

THE MINISTRY OF SCIENCE AND HIGH EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
NORTHERN WATER PROBLEMS INSTITUTE OF THE KARELIAN RESEARCH CENTRE
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
THE INSTITUTE OF LYMNOLOGY OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN
RESEARCH INSTITUTE FOR PROBLEMS OF ECOLOGY AND MINERAL WEALTH USE
OF TATARSTAN ACADEMY OF SCIENCES
THE MINISTRY OF ECOLOGY AND NATURAL RESOURCES OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN
STATE COMMITTEE OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN ON BIOLOGICAL RESOURCES
INSTITUTE FOR URBAN DEVELOPMENT OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN
VOLGA-KAMA STATE NATURAL BIOSPHERE RESERVE
BRANCH OF THE RUSSIAN GEOGRAPHICAL SOCIETY IN THE REPUBLIC OF TATARSTAN
UNESCO CHAIR «APPLICATION OF THE FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF THE EARTH CHARTER
TO CREATE A SUSTAINABLE COMMUNITY»

LAKES OF EURASIA: PROBLEMS AND SOLUTIONS

PROCEEDING
III INTERNATIONAL CONFERENCE
Kazan, May 20 – 23, 2025

KAZAN
2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ СЕВЕРА КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН
АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЭКОЛОГИИ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ АН РТ
МИНИСТЕРСТВО ЭКОЛОГИИ И ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН ПО БИОЛОГИЧЕСКИМ РЕСУРСАМ
ИНСТИТУТ РАЗВИТИЯ ГОРОДОВ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
ВОЛЖСКО-КАМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПРИРОДНЫЙ БИОСФЕРНЫЙ ЗАПОВЕДНИК
ОТДЕЛЕНИЕ РУССКОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА В РЕСПУБЛИКЕ ТАТАРСТАН
КАФЕДРА ЮНЕСКО «РАЗВИТИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПРИНЦИПОВ ХАРТИИ ЗЕМЛИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ УСТОЙЧИВОГО СООБЩЕСТВА»

ОЗЕРА ЕВРАЗИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

МАТЕРИАЛЫ
III МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
г. Казань, 20 – 23 мая 2025 г.

КАЗАНЬ
2025

УДК 556.55(4/5)(063)
ББК 26.222.6
О-46

Редакционная коллегия
Р.Р. Шагидуллин, Н.Н. Филатов, Д.В. Иванов

Рецензенты:
Академик РАН, доктор географических наук,
советник директора по научной работе, главный научный сотрудник
Санкт-Петербургского научного центра РАН
В.А. Румянцев,
Член-корреспондент АН РТ, доктор химических наук,
профессор Казанского (Приволжского) федерального университета
В.З. Латыпова

Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы III международной конференции (г. Казань, 20–23 мая 2025 г.). Казань: Издательство Академии наук РТ, 2025. 991 с.

ISBN 978-5-9690-1336-0

В книге представлены результаты теоретических исследований, практического использования, охраны и управления ресурсами озер Евразии. Рассмотрены Великие озера Евразии: Байкал, Ладожское, Онежское, Телецкое, Чаны и разнообразные озера Арктики и субарктики, бореальной и аридной зон. Основной акцент при организации конференции и подготовке сборника был сделан на то, чтобы рассмотреть наиболее актуальные вопросы лимнологии и возможные пути решения теоретических и практических проблем озер на обширной территории Евразии с учетом необходимости развития тесного международного сотрудничества. Важной задачей конференции является консолидация ученых разных стран Евразии, БРИКСа для получения новых научных знаний, объединение усилий для решения практических проблем трансграничных озерно-речных систем, обоснования возможного перераспределения водных ресурсов, обоснование рационального использования и охраны озер Евразии.

This volume of collected papers was compiled of the proceedings of the III International Conference «Lakes of Eurasia: Problems and Solutions», Kazan, 20-23.05.2025. The volume presents the results of theoretical studies, practical use, conservation and resource management of various lakes of Eurasia. Great Eurasian lakes (Baikal, Ladoga, Onego, Teletskoye, Chany) and diverse lakes of the arctic and subarctic regions, the boreal and arid zones are considered. The key idea in organizing the conference and preparing these proceedings was to address the most pressing issues of limnology and offer potential solutions for theoretical and practical problems of lakes in the vast territory of Eurasia, keeping in mind the need for close international cooperation. An important mission for the 1st conference is to consolidate the efforts of scientists from different Eurasian and BRICS countries in obtaining new knowledge and handling the real problems of transboundary lake-river systems, substantiating possible redistributions of water resources, sustainable management and conservation of Eurasian lakes.

УДК 556.55(4/5)(063)
ББК 26.222.6

ISBN 978-5-9690-1336-0

© Институт проблем экологии и
недропользования АН РТ, 2025
© Изд-во АН РТ, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ ОЗЕР ЕВРАЗИИ 25

З.Б. Акмалова, Н.М. Мингазова, И.С. Шигапов, Э.Г. Набеева, А.Ю. Леушин, В.И. Галеева
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И УГРОЗЫ ДЛЯ ОЗЕР В СВЯЗИ СО СТРОИТЕЛЬСТВОМ ВБЛИЗИ ВОЛЖСКО-КАМСКОГО ЗАПОВЕДНИКА 25

И.В. Башинский, В.В. Осипов
ИССЛЕДОВАНИЯ СКОПЛЕНИЙ ПОЙМЕННЫХ ВОДОЕМОВ – ОСОБЕННОСТИ ПОДХОДА И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 29

Л.С. Визер, Д.Л. Сукнев
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАЛЫХ ОЗЕР ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ.... 34

М.Я.Войтехов
К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ РАЗМЕРА ВНУТРИБОЛОТНЫХ ОЗЁР (ОЗЕРКОВ) И СВЯЗАННОГО С НИМ НАЛИЧИЯ/ОТСУТСТВИЯ ВОЛНОВОГО РЕЖИМА НА ЦИКЛЫ ЭЛЕМЕНТОВ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ 39

Е.М. Волкова
РАЗНООБРАЗИЕ ПОДХОДОВ К ИЗУЧЕНИЮ БОЛОТ СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ 43

В.С. Вуглинский, В.А. Сушкова
МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К КОРРЕКТИРОВКЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ПО УРОВНЮ ВОДЫ ОЗЕР (НА ПРИМЕРЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ РОССИИ)..... 48

О.В. Галанина, М.Е. Леготин, П.А. Черненко
ФОРМИРОВАНИЕ МАЛЫХ БОЛОТ В УСЛОВИЯХ ДАРВИНСКОГО ЗАПОВЕДНИКА (ВОЛОГОДСКАЯ ОБЛАСТЬ) 53

Д.А.Ганюшкин
РАЗВИТИЕ ОЗЕР В ВЫСОКОГОРЬЕ ГОРНОГО МАССИВА ТАВАН-БОГДО-ОЛА (АЛТАЙ) ОБСЛОВЛЕННОЕ ДИНАМИКОЙ ЛЕДНИКОВ..... 57

А.Т. Горшкова, В.П. Горбунова, Р.А. Рыков, Н.В. Бортникова, Д.А. Семанов
ГИДРОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЗЁР ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН 61

Н.А. Демиденко, А.С. Саввичев
МОРСКИЕ ВОДОЕМЫ СЕВЕРА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ, ОТДЕЛЕННЫЕ ОТ МОРЕЙ ФИЛЬТРУЮЩЕЙ ДАМБОЙ..... 67

Д.С. Дудакова, В.М. Анохин
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАНДШАФТНОГО ПОДХОДА И СОВРЕМЕННЫХ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ В МОНИТОРИНГЕ СОСТОЯНИЯ КРУПНЫХ ОЗЕР НА ПРИМЕРЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА 72

О.Н. Ерина, С.И. Полухин, Д.И. Соколов
ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПРОДУКТИВНОСТИ ВОДОЕМОВ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО МОНИТОРИНГА СОДЕРЖАНИЯ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА 76

Н.Е. Зарецкая, С.В. Копытов, Е.Г. Лаптева, П.Ю. Санников, С.С. Трофимова, Е.А. Новикова, Е.А. Мехоношина, А.А. Самаркина
МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЗЁРНО-БОЛОТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРНОГО ПРИКАМЬЯ В КОНКТЕСТЕ ИХ ГЕНЕЗИСА И ВОЗРАСТА 80

Н.А. Зеленкевич, Е.В. Мойсейчик, Д.Г. Груммо
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ТУРИЗМА НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКАНСКОГО ЗАКАЗНИКА «СМЫЧОК» (БЕЛАРУСЬ) 82

И.И. Зиганшин, Д.В. Иванов, И.М. Сафин
МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТЧЛЕНЕННЫХ ЗАЛИВОВ ТЕТЮШСКОГО ПЛЕСА КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА 87

Н.В. Зуева, Е.Д. Дрюкова, А.М. Губина, Ю.А. Зуев, Н.А. Лис, М.И. Болотов, О.Г. Грушуткин, Е.Ю. Воякина
ЛИМНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ МАЛЫХ АРКТИЧЕСКИХ ОЗЕР ОСТРОВОВ БАРЕНЦЕВА МОРЯ (ПО ЭКСПЕДИЦИОННЫМ ДАННЫМ 2024 г.) 92

А.В. Исаев, В.А. Рябченко
МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКОСИСТЕМЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА В ПЕРИОД С 1980 ПО 2020 ГОДЫ 96

С.А. Кондратьев, С.Д. Голосов, И.С. Зверев, А.М. Расулова
ОЦЕНКА АБИОТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕИЗУЧЕННЫХ МАЛЫХ И СРЕДНИХ ОЗЕР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ 100

О.Л. Кузнецов
РАЗНООБРАЗИЕ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ В СОСТАВЕ ВОДНО-БОЛОТНЫХ УГОДИЙ РОССИИ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ 105

Е.В. Кузнецова, С.В. Тархов
ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОЗЕРА КАМЕННОГО И МЕРЫ ПО ЕГО ОХРАНЕ В ЗАПОВЕДНИКЕ «КОСТОМУКШСКИЙ» 108

Е.А. Лабунская, Ю.Г. Соколовская, В.И. Лобышев, С.В. Пацаева,Д.А. Воронов, Е.Д. Краснова
ВЛИЯНИЕ БРАУНИФИКАЦИИ НА ПОДВОДНЫЙ СВЕТОВОЙ КЛИМАТ И СОСТАВ ФОТОТРОФОВ В СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ВОДОЕМАХ, ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ОТ БЕЛОГО МОРЯ 112

Н.Г. Максимович, О.Ю. Мещерякова
ОЗЕРА В РАЙОНАХ РАЗВИТИЯ СУЛЬФАТНОГО КАРСТА ПЕРМСКОГО КРАЯ..... 117

Я.С. Маланов
ЛЕСНЫЕ ОЗЁРА ПОСТРАДАВШИЕ ВО ВРЕМЯ КРУПНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ 1972, 2010, 2021 ГОДОВ В РЕСПУБЛИКЕ МАРИЙ ЭЛ 122

С.В. Маланов
ОЗЕРА МАРИЙ ЭЛ: ПОСТРОЕНИЕ КАТАЛОГА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ 126

Ю.И. Мельников
СОВРЕМЕННОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ КЛИМАТА И ДИНАМИКА ВИДОВОЙ СТРУКТУРЫ ПТИЦ АКВАТОРИИ И ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ ОЗЕРА БАЙКАЛ..... 134

Н.М. Мингазова, Э.Г. Набеева
КОНЦЕПЦИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И МЕТОДОЛОГИЯЭКОРЕАБИЛИТАЦИИ ТРАНСФОРМИРОВАННЫХ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ..... 139

А.С. Миронов, А.А. Саенко
РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЭКОСИСТЕМЫ ВОДНОГО ОБЪЕКТА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ 144

Г.Р. Нигаматзянова, А.А. Андреев, Х.-Ч. Ли, В.Д. Страховенко, Л.А. Фролова
РЕКОНСТРУКЦИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 1700 ЛЕТ НА ОСНОВЕ ПАЛИНОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗ. ЗОЛОТОЕ..... 149

Г.Р. Нигаматзянова, Н.М. Нигматуллин, И.В. Федорова,Х.-Ч. Ли, Л.А. Фролова
ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ БИОРАЗНООБРАЗИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ЮГА П-ОВА ЯМАЛ В ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ..... 151

Л.Г. Никонова, Ю.В. Зубарева
РАЗЛОЖЕНИЕ ОПАДА РАСТЕНИЙ ОЛИГОТРОФНЫХ БОЛОТ В МОДЕЛИРУЕМЫХ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ НА НАЧАЛЬНЫХ ЭТАПАХ ДЕСТРУКЦИИ..... 154

Н.А. Новик
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР ЗАПАДНОЙ ПЕРИФЕРИИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ 158

О.А. Новожилов, А.В. Алдушин, Ю.К. Алдушина
ПЕРСПЕКТИВЫ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОЗЕРА ВИШТЫНЕЦКОГО В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ СТАТУСА ПРИРОДНОГО ПАРКА «ВИШТЫНЕЦКИЙ» С РЕГИОНАЛЬНОГО НА ФЕДЕРАЛЬНЫЙ..... 162

I.Sh. Normatov, G.N. Saburova, N. Shermatov, A.O. Rahimzoda, M. Kh. Khakimjonzoda
RESERVOIR - ARTIFICIAL LAKE AS A DISTURBING FACTOR IN CHANGING THE MICROCLIMATE OF COASTAL AREAS..... 167

М.Б. Носова, Н.Г. Лавренов, Д.А. Куприянов, Н.Г. Мазей, Е.А. Зеленин
МАЛОЕ БОЛОТО КОСИЛОВО В КРАЕВОЙ ЗОНЕ ВАЛДАЙСКОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ: ЛАНДШАФТНЫЕ, КЛИМАТИЧЕСКИЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ 173

Н.А. Панютин, В.В. Дмитриев, М.М. Щетинина
ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СТАТУС ВОДОЕМА: МЕТОДИКА, ОЦЕНКА, ПЕРСПЕКТИВЫ 178

В.Е. Пименов, М.М. Певзнер, Н.Г. Мазей, А.Н. Цыганов,Ю.А. Мазей, Е.Г. Ершова
ВЛИЯНИЕ ПЕПЛОПАДОВ НА РАЗВИТИЕ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ В СРЕДНЕМ И ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ НА ПРИМЕРЕ МАЛОГО БОЛОТА КУМРОЧ (СЕВЕРО-ВОСТОЧНАЯ КАМЧАТКА) 183

Т.В. Рогова, О.В. Бакин, Г.А. Шайхутдинова, П.В. Хомяков
УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЕ ЛИМНОГЕННЫХ СФАГНОВЫХ БОЛОТ НА ТЕРРАСАХ ДОЛИНЫ ВОЛГИ 185

К.В. Ромашова, Р.А. Чернов
ИНВЕНТАРИЗАЦИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР ШПИЦБЕРГЕНА 190

А.Ю. Санин
К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ РЕКРЕАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ОЗЕР 194

В.Н. Синюкович
ПРОБЛЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ОЗЕРА БАЙКАЛ 199

В.А. Смагин
СОВРЕМЕННОЕ ЗАБОЛАЧИВАНИЕ МАЛЫХ ОЗЕР: СУКЦЕССИИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ, ИХ НАПРАВЛЕННОСТЬ И СКОРОСТЬ 203

А.Н. Строганов, Н.Н. Луговой, Е.В. Пономарева
МОРСКИЕ МЕРОМИКТИЧЕСКИЕ ОЗЕРА: ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ .. 207

Н.Ю. Суховило
ВЛИЯНИЕ РЕКРЕАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ НА ЗАРАСТАНИЕ ОЗЕРА БЕЛОЕ (ЛУНИНЕЦКИЙ РАЙОН БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ) 211

Д.А. Тихонова, В.В. Дмитриев
МИКРОПЛАСТИК В ЭКОСИСТЕМЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА: ОТ НАБЛЮДЕНИЙ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ МАССООБМЕНА И ТРАНСФОРМАЦИИ ВЕЩЕСТВА В ВОДНОЙ ЭКОСИСТЕМЕ 216

R.R. Khasanov, I.I. Ziganshin, D.V. Ivanov, A.B. Alexandrova, V.S. Valiev
THE INFLUENCE OF ABIOTIC FACTORS ON OVERGROWTH OF LAKES IN THE PROTECTIVE ZONE OF THE SARALINSKY SECTION OF THE VOLGA-KAMA NATURE RESERVE 221

Н.Н. Цветкова, О.В. Казимирченко
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРНО-РЕЧНЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ (НА ПРИМЕРЕ РЕКА СВЕТЛОГОРКА – ОЗЕРО ТИХОЕ, Г. СВЕТЛОГОРСК, КАЛИНИНГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ) 225

Н.А. Цупикова, В.В. Моисеенко, Е.А. Севостьянова
АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРУДА ПЕЛАВСКОГО (Г. КАЛИНИНГРАД) ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ

ПО БЛАГОУСТРОЙСТВУ 230

Е.А. Чекмарева, С.Д. Сорокин
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БОЛЬШОГО ЛИМАНА (ВОЛГОГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ)..... 234

А.Д. Чулей, Н.Г. Мазей, А.Н. Цыганов, Ю.А. Мазей
ФОРМИРОВАНИЕ И ДИНАМИКА ВОДНО-БОЛОТНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ В СЕВЕРНОЙ ПОДЗОНЕ ТАЙГИ (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ) В ГОЛОЦЕНЕ ПО ДАННЫМ КОМПЛЕКСНОЙ ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ 239

Р.Р. Шагидуллин, Д.В. Иванов, И.И. Зиганшин, А.Т. Горшкова, Р.П. Токинова
ОЗЕРА РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ ИХ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ..... 244

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОЗЕРАХ 247

И.А. Асламов, Р.Ю. Гнатовский, М.М. Макаров, И.Н. Тюрнев, В.В. Блинов
КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ И ТЕРМОБАРИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ГИПОЛИМНИОНА ОЗЕРА БАЙКАЛ ПРИ ЛЕТНЕЙ СТРАТИФИКАЦИИ..... 247

И.А. Асламов, К.М. Кучер, М.М. Макаров
АВТОНОМНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ 252

А.А. Батмазова, Е.В. Гайдукова
МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВЕННОГО РЕЖИМА ОЗ. КУЭТСЪЯРВИ, ВХОДЯЩЕГО В ТРАНСГРАНИЧНУЮ ОЗЕРНО-РЕЧНУЮ СИСТЕМУ 257

С.Р. Богданов, Н.И. Пальшин, Т.В. Ефремова, Г.Э. Здоровеннова, Р.Э. Здоровеннов, Ю.С. Новикова
ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ МАЛОГО ОЗЕРА; ЭФФЕКТЫ ТЕПЛОВОЙ ИНЕРЦИИ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВОЛНЫ 261

А.И. Второва, Н.В. Мякишева
СОВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВОДНОГО БАЛАНСА ОЗЕРА СМОЛИНО 266

Д.В. Зацаринная
ОСОБЕННОСТИ ГОДОВОГО ХОДА ТЕМПЕРАТУР ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ СПЛАВИННЫХ КАРСТОВО-СУФФЗИОННЫХ БОЛОТ 271

G.E. Zdorovennova, R.E. Zdorovennov, Iu.S. Novikova, N.I. Palshin, T.V. Efremova, S.I. Smirnov, S.R. Bogdanov
VARIABILITY OF THE THERMAL AND ICE REGIMES IN THE PETROZAVODSK BAY OF LAKE ONEGA BASED ON MEASUREMENT DATA AT AN AUTONOMOUS STATION 275

А.В. Зимин, О.А. Атаджанова, А.А. Коник
ЭЛЕКТРОННЫЙ АТЛАС МАЛЫХ ВИХРЕЙ И ПОЛОЖЕНИЙ ТЕРМОБАРА В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ 280

А.Т. Зиновьев, А.В. Дьяченко, К.Б. Кошелев
ИЗМЕРЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО, ЛЕДОВОГО И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМОВ ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ 284

Д.Ю. Кучиев, А.А. Смирновский, С.И. Смирнов
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ АСПЕКТОВ ТУРБУЛЕНТНОЙ ПОДЛЁДНОЙ КОНВЕКЦИИ В ОЗЁРАХ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ С ОБЪЁМНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА 287

Н.В. Мякишева, Е.В. Голованъ, Д.А. Орлов
УРОВЕННЫЙ РЕЖИМ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ 292

М.А. Науменко, В.В. Гузиватый
ОСОБЕННОСТИ ГОДОВОГО ХОДА ПРИДОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫВ РАЗЛИЧНЫХ РАЙОНАХ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА 298

М.А. Науменко
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА: РЕЗУЛЬТАТЫ И ПРОБЛЕМЫ 301

Ю.С. Новикова, Г.Э. Здоровеннова, С.И. Смирнов,С.Р. Богданов, Р.Э. Здоровеннов
СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ, УСТОЙЧИВОСТИ ВОДНОЙ ТОЛЩИ И КОЭФФИЦИЕНТА ГАЗОПЕРЕНОСА В НЕБОЛЬШОМ ЛЕСНОМ ОЗЕРЕ КАРЕЛИИ ПО ДАННЫМ 2024 ГОДА 305

Г.В. Пряхина, Е.С. Зелепукина
РАСЧЕТ СУТОЧНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ ПЕРИГЛЯЦИАЛЬНЫХ ОЗЕР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ 310

М.А. Терешина, О.Н. Ерина, Д.И. Соколов
ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОЗЕР МОСКВЫ И МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА 314

А.В. Толстиков, И.В. Серых
ИЗМЕНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ НА ВОДОСБОРЕ БЕЛОГО МОРЯ: РАСЧЕТ ПО МОДЕЛЯМ CMIP6 317

Е.С. Троицкая, Н.М. Буднев, М.Н. Шимараев
ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЯ ВОДНОЙ ТОЛЩИ В ПРИСКЛОНОВОЙ ОБЛАСТИ ЮЖНОГО БАЙКАЛА В 2000-2024 ГОДЫ 321

Wenfeng Huang, Zhijun Li, Wen Zhao
PHYSICAL CONDITIONS AFFECTING UNDER-ICE CHLOROPHYLL-A VARIATIONS IN A SHALLOW ARID-REGION LAKE 326

Е.М. Шумакова, М.Д. Трубецкова
ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ В СРЕДНЕМ ТЕЧЕНИИ ВОЛГИ И ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК 331

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЗЕР. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДЫ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ 336

А.Б. Александрова, Д.В. Иванов, И.И. Зиганшин, В.С. Валиев, Р.Р. Хасанов, В.В. Маланин, А.А. Марасов, О.М. Солодникова
ЛАТЕРАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ ВОДОСБОРНОЙ ТЕРРИТОРИИИ И ОЗЕРНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ В УСЛОВИЯХ АДАПТИВНО-ЛАНДШАФТНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ 336

В.М. Анохин, Д.С. Дудакова
ХАРАКТЕР РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА 340

К.С. Антясова, Е.А. Шорникова
МАТЕРИАЛЫ К ЭКОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОЗЕР СРЕДНЕГО ПРИОБЬЯ В ГРАНИЦАХ ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА 344

Н.А. Белкина
ПРОЦЕССЫ НАКОПЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР КАРЕЛИИ В УСЛОВИЯХ ОРГАНИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ 348

Н.Н. Бозорова, А.О. Муминов, И.Ш. Норматов, М. Ашуров
ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ РЕКИ СЫРДАРЬЯ И ВОЗМОЖНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ИХ В КАЙРАККУМСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ 352

Г.С. Бородулина, Г.А. Изотов
ПОСТУПЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОДЗЕМНЫМ СТОКОМ В ОНЕЖСКОЕ ОЗЕРО 356

А.А. Бызаакай, А.О. Ховалыг, Т.В. Раудина, О.С. Покровский, С.Н. Кирпотин
БИОГЕОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОЗЕРНЫХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА РЕСПУБЛИКИ ТЫВА 361

Е.А. Вахрамеева, Т.А.Жибарева
РОЛЬ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПРИ ПОСТУПЛЕНИИ ЖЕЛЕЗА В ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА 364

М.Г. Гречушникова, В.А. Ломов, В.С. Казанцев
ОЦЕНКА ЭМИССИИ МЕТАНА С ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ПО ДАННЫМ СЪЕМОК 368

И.Л. Григорьева, В.В. Кузовлев, Е.А. Чекмарева
МЕЖГОДОВАЯ И ВНУТРИГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ВОДЫ ОЗЕР СТЕРЖ И СЕЛИГЕР (БАССЕЙН ВЕРХНЕЙ ВОЛГИ) 373

Е.С. Гришанцева, Л.П. Федорова, М.Л. Григорьева, И.Ю. Николаева, М.Е.Тарнопольская
БИОАККУМУЛЯЦИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МОЛЛЮСКАМИ DREISSENA POLYMORPHA В ИВАНЬКОВСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ 377

В.А. Даувальтер, П.Н. Адамская, Ю.М. Банникова, З.И. Слуковский, И.Р. Елизарова
ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ФОНОВОГО РАЙОНА МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ (НА ПРИМЕРЕ ОСТРОВА КИЛЬДИН) 381

Ю.П. Демаков, А.В. Исаев
ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА КОШЕЕР И ТОРФА ЕГО СПЛАВИНЫ 386

В.В. Законнов, А.В. Законнова
ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОЗЕР И ВОДОХРАНИЛИЩ..... 391

Д.В. Катенович, М.О. Осипова, С.Л. Лузянин
ОЦЕНКА СБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ 395

В.А. Кирьянова, Е.В. Линкевич, Е.Н. Гуляева, А.Ю. Родин
МОНИТОРИНГ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БОЛОТНЫХ ВОД (НА ПРИМЕРЕ БОЛОТ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ) 399

Н.М. Кокрятская, Г.Н. Лосюк, С.С. Попов, К.В. Титова
ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЗЕР БОЛЬШИЕ И МАЛЫЕ ХРУСЛОМЕНЫ
(ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИИ 2024 ГОДА) 403

В.Н. Колотыгина, Е.А. Солдатова
ЦИКЛ УГЛЕРОДА В СИСТЕМЕ ВОДА-АТМОСФЕРА ЗАРАСТАЮЩЕЙ ЛИТОРАЛИ ЭВТРОФНОГО ОЗЕРА КУЧАК (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ) 407

Е.С. Колпакова, А.В. Вельямидова
ХЛОРОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В ДОННЫХ ОСАДКАХ МАЛЫХ ОЗЕРКАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ 413

Т.А. Королева, Е.С. Колпакова, Р.Д. Коробицына
ГАЛОГЕНОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ НА ТЕРРИТОРИИ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ 416

М.В. Косова, Е.Н. Унковская, О.Ю. Деревенская, Н.В. Шурмина,Ф.М. Мухаметзянова, Ю.А. Игнатьев, В.В. Маланин, В.С. Валиев
ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ И ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЗЕРА РАЙФСКОЕ ВОЛЖСКО-КАМСКОГО ЗАПОВЕДНИКА 419

Д.А. Коцур
СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ БИОТЕСТИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА СТОЧНЫХ ВОД И ЭКСТРАКТОВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ЭМБРИОНОВ РЫБ DANIORERIO 424

М.И. Ксенофонтова
КАЧЕСТВО ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР БАССЕЙНА Р. ВИЛЮЙ 429

Д.Г. Курашев, Р.М. Манасыпов
ХАРАКТЕРИСТИКА РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ПОРОВЫХ ВОД ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР ПРЕРЫВИСТОЙ ЗОНЫ МЕРЗЛОТЫ 433

Г.А. Леонова, А.Е. Мальцев, Л.В. Мирошниченко, С.К. Кривоногов
ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ГИПЕРГАЛИННОГО ОЗЕРА МАЛОЕ ЯРОВОЕ В ГОЛОЦЕНЕ (КУЛУНДИНСКАЯ РАВНИНА, АЛТАЙСКИЙ КРАЙ) 438

Г.Н. Лосюк, Н.М. Кокрятская, С.С. Попов
СОЕДИНЕНИЯ ВОССТАНОВЛЕННОЙ СЕРЫ В ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ВОДОЕМАХ БЕЛОГО МОРЯ 443

А.Е. Мальцев, Г.А. Леонова, Л.В. Мирошниченко, С.К. Кривоногов
ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ УСЛОВИЙ СЕДИМЕНТОГЕНЕЗА ГИПЕРГАЛИННОГО ОЗЕРА БОЛЬШОЕ ЯРОВОЕ КАК ОТРАЖЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФЛУКТУАЦИЙ ГОЛОЦЕНА СТЕПНОЙ ЗОНЫ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (КУЛУНДИНСКАЯ РАВНИНА) 446

Е.А. Минакова, А.П. Шлычков, С.А. Кондратьев, В.З. Латыпова
ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВНЕШНЕЙ БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА КУЙБЫШЕВСКОЕ И НИЖНЕКАМСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩА В ГРАНИЦАХ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН 451

С.Ю. Неронова
ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДЫ ПОСОЛЬСКОГО СОРА ОЗ. БАЙКАЛ 455

О.В. Никитин, Н.Ю. Степанова, Р.С. Кузьмин, В.З. Латыпова
ОЦЕНКА ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ОТ КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ G-RES 459

В.С. Новиков, А.В. Дарьин
МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАЛЕОРЕКОНСТРУКЦИЙ ВЫСОКОГО ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА ОСНОВАНИЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ОЗЕРНЫХ ОСАДКОВ 464

Е.А. Одинцова, Ы. Сабыров, А.А. Плотникова, В.А. Вишневская, Т.А. Ловдина, В.А. Рудакова
МОНИТОРИНГ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ВОДОЕМЫ ПОСЕЛЕНИЯ СОЛОВЕЦКОЕ 468

Д.В. Иванов, Е.В. Осмелкин, И.И. Зиганшин
ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОЗЕР ОХРАННОЙ ЗОНЫ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА «ПРИСУРСКИЙ» В

ЗИМНИЙ ПЕРИОД 473

В.И. Полетаева, М.В. Пастухов, Е.А. Цветкова
ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БРАТСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В РАЗНЫЕ ПО АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКЕ ПЕРИОДЫ 475

В.И. Полетаева, Г.Б. Хомматлиев, М.В. Пастухов
ПОИСК РЕГИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ КАЧЕСТВА ДЛЯ ВОД АНГАРСКОЙ СИСТЕМЫ 480

М.С. Потахин, Н.А. Белкина, М.С. Богданова, Е.В. Гатальская,И.В. Морозова, Н.А. Мясникова, А.В. Орлов, А.В. Пронина
ОСОБЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА ЧУДЕСНАЯ ЛАМБА (ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАПОВЕДНИК «КИВАЧ») 484

С.Д. Прасолов, С.А. Забелина, С.И. Климов
СУТОЧНАЯ ДИНАМИКА ПОТОКОВ CH4 И CO2 С ПОВЕРХНОСТИ МЕЛКОВОДНЫХ ГУМИНОВЫХ ОЗЕР ТАЕЖНОЙ ЗОНЫ 487

А.В. Пронина, Н.А. Белкина
УГЛЕРОД В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР КАРЕЛО-КОЛЬСКОГО РЕГИОНА ... 490

Т.В. Реутова, Ф.Р. Дреева, Н.В. Реутова
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГОРНЫХ ОЗЕР ЦЕНТРАЛЬНОГО СЕГМЕНТА СЕВЕРНОГО КАВКАЗА 495

З.И. Слуковский, В.А. Даувальтер
ГЕОХИМИЯ СОВРЕМЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ: ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ (ГЕОЛОГИЧЕСКИХ) ФАКТОРОВ, УРБАНИЗАЦИИ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ 500

Д.И. Соколов, О.Н. Ерина, М.А. Терешина
СОВРЕМЕННЫЙ РЕЖИМ ПРИТОКА БИОГЕННЫХ И ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В МОЖАЙСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ 504

Ю.Г. Соколовская, Е.Д. Краснова, Д.А. Воронов, С.В. Пацаева
ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В МЕРОМИКТИЧЕСКИХ ВОДОЕМАХ БЕЛОГО МОРЯ 509

В.Д. Страховенко, Д.А. Субетто, А.Е. Рыбалко, В.И. Малов,Н.А. Белкина, М.С. Потахин
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИНЕРАЛЬНО-ГЕОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В НЕПРЕРЫВНОМ КЕРНЕ ИЗ ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЫ (ПОЗДНИЙ НЕОПЛЕЙСТОЦЕН - ГОЛОЦЕН) 514

Т.П. Трофимова
ЭКОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОЗЁР САЛТАНЫ НЮРБИНСКОГО УЛУСА РС(Я) 518

Ю.А. Тунакова, С.В. Новикова, Е.В. Байбакова
ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ ОЗЕР ПРИКАЗАНСКОГО РАЙОНА МЕТОДОМ НЕЙРОСЕТЕВОГО КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА 523

И.Д. Ульзетуева, Е.Ж. Гармаев, Г.С. Ширапова,А.А. Аюржанаев, Б.В. Содномов
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСТУПЛЕНИЯ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ С ДИФФУЗНЫМ СТОКОМ Р. СЕЛЕНГА В ОЗ. БАЙКАЛ 528

Н.Л. Фролова, М.Г. Гречушникова, И.А. Репина, В.М. Степаненко
ЭМИССИЯ МЕТАНА ИЗ ВОДОХРАНИЛИЩ РОССИИ: ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 531

Ю.А. Харанжевская
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА И МИГРАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В СИСТЕМЕ ВАСЮГАНСКОЕ БОЛОТО-РЕКА В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ 536

А.А. Цхай, М.А. Романов, В.А. Куприянов
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛОВ ТРАНСФОРМАЦИИ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ И ИХ АССИМИЛЯЦИИ В ЭКОСИСТЕМЕ ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА 538

Е.П. Чебыкин, Н.Н. Куликова, Е.В. Лихошвай, А.Н. Сутурин
ГЕОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ НА ПРИМЕРЕ ОЗ. БАЙКАЛ 543

Г.М. Чуйко, А.Н. Шаров
Стойкие органические соединения (СОЗ) В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ЮЖНОЙ ЧАСТИ ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ: ИСТОЧНИКИ И ПУТИ ПОСТУПЛЕНИЯ..... 548

А.Г. Шарифуллин, А.В. Гусаров, Д.В. Иванов
ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ БОБРОВЫХ ПРУДОВ В МАЛЫХ РЕКАХ СЕВЕРА ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ 553

Т.С. Шелехова, Н.Б. Лаврова
ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ОНЕЖСКО-ЛАДОЖСКОГО ПЕРЕШЕЙКА (ПО МИКРОПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ДОННЫХ ОСАДКОВ ОЗЕРА НИЖНЕЕ БАТЫКОЗЕРО)..... 555

ЭКОСИСТЕМЫ ОЗЕР. ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 561

К.И. Абрамова, Р.П. Токинова, Н.В. Шурмина
ANABAENOPSIS CF. ARNOLDII – ВОЗБУДИТЕЛЬ «ЦВЕТЕНИЯ ВОДЫ» В МЕЛКОВОДНОМ ГОРОДСКОМ ВОДОЕМЕ 561

Д.Ф. Аверьянов, С.П. Монахов, Ю.А. Лукьянова
CARASSIUSGIBELIO (BLOCH, 1782) – КАК ОБЪЕКТ ЛЮБИТЕЛЬСКОГО РЫБОЛОВСТВА В ПОЙМЕННЫХ ОЗЕРАХ ЕЛАБУЖСКИХ ЛУГОВ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «НИЖНЯЯ КАМА»..... 565

Д.Г. Алешина, Т.А. Петрова, М.С. Трифонова
ЗООПЛАНКТОН И ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРНО-РЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ВУОКСЫ..... 569

А.Ю. Асанов
ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОЗЕРА ЗАТОН В ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ БИОРЕСУРСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ 574

А.О. Аськеев, О.В. Аськеев, И.В. Аськеев, С.П. Монахов, Н.М. Яныбаев
НАСЕЛЕНИЕ РЫБ МАЛЫХ ОЗЕР РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН 578

Е.Ю. Афонина, Н.А. Ташлыкова
РАЗНООБРАЗИЕ И СТРУКТУРА ПЛАНКТОННЫХ СООБЩЕСТВ (ФИТО- И ЗООПЛАНКТОН) ТРАНСГРАНИЧНЫХ РЕК (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ)..... 583

И.А. Барышев
ОСОБЕННОСТИ МАКРОЗООБЕНТОСА РЕК ЮЖНОЙ ЧАСТИ ОНЕЖСКО-ЛАДОЖСКОГО ВОДОРАЗДЕЛА В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ 587

Е.А. Беляков, Э.В. Гарин
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О СОВРЕМЕННОМ СОСТОЯНИИ ФЛОРЫ МАКРОФИТОВ МАЛЫХ ОЗЁР ЯРОСЛАВСКОЙ ОБЛАСТИ 592

Н.А. Березина, А.Н. Шаров, А.А. Максимов
ДИНАМИКА ПИЩЕВЫХ ЦЕПЕЙ В СВЕТЛОВОДНОМ И ТЕМНОВОДНОМ СУБАРКТИЧЕСКИХ ОЗЕРАХ В ЗИМНИЙ И РАННЕВЕСЕННИЙ ПЕРИОДЫ 596

Н.Л. Болотова, О.Г. Лопичева, И.А. Мухин, С.Ю. Арашин
К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЦЕЛЯХ АКВАКУЛЬТУРЫ МАЛЫХ ОЗЕР СРЕДНЕТАЕЖНЫХ ЛАНДШАФТОВ ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ 600

Н.А. Бондаренко, Н.Г. Шевелёва, О.Г.Пенькова
ОЗЕРА БАЙКАЛ В ПОДЛЁДНЫЙ ПЕРИОД..... 605
Е.В. Борвинская, М.А. Пасивкина, А.А. Воробьева, И.В. Суховская,С. Курпе,

Е.В. Борвинская, М.А. Пасивкина, А.А. Воробьева, И.В. Суховская, С. Курпе, Э.Р. Зулькарнеев
МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПРЕОДОЛЕНИЯ ИММУННОЙ ЗАЩИТЫ ХОЗЯИНА КАК ФАКТОР ИНВАЗИВНОГО УСПЕХА ООМИЦЕТ SAPROLEGNIA PARASITICA В ОЗЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ..... 610

С.В. Быкова
ИНФУЗОРИИ ВОДОЕМОВ РАИФСКОГО УЧАСТКАВОЛЖСКО-КАМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА В 2019, 2022 ГГ. 614

Е.Д. Васильева, Б.А. Лёвин
К ПРОБЛЕМЕ СОХРАНЕНИЯ ИХТИОФАУНЫ КАСПИЙСКОГО МОРЯ – САМОГО КРУПНОГО БЕССТОЧНОГО ОЗЕРА ЗЕМЛИ 620

К.П.Верещагина, С.С. Седова, Е.С. Кондратьева, Ж.М. Шатилина,Е.Б. Индосова, М.А. Тимофеев
ВОЛНЫ ТЕПЛА НА БАЙКАЛЕ: ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ВЛИЯНИЯ ВОЛН ТЕПЛА НА ВЫЖИВАЕМОСТЬ И ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТАБОЛИЗМА МАССОВЫХ ВИДОВ АМФИПОД ЛИТОРАЛИ ОЗЕРА 624

С.Д. Ветлужских, Л.А. Фролова, Г.Р. Нигаматзянова
ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ CLADOCERA В ТАФОЦЕНОЗЕ ОЗЕРАБ. ЧЕРЛИВОЕ (СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ) 629

С.И. Вокуева, Д.Б. Денисов, З.И. Слуковский
ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРОДСКОГО ОЗЕРА СЕВЕРНОЕ (Г. МУРМАНСК, РОССИЯ) ПО ДИАТОМОВЫМ КОМПЛЕКСАМ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ 633

Е.Ю. Воякина
ФИТОПЛАНКТОН МАЛЫХ ОЗЕР ВАЛААМСКОГО АРХИПЕЛАГА 636

Д.Е. Гаврилко, В.С. Жихарев, Т.В. Золотарева, В.А. Бубнов, А.Ю. Сарапкин
РОЛЬ ВИДОВ-ВСЕЛЕНЦЕВ В ЗООПЛАНКТОНЕ ЗАРОСЛЕЙ МАКРОФИТОВ ОЗЁР И ПРУДОВ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ 639

Ю.В. Герасимов, Э.С. Борисенко, А.И. Цветков
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЯПУШКИ В ОЗЕРЕ ПЛЕЩЕЕВО ПО ДАННЫМ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ В ВЕСЕННЕ-ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2024 Г. 641

М.Ю. Горбунов, М.В. Уманская, Е.С. Краснова, Е.Н. Унковская
ВЕРТИКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА МИКРОБНОГО ПЛАНКТОНА В НЕБОЛЬШОМ ВЫСОКОГУМОЗНОМ ОЗЕРЕ 646

О.Г. Горохова
МАЛЫЕ ВОДОЁМЫ СРЕДНЕВОЛЖСКОГО БИОСФЕРНОГО РЕЗЕРВАТА КАК МЕСТА ОБИТАНИЯ РЕДКИХ ВИДОВ ВОДОРОСЛЕЙ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ 651

Н.Д. Грищенкова, Н.М. Роговский
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ДИНАМИКА И ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ОЗЕР БЕЛАРУСИ (В РАЗРЕЗЕ КЛИМАТИЧЕСКИ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ АСПЕКТОВ) 653

Д.С. Даирова, Д.С. Петрушкиева
СТРУКТУРА ДОННЫХ СООБЩЕСТВ ОЗЕРА ЦАГАН-НУР (СИСТЕМА САРПИНСКИХ ОЗЕР ЗАПАДНО-КАСПИЙСКОГО БАССЕЙНОВОГО ОКРУГА) 658

Д.С. Даирова, Д.С. Петрушкиева
СОСТАВ И ЭКОЛОГО-ФАУНИСТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАКРОЗООБЕНТОСА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОЗЕРА ЦАГАН-НУР (СИСТЕМА САРПИНСКИХ ОЗЕР ЗАПАДНО-КАСПИЙСКОГО БАССЕЙНОВОГО ОКРУГА) 664

Д.Б. Денисов, А.Л. Косова, С.И. Вокуева
ИССЛЕДОВАНИЯ АЛЬГОЦЕНОЗОВ ОЗЕР ЕВРО-АРКТИЧЕСКОГО БАРЕНЦЕВА РЕГИОНА В XXI ВЕКЕ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ 672

О.Ю. Деревенская
ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЗООПЛАНКТОНА ОЗЕРА МАЛОЕ ЧАЙКОВОЕ ПОСЛЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЭКОРЕАБЛИТАЦИИ 676

А.А. Евсеева
ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ОБИЛИЕ ЗООПЛАНКТОНА ПОЙМЕННОГО ОЗЕРА – РЫБОПИТОМНИКА (ОБЬ-ИРТЫШСКИЙ БАССЕЙН, ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ) 679

Н.И. Ермолаева, О.С. Бурмистрова
ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЛИТОРАЛЬНОГО ЗООПЛАНКТОНА ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА ПОД ВЛИЯНИЕМ ВОЗРАСТАЮЩЕЙ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ 684

Я.К. Ермолаева, М.А. Масленникова, С.А. Бирицкая, А.В. Лавникова, Н.А. Кульбачная, Д.Г. Рэчилэ, А.Т. Гулигуев, И.Д. Кодатенко, Д.С. Кондратьева, А.Н. Соломка, А.В. Башкирцев, А.С. Слепченко, А.Е. Артёмов, Д.Ю. Карнаухов
СРАВНЕНИЕ РЕАКЦИЙ ОСОБЕЙ АМФИПОД ВИДА GAMMARUSLACUSTRIS SARS, 1863, ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ И НЕ ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ ДЛИТЕЛЬНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ СВЕТОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ, НА РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ ОСВЕЩЕНИЯ 689

В.С. Жихарев, Д.И. Соколов, М.А. Терешина, О.Н. Ерина
ВИДОВАЯ СТРУКТУРА СООБЩЕСТВ ЗООПЛАНКТОНА КОСИНСКИХ ОЗЕР (ПРИРОДНО-ИСТОРИЧЕСКИЙ ПАРК «КОСИНСКИЙ», Г. МОСКВА)..... 693

К.М. Зарипова, Д.А. Тихонова
ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОМ ТРАКТЕ РЫБ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА..... 698

Е.Ю. Зарубина, М.И. Соколова
ДИНАМИКА ВОДНЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ ГЛУБОКОГО ОЛИГОТРОФНОГО ВОДОЕМА В УСЛОВИЯХ ВОЗРОСШЕЙ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ (ТЕЛЕЦКОЕ ОЗЕРО, РЕСПУБЛИКА АЛТАЙ)..... 703

Ю.Р. Захарова, М.В. Башенхаева, А.Д. Фирсова, А.Ю. Бессудова, И.В. Томберг, М.В. Сакирко, Е.Д. Бедошвили, Л.И. Копырина, Е.В. Лихошвай
ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФИТОПЛАНКТОНА В ПОДЛЕДНЫХ СООБЩЕСТВАХ ОЗЕРА БАЙКАЛ И СУБАРКТИЧЕСКИХ ОЗЕР ВОСТОЧНОЙ ЯКУТИИ 706

Д.В. Злотник, Ю.Ю. Форина
ОЗЕРО ИНГОЛЬ: РЕЗУЛЬТАТ АККЛИМАТИЗАЦИИ ЕВРОПЕЙСКОЙ РЯПУШКИ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЕЁ ПОПУЛЯЦИИ..... 711

А. Г. Ибрагимова, Д.Г. Селезнев, Л.А. Фролова, Д.А. Субетто, М.С. Потахин, Н.А. Белкина, А.А. Котов
КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ И КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ CLADOCERA ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАРЕЛИИ (СЗ РОССИИ) В НЕОПЛЕЙСТОЦЕНЕ-ГОЛОЦЕНЕ 716

Д.А. Иванова, Е.Д. Краснова, Д.А. Воронов, И.Г. Радченко
ФИТОПЛАНКТОН СУБАРКТИЧЕСКОГО МЕРОМИКТИЧЕСКОГО ОЗЕРА ТРЕХЦВЕТНОЕ С ПРЕСНЫМ МИКСОЛИМНИОНОМ ЛЕТОМ 2024 Г. 720

В.М. Иванова, А.В. Горбунова, А.И. Галеева, Н.М. Мингазова, Р.С. Дбар, Н.Г. Назаров, Э.Г. Набеева, Д.Ю. Мингазова, А.М. Тарасенко
ТИПОЛОГИЯ И БИОРАЗНООБРАЗИЕ (ЗООБЕНТОС, ИХТИОФАУНА) ОЗЕР

АБХАЗИИ 723

Е.Ю. Иванчева, В.П. Иванчев
ОСОБЕННОСТИ ВИДОВОЙ СТРУКТУРЫ РЫБНОГО НАСЕЛЕНИЯ ПОЙМЕННОГО ОЗЕРА НЕОБЫЧНОГО СТРОЕНИЯ 729

Т.Г. Ивченко
СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ БОЛОТ, СФОРМИРОВАВШИХСЯ ВОКРУГ МАЛЫХ ВОДОЕМОВ НИЗКОГОРНОЙ ЧАСТИ ЮЖНОГО УРАЛА (ЧЕЛЯБИНСКАЯ ОБЛАСТЬ) 733

Н.В. Ильмаст, Я.А. Кучко, Н.П. Милянчук
ПРЕСНОВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ КАРЕЛИИ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ 735

Е.С. Кондратьева, А.Н. Гурков, Я.А. Ржечицкий, Ж.М. Шатилина, М.А. Тимофеев
ВЛИЯНИЕ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЛИТОРАЛЬНЫХ И ГЛУБОКОВОДНЫХ АМФИПОД ОЗЕРА БАЙКАЛ 739

А.Л. Косова, Д.Б. Денисов
ДИАТОМОВАЯ ФЛОРА МАЛЫХ ОЗЕР, ПОДВЕРЖЕННЫХ АНТРОПОГЕННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ) 741

Е.Д. Краснова, Д.А. Воронов
СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА И ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАССОВЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ В ПРИБРЕЖНОМ МЕРОМИКТИЧЕСКОМ ОЗЕРЕ ТРЕХЦВЕТНОЕ (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ, БЕЛОЕ МОРЕ) 745

К.В. Кренева
ТРАНСФОРМАЦИЯ СООБЩЕСТВА ИНФУЗОРИЙ ОЗЕРА МАНЫЧ-ГУДИЛО ВСЛЕДСТВИЕ РОСТА МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОД 750

И.И. Кроленко
ОСОБЕННОСТИ ФАУНЫ ВЕТВИСТОУСЫХ РАКООБРАЗНЫХ (CRUSTACEA: CLADOCERA) В МАЛЫХ ВОДОЕМАХ ГОРОДА МОСКВЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМА ОХРАНЫ ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ТЕРРИТОРИИ 755

Т.И. Ловдина, С.Д. Прасолов, Т.Я. Воробьева,Н.С. Прилуцкая, А.С. Аксенов
ТАКСОНОМИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ПРОКАРИОТ ХЕМОКЛИНОВ ПРЕСНОВОДНЫХ МЕРОМИКТИЧЕСКИХ ОЗЕР СЕВЕРА АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ 759

Д.С. Любарский, Р.П. Токинова, С.В. Бердник
МАКРОФИТЫ ОЗЕРА АРХИЕРЕЙСКОЕ (ТАТАРСТАН), ПО МАТЕРИАЛАМ ЭКСПЕДИЦИИ 2024 ГОДА 764

О.А. Ляшенко, Г.Ф. Ляшенко, Е.В. Протопопова
ФИТОПЛАНКТОН ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА В 2020-2023 ГГ. 768

А.Б. Медвинский, Б.В. Адамович, Н.С. Минаев, Н.И. Нуриева,Н.П. Радчикова, А.В. Русаков, Д.А. Тихонов, Ю.В. Тютюнов
МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА ОЗЁРНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ: ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ОТВЕТ ЗООПЛАНКТОНА 772

Н.П. Милянчук, Я.А. Кучко, Н.В. Ильмаст
ВЛИЯНИЕ ТОВАРНОГО РЫБОВОДСТВА НА РЫБНОЕ НАСЕЛЕНИЕ ОЗЕР КАРЕЛИИ 773

Е.Ю. Митрофанова
ТЕЛЕЦКОЕ ОЗЕРО (АЛТАЙ, РОССИЯ) И ЕГО ФИТОПЛАНКТОН СРЕДИ КРУПНЫХ И ГЛУБОКИХ ОЗЕР МИРА: ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И ОБИЛИЯ .. 776

О.В. Морозова, С.В. Бердник, Д.С. Любарский
МИКРОБНЫЕ СООБЩЕСТВА ВОДЫ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙОЗ. БОЛЬШОЕ ГОЛУБОЕ И МАЛОЕ ГОЛУБОЕ (ТАТАРСТАН)..... 781

О.В. Мухортова, Р.З. Сабитова, Г.Р. Юмагулова
ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗООПЛАНКТОНА ОЗЕР ЛИНЕВО И КАРАСИХА ВОЛЖСКО-КАМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА..... 784

А.С. Нагаева, Е.А. Лабунская, Ю.Г. Соколовская, В.И. Лобышев, С.В. Пацаева, Д.А. Воронов, Е.Д. Краснова
ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТА НА ТАКСОНОМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ФОТОТРОФОВ В ОЗ. БОЛЬШИЕ ХРУСЛОМЕНЫ..... 788

А.А. Назарова, С.С. Седова, Ж.М. Шатилина, М.А. Тимофеев
ИЗУЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИММУНИТЕТА БАЙКАЛЬСКИХ АМФИПОД В ОТВЕТ НА ПОТЕНЦИАЛЬНО НЕГАТИВНЫЕ ФАКТОРЫ СРЕДЫ..... 793

Н.М. Нигматуллин, Л.А. Фролова, Г.Р. Нигаматзянова
ФАУНИСТИЧЕСКИЕ АССОЦИАЦИИ РЕЦЕНТНЫХ СООБЩЕСТВ CLADOCERA В ТУНДРОВЫХ ОЗЕРАХ ДЕЛЬТЫ Р. ПЕЧОРЫ (НЕНЕЦКИЙ АО).... 795

Н.А. Никулина, И.А. Бутусин
НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЗООБЕНТОСЕ БАССЕЙНА РЕКИ ГОЛОУСТНАЯ (ЗАПАДНОЕ ПОБЕРЕЖЬЕ ОЗ. БАЙКАЛ)..... 799

А.П. Новоселов
ВИДОВОЙ СОСТАВ, ТАКСОНОМИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ИХТИОФАУНЫ И БИОЛОГИЯ СИГОВЫХ РЫБ В ОЗЕРАХ БАССЕЙНОВ РЕК СОЯНЫ И МЕГРЫ (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ) 801

Н.И. Нуриева, Б.В. Адамович, А.Б. Медвинский
МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА ОЗЁРНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ: ФУНКЦИЯ СКОРОСТИ РОСТА ФИТОПЛАНКТОНА 805

М.Е. Овдин, Е.А. Петров
ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БАЙКАЛЬСКОЙ НЕРПЫ (PUSA SIBIRICA GM.) В РЕКРЕАЦИОННЫХ ЦЕЛЯХ НА ПРИМЕРЕ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА (ОЗ. БАЙКАЛ)..... 809

М.И. Орлова, Е.В. Строгова, В.В. Кузьмин
РАССЕЛЕНИЕ, СОСТОЯНИЕ И ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ МЕТАПОПУЛЯЦИИ ДВУСТВОРЧАТОГО МОЛЛЮСКА-ОБРАСТАТЕЛЯ DREISSENA POLYMORPHA В ВОДОЕМАХ-ОХЛАДИТЕЛЯХ АЭС

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: НА ПРИМЕРЕ ОЗЁР УДОМЛЯ И ПЕСЬВО 815

О.В. Палагушкина, Н.Г. Баянов, Л.А. Фролова, Е.Н. Унковская
ДИАТОМОВЫЕ СОВРЕМЕННЫХ ДОННЫХ ОСАДКОВ ОЗЕР ЛЕСНОЙ ЗОНЫ ВЕРХНЕГО И СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ 819

С.В. Пацаева, Ю.Г. Соколовская, А.А.Жильцова, Д.А. Воронов, Е.Д. Краснова
КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ХЛОРОСОМНЫХ БАКТЕРИОХЛОРОФИЛЛОВ В ХЕМОКЛИНЕ МЕРОМИКТИЧЕСКОГО ОЗЕРА ТРЕХЦВЕТНОЕ В РАЗНЫЕ СЕЗОНЫ 2024 ГОДА 824

В.Р. Погосян, В.Н. Коваленко
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИХТИОФАУНЫ КИЖСКИХ ШХЕР В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ 829

В.Н. Подшивалина
ДИНАМИКА ЗООПЛАНКТОНА ВОДОЕМОВ РЕЧНОЙ ПОЙМЫ (НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ СУРА) 833

В.И. Пономарев
МАЛЫЕ ОЗЕРА ЗАПАДНОГО МАКРОСКЛОНА ПРИПОЛЯРНОГО И ПОЛЯРНОГО УРАЛА И ИХ РОЛЬ В СОХРАНЕНИИ РАЗНООБРАЗИЯ РЫБНОГО НАСЕЛЕНИЯ 838

Е.С. Савосин
МАКРОЗООБЕНТОС АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ КАРЕЛИИ В УСЛОВИЯХ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ 843

Е.С. Савосин
РЫБОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ МАЛЫХ ВОДОЕМОВ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ КАРЕЛИИ 847

Е.Г. Сахарова
БИОМАССА И ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФИТОПЛАНКТОНА ОЗ. СЕВАН (АРМЕНИЯ) В 2018–2019 гг. 851

Б.Ф. Свириденко
ВОДНАЯ МАКРОФИТНАЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ КАК ИНДИКАТОР ВНУТРИВЕКОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОЗЕР ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ РАВНИНЫ 856

А.С. Семенова
ВИДОВОЙ СОСТАВ И КОЛИЧЕСТВЕННОЕ РАЗВИТИЕ ЗООПЛАНКТОНА БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ 860

А.С. Семенова, С.М. Жданова, М.И. Малин, С.И. Сиделев, А.И. Цветков
ПОКАЗАТЕЛИ СМЕРТНОСТИ ЗООПЛАНКТОНА В РАЗНОТИПНЫХ ОЗЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ КАЛИНИНГРАДСКОЙ И ЯРОСЛАВСКОЙ ОБЛАСТЕЙ 864

С.И. Сиделев, Л.Г. Корнева, Е.Н. Чернова, Е.Г. Сахарова
ОБНАРУЖЕНИЕ ЦИАНОБАКТЕРИАЛЬНЫХ ГЕПАТОТОКСИНОВ И ГЕНОВ ИХ БИОСИНТЕЗА В ФИТОПЛАНКТОНЕ МЕЗОТРОФНОГО ОЗЕРА ПЛЕЩЕЕВО

(ЯРОСЛАВСКАЯ ОБЛАСТЬ, РОССИЯ) В ПЕРИОД ВСПЫШКИ ОБИЛИЯ GLOEOTRICHIA ECHINULATA (SMITH ET SOWEBRY) RICHTER 869

С.М. Сидоров, А.И. Сидорова, Ю.Ю. Фомина
РОЛЬ GMELINOIDES FASCIATUS (CRUSTACEA: AMPHIPODA) В МАКРОЗООБЕНТОСЕ ЛИТОРАЛИ РАЙОНА О. КИЖИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА 871

А.И. Сидорова, Ю.Ю. Фомина, Е.М. Макарова, В.С. Смирнова, Ю.Л. Сластина
БАКТЕРИОПЛАНКТОН, ФИТОПЛАНКТОН, ЗООПЛАНКТОН И МАКРОЗООБЕНТОС РАЙОНА О. КИЖИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА (ОБЪЕКТ ВСЕМИРНОГО НАСЛЕДИЯ ЮНЕСКО-КИЖСКИЙ ПОГОСТ) 874

А.И. Сидорова, Ю. Ю. Фомина
МАКРОЗООБЕНТОС РАЙОНА О. КИЖИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА 879

Е.И. Собко, И.Н. Зубов, Т.И. Пономарева
ВИДОВОЙ СОСТАВ ЗООПЛАНКТОНА ЮНОПРИБЕЛОМОРСКОГО БОЛОТА ИЛАССКОЕ (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ) 882

Н.А. Старцева, Д.Е. Гаврилко
ПЕРВАЯ НАХОДКА RAPHIDIOPSIS RACIBORSKII (WOLOSZYNSKA) SEENAYYA ET SUBBARAJU ВОЗ. ЛУНСКОЕ (НИЖНИЙ НОВГОРОД, РОССИЯ) 886

О.Н. Суслопарова, А.Е. Трифонов
ЗООПЛАНКТОН КАК КОРМОВАЯ БАЗА РЫБ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА 891

А.Ю. Тамулёнис, Е.А. Стратаненко
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О РАССЕЛЕНИИ ИНВАЗИВНОГО ЧУЖЕРОДНОГО ВИДА РЕЧНЫХ РАКОВ PACIFASTACUS LENIUSCULUS (DANA, 1852) (DECAPODA: ASTACIDAE) В ОЗЁРНО-РЕЧНОЙ СИСТЕМЕ РЕКИ ВУОКСА 896

Н.Г. Тарасова, О.В. Мухортова, С.В. Быкова, М.В. Уманская, Е.С. Краснова
ИЗМЕНЕНИЯ В СООБЩЕСТВЕ ПЛАНКТОННЫХ ОРГАНИЗМОВ ПОЙМЕННЫХ ОЗЕР НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «САМАРСКАЯ ЛУКА» В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ 900

Н.А. Ташлыкова, Е.Ю. Афонина
СООБЩЕСТВА ФИТО- И ЗООПЛАНКТОНА ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ВОДОЕМОВ 905

П.М. Терентьев, Е.М. Зубова, И.М. Королева, Н.А. Кашулин
СОСТОЯНИЕ РЫБНОЙ ЧАСТИ СООБЩЕСТВ АНТРОПОГЕННО-ПРЕОБРАЗОВАННЫХ ВОДОЕМОВ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ 909

А.А.Тимофеева
МАКРОФАУНА БЕСПОЗВОНОЧНЫХ МАЛЫХ ВОДОЕМОВ УЧАСТКА ОСТРОВЦОВСКАЯ ЛЕСОСТЕПЬ ЗАПОВЕДНИКА ПРИВОЛЖСКАЯ ЛЕСОСТЕПЬ 913

М.А. Трухан, Е.С. Чертопруд, П.Г. Гарибян
ПЛАНКТОННЫЕ МИКРОРАКООБРАЗНЫЕ (CLADOCERA И COPEPODA) МАЛЫХ ОЗЕР ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ПЛАТО ПУТОРАНА (КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ, РОССИЯ) 917

М.В. Уманская, М.Ю. Горбунов, Е.С. Краснова, С.В. Быкова,Н.Г. Тарасова, О.В. Мухортова
РАЗНООБРАЗИЕ ПЛАНКТОННЫХ ПРО- И МИКРОЭУКАРИОТ В ПОЙМЕННЫХ ВОДОЕМАХ Р. ВОЛГИ ВБЛИЗИ Г. САМАРА 921

Ю.Ю. Фомина, А.И. Сидорова
СОСТОЯНИЕ ЗООПЛАНКТОНА И МАКРОЗООБЕНТОСА В ОЗЕРЕ СЯМОЗЕРО 926

Л.А. Фролова, Н.М. Нигматуллин, Л. Ширмайстер, С. Веттерих
CLADOCERA ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ВОДОЕМОВ НОВОСИБИРСКИХ ОСТРОВОВ ПО ДАННЫМ ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА 930

Н.В. Холмогорова
МАКРОЗООБЕНТОС ВРЕМЕННЫХ ПОЙМЕННЫХ ВОДОЕМОВ РЕК ИЖ И ПОЗИМЬ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ 933

Е.В. Чемерис, Ю.С. Виноградова, Н.К. Конотоп, В.А. Филиппова, А.А. Бобров
МАЛЫЕ ОЗЁРА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ КАК МЕСТООБИТАНИЯ РЕДКИХ ВОДНЫХРАСТЕНИЙ 937

Ф.М. Шакирова, В.З. Латыпова
ВЛИЯНИЕ ВСЕЛЕНЦЕВ НА ИЗМЕНЕНИЕ ВИДОВОГО СОСТАВА АБОРИГЕННОЙ ФАУНЫ КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА 941

Н.В. Шакурова
К ВОПРОСУ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ПЛАНАРИЙ В ЛЕСНОМ ЗАВОЛЖЬЕ И ЗАПАДНОМ ПРЕДКАМЬЕ 946

Е.М. Шарагина, П.В. Кулизин, НА. Старцева, Д.А. Журова, А.С. Кузнецова, Е.Л. Воденеева
ОЦЕНКА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ФИТОПЛАНКТОНА НЕКОТОРЫХ РАЗНОТИПНЫХ ОЗЕР НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВАНИИ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА «А» ВО ЛЬДУ И ПОДЛЕДНОЙ ВОДЕ 952

А.Н. Шаров
МАССОВОЕ РАЗВИТИЕ ЦИАНОБАКТЕРИЙ В ОЗЕРАХ РОССИИ: ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ 956

Н.Г. Шерышева, М.А. Унковская
БАКТЕРИОБЕНТОС В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ РАИФСКОГО И САРАЛИНСКОГО УЧАСТКОВ ВОЛЖКО-КАМСКОГО ЗАПОВЕДНИКА 958

А.В. Шерышова, С.А. Сенник
РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОЗЕРА ЕНДРА 963

Ю.А. Широкова, Е.В. Тэльнес (Мадьярова), А.Д. Мутин, Я.А. Ржечицкий, Ж.М. Шатилина, М.А. Тимофеев
БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВУХ ЭНДЕМИЧНЫХ ЭВРИБАТНЫХ АМФИПОД РОДА OMMATOGAMMARUS ИЗ ДРЕВНЕГО ОЗЕРА БАЙКАЛ В УСЛОВИЯХ БЫСТРОГО ГРАДИЕНТНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ 967

Г.В. Шурганова, А.А. Ревухин, Р.Е. Воронин, Д.И. Постнов,В.А. Гремячих, М.И. Базаров, В.Т. Комов
СОДЕРЖАНИЕ РТУТИ В МЫШЦАХ ПРОМЫСЛОВЫХ ВИДОВ РЫБ ГОРЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И НЕКОТОРЫХ ОЗЕР НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ 972

Е.П. Щапова, А.Н. Гурков, Я.А. Ржечицкий, Е.Б. Индосова, М.А. Тимофеев
ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ГИДРОГЕЛЕЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ 975

Е.Н. Ядренкина
ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ИХТИОКОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ ЗАМОРНЫХ ОЗЕР ЗАПАДНОЙ СИБИРИ 979

В.М. Яхненко, Ю.П. Сапожникова, А.Г. Королева, И.А. Небесных, А.А. Епифанцев, Е.А. Вахтеева, И.В. Ханаев
ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТА КИСЛОРОДА РОГАТКОВЫХ РЫБ (COTTOIDEI) ОЗЕРА БАЙКАЛ 984

Н.Н. Филатов, Т.И. Регеранд, Р.Р. Шагидуллин, Д.В. Иванов
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОДОЛЖЕНИЯ МЕЖДУНАРОДНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ «ОЗЕРА ЕВРАЗИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ» 988

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ ОЗЕР ЕВРАЗИИ

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И УГРОЗЫ ДЛЯ ОЗЕР В СВЯЗИ СО СТРОИТЕЛЬСТВОМ ВБЛИЗИ ВОЛЖСКО-КАМСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

З.Б. Акмалова, Н.М. Мингазова, И.С. Шигапов, Э.Г. Набеева, А.Ю. Леушин, В.И. Галеева
Казанский (Приволжский) федеральный университет

Статья посвящена оценке экологического состояния озер и их экологическим проблемам, находящихся в непосредственной близости от Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника. Особенное внимание уделено озерам, попадающим под территорию строительства коттеджного поселка. Описана их гидрология, площадь и современное состояние. Исследуется потенциальное влияние планируемого строительства коттеджного поселка на территориях водосбора этих озер. Анализ показывает, что застройка может привести к значительным экологическим угрозам.

По проведенной в 2024 году инвентаризации на территории Зеленодольского района Республики Татарстан выявлено 278 озер общей площадью 405,74 га, часть из которых сталкиваются с экологическими проблемами. Антропогенная деятельность, интенсивное освоение территорий и отсутствие достаточных мер защиты приводят к деградации водоёмов. Это участь не миновала и озера, расположенные вблизи Волжско-Камского заповедника.

Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник (ВКГПБЗ), образованный 13 апреля 1960 года, по праву можно назвать жемчужиной природных богатств Республики Татарстан, состоящий их двух участков – Раифского и Сараловского и является единственным в республике биосферным резерватом ЮНЕСКО (Шигапов и др., 2022).

Раифский участок расположен на территории Зеленодольского района в 5 км от Казани и в 7 км от Зеленодольска и известен своей уникальной гидрологической системой. На территории Раифского участка расположено 8 озер суффозионного и карстового происхождения; самым крупным является озеро Раифское площадью 32,3 га. Гидрологическая система заповедника относится к редкому для Среднего Поволжья типу карстовых провальных озер в руслах рек. Так, река Сумка включают озёра Белое, Раифское и Ильинское, а река Сер-Булак — озёра Линево и Карасиха (Унковская и др., 2002).

Однако, близость урбанизированных территорий обусловливает интенсивное использование земель вокруг заповедной зоны ВКГБПЗ. Строительство жилых домов и сопутствующей инфраструктуры создают серьёзные угрозы для экосистемы заповедника и окружающих озёр. Эти процессы могут привести к загрязнению воды, утрате природных местообитаний и снижению биоразнообразия, что делает вопрос охраны озёр особенно актуальным.

В 2019 году земли сельскохозяйственного назначения Айшинского сельского поселения были переведены в категорию земель населённых пунктов и отданы под индивидуальное жилищное строительство (рис. 1).

Данные земли непосредственно граничат с охранной зоной Волжско-Камского заповедника и прилегают к озеру Ильинское. Более того, на территории расположения

будущих жилых массивов находятся четыре озера (Черное, Доброе, Проточное и Бобровое), связанных с озером Ильинское протоками, часть которых также попадает под застройку.

По происхождению данные озера, вероятно, карстово-суффозионные, как и озеро Ильинское и в прошлом представляли собой единый водоем. В настоящее время данные озера подвержены процессам заболачивания в разной степени.



Рис. 1. Карта-схема публичной кадастровой карты с выделенными участками для строительства нового поселка

Озеро Доброе располагается севернее озера Ильинское, в 300 м. Имеет длинную вытянутую форму и выраженные ложбины стока в озеро Ильинское и в сторону озера Проточное. Площадь озера по результатам картографических измерений открытой акватории составляет не менее 3,85 га, и вероятно, в 2 раза больше (7-8 га), т.к. много мелководных участков, трудно учитываемых по площади вследствие зарастания и заболачивания. Берега частично заросли лесом, частично открытые, с луговой и водно-болотной растительностью.

Озеро Черное располагается северо-западнее озера Ильинское, в 350 м. Имеет округлую форму, указывающее на карстовое происхождение. Из озера вытекает широкий, слабо текущий ручей, впадающий в озеро Проточное. Площадь озера Черное, составляет около 2,4 га, длина водоема - 241 м, ширина - 160 м, длина береговой линии - 965 м. Озеро округлой формы, берега заросли лесом.

Озеро Бобровое располагается юго-западнее озера Ильинское, в 100 м. Имеет вытянутую форму, мелководное, заболачиваемое со множеством кочек. В настоящее время отделено дорогой и земляным валом от комплекса озер. Площадь озера составляет около 1,3 га, длина водоема - 273 м, ширина - 72 м, длина береговой линии - 872 м. Ранее было больше, в западной части имеется низина, как бывшая часть озера. Озеро вытянутой формы, берега заросли лесом.

Озеро Проточное располагается западнее озера Ильинское, в 200 м. Имеет вытянутую форму. Озеро участвует в подпитке озера Ильинское. В южной части имеются водно-болотные угодья, соединенные сеткой проток. Площадь озера Проточное составляет около 1 га, длина водоема - 187 м, ширина - 61 м, длина береговой линии - 905 м. Озеро вытянутой формы, берега заросли лесом.

Площадь водосбора озер Черное, Проточное и Доброе составляет 40,69 га. Современное состояние водосборной площади представлено территорией покрытой

древесной (50 %) и луговой растительностью (47%), а на территорию с асфальтированными и грунтовыми дорогами приходится 3%. Вычисления коэффициентов лесистости и застроенности территории водосбора составили, соответственно, 0,38 и 0.

Согласно кадастровой карте, земли населенных пунктов будут занимать 61,1% (24,88 га) от всей территории водосбора озер Черное, Доброе и Проточное, из них – для индивидуального жилищного строительства 61% (24,84 га). Прогноз состояния территории приведен на рисунке 2.

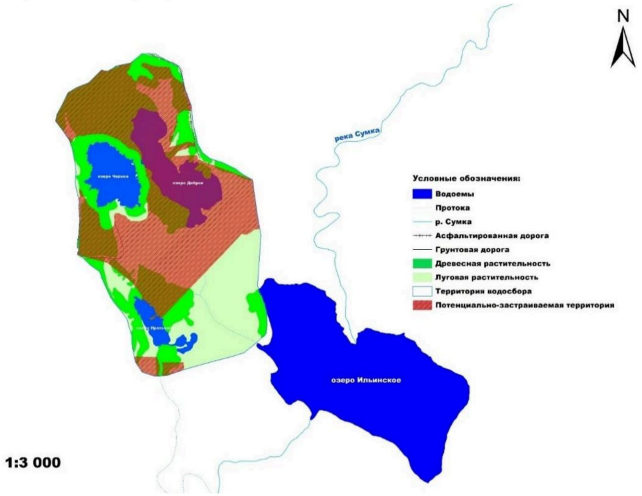


Рис. 2. Прогноз состояния территории водосборов озер Черное, Проточное и Доброе при строительстве коттеджного поселка

Площадь водосбора озера Бобровое составляет 68,49 га. Современное состояние водосборной площади представлено территорией покрытой древесной (36 %) и луговой (54 %) растительностью, а на территорию с асфальтированными и грунтовыми дорогами приходится 10%. Вычисления коэффициентов лесистости и застроенности территории водосбора для озера Бобровое составили 0,35 и 0,001. Всего антропогенно-нарушенная территория ландшафта занимает на настоящее время 0,87% от всей территории водосбора озера Бобровое.

Согласно кадастровой карте, земли населенных пунктов при строительстве займут 93,8% (64,26 га) от всей территории водосбора озера Бобровое, из них – для индивидуального жилищного строительства - 35,5% (25,05 га). (рис. 3).

Рассматриваемый гидрологический комплекс и его прилегающая территория имеют высокую экологическую ценность для сохранения целостности экосистемы и надлежащего качества окружающей среды, а также для сохранения ценности Волжско-Камского заповедника, однако, планируемое строительство коттеджного поселка на этой территории несет серьезные экологические угрозы. Воздействие строительства может привести к нарушению естественных процессов в экосистеме, ухудшению качества воды, сокращению биоразнообразия, а также снижению привлекательности природной территории.

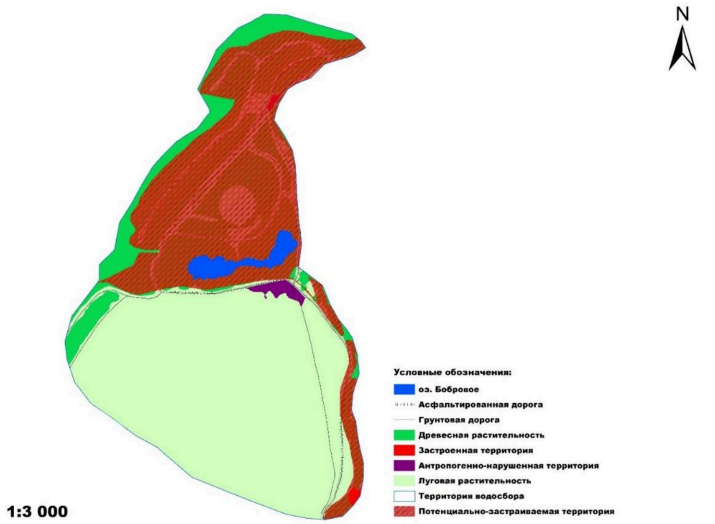


Рис. 3. Прогноз состояния территории водосборов озер Черное, Проточное и Доброе при строительстве коттеджного поселка

Тотальная застройка и освоение территории водосбора озер лишат их водного питания с поверхности водосбора, приведет к усыханию озер и, соответственно, изменит водный баланс озера Ильинское в сторону снижения объема водных ресурсов и последующим усыханием мелководных участков.

Расширение застройки приведет к уплотнению почвы и уничтожению растительности, защищающей берега от размыва. Это может вызвать эрозию и снижение устойчивости берегов, что увеличит разрушения природного ландшафта.

Появление новых антропогенных территорий нарушит среду обитания местных животных и растений. Увеличение шумового фона, вырубка деревьев и кустарников, уменьшение площадей естественных местообитаний могут привести к снижению биоразнообразия территории.

Прокладки коммуникаций и дорог могут перекрыть или уничтожить протоки, соединяющие озера. Это нарушает связь между водоемами, делая невозможным перемещение гидробионтов, а также затрудняет водообмен.

Принимая во внимание природную значимость территории, планы по освоению водосборных площадей могут привести к значительным изменениям в экосистемах этих водоёмов. Это может выразиться в нарушении их питания, последующем обмелении и усилении процессов заболачивания и угасания. Такие изменения приведут к снижению ландшафтного и биологического разнообразия, а также негативно повлияют на биоразнообразие Волжско-Камского заповедника, поскольку территории взаимосвязаны местами обитания и путями миграции.

Исследование показало, что планируемая застройка территорий вблизи озёр оказывает значительное негативное воздействие на их экологическое состояние. Массовое освоение земель ведёт к нарушению гидрологических режимов, ухудшению качества воды, утрате природных местообитаний и снижению биоразнообразия.

Особенно остро эти проблемы проявляются в районах, прилегающих к охраняемым природным зонам, таким как Волжско-Камский заповедник, где любое вмешательство может привести к необратимым последствиям для уникальной экосистемы.

Литература

Шигапов И.С., Набеева Э.Г., Мингазова Н.М., Акмалова З.Б. Геоэкологическая оценка состояния гидрологической системы Раифского участка Волжско-Камского заповедника // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. №6. Ч. 1. С. 181–184.

Унковская Е.Н., Мингазова Н.М., Павлова Л.Р. Гидрологическая и гидрохимическая характеристика водоемов Раифы // Труды Волжско-Камского государственного природного заповедника. Казань, 2002. Вып. 5. С. 9–37.

ENVIRONMENTAL PROBLEMS AND THREATS TO LAKES ASSOCIATED WITH CONSTRUCTION NEAR THE VOLGA-KAMA NATURE RESERVE

Z.B. Akmalova, N.M. Mingazova, I.S. Shigapov, E.G. Nabeeva, A.Yu. Leushin, V.I. Galeeva

The article assesses the ecological state and environmental challenges facing lakes located near the Volga-Kama State Natural Biosphere Reserve. It particularly focuses on lakes falling within the territory designated for a cottage development project. Their hydrology, area, and current condition are described. The potential environmental impact of the planned cottage construction on the catchment of these lakes is explored. The analysis reveals that the development could pose significant ecological threats.

ИССЛЕДОВАНИЯ СКОПЛЕНИЙ ПОЙМЕННЫХ ВОДОЕМОВ – ОСОБЕННОСТИ ПОДХОДА И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

И.В. Башинский[1], В.В. Осипов[2]

[1]Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН

[2]Государственный природный заповедник «Приволжская лесостепь»

В работе описывается подход к исследованию малых водоемов с помощью анализа их скоплений. В рамках решения задач была создана векторная карта пойменных водоемов верховьев р. Хопер, с помощью которой были выделены скопления водоемов («pondscapes»). По результатам выборочных полевых обследований выявлено, что скопления достоверно отличались по многим абиотическим и биотическим характеристикам, поэтому их выделение было обоснованным. На примере рыб показано, что доминирующие виды «гидроландшафта» могут быть индикаторами разных стадий развития пойменных комплексов. Рассмотрение водоемов на уровне их скоплений позволяет глубже понять многие процессы, происходящие в динамичных пойменных экосистемах.

Одним из важных направлений озероведения являются исследования малых водоемов, которые особенно уязвимы в условиях современных природных изменений. Хотя все еще остается открытым вопрос, что такое «малый водоем», последнее время появляются работы, описывающие их отличия от более крупных водных объектов. Помимо размеров, такие экосистемы характеризуются иным балансом органического

вещества и своими особенностями перемешивания водных слоев (Holgerson et al., 2022; Башинский и др., 2023).

Многие малые водоемы располагаются группами, поэтому сейчас приобретает популярность подход рассматривать такие экосистемы не по отдельности, а в составе разнообразных скоплений («pondscapes» или «waterscapes» – в иностранной литературе). Именно формируя «гидроландшафты», такие экосистемы вносят максимальный вклад в качестве поставщика экосистемных услуг (Cuenca-Cambronero et al., 2023).

Исследования малых водоемов в скоплениях особенно актуально для пойменных ландшафтов, которые представляют собой комплексы очень разнообразных экосистем, границы которых регулярно меняются. Акцентирование внимания только на крупных озерах-старицах дает нам много ценной информации, однако игнорирование в исследованиях мелких водоемов, баклуш, пересыхающих и временных водоемов лишает полной картины о состоянии долин рек.

Согласно концепции пульса половодья (Junk et al., 1989), нестабильность пойменных водоемов является, по сути, их гармоничным состоянием, поэтому почти невозможно отличить изменения, вызванные естественными процессами, от негативных последствий климатических и антропогенных воздействий. Поскольку оценки состояния экосистем нам нужны для реализации различных природоохранных стратегий, необходимо понимать, как уловить негативные изменения даже таких динамичных экосистем, как пойменные водоемы.

В этом случае нам как раз может помочь мониторинг скоплений водоемов, так как это покажет уменьшение разнообразия местообитаний, что в случае пойменных водоемов будет индикатором негативных изменений. Кроме того, исследование комплексов водных объектов позволит использовать при анализе показатели β-разнообразия, которые тоже служат оценкой состояния экосистем (Башинский и др., 2024).

Несмотря на преимущества такого подхода, на данный момент нет общепринятых методов выделения скоплений водоемов, и во многих случаях в исследованиях такие комплексы описываются условно, на основе границ ландшафтов или населенных пунктов. Кроме того, иногда они упоминаются в качестве абстрактного термина, обозначающего просто обводненные территории, не имеющие четких границ (Borthagaray et al., 2023).

В рамках нашего исследования мы поставили целью попробовать выделить обособленные скопления водоемов и проверить, отличаются ли они по абиотическим и биотическим характеристикам. В качестве модельной территории было выбрано верхнее течение реки Хопер, от истоков до границы Пензенской и Саратовской областей. На первом этапе была сделана инвентаризация пойменных водоемов в среде QGIS на основе анализа общедоступных спутниковых снимков, датированных июнем 2015 г. и июнем-июлем 2016 г. (ESRI World Imagery Wayback 2017-01-25). Это отражало ситуацию с пойменными комплексами в конце продолжительного периода маловодья (Дмитриева, 2020).

По итогам инвентаризации была создана векторная карта водоемов (рис. 1). На основе нее были выделены скопления водоемов, с использованием алгоритма кластеризации данных DBSCAN (Ester et al., 1996). Для каждого скопления установлено минимальное количество водоемов, равное трем, и установлен 1 км в качестве максимального расстояния между водоемами (Boothby, 1997).

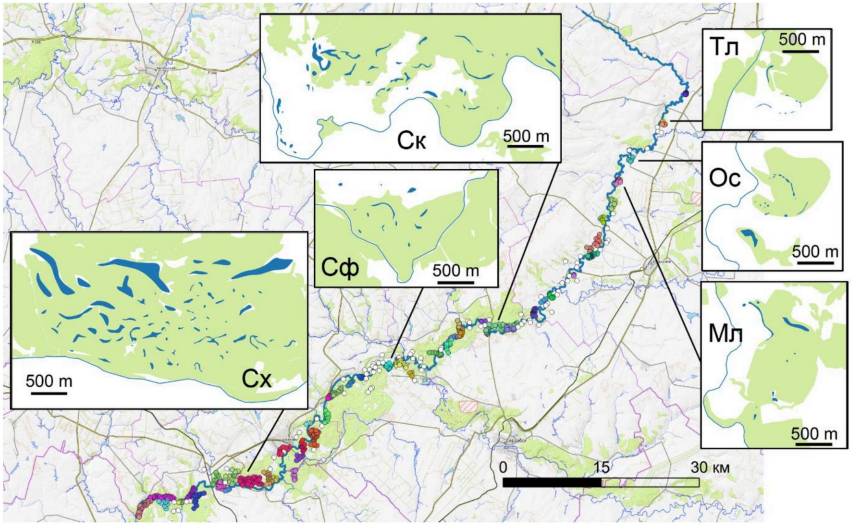


Рис. 1. Карта пойменных водоемов верхнего течения р. Хопер. Разным цветом показаны выделенные скопления водоемов. Отдельно приведены схемы модельных скоплений, на которых проводились полевые исследования. Расшифровка аббревиатур приведена в тексте

Для дальнейших полевых исследований мы выбрали шесть скоплений пойменных водоемов, названных по ближайшему населенному пункту: Телегино (Тл), Островцы (Ос), Мельник (Мл), Секретарка (Ск), Софьино (Сф) и Сахзавод (Сх) (рис. 1). В каждом из этих скоплений с помощью модулей QGIS случайным образом были выбраны по шесть водоемов в качестве модельных.

Все выбранные 36 водоемов были обследованы в мае, июле и октябре 2023 года. Были сделаны измерения глубины, температуры воды, содержания растворенного кислорода, pH, визуально оценивалась связанность водоемов с соседними. Вместе с этим описывали зарастание водоемов (проективное покрытие), как водной растительностью в целом, так и основными ее группами (погруженные, полупогруженные, плавающие). Мозаичность водоемов оценивалась по выравненности (критерий Симпсона) зарастания разными экогруппами макрофитов.

В качестве объекта для анализа биоразнообразия были выбраны рыбы, которые служат хорошим индикатором состояния водных экосистем. В каждом из модельных водоемов на сутки были установлены ловушки верши. Для уточнения ихтиофауны, использовали сеть Киналева размером сечения 1x1 м и ячеей 5 мм. Все пойманные рыбы затем выпускались обратно в водоём.

По итогам инвентаризации на исследованной территории идентифицировано 634 пойменных водоема. Анализ показал, что 98% из них представляют собой малые водоемы (площадью менее 5 га, согласно последним определениям малого водоема – Richardson et al., 2022). Средний размер водоема составлял 5852 м^2 (от 75 до 120 104 м^2). Большинство водоемов (70%) были расположены на расстоянии более 300 м от реки. В стадии затона (соединялись с рекой) находился лишь 21 водоем (3%). Наблюдалось увеличение средней площади не связанных с рекой водоемов по мере удаления от реки

(R^2=0.72). Средняя площадь водоемов, расположенных далее 1.2 км от реки, достигала 2 га. Ближе этой дистанции все водоемы относились к малым.

По итогам проведенной кластеризации на исследуемой территории выделено 49 скоплений водоёмов, 22 для правого берега, и 27 для левого. В среднем каждое скопление состояло из 20 водоемов (от 5 до 79). Еще 85 водоемов были расположены изолировано. Анализ этих скоплений показал, что водоемы в скоплениях были достоверно меньше по площади, чем изолированные (критерий Краскелла-Уоллиса, p=0.0005). Помимо этого, изолированные пойменные водоемы в большей степени были приурочены к открытым ландшафтам (p=0.018) и окрестностям населенных пунктов (p=0.028).

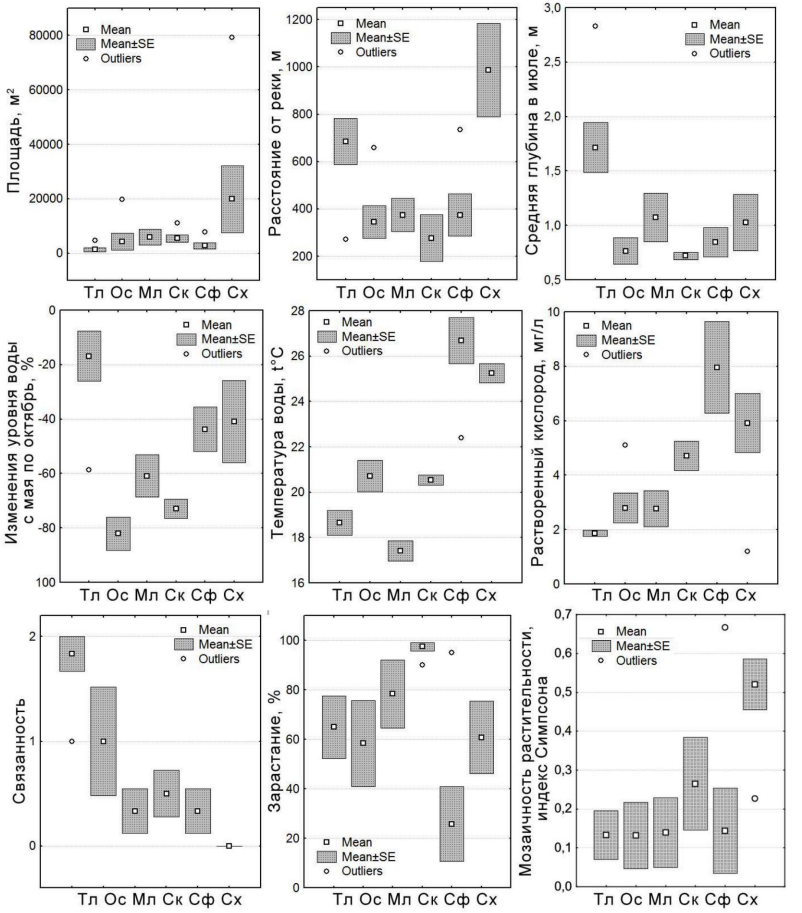


Рис. 2. Значения некоторых факторов среды в исследованных скоплениях пойменных водоемов р. Хопер (полные названия скоплений приведены в тексте)

Выделенные скопления водоемов отличались друг от друга по большинству параметров (рис. 2) – площади (критерий Краскелла-Уоллиса, p=0.04), средним глубинам (p=0.03), расположению относительно реки (p=0.009), перепаду уровня (p=0.001), облесенности (p=0.002), температуре воды (p=0.00001), содержанию растворенного кислорода (p=0.005), связанности с другими водоемами (p=0.005), общему зарастанию (p=0.02), зарастанию плавающей растительностью (p=0.04), мозаичностью растительности (p=0.04).

По результатам анализа ихтиофауны исследованных скоплений пойменных водоемов были найдены различия по структуре рыбного населения. Всего было обнаружено 11 видов, в отдельных скоплениях видовое богатство варьировало от 3 до 9 видов. При этом только два скопления пойменных водоемов (Ос и Мл) имели один и тот же доминирующий вид (золотой карась *Carassius carassius*), в остальных по численности выделялись разные рыбы – вьюн *Misgurnus fossilis* (Тл), ротан *Perccottus glenii* (Ск), горчак *Rhodeus sericeus* (Сф), серебряный карась *Carassius gibelio* (Сх). Такое различие по доминантам не было бы обнаружено при исследовании отдельных водоемов, так как внутри скоплений многие водоемы (25% от всех исследованных) были вообще без рыб. Доминирование разных по экологическим предпочтениям видов было следствием разных стадий развития всего пойменного комплекса – например, максимальная доля горчака указывала на связь водоемов с рекой, а преобладание золотого карася на высыхание и зарастание водоемов.

В целом, исследование показало, что скопления пойменных водоемов можно выделять с помощью модулей QGIS, используя предварительно проведенную инвентаризацию водоемов на определенной территории. В качестве критерия выделения скоплений мы использовали максимальное расстояние между водоемами, равное 1 км, но эту дистанцию можно варьировать в зависимости от задач и объектов исследования. Выборочные обследования скоплений показали, что они достоверно отличались по многим абиотическим и биотическим характеристикам, поэтому их выделение было обоснованным. Рассмотрение водоемов в составе комплексов позволяет глубже понять многие процессы, происходящие в динамичных пойменных экосистемах.

Литература

Башинский И.В., Кадетов Н.Г., Сенкевич В.А., Стойко Т.Г., Кацман Е.А., Осипов В.В. Трансформации экосистем пойменных водоемов в условиях современных природных и антропогенных изменений и возможные природоохранные стратегии // Успехи современной биологии. 2024. Т. 144. № 1. С. 80-96.

Башинский И.В., Прокин А.А., Филиппов Д.А., Сажнев А.С., Осипов В.В., Ершкова Е.В., Свинин А.О., Жаров А.А., Айбулатов С.В. Мир малых водоёмов: коллективная монография. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2023. 282 с.

Дмитриева В.А. Современные изменения водного режима и морфометрии рек Верхнедонского бассейна // Известия РАН. Сер. географическая. 2020. №1. С. 103-113.

Boothby J. Pond conservation: towards a delineation of pondscape // Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems. 1997. V. 7. №2. C. 127-132.

Ester M., Kriegel H.P., Sander J., Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // KDD-96 Proceedings. 1996. №34. P. 226-231.

Holgerson M.A., Richardson D.C., Roith J. et al. Classifying Mixing Regimes in Ponds and Shallow Lakes // Water Resources Research. 2022. V. 58. №. 7. e2022WR032522.

Junk W.J., Bayley P.B., Sparks R.E. The flood pulse concept in river-floodplain systems // Canadian special publication of fisheries and aquatic sciences. 1989. V. 106. №1. C. 110-127.

STUDY OF FLOODPLAIN PONDSCAPES – SPECIFICITY OF THE APPROACH AND FIRST RESULTS

I.W. Bashinskiy, V.V. Osipov

The article describes an approach to the study of small water bodies through the analysis of their conglomerations (pondscapes). A vector map of the floodplain water bodies in the upper reaches of the Khoper River was created and used to delineate pondscapes. According to the results of the field surveys it was shown that they differ significantly in many abiotic and biotic characteristics, so their identification was reasonable. Using fishes as an example, it was shown that the dominant species of pondscapes can be indicators of different stages of succession of floodplain complexes. Examining water bodies at the pondscape scale allows a deeper understanding of many processes occurring in dynamic floodplain ecosystems.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАЛЫХ ОЗЕР ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Л.С. Визер, Д.Л. Сукнев

Новосибирский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии

Исследовались малые озера юга Западной Сибири. Озера бессточны, мелководны, уровень кислорода в летнее время 4 – 10 мг/л, общая минерализация – от 0.8 до 9.0 г/л. Преобладающие грунты – илы. В зоопланктоне озер отмечен 31 вид из трех систематических групп. Наиболее представительны семейства Brachionidae и Daphniidae. Количественные показатели зоопланктона имели широкий диапазон: численность составляла от 5.7 до 1312.7 тыс. экз./м^3, биомасса – от 0.1 до 70.7 г/м^3. По показателям зоопланктона 60% озер относится к гипертрофным и эвтрофным водоемам, 30% озер – мезотрофного типа, 10% – олиготрофные. Потенциальная рыбопродукция за счет утилизации зоопланктона составляет в озерах от 1.1 до 663.3 кг/га.

Поверхностные воды юга Западной Сибири сосредоточены в бассейне Верхнего и Среднего течения р. Оби и многочисленных бессточных озерах Обь-Иртышского междуречья, относящихся к территории замкнутого стока общей площадью более 445 тыс. км^2 (Карнацевич и др., 2007; Мезенцева, 2010). Озерность территории в два раза выше, чем в среднем по стране. Здесь расположены крупнейшие озера Чаны, Сартлан, Хорошее, а также многочисленные малые озера, которых насчитывается более 3.5 тысяч, общей площадью свыше 5000 км^2. Большая часть малых озер сосредоточена в Новосибирской области.

Территория подвержена изменениям водности: в озерах происходит колебание уровня, меняются площади водного зеркала, глубина, минерализация, показатели биопродуктивности. Практически ежегодно происходят заморы, приводящие к гибели значительной части ихтиофауны.

Малые озера юга Западной Сибири высокопродуктивны. Накоплению органического вещества способствую ландшафтно-лимнологические и климатические особенности региона: незначительный уклон на север (не превышает 1°), плоский расчлененный рельеф, теплый климат, превышение испарения над осадками. Во многих малых озерах существуют залежи сапропелей с высоким содержанием сероводорода. Мозаичность солевого состава почв обеспечивает различный уровень минерализации

воды в озерах, которая может изменяться от пресной до горько соленой (рассолы) (Экология …, 2006).

Население озер зависит от минерального состава воды. В пресных и солоноватых озерах обитает не богатая аборигенная ихтиофауна, состоящая в основном из золотого и серебряного карася. В этих же озерах высокую численность, имеющую промысловое значение, может создавать рачок *Gammarus lacustris* Sars. В озерах Новосибирской области фонд таких озер составляет около 150 общей площадью более 13 тыс. га. Ежегодный вылов гаммарид из озер составляет от 870 (2015 г.) до 1300 т (2022 г.). В Омской области запасы гаммарид несколько ниже, ежегодный вылов рачка составляет от 500 до 700 т.

В высокоминерализованных озерах юга Западной Сибири обитает рачок *Artemia* sp., цисты которого являются прекрасным стартовым кормом для многих видов рыб. Артемиевые озера Новосибирской области находятся на северной границе ареала, их немного (около 25), все они относятся к категории малых водоемов. Ежегодный суммарный вылов цист артемии составляет от 80 до 105 т.

Большая часть малых озер, как в Новосибирской, так и в Омской области, используется как рыбопромысловые водоемы. Расположение озер в непосредственной близости от населенных пунктов позволяет использовать их местному населению для добычи рыбы. Однако, мелководность, нестабильный водный режим и периодические зимние заморы являются причиной не высокой рыбопродуктивности малых озер. Поэтому, несмотря на достаточно большой фонд малых озер, в Новосибирской области вылов рыбы из этих водоемов составляет только от 600 до 1200 т.

Учитывая все обстоятельства, в Новосибирской области в последние годы активно ведутся работы по созданию озерных товарных хозяйств для получения дополнительной рыбной продукции. Организация товарного рыбоводства на малых озерах весьма перспективна в связи с тем, что в таких рыбоводных хозяйствах есть возможность более полного контроля за технологическими процессами и выращиванием рыбы на естественной кормовой базе.

В качестве рыбопосадочного материала используются планктофаги – рыбы сиговых пород (Визер и др., 2013; Прусевич, Егоров, 2014). Технологии предусматривают выращивание рыбы в течение вегетационного периода с отловом ее перед ледоставом. Несмотря на уже достаточно большой объем товарного выращивания рыбы (Государственный …, 2018, 2020) в области сохраняется резерв для использования водоемов в этом же направлении.

Исследования малых озер, предназначенных для товарного выращивания рыб-планктофагов, проводились в пяти районах Новосибирской области в июле 2022 г. Озера, различаются как по морфометрическим, так и по экологическим показателям, но для всех их характерна мелководность – средние глубины составляют от 0,5 до 2,7 м, максимальные – не более 3,7 м. Водоемы бессточны, уровень кислорода в летнее время колеблется от 4 до 10 мг/л, общая минерализация – от 0.8 до 9.0 г/л. Преобладающие грунты, как правило, – илы. В озерах они наблюдаются в сочетании с песком, глиной или детритом, но ил – основная составляющая грунтов (табл. 1). Илы озер богаты органикой и железом. Теплый климат, избыток влаги, наряду с процессами выветривания и размыва, обеспечивают поступление в озера большого количества биогенных компонентов и накопление органики (Леонова, 2007; Попо́лзин, 1967; Хацкелевич, 1982).

Жесткая водная растительность в таких водоемах, как правило, расположена вдоль береговой линии и занимает 15-20% площади озера, мягкая – встречается в вегетационный период практически по всему плесу исследуемых озер.

Таблица 1. Морфометрические и экологические характеристики малых озер Новосибирской области

Озеро	Площадь, га	Средняя (максимальная) глубина, м	Общая минерализация воды, г/л	Грунты
Баганский район				
Плоское	57.0	0.5 (2.5)	1.0	песок, ил, детрит
Барабинский район				
Богатиха	158.0	1.5 (2.8)	2.4	песок, ил, детрит
Горькое	122.0	0.5 (1.0)	9.0	черный ил, детрит
Карасукский район				
Астродым	700.0	2.0 (3.0)	2.7	песок, ил, детрит
Черное	244.0	2.7 (3.7)	1.6	песок, ил, детрит
Куйбышевский район				
Кол	147.0	2.0 (2.5)	0.9	песок, ил, детрит
Чистоозерный район				
Горбунечное	41.0	1.0 (1.5)	0.8	глина, ил
Калач	20.0	1.0 (1.5)	1.6	песок, ил, детрит
Каменное	45.0	1.0 (1.5)	1.2	глина, ил, детрит
Сладкое	50.0	1.8 (2.2)	3.4	песок, ил, детрит

В зоопланктоне озер отмечен 31 вид из трех систематических групп. В группе коловраток насчитывалось 13 видов из 6 семейств. Наиболее представительно семейство Brachionidae, в котором наблюдалось 7 видов. В группе ветвистоусых ракообразных 11 видов из 5 семейств. Максимальное число видов (5) в семействе Daphniidae. Веслоногих раков обнаружено 7 видов из трех отрядов.

Максимальное количество видов наблюдалось в оз. Плоское степной зоны на юге области – 17, минимальное – 5, в озерах Горькое, Черное и Сладкое, расположенных в лесостепной и степной зонах области. Наиболее часто встречающиеся эврибионтные фитофильные виды *Asplanchna priodonta*, *Brachionus variabilis*, *Keratella quadrata*, *Daphnia longispina, Ceriodaphnia reticulata, Chydorus sphaericus*, *Bosmina longirostris*, *Mesocyclops leuckarti, Eudiaptomus gracilis.*

Количественные показатели зоопланктона малых озер имеют широкий диапазон: от крайне низких до чрезвычайно высоких. Так, минимум численности зоопланктона в оз. Черное составила 5,727 тыс. экз./м^3, максимум – в 229 раз больше, т.е. 1312,667 тыс. экз./м^3 в оз. Сладкое. Минимальная биомасса зоопланктона (0,121 г/м^3) наблюдалась также, как и численность, в оз. Черное, максимальная биомасса отмечена в оз. Горькое и достигала 70,743 г/м^3 (рис.).

Доминировала в биомассе зоопланктона озер в основном группа ветвистоусых ракообразных. Руководящая роль принадлежала, как правило, фитофильным эврибионтным видам *D. longispina, C. reticulata, Ch. sphaericus*, *B. longirostris, Moina rectirostris.* Исключение составили 2 озера – Богатиха и Сладкое. В них преобладала группа веслоногих ракообразных, доминировали *E. gracilis* и *M. leuckarti.*

По показателям зоопланктона большая часть (60%) озер относится к гипертрофным и эвтрофным водоемам, т.е. высокого и очень высокого класса продуктивности, 30% озер – средне продуктивных (мезотрофного типа), 10% – олиготрофные, т.е. низкого класса продуктивности. По типу кормности озера распределяются следующим образом: 40% относятся к водоемам весьма высококормным, 10% – к высококормным, 20% – выше средн кормности, 20% – к среднекормным и 10% – к малокормным (табл. 2).

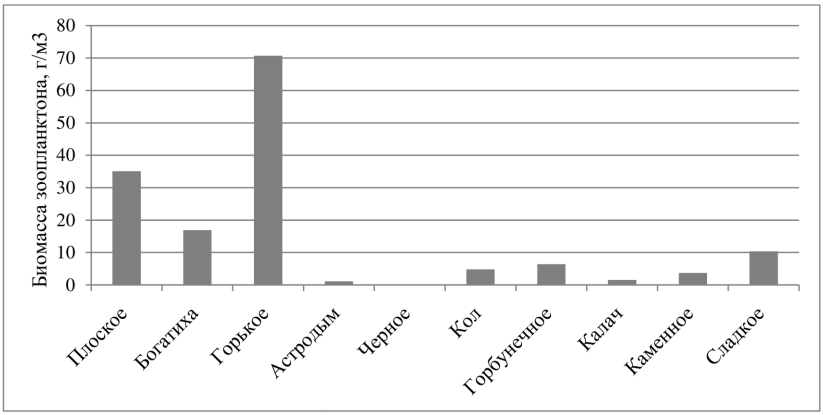


Рис. Биомасса зоопланктона (г/м^3) в озерах Новосибирской области в июле 2022 г., предназначенных для товарного выращивания рыбы

Таблица 2. Биомасса зоопланктона, продукционный статус, тип кормности и потенциальная рыбопродуктивность озер за счет утилизации зоопланктона рыбами-планктофагами

Озеро	Биомасса зоопланктона, г/м^3	Продукционный статус (Китаев, 2007)	Тип кормности (Пидгайко и др., 1968)	Потенциальная рыбопродуктивность, кг/га	Валовая потенциальная рыбопродукция, т
Плоское	35.087	гипертрофный	весьма высококормный	328.9	18.747
Богатиха	16.935	гипертрофный	весьма высококормный	158.8	25.090
Горькое	70.743	гипертрофный	весьма высококормный	663.2	80.910
Астродым	1.081	мезотрофный	среднекормный	10.1	7.070
Черное	0.121	олиготрофный	малокормный	1.1	0.268
Кол	4.827	эвтрофный	выше средней кормности	45.3	6.659
Горбунечное	6.414	эвтрофный	высококормный	60.1	2.464
Калач	1.542	мезотрофный	среднекормный	14.5	0.290
Каменное	3.654	мезотрофный	выше средней кормности	34.4	1.548
Сладкое	10.384	эвтрофный	весьма высококормный	97.4	4.870

Расчет потенциальной рыбопродукции за счет утилизации зоопланктона показал, что она может составить в озерах от 1.1 до 663.3 кг/га или от 0.268 до 80.910 т для каждого из водоемов. Суммарный объем дополнительной рыбопродукции в 10 озерах достигает 147.916 т.

С точки зрения рационального использования исследованных малых озер наиболее перспективными для выращивания рыб-планктофагов могут быть все озера за исключением малокормного олиготрофного озера Черное.

Литература

Визер Л.С., Прусевич Л.С., Наумкина Д.И. Кормовая база малых озер Новосибирской области // Вестник НГАУ. 2013. №2. С. 53-58.

Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Новосибирской области в 2017 году». Новосибирск, 2018. 235 с.

Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Новосибирской области в 2019 году». Новосибирск, 2020. 140 с.

Карнацевич И.В., Мезенцева О.В., Тусупбеков Ж.А., Бикбулатова Г.Г. Возобновляемые ресурсы тепловлагообеспеченности Западно-Сибирской равнины и динамика их характеристик. Омск: Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2007. 268 с.

Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 395 с.

Леонова Г.А. Геохимическая роль планктона континентальных водных экосистем в концентрировании и перераспределении микроэлементов: Автореф. дисс. … докт. геол.-минер. наук. Новосибирск, 2007. 32 с.

Мезенцева О.В. Географические закономерности зоны оптимального гидролого-климатических условий для аграрного природопользования (на примере Западной Сибири): Автореф. дисс. … докт. геогр. наук. Томск, 2010. 44 с.

Пидгайко М.Л., Александров Б.М., Иоффе Ц.И. и др. Краткая биолого-продукционная характеристика водоемов северо-запада СССР. Л.: Известия ГосНИОРХ. 1968. Т. 67, 1968. С. 205-228.

Поползин А.Г. Озера юга Обь-Иртышского бассейна (зональная комплексная характеристика). Новосибирск: Западно-Сибирск. кн. изд-во, 1967. 376 с.

Прусевич Л.С., Егоров Е.В. Оценка рыбопродуктивности малых озер Куйбышевского района Новосибирской области по гидробиологическим показателям // Вестник рыбохозяйственной науки. 2014. Т. 1, №2. С. 47-52.

Хацкелевич Л.М. Гидрогеохимические особенности формирования грязевых отложений в озерах Томской области // Курортные ресурсы и санаторно-курортное лечение в Сибири. Томск, 1982. С. 31-36.

Экология рыб Обь-Иртышского бассейна. М.: Т-тво научных изданий КМК, 2006. 596 с.

PROSPECTS FOR THE USE OF SMALL LAKES SOUTH OF WESTERN SIBERIA

L.S. Vizer, D.L. Suknev

Small lakes in the south of Western Siberia were studied. The lakes are drainless and shallow, the oxygen level in summer is 4-10 mg/l, and the total mineralization is from 0.8 to 9.0 g/l. The predominant soils are silts. There are 31 species from three systematic groups in the zooplankton of the lakes. Zooplankton indicators have a wide range: the number ranged from 5.7 to 1312.7 thousand specimens/m3, and the biomass ranged from 0.1 to 70.7 g/m3. According to zooplankton indicators, 60% of lakes belong to hypertrophic and eutrophic reservoirs, 30% of lakes are mesotrophic, and 10% are oligotrophic. The potential fish production due to zooplankton utilization ranges from 1.1 to 663.3 kg/ha in lakes.

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ РАЗМЕРА ВНУТРИБОЛОТНЫХ ОЗЁР (ОЗЕРКОВ) И СВЯЗАННОГО С НИМ НАЛИЧИЯ/ОТСУТСТВИЯ ВОЛНОВОГО РЕЖИМА НА ЦИКЛЫ ЭЛЕМЕНТОВ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ

М.Я. Войтехов

В небольших по площади внутриболотных озерках наблюдается внутригодовой сезонный цикл: (1) поглощение элементов минерального питания микроводорослями, приводящее к резкому снижению минерализации воды, нарушающему рост сфагновых мхов по краям озерков, (2) оседание на дно водорослевой массы, (3) её всплытие и деструкцию гетеротрофами. В больших внутриболотных озёрах волны выбрасывают планктон на края озёр, что приводит к формированию по краю озёр поясов эвтрофных сосудистых растений, поглощающих продукты разложения планктона, безвозвратной потере озёрами ранее поглощённых водорослями элементов минерального питания и переводу озёр в дистрофный режим.

В статье обращается внимание на различия циклов элементов минерального питания между малыми внутриболотными водоёмами, в которых отсутствует ветровое (волновое) перемешивание воды, и динамика водных масс определяется, прежде всего, температурными факторами и выделением газов, и озёрами шириной от нескольких сот метров с существенным волновым режимом. В отличие от, предложенного в книге «Мир малых водоёмов» (Башинский и др., 2023) определения, в данной статье в качестве малых водоёмов анализируются только водоёмы шириной водного зеркала до нескольких метров.

Исследования минерализации воды с использованием кондуктометра «Dist-1» фирмы Hanna и общие наблюдения за состоянием внутриболотных водоёмов автор проводил регулярно на водоёмах среди сфагновых болот Талдомского района Московской области. Подробный мониторинг динамики альгофлоры и минерализации воды выполнен в озерках болота Сима на Звенигородской биостанции МГУ им. М.В. Ломоносова. Отдельные стадии описанных ниже циклов, в целом, подтверждающие сделанные автором выводы, также наблюдались автором в ходе кратковременных экскурсий на болотах Псковской, Смоленской, Тверской, Московской, Владимирской, Томской областей, Республики Коми и ХМАО, где проводились измерения минерализации воды и взятие образцов микроводорослей.

Как известно, к началу весны в водоёмах наибольшая концентрация элементов минерального питания и наименьшая O_2 наблюдается в придонных слоях, где разлагаются остатки планктона. После схода льда конвекция выравнивает распределение с глубиной температуры воды и всех её химических и биологических характеристик, повышая содержание O_2 во всей толще воды до 100 %. Это приводит к усилению разложения органических остатков, повышению минерализации и весенней вспышке развития фитопланктона (Эдельштейн, 2014). В водоёмах среди сфагновых болот эта общая модель имеет свои особенности.

По нашим наблюдениям, минимальная концентрация растворённых минеральных элементов, при которой в непроточных водоёмах растут наиболее олиготрофные гидрофильные виды сфагнов (например, *Sphagnum balticum*), составляет 8–10 мг/л (в водотоках сфагновые мхи, в т.ч. виды, относящиеся к олиго-мезотрофным *S. lindbergii*, и мезотрофным *S. fallax*, отмечены и при более низкой минерализации). Более бедные питанием непроточные водоёмы можно считать дистрофными (с точки зрения потребностей основных эдификаторов олиготрофных болот – сфагновых мхов, некоторые виды микроводорослей более толерантны к дефициту минерального питания и способны

развиваться при минерализации по крайней мере от 2 мг/л). Весной, после таяния снега, минерализация воды в непроточных внутриболотных водоёмах и в толще сфагнового ковра обычно близка и соответствует олиготрофной или мезотрофной – до 20–35 мг/л, но к июню на поверхности воды в озерках и многих мочажинах нередко снижается до дистрофного уровня. Годовая амплитуда колебаний общей минерализации в водоёмах среди сфагновых болот выше, чем в прилегающих сфагновых коврах.

В сфагновых коврах основными редуцентами мортфитомассы являются грибы, а во внутриболотных фациях, парцеллах с доминированием водорослей основные редуценты – бактерии, среди которых значительное участие может принадлежать азотобактеру (Головченко и др., 2015). Известно, что бактерии характерны для биогеоценозов с быстрым, а грибы – с медленным оборотом элементов минерального питания и органического вещества (Bardgett, Wardle, 2010).

В мезотрофных водоемах таксономическое разнообразие водорослей варьирует сильно. В одних регионах можно наблюдать высокое разнообразие конъюгат, в других – разнообразие всех водорослей минимальное. Общей чертой для водоемов этого типа является большая численность цианофитных и зелёных нитчаток (*Mougeotia* sp. и *Anabaena* sp.) и диатомей из рода *Frustulia*. При олиготрофном и, далее, дистрофном уровне минерализации (ниже 10 мг/л) состав альгофлоры показывает значительное разнообразие диатомовых и десмидиевых водорослей, а также конъюгат. При этом доминантные виды водорослей специфичны для разных водоемов.

Помимо снижения общей минерализации ниже порога толерантности сфагнов, часто наблюдается покрытие мхов «чехлом» водорослей, снижающим освещённость, и даже полное погребение в водорослевых матах успевших прорасти в водоёмы побегов сфагнов. В водоёмах глубиной более 40 см происходит сначала оседание планктонных водорослей на дно, позже всплытие комков на поверхность и формирование плотных матов, при глубине до 40 см схожие по внешним признакам маты могут формироваться непосредственно в толще воды. Толщина матов может достигать по крайней мере 25 мм, при этом только в их верхних слоях наблюдаются живые водоросли, а нижние слои состоят из разрушенных клеток водорослей, определение которых возможно лишь до уровня крупных таксономических групп. Поверхность возвышающихся над водой участков водорослевых матов колонизируется золотистыми водорослями.

Несмотря на развитие планктонных водорослей и водорослевых матов, сапропеля в дистрофных водоёмах откладывается крайне мало. По нашим наблюдениям, на дне незаросших дистрофных «окон» (минерализация в июле-августе 4–7 мг/л), оставшихся от карьеров проводившейся около 60 лет назад добычи торфа в болоте Сима на ЗБС МГУ, сапропеля оказалось всего 2–3 мм, и в нём преобладали остатки не водорослей, а стенок ловчих пузырьков пузырчатки малой *Urticularia minor*. По свидетельству В.П. Матюшенко, на болоте Лодкинский мох в Тверской области имелись первичные «озерки в виде мешков воды, доходящих почти до дна болота с тонким слоем сапропеля и жидкого сфагно-осокового торфа (вместе около 0.5 см)» (Матюшенко, 1934). Отсутствие во внутриболотных озерках отложения сапропеля может быть связано с упомянутым выше явлением метафитон – всплыванием на поверхность водоёмов в результате газообразования донных отложений органики (Макаревич, Остапеня, 2000), которые в хорошо аэрируемых слоях быстро разрушаются.

Очевидно, в отличие от сфагновых сообществ, где элементы минерального питания долгосрочно иммобилизуются при образовании торфа (разрыв биологического круговорота), сообщества, первичным продуцентом которых является альгофлора, обеспечивают лишь кратковременную сезонную иммобилизацию элементов питания, связанную с температурной стратификацией и летней аноксией гиполимнона, а дополнительная фиксация азота из атмосферы в аэрируемых слоях способствует

усилению биологического круговорота, в т.ч. разложению сфагнов. Этому может способствовать и обилие в плавающих на поверхности матах микро- и мезофауны – нематод, коловраток, тихоходок, личинок двукрылых, иных беспозвоночных, дополняющих химическое разложение механическим разрушением.

В нашем эксперименте *in vitro* примерно половина листьев сфагновых мхов при двухмесячном инкубировании в водорослевых матах оказалась фрагментирована, внутри клеток некоторых листьев мха отмечены диатомовые водоросли и грибные гифы. Контрольные листья сфагнов, инкубированные в тех же сосудах вне водорослевых матов, не проявили признаков разрушения.

Следует отметить также быстрое вовлечение в биогенный круговорот опада характерных для олиготрофных болот пузырчаток (*Urticularia minor*, *U. intermedia*). В эксперименте *in vitro* при естественной температуре в сентябре–октябре 2016 г., после формирования зимующих верхушечных почек листья пузырчаток разложились в дистрофных условиях до состояния бесформенной массы в течение 10–15 дней, сосудистые пучки стебельков пузырчаток потеряли структуру в течение 30–40 дней. При повышении минерализации путём добавления в сосуды отложений со дна внутриболотных водоёмов отмершие побеги пузырчаток покрылись пушистым «чехлом» водорослей, при этом их разложение прекратилось.

Можно предположить, что соотношение площадей сфагновых сообществ и дистрофных озерков на грядово-озерковых болотах определяется степенью дефицита элементов питания, необходимых для роста сфагновых мхов, и это соотношение может быть выражено формулой:

$$A_{tot}/A_{bog} = N_{nead}/N_{real}$$

где A_{tot} – общая площадь болота; A_{bog} – площадь собственно болотных (с доминированием сфагновых мхов) сообществ; N_{need} – количество элементов питания, необходимое для полноценного роста сфагновых мхов на всей площади болота; N_{real} – количество элементов питания, реально поступающее на поверхность болота.

Парцеллы с доминированием сфагнов и водорослей следует рассматривать как конкурирующие подсистемы болотного биогеоценоза. Наиболее остра эта конкуренция при обеспеченности болота элементами питания, близкой к нижнему порогу толерантности сфагновых мхов, но, очевидно, некоторые механизмы способны действовать и при уровне обеспеченности элементами питания, достаточном для роста мезотрофных видов *Sphagnum*. Эти механизмы нуждаются в дальнейшем изучении.

Само формирование описанного выше условно замкнутого (внутри озерка) цикла элементов минерального питания может происходить очень быстро. Например, характерные изменения динамики минерализации воды и появление всплывающих клочков матов метафитона отмечены на заброшенной (после эпидемии) кабаньей тропе среди болота в Талдомском районе Московской области через год после прекращения использования её кабанами («врез» тропы в поверхность болота до 0,6 м).

В больших озёрах, в т.ч. с песчаным дном, окружённых сфагновой сплавиной, можно наблюдать более низкое, чем в окружающей сфагновой сплавине (25-45 мг/л), и мочажинах среди неё (10-15 мг/л) содержание минеральных элементов. В июле-августе в непроточном озере Светлое, диаметром около 800 м, на восточном краю пос. Белый Яр (Томская обл.) отмечено 2 мг/л, в слабо проточном озере Ранге-Тур, диаметром около 3 км (ХМАО, Природный парк Кондинское полесье) – 5 мг/л.

Основную массу фитопланктона в озере Ранге-Тур составляют не десмидиевые и диатомовые водоросли и представители коньюгат, а характерные обитающие в толще воды крупных озёр виды, что является косвенным свидетельством различий процессов, происходящих в малых и больших внутриболотных озёрах.

По краям сфагновой сплавины на границе с большими озёрами наблюдаются пояса эвтрофных растений, в т.ч. нитрофилов (*Calamagrostis epigeios*, *Cicuta virosa*, *Comarum palustre*, *Epilobium palustre*, *Lythrum salicaria*, *Scutellaria galericulata* и др., а также эвтрофный *Sphagnum squarrosum*). Это может быть связано с тем, что водоросли (а также питающийся ими зоопланктон, более многочисленный, чем в малых озерках, в связи с невыраженностью в озёрах, для которых характерно волновое перемешивание воды, гипоксии гиполимнона) аккумулируют в своей биомассе содержащиеся в воде биогенные элементы, которые при выбрасывании фито- и зоопланктона волнами на край сплавины отфильтровываются, проходя сквозь плотную массу корней и корневищ, мобилизуются при разложении, обогащая ризосферу сосудистых растений и обеспечивая их эффективный рост и необратимую иммобилизацию в более устойчивой к разложению, чем водоросли, фитомассе. Это ведёт к разрыву характерного для небольших озерков циклического оборота элементов минерального питания, поглощаемых микроводорослями, и переводу озёр в дистрофный режим.

Пояс сосудистых растений выполняет не только функцию поглощения элементов питания, но плотный слой корневищ и корней также защищает края сплавины от разрушения волнами.

В данном сообщении рассмотрены только крайние по размерам из характерных для сфагновых болот варианты: (1) озерки, ширина которых не превышает нескольких метров, в которых быстро происходит либо полное истощение элементов минерального питания микроводорослями (при глубине до 0,4 м), либо быстрая стратификация слоёв с формированием аноксичного гиполимнона (более глубокие озерки), в обоих случаях зоопланктон не успевает достигать обилия, способного регулировать развитие микроводоросоей; (2) озёра шириной от нескольких сот метров до километров, в которых ветер может развивать достаточную волну для выбрасывания планктона на края озера. Промежуточные по размерам внутриболотные озёра (шириной десятки – первые сотни метров, которые также могут быть отнесены к категории «малых» (по Башинский и др, 2023)), в которых вертикальная стратификация по обеспеченности O_2 может оставлять более значительный аэрируемый эпилимнон (ветер перемешивает поверхностные слои воды, но не развивает волну, способную выбросить планктон на край озера) и происходить не настолько быстро, чтобы нарушить развитие зоопланктона, способного регулировать обилие микроводорослей, не охвачены полевыми исследованиями автора. В средних по размерам внутриболотных водоёмах циклы элементов минерального питания могут существенно отличаться от описанных выше «крайних» по размерам вариантов и заслуживают дополнительного изучения.

Результаты исследования поддерживают выводы Р.Д. Барджета и Д.А. Уордла (Bardgett, Wardle, 2010) о том, что некоторые виды растений, воздействуя на круговорот элементов питания, могут оказывать непропорционально большое влияние на процессы в экосистемах относительно их вклада в общую биомассу сообщества.

Автор благодарит ведущего научного сотрудника Звенигородской биологической станции МГУ имени М.В. Ломоносова к.б.н. О.В. Анисимову за определение видов собранных автором образцов и общий анализ альгофлоры.

Литература

Башинский И.В., Прокин А.А., Филиппов Д.А., Сажнев А.С., Осипов В.В., Ершкова Е.В., Свинин А.О., Жаров А.А., Айбулатов С.В. Мир малых водоёмов: коллективная монография. Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2023. 282 с.

Войтехов М.Я. К вопросу о причинах длительной устойчивости водоёмов (озерков, мочажин) среди олиготрофных и дистрофных болот // Труды ИБВВ РАН. 2017. вып. 79. С. 30-35.

Войтехов М.Я., Анисимова О.В. К вопросу о конкуренции болотных и водных парцелл (фаций) на сфагновых болотах // Углеродный баланс болот Западной Сибири в контексте изменения климата / Материалы междунар. конф. Томск: Томский гос. ун-т, 2017. С. 45-47.

Войтехов М.Я. Об участии низко организованных растений в динамике болот // Растительность болот: современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны / Материалы III Междунар. науч. семинара. Минск: Колорград, 2018. С. 17-20.

Головченко А.В., Богданова О.Ю., Глухова Т.В. Структура микробных сообществ регрессионных пятен верхового торфяника // Болота и биосфера: мат. Всероссийской с международным участием 9-ой школы молодых ученых. Иваново: ПресСто, 2015. С. 39–44.

Макаревич Т.А., Остапеня А.П. Метафитон как структурно-функциональный элемент водных экосистем // Озёрные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды / Материалы Международ. науч. конф. по озерным экосистемам. Минск: БГУ, 2000. С. 226–230

Матюшенко В.П. О геоботанических основах гидрологии торфяных болот // Труды Научно-исследовательского торфяного института. 1934. Вып. 14. С. 182–199.

Эдельштейн К.К. Гидрология озёр и водохранилищ. М.: Перо, 2014. 399 с.

Bardgett R.D, Wardle D.A. Aboveground-Belowground Linkages. Biotic Interactions, Ecosystem Processes, and Global Change. Oxford University Press, 2010. 312 p.

ON THE INFLUENCE OF THE INTRA-BOG LAKES SIZE AND THE ASSOCIATED WAVE REGIME PRESENCE/ABSENCE ON THE MINERAL NUTRITION ELEMENTS CYCLES

M.Ya. Voytehov

In small intra-bog lakes (pools), an intra-annual seasonal cycle is observed: (1) mineral nutrition elements absorption by microalgae, leading to a water mineralization sharp decrease, the Sphagnum growth disrupting along the lakes edges, (2) the algal mass settling to the bottom, (3) its floating up and destruction by heterotrophs. In large intra-bog lakes, waves throw plankton onto the lakes edge, which leads to the eutrophic vascular plants belts formation along the lakes edge, absorbing the decomposition products by vascular plants, the irreversible loss by the lakes of mineral nutrition elements previously absorbed by the microalgae, and the lakes transfer to a dystrophic regime.

РАЗНООБРАЗИЕ ПОДХОДОВ К ИЗУЧЕНИЮ БОЛОТ СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Е.М. Волкова

Тульский государственный университет, Национальный парк «Тульские засеки»

Исследования болот на Среднерусской возвышенности включают оценку флористического и ценотического разнообразия, выявление и картирование горизонтальной структуры растительности, определение запасов фитомассы и углерода; мониторинг гидролого-гидрохимических показателей в разных сообществах; изучение строения торфяных залежей, состава и свойств торфов, включая содержание и запасы углерода; реконструкцию развития болот, динамику палеоэкологических параметров и

интенсивность аккумуляции углерода в генезисе. Оценка функционирования болот на современном этапе включает изучение депонирования и эмиссии углерода растительностью, трансформацию углерода в торф при отмирании растений, интенсивность торфообразовательного процесса и роль микроорганизмов. Исследования проводятся на разных типах болот в соответствии с разработанной классификацией.

Болотные экосистемы являются важными компонентами ландшафтов разных природных зон, центрами биологического разнообразия, а также выполняют ряд важных биосферных функций. Однако их роль долгое время недооценивалась и особенно – в слабозаболоченных регионах, что явилось причиной множества экологических проблем. Для изменения ситуации необходимы исследования различных аспектов структуры и функционирования болотных экосистем, что позволит разработать подходы к их сохранению. Кроме того, полученные сведения могут стать основой для экологического образования и просвещения населения.

Проблема сохранения болот особенно актуальна для слабозаболоченных регионов, поскольку низкая доля этих экосистем в структуре ландшафтов не способствовала их изучению, что привело к деградации значительной части болот. Одним из регионов с низкой заболоченностью является Среднерусская возвышенность (0,5%) в силу комплекса физико-географических факторов (Волкова, 2018). Несмотря на работы ряда известных ученых (Пьявченко, 1958; Хмелев, 1985) уровень изученности этих экосистем не был высоким. Проводимые исследования касались, прежде всего, оценки биологического разнообразия болот, реже – строения торфяных залежей

Комплексный подход к изучению болотных экосистем на Среднерусской возвышенности, начатый более 20 лет назад, предусматривал на первом этапе их инвентаризацию, что сопровождалось выявлением видового состава сосудистых растений и мхов, а также геоботаническими описаниями растительности. Это позволило провести оценку флористического и фитоценотического разнообразия болот.

Результаты проведенных исследований показали, что на болотах произрастает 605 сосудистых растений. Без учета «случайных» видов, приуроченных большей частью к трансформированным болотным экосистемам, парциальная флора сосудистых растений представлена 332 видами (Волкова, 2019). Бриофлора болот насчитывает 122 вида. На болотах произрастает 104 вида сосудистых растений и 41 вид мхов, находящихся под охраной и внесенных в «Красные книги», что отражает роль этих экосистем в сохранении флористического разнообразия регионов.

Оценка фитоценотического разнообразия показала, что растительность болот представлена 44 ассоциациями, относящимися к 5 типам растительности: Древесный (9 ассоциаций), Древесно-моховой (8 асс.), Кустарниковый (1 асс.), Гидрофильно-травяной (16 асс.) и Гидрофильно-моховой (10 асс.). Из 44 ассоциаций эвтрофными являются 26 (59%), мезотрофными – 11 (25%), олиготрофными – 7 (16%). Доминирование эвтрофных синтаксонов обусловлено геолого-гидрологическими особенностями региона. Редкие для региона мезо- и олиготрофные ассоциации сформированы на террасных и водораздельных болотах (как на зандровых отложениях, так и вне таковых) (Волкова, 2022, 2023).

Растительный покров болот образован сообществами разных ассоциаций, что зависит от характера водно-минерального питания. Если в питании болота доминирует один источник питания (грунтовые, делювиальные или атмосферные воды), то растительность будет гомогенной. При смешанном питании горизонтальная структура растительности болот всегда является гетерогенной и может быть представлена не только разными ассоциациями, но и типами болотной растительности. Такую структуру следует рассматривать как гетеротрофную. Комбинация сообществ разного типа водно-

минерального питания позволяет выделить следующие типы горизонтальной структуры растительности болот: 1. Гомогенный (виды структуры – эвтрофная, мезотрофная, олиготрофная); 2. Гетерогенный с подтипами: 2.1. гомотрофный (эвтрофная, мезотрофная, олиготрофная структура); 2.2. гетеротрофный (эвтрофно-мезотрофная, мезо-олиготрофная, эвтрофно-мезо-олиготрофная, эвтрофно-олиготрофная). Выделенные типы, подтипы и виды горизонтальной структуры растительности формируются при разном режиме увлажнения и минерализации питающих вод.

Торфообразовательный процесс является обязательным компонентом функционирования болотных экосистем, что стало предметом исследований на втором этапе. Торф образован остатками разных видов растений, на основании чего выделяют разные виды и типы торфа. На болотах Среднерусской возвышенности выявлено 38 видов торфа. Наиболее разнообразны низинные торфа (27 видов), являющиеся доминирующими в торфяных залежах. Разнообразие переходных торфов представлено 8-ю видами, верховых – 3-мя видами (Волкова, 2018).

В процессе развития болот происходит напластование торфов и формирование торфяных залежей. Залежи болот Среднерусской возвышенности различаются по мощности, структуре и разнообразию видов торфа на вертикальном разрезе. Мощность торфяных отложений зависит от глубины депрессии, в которой формируется болото, и продолжительности болотообразовательного процесса. По структуре торфяные залежи болот могут быть целостными (сплошными) – заполняют весь объем депрессии; разорванными – представлены придонным слоем торфа и плавающей на поверхности воды сплавиной; сплавинными – депрессия заполнена водой и на ее поверхности сформирована торфяная сплавина.

Различия в составе торфов позволили разработать динамическую классификацию торфяных залежей, которая отражает особенности развития болотных экосистем. В основу классификации положены классические подходы к выделению типов торфяных залежей. Эти типы, в зависимости от состава слагающих торфов, относили к гомотрофным и гетеротрофным (группа типов), гомогенным или гетерогенным (класс типов) залежам. В гетеротрофных залежах указывали наличие торфов других типов, что отражает не только особенности возникновения, но и перспективы развития болот.

На основании строения торфяных залежей (учет, прежде всего, ботанического состава торфов) проведена реконструкция развития болот. Показано, что на разных геоморфологических уровнях и подстилающих породах генезис болот отличается. Полученные данные позволили расширить классические представления об озерном (лимногенном) и суходольном (тельматогенном) происхождении болот и выделить следующие типы заболачивания: I – вертикальное нарастание торфа; II – сплавинное зарастание; III – последовательное вертикальное нарастание и сплавинное зарастание; IV – комбинированное заболачивание: вертикальное нарастание и сплавинное зарастание происходят одновременно в центральной части и на пологих склонах карстово-суффозионных депрессий на водоразделах.

Генезис болот, имеющих разное геоморфологическое положение, существенно различается по количеству и продолжительности этапов и стадий, интенсивности вертикального прироста торфа и структуре торфяных залежей. Направления сукцессий палеорастительности в генезисе болот обусловлены гидролого-гидрохимическими условиями биотопов. Для реконструкции палеоэкологических условий в генезисе болот к ботаническому составу торфов применяли экологические шкалы Д.Н. Цыганова, Элленберга и Ландольта (Леонова, Волкова, 2024).

Несмотря на низкую заболоченность Среднерусской возвышенности, болотообразовательный процесс на этой территории протекал в разные периоды голоцена и с разной интенсивностью. Наиболее «древними» являются болота на

зандровых и моренных отложениях речных террас и склонов водоразделов, которые начали формироваться в бореальном периоде (8-9 тыс. лет назад). В атлантический период происходило активное заболачивание депрессий в поймах рек, на террасах и водоразделах с разными типами подстилающих пород. В субатлантический период началось интенсивное заболачивание карстово-суффозионных депрессий на водоразделах, расположенных вне моренных и зандровых отложений. Часто такие болота формировались на месте озер, обмелевших в суббореальный период (Волкова и др., 2020).

На третьем этапе проведено обобщение выявленных особенностей болот (геоморфологическое положение, ценотическое разнообразие и горизонтальная структура растительности, строение торфяных залежей, особенности развития болот), что позволило выделить 39 типов и 16 вариантов болотных массивов, относящихся к 3-м классам типов:

1. Водораздельные болота в карстово-суффозионных депрессиях;
2. Террасные и склоновые водораздельные болота на зандровых и моренных отложениях в суффозионных депрессиях;
3. Пойменные и балочные болота.

Особенности распространения разных типов болот позволили провести районирование Среднерусской возвышенности. Изучаемая территория располагается в границах 3-х болотных округов и 7 районов. Округа выделены в соответствии с доминированием определенного класса типов болот. При выделении районов руководствовались преобладающим типом или вариантом болот.

Понимание разнообразия и распространения болот на изучаемой территории позволяет перейти к следующему этапу, связанному с изучением экологии и функционирования болотных экосистем разных типов и в разных регионах. Среди экологических параметров наиболее актуальным является изучение сезонной и разногодичной динамики гидролого-гидрохимических показателей (в первую очередь, уровень залегания болотных вод, их минерализация или катионно-анионный состав, кислотность, содержание кислорода). Опыт проведения таких исследований имеется (Зацаринная, 2015).

Важным показателем функционирования болот является запас фитомассы в сообществах. Этот показатель связан с видовым составом и структурой фитоценозов, определяется водно-минеральным питанием и влияет на скорость вертикального прироста торфяных отложений. Проведенные исследования показали, что максимальные запасы фитомассы свойственны олиготрофным древесно-сфагновым и эвтрофным ценозам с развитым древесным ярусом. В олиготрофных травяно-сфагновых и кустарничково-сфагновых сообществах запасы фитомассы наиболее низкие.

В фитомассе происходит аккумуляция углерода, что отражает потенциальную депонирующую способность рассматриваемых сообществ. Расчеты запасов углерода на основании его содержания в каждой фракции свидетельствуют об отличиях в этом показателе для болот разных типов. При этом, учет площади болот свидетельствует о наиболее существенном вкладе в аккумуляцию углерода растительностью именно пойменных болот, занимающих наибольшие площади среди болот Среднерусской возвышенности (более 80%).

Депонированный в фитомассе углерод после отмирания растений «переходит» в торф. Однако интенсивность разложения отмерших растительных остатков зависит от гидролого-гидрохимического режима болот, влияющих на активность микрофлоры, что обеспечивает разную долю углерода, поступающего из растительности в торф. Чем активнее протекает процесс трансформации остатков растений, тем интенсивнее будет

эмиссия углекислоты с поверхности болота, тем ниже прирост торфа и доля поступившего углерода.

Оценка интенсивности эмиссии углекислого газа является важным показателем функционирования болот. Результаты исследований, организованные на болотах северной части Среднерусской возвышенности (Тульская область), показали преобладание процессов связывания углекислоты над ее эмиссией в атмосферу для гидрофильно-моховых сообществ водораздельных болот. Предварительные исследования на пойменных травяных болотах бассейна Дона свидетельствуют о том, что в летний период при оптимальном освещении их растительные сообщества являются «депо» углерода, однако весной и осенью соотношение процессов депонирования и эмиссии меняется, что приводит к активному разложению растительных остатков и снижает интенсивность прироста торфа.

Оценивая роль болот как «депо» атмосферного углерода, необходимо определить запас углерода в торфяных залежах. Этот показатель зависит, прежде всего, от возраста болот, а также от палеоэкологических условий, в которых происходило формирование торфов с разными свойствами. В ходе исследований на болотах Тульской области выявлено с какой скоростью палеосообщества аккумулировали углерод на разных этапах/стадиях развития разных типов болот и в разные периоды голоцена (Леонова, Волкова, 2023).

В разложении растительных остатков и формировании торфяных отложений важную роль играют разные группы микроорганизмов (бактерии, грибы). Выявлена корреляция между запасами углерода в торфяных залежах пойменных болот, интенсивностью разложения растительных остатков и структурой микробных комплексов (Volkova et al., 2024). Показано, что осушение болот сопровождается увеличением численности диаспор и биомассы грибов, что активизирует разложение растительных остатков, усиливает эмиссию углерода и понижает его содержание в торфах.

Таким образом, комплексный подход к изучению болот Среднерусской возвышенности, применяемый, в первую очередь, на болотах Тульской области, позволит охарактеризовать значимость и специфику функционирования этих экосистем в слабозаболоченных регионах.

Литература

Волкова Е.М. Болота Среднерусской возвышенности: генезис, структурно-функциональные особенности и природоохранное значение: Автореф. дис… докт. биол. наук. СПб., 2018. 46 с.

Волкова Е.М. Гидрофильно-моховая растительность болот Среднерусской возвышенности // Разнообразие растительного мира. 2023. №2. С. 44–58.

Волкова Е.М. Древесная, древесно-моховая и кустарниковая растительность болот Среднерусской возвышенности // Разнообразие растительного мира. 2022. №2. С. 5–29.

Волкова Е.М. Флора сосудистых растений болот Среднерусской возвышенности // Бот. журн. 2019. Т. 104, №10. С. 17–30.

Волкова Е.М., Новенко Е.Ю., Юрковская Т.К. Возраст болот Среднерусской возвышенности // Известия РАН. Сер. географическая. 2020. Т. 84. № 4. С. 551-561

Зацаринная Д.В. Экологические особенности и растительность карстовых болот зоны широколиственных лесов (на примере Тульской области). Дисс. … канд. биол. наук. М., 2015. 173 с.

Леонова О.А., Волкова Е.М. Динамика экологических условий в генезисе разных типов болот северной части Среднерусской возвышенности // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2024. Вып. 3. С. 100-120.

Леонова О.А., Волкова Е.М. Запасы углерода в торфяных залежах водораздельных болот на северо-востоке Среднерусской возвышенности // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. №8. С. 20-27.

Пьявченко Н.И. Торфяники Русской лесостепи. М., 1958. 191 с.

Хмелев К.Ф. Закономерности развития болотных экосистем Центрального Черноземья. Воронеж: Изд-во Воронежск. ун-та, 1985. 168 с.

Volkova E.M., Leonova O.A., Golovchenko A.V. Carbon Accumulation in Peat Soils of Floodplain Mires in the Northeast of the Central Russian Upland // Eurasian Soil Science. 2024. Vol. 57, №3, 3. 419–429.

THE VARIETY OF APPROACHES FOR STUDYING OF THE MIRES OF THE MID-RUSSIAN UPLAND

E.M. Volkova

Studies of mires on the Mid-Russian Upland include assessment of floral and cenotic diversity, identification and mapping of the horizontal structure of vegetation, determination of phytomass and carbon reserves; monitoring of hydrological and hydrochemical parameters in different communities; study of the structure of peat deposits, composition and properties of peat, including carbon content and reserves; reconstruction of mire development, dynamics of paleoecological parameters and intensity of accumulation carbon in genesis. Assessment of the functioning of mires at the present stage includes the study of carbon deposition and emission by vegetation, the transformation of carbon into peat during plant death, the intensity of the peat-forming process and the role of microorganisms. Studies are conducted on different types of mires in accordance with the developed classification.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К КОРРЕКТИРОВКЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ПО УРОВНЮ ВОДЫ ОЗЕР (НА ПРИМЕРЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ РОССИИ)

В.С. Вуглинский[1], В.А. Сушкова[2]
[1]Государственный гидрологический институт
[2]АО «Ленморнипроект»

Работы по сопоставлению наземных и спутниковых наблюдений за уровнями воды водоёмов суши и разработке методики корректировки спутниковых данных ведутся в ГГИ с 2019 года. Основы соответствующей методики были разработаны Лабораторией космических исследований в области геофизики и океанографии (LEGOS) Национального центра космических исследований Франции (CNES). В дальнейшем, методика получила развитие в совместных работах указанной лаборатории и Государственного гидрологического института. Апробация спутниковых данных и их корректировка осуществляются по данным наземных наблюдений. Без них «прямое» использование спутниковых наблюдений в настоящее время нецелесообразно из-за недостаточной точности последних. В статье излагаются основные положения разработанной методики и рассматриваются особенности ее применения на примере озер России.

Основы методики корректировки спутниковых данных (Cretaux et al., 2011) были разработаны Лабораторией космических исследований в области геофизики и океанографии (LEGOS) Национального центра космических исследований Франции (CNES), с которой ГГИ поддерживает многолетнее сотрудничество. Одной из главных целей сотрудничества является развитие и усовершенствование вышеупомянутой методики с учётом характера и особенностей как наземных, так и спутниковых данных, а также различий, связанных с типом водоёмов (озеро, водохранилище), их размерами, особенностями размещения пунктов наблюдений наземной сети на водоёме и т. д. За последние 5 лет методика была апробирована на 30 озерах Российской Федерации, расположенных в разных природных зонах и различающихся как про размерам, так и по качеству исходной информации об уровнях воды, полученной на основании данных наземных наблюдений. Информационной основой работ по корректировке спутниковых данных в последние годы явилась Интегрированная база данных (ИБД) по среднегодовым и среднемесячным уровням воды водоёмов, которая была создана в ГГИ в 2022 – 2023 годах и размещена на сайте Международного центра данных ВМО по гидрологии озёр и водохранилищ (HYDROLARE). В ней представлены результаты как наземных, так и спутниковых наблюдений за уровнем воды крупных водоёмов РФ и зарубежных стран за совместный период наблюдений, начиная, как правило, с 1992 года.

Результаты наземных наблюдений за уровнем воды озер были получены по данным местных управлений Гидрометслужбы и представляли собой среднемесячные массивы данных. В тех случаях, когда на озере действовали несколько постов, их данные осреднялись. На крупнейших водоемах (с площадью водной поверхности более 1000 км^2), где количество постов достигает 10 и более, использовались осредненные для акватории озера данные об уровнях воды, рассчитанные в УГМС Росгидромета по специальной методике. Для определения таких уровней выбираются так называемые репрезентативные гидрологические посты. Под репрезентативными понимаются посты, характеризующие типовую динамику изменений уровня воды на прилегающем участке акватории озера. Необходимость выбора репрезентативных постов обусловлена еще и тем, что на некоторых постах уровни воды могут часто искажаться под влиянием динамических явлений, таких как сгоны и нагоны, сейши, волнение.

Анализ спутниковых данных показал, что альтиметрические наблюдения на всех рассматриваемых озёрах начались с сентября 1992 года. При этом в разные периоды количество наблюдений в течение месяца изменялось. Так, до 2014 г. над российскими водоемами выполнялись не более 1-3 измерений в месяц. В последующие годы количество измерений существенно возросло, что было связано с увеличением количества спутников, ведущих альтиметрические наблюдения (Vuglinsky et al., 2023). В таблице 1, в качестве примера, приведены сведения о количестве спутниковых наблюдений в течение месяца по Ладожскому озеру за период с 1992 по 2020 гг. Аналогичная картина характерна для озера Байкал и других российских озер. Погрешности результатов спутниковых измерений связаны, также, с тем, что в многолетних рядах спутниковых наблюдений часто наблюдаются пропуски, которые требуют заполнения.

Таблица 1. Число спутниковых наблюдений в течение месяца в разные временные периоды (Ладожское озеро)

Периоды, с разным количеством спутниковых наблюдений в течение месяца (Ладожское озеро)		
Одно наблюдение	Преимущественно 3 наблюдения	От 6 до 17 наблюдений и более
с 09.1992 по 07.2008	с 08.2008 по 08.2014	с 09.2014 по 03.2023.

Для того, чтобы заполнить пропуски в спутниковых рядах, применяются различные способы интерполяции. Анализ применения шести разных способов интерполяции (линейная интерполяция, интерполяция методом «ближайшего соседа», интерполяция полиномами 2-й и 3-й степени, кусочно-кубическая интерполяция методом Эрмита и интерполяция сплайнами Акима) для заполнения пропусков в многолетних спутниковых рядах уровня воды, выполненный на примере пяти крупных водохранилищ России показал, что метод линейной интерполяции оказался наиболее предпочтительным (Вуглинский и др., 2024). После заполнения пропусков образуется «базовый» многолетний ряд спутниковых данных, который подвергается статистическому анализу с использованием стандартного статистического пакета для того, чтобы удалить сомнительные и ошибочные значения. Для этого используется статистический способ выбраковки величин, выходящих за пределы полуторного размаха интерквартильного интервала между первым и третьим квартилями (Ricko et al., 2012). Все значения, лежащие за пределами полуторного размаха этого интервала, превышают допустимую статистическую ошибку разброса членов ряда, рассматриваются как случайные «выбросы» и подлежат удалению из ряда. В таблице 2 в качестве примера приведены статистические характеристики «базового» ряда среднемесячных значений уровня воды по оз. Чаны за период октябрь 1992 – ноябрь 2019 гг.

Таблица 2. Статистические характеристики «базового» многолетнего спутникового ряда среднемесячных значений уровня воды (оз. Чаны)

Вид многолетнего ряда	Статистические параметры				Квартили		
	σ	Среднее значение	Максимальное значение	Минимальное значение	25% (первый квартиль)	50% (медиана)	75% (третий квартиль)
Среднемесячные значения уровня, м БС	0.37	102.11	103.01	101.22	101.85	102.11	102.34

На рисунке 1 представлена так называемая «коробочка», построенная по данным «базового» спутникового ряда среднемесячных значений уровней воды оз. Чаны, которая иллюстрирует процедуру определения «выбросов».

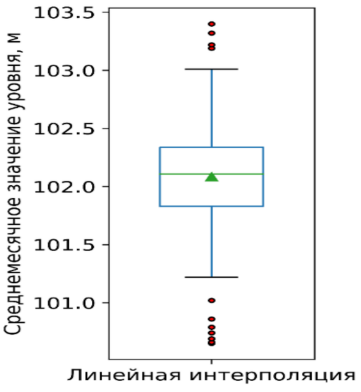


Рис. 1. «Коробочка», характеризующая разброс «преобразованного» многолетнего спутникового ряда среднемесячных значений уровней воды (оз. Чаны)

Верхние и нижние стороны «коробочки» характеризуют значения 75% и 25% квартилей (102,34 и 101,85 м), а горизонтальная линия внутри «коробочки» –среднее (медианное) значение многолетнего ряда, равное 102,11 м. Все значения, лежащие за пределами полуторного размаха разницы между первым и третьим квартилями (этот размах равен 0,73 см.) превышают допустимую ошибку и подлежат удалению. Эта разница отнимается от значения 25% квартиля (101,85 - 0,73 = 101,12) и прибавляется к 75% квартилю (102,34+0,73=103,07). Во втором случае, так как полученное значение 103,07 превышает максимальное значение в ряду, то принимается

последнее, т.е. 103,01 м. На рисунке 1 эти границы (значения 101,12 и 103,01) обозначены горизонтальными отрезками на вертикальных линиях, проведенных от нижней и верхней сторон «коробочки». В данном конкретном примере установлены 13 «выбросов», которые были удалены из ряда. Эти значения на рисунке обозначены кружками в верхней и нижней его частях. Все «выбросы» оказались внутри ряда и на его длину не повлияли.

После удаления «выбросов» в многолетних «базовых» спутниковых рядах, пропуски в них заполняются с использованием метода линейной интерполяции. Далее следует процедура проверки соответствия полученных многолетних спутниковых рядов аналогичным рядам, полученным по данным наземных наблюдений. Это осуществляется путем построения совместных хронологических графиков изменений уровней воды за выбранные периоды совместных наблюдений. На таких графиках хорошо прослеживаются периоды и размах отклонений между спутниковыми и наземными данными. На риceyrt 2 представлены такие графики для озера Сегозеро. Колебания уровней синхронны, но очевидно систематическое превышение спутниковых данных по сравнению с наземными в среднем на 40-50 см.

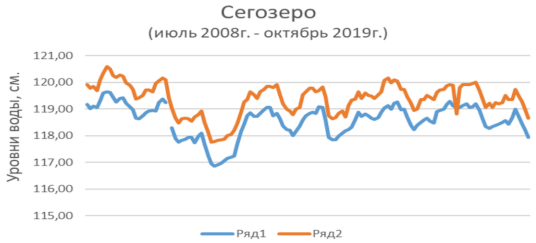


Рис. 2. Совмещенные хронологические графики изменений среднемесячных наземных и «базовых» спутниковых значений уровней воды оз. Сегозеро за совместный период наблюдений (ряд 1 – наземные данные, ряд 2 – спутниковые данные)

С целью исключения выявленных систематических погрешностей в спутниковых рядах все их значения корректируются путем введения коэффициента, полученного как частное от деления средних значений наземного и спутникового многолетних рядов. В результате формируется «откорректированный» спутниковый ряд.

Репрезентативность полученных «откорректированных» спутниковых рядов оценивается на основе сопоставления двух статистических параметров – среднеквадратического отклонения σ и коэффициента корреляции r (Cretaux et al., 2006; 2018). Оценка и анализ различий в величинах среднеквадратических отклонений для наземных и спутниковых многолетних рядов, позволяют получить наглядное представление о том, насколько велик разброс значений в рассматриваемых рядах. Коэффициент корреляции характеризует тесноту связи между наземным и спутниковым рядами. При значениях коэффициентов корреляции более 0.85, оба многолетних ряда считаются репрезентативными. В большинстве случаев, при таких значениях коэффициентов корреляции, погрешности в значениях среднемесячных уровней воды не превышают 10 см (Berry, 2005; Vaze, 2010). В таблице 3 приведены соответствующие данные, полученные для откорректированных многолетних спутниковых рядов по трем озерам.

Из таблицы видно, что откорректированные многолетние ряды, полученные для рассматриваемых озёр, соответствуют принятым критериям, являются репрезентативными и пригодны для дальнейшего использования.

Таблица 3. Значения среднеквадратических отклонений и коэффициентов корреляции для «откорректированных» многолетних спутниковых рядов

Озера	Вид многолетнего ряда	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент корреляции
Кубенское	Наземные наблюдения	1.07	0.94
	Спутниковые наблюдения	1.11	
Сегозеро	Наземные наблюдения	0.61	0.97
	Спутниковые наблюдения	0.61	
Ладожское	Наземные наблюдения	0.43	0,98
	Спутниковые наблюдения	0,44	

Требуется дальнейшее совершенствование методологии адаптации данных спутниковых наблюдений за уровнем воды на примере большего числа водных объектов. Это связано со многими обстоятельствами: видом водоёмов и особенностями их морфометрии, влияющими на результаты альтиметрических измерений; надежностью определения уровня воды по данным наземных наблюдений; видом и количеством спутников, числом и частотой их треков над водоёмом; наличием пропусков в данных наблюдений; расчётным интервалом времени и др.

Литература

Вуглинский В.С., Крето Ж.-Ф., Измайлова А.В., Гусев С.И. Курочкина Л.С. Перспективы использование спутниковой информации для определения уровня воды крупных озер и водохранилищ (на примере водных объектов России) // Метеорология и гидрология. 2024. №1. С. 5-16.

Berry P.A.M. Global inland water monitoring from multi-mission altimetry // Geophys. Res. Lett. 2005. 32(16). P. 4.

Crétaux J.-F., Birkett C. Lake studies from satellite altimetry // Geoscience. 2006. V. 338. P. 1098-1112.

Cretaux J., Berge-Nguyen M., Montazem A.S., Maisongrande P., Calmant S., Jamangulova N., Satylkanov R., Lyard F., Perosanz F., Verron J., Guilcher G.L., Leroux D., Barrie J., Bonnefond P. Absolute Calibration or Validation of the Altimeters on the Sentinel-3A and the Jason-3 Lake Issykkul (Kyrgyzstan) // Remote sensing. 2018. 10(11). P. 17.

Vuglinsky V.S., Cretaux J-F., Izmailova A.V., Gusev S.I.,, Berge-Nguyen M., Calmettes B. Comparison and correction of satellite measurements using in-situ observations of lake surface heights: A case study in lake Baikal // Advances in Space Research. 2023. V. 71. Iss. 10. P. 4030-4044.

METHODOLOGICAL APPROACHES TO ADJUSTING SATELLITE DATA ON WATER LEVEL OF LAKES (ON THE EXAMPLE OF WATER BODIES OF USSIA)

V.S. Vuglinsky, V.A. Sushkova

Work on comparing ground-based and satellite observations of water levels in land water bodies and developing a methodology for adjusting satellite data has been underway at the State Hydrological Institute since 2019. The foundations of the corresponding methodology were developed by the Laboratory of Space Research in Geophysics and Oceanography (LEGOS) of the National Center for Space Research in France (CNES). Subsequently, the methodology was developed in joint work by this laboratory and the State Hydrological Institute. Satellite data

are tested and adjusted using ground-based observations. Without them, "direct" use of satellite observations is currently inappropriate due to the latter's insufficient accuracy. The article presents the main provisions of the developed methodology and examines the features of its application using the example of Russian lakes.

ФОРМИРОВАНИЕ МАЛЫХ БОЛОТ В УСЛОВИЯХ ДАРВИНСКОГО ЗАПОВЕДНИКА (ВОЛОГОДСКАЯ ОБЛАСТЬ)

О.В. Галанина[1,2,3], М.Е. Леготин[1], П.А. Черненко[3]
[1]Санкт-Петербургский государственный университет
[2]Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН
[3]Институт лесоведения Российской академии наук

Статья посвящена изучению болот и болотной растительности Дарвинского государственного заповедника. В условиях колебания уровня Рыбинского водохранилища происходит формирование и развитие малых болот, которые выявляются практически повсеместно. Болота и заболоченные понижения малого размера часто располагаются вблизи побережья и могут иметь связь с водохранилищем. Но зачастую они удалены от берега резервуара на значительное расстояние, которое, по нашим данным, составляет до 1,2 км. Малые размеры и неглубокая торфяная залежь болот позволяет считать эти объекты примерами современного заболачивания.

Создание крупного искусственного водоема, каким является Рыбинское водохранилище, повлекло за собой изменение гидрологического режима окружающих территорий. В Дарвинском государственном заповеднике (ДГЗ), организованном в 1945 г., начались работы по изучению влияния резервуара на природные экосистемы Вологодской и Ярославской областей. Были созданы гидрологические профили для многолетнего мониторинга уровня грунтовых вод в разных биотопах: луговых, лесных, болотных. В настоящее время эти наблюдения ведутся, однако в несколько сокращенном виде (Мухин, 2015).

Целый ряд публикаций был посвящен данному вопросу в первые годы создания заповедника. Впоследствии в Трудах ДГЗ освещались аспекты, связанные с влиянием колебания уровня водохранилища на видовой состав и структуру лесных фитоценозов. Было предложено выделять зоны: временного затопления и подтопления.

Изучением растительности болот заповедника и стратиграфии их торфяной залежи, а также всплывших в результате размыва водами водохранилища торфяных островов, занимался В.П. Денисенков (1969, 1981).

Нами была поставлена задача установить характер динамических процессов в экотонной полосе – зоне контакта леса и болота – при воздействии водохранилища. Использовался метод геоботанического профилирования, проводилось сопоставление разновременных аэрофото- и космоснимков, бурилась торфяная залежь, закладывались почвенные разрезы.

При крупномасштабном картографировании растительного покрова выбранных ключевых участков мы обратили внимание на наличие «ям» – малого размера понижений, которые обнаруживаются вдоль побережья водохранилища на разном расстоянии от берега (от <0,05 до 1,20 км). Они присутствуют как на участках озерной террасы, так и в окраинных частях болотного массива Большой Мох, граничащих с лесами на суходоле (Галанина, Черненко, 2024). Размер, глубина и растительность понижений различна. В них встречены осоковые, вейниково-осоковые, осоково-

сфагновые, ивово-травяно-осоковые, березово-пушицево-сфагновые и другие фитоценозы. Некоторые понижения имеют маломощную торфяную залежь, другие демонстрируют промывной водный режим почвенных горизонтов и быстрое заполнение разреза грунтовыми водами. Из-за бедных по минералогическому составу подстилающих пород и, как следствие, низких значений pH, измеренных как в почвенных горизонтах, так и водных пробах, видовой состав большинства растительных сообществ обеднен.

Во время полевого этапа нами выполнялся отбор проб торфа с помощью зондировочного торфяного бура (модель ТБГ-66). Бурение торфяной залежи проводилось с учетом методических указаний (Методы., 1939), всего было заложено 14 скважин. Ниже приведем результаты обследования трех малых болот ключевого участка «Борок», изучавшихся в июле 2024 г. (рис. 1).

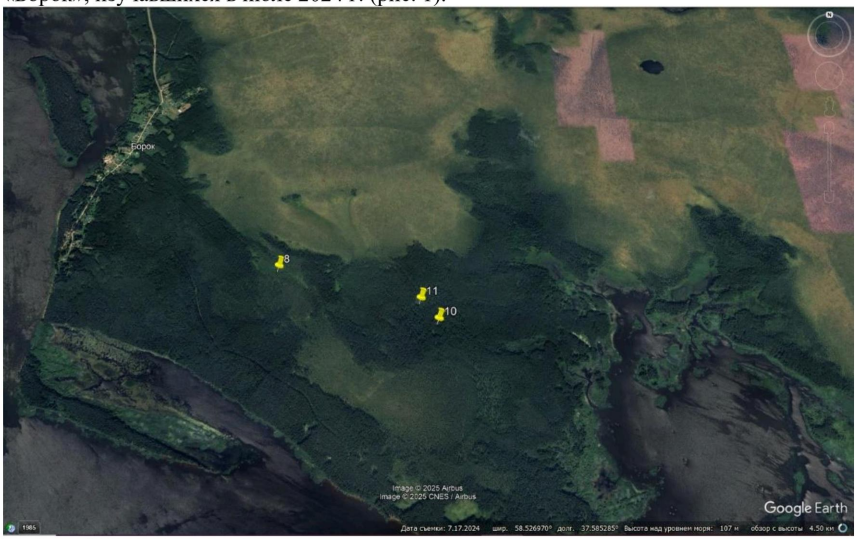


Рис. 1. Фрагмент космического снимка на исследованную территорию и объекты изучения, упомянутые в статье

Осоковое понижение (скважина 8) находится в 230 м к югу от болота Большой мох, рядом с вытекающим из него ручьём (58,53321 с.ш. 37,56420 в.д.). Расстояние от Мшичинского залива водохранилища составляет около 0,9 км. Древесный ярус представлен усыхающей *Betula pubescens* высотой 11-14 м; единично встречается *Pinus sylvestris*. Из кустарников отмечена *Salix aurita*. Проективное покрытие травяного яруса – 60%. Доминируют осоки: *Carex rostrata, C. nigra, C. elongata, C. lasiocarpa*. Заметно выделяется группа влаголюбивых трав *Epilobium palustre, Juncus filiformis, Menyanthes trifoliata, Calla palustris, Eriophorum vaginatum, Naumburgia thyrsiflora*. Моховой покров сплошного ковра не образует, его проективное покрытие – 15%, встречаются *Sphagnum fallax, S. squarrosum, Straminergon stramineum* и *Polytrichum commune.* pH болотных вод (определен полевым pH/EC-метром EZ-9902 из вымочки с вахтой) = 4,83.

Мощность торфяной залежи составила 0,6 м, можно выделить 4 стадии в торфонакоплении (Рис. 2). На глубине 45-60 см встречаются крупные угольки (до 1,5 см), а на 40-45 см расположен угленосный прослой − это может свидетельствовать о том, что данный болотный участок возник путём заболачивания лесного пожарища.

Наличие подобных угольных прослоек в торфяной залежи отмечал В.П. Денисенков при изучении болот юго-восточной части ДГЗ (1968).

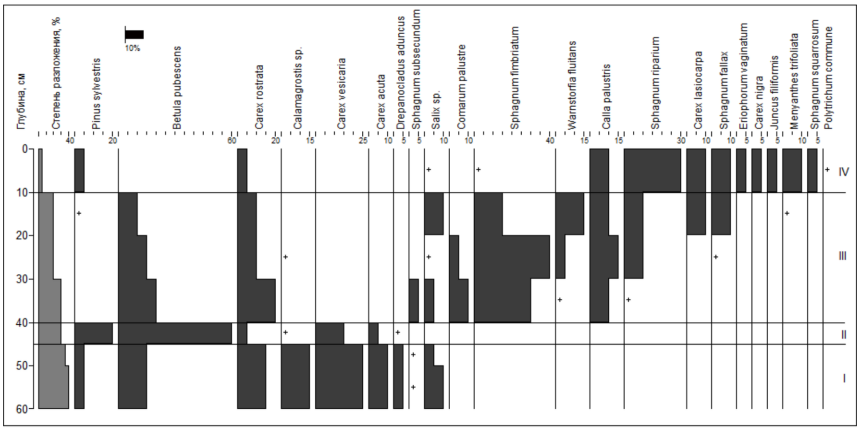


Рис. 2. Скважина 8. Стратиграфия торфяной залежи, угленосный прослой (40-45 см)

Осоковое понижение (скважина 10) находится в 240 м к северу от небольшого верхового болота Мшичино (58,52969 с.ш. 37,58309 в.д.) и удалено от берега водохранилища на 1, 2 км. Древесный ярус сложен *Alnus glutinosa*, которая произрастает в краевых частях обсохшего понижения. В травяном ярусе (проективное покрытие до 80%) доминирует *Carex vesicaria* (75%). Спорадически встречаются *Comarum palustre*, *Solanum dulcamara*. Моховой покров не развит. Глубина понижения составила всего 0,2 м; накопившиеся торфяные отложения позволяют выделить две стадии: древесно-осоковую и древесно-травяно-осоковую (рис. 3).

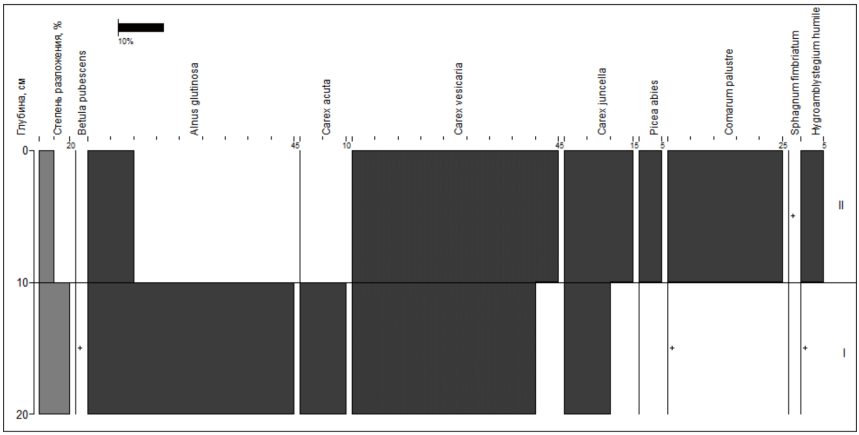


Рис. 3. Скважина 10. Стратиграфия торфяных отложений на начальной стадии заболачивания понижения

Травяно-осоковое низинное болото (58,53104 с.ш. 37,58101 в.д.) находится в 170 м к северо-западу от описанного выше заболоченного понижения. Расстояние от залива водохранилища – 1,2 км. Пробурена скважина 11. Древесный ярус не сомкнут, он представлен единичными экземплярами *Alnus glutinosa, A. incana, Betula pubescens*. Травяной ярус имеет проективное покрытие 85%. Доминируют осоки: *Carex vesicaria, C. acuta, C. juncella, C. rostrata, C. elongata*. Активное участие в составе сообщества принимают травы *Comarum palustre, Lycopus europaeus, Thyselium palustre, Scutellaria galericulata, Calamagrostis canescens, Thelypteris palustris, Sium latifolium, Epilobium adenocaulon*. Отмечены мхи *Sphagnum warnstorfii, S. centrale*, по ветоши произрастает *Climacium dendroides*. Вода кое-где поблескивает у поверхности, pH = 6,53. Спорадически встречается *Lemna minor*. Мощность торфяной залежи составила 0,7 м. Болото в ходе своего формирования прошло три стадии торфонакопления: древесно-травяную, древесно-травяно-осоковую и древесно-осоковую (рис. 4).

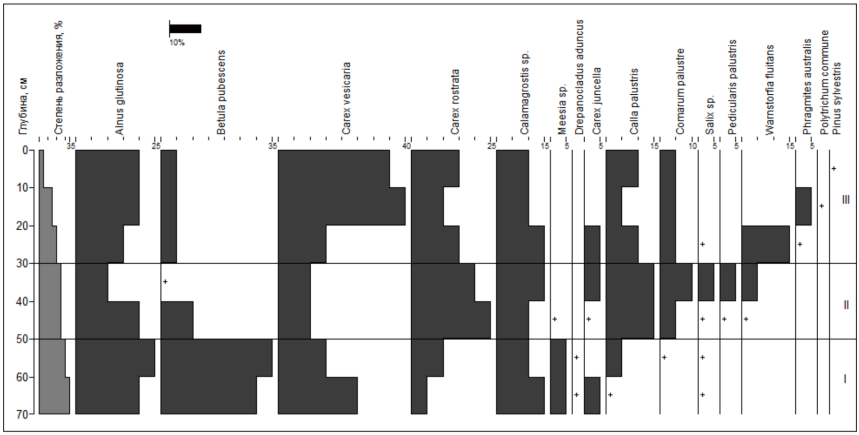


Рис. 4. Скважина 11. Стратиграфия торфяной залежи

Известно, что для территории Дарвинского заповедника наиболее характерны верховые болотные массивы, облесенные сосной. В литературе также отмечалось присутствие низинных болот. Вопрос о влиянии водохранилища на рассматриваемую территорию порой противопоставлялся мнению о воздействии болотного массива «Большой Мох» на прилегающие лесные участки. Малые болота и заболоченные понижения ранее целенаправленно не изучались, однако представляют определенный интерес.

Таким образом, можно заключить, что несмотря на незначительные размеры, малые болота являются неотъемлемой чертой заповедных ландшафтов. Изучение динамики торфонакопления и стратиграфии залежей представляется важным для составления прогноза развития природы данной территории.

Литература

Галанина О.В., Черненко П.А. Крупномасштабное картографирование болотной растительности в полосе влияния Рыбинского водохранилища // Растительность болот:

современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны / Материалы V Международного научного семинара. Минск, 2024. С. 36-38.

Денисенков В.П. Стратиграфия торфяных залежей болот юго-восточной части Дарвинского государственного заповедника // Труды Дарвинского гос. заповедника. 1968. Вып. IX. С. 79–93.

Денисенков В.П. Растительность и стратиграфия залежи болот Дарвинского заповедника: Автореф. дис. … канд. геогр. наук. Л., 1969. 23 с.

Денисенков В.П. Растительность и торфяная залежь всплывших торфяных островов Рыбинского водохранилища // Вестн. ЛГУ. 1981. Сер. Геология. География. Вып. 3., № 18. С. 70–77.

Методы исследования торфяных болот / Под ред. М. И. Нейштадт. В 2-х частях // Труды центральной торфяной опытной станции. М., 1939. Ч. 1. 171 с.; ч. 2. 319 с.

Мухин А.К. Влияние Рыбинского водохранилища на положение уровня грунтовых вод на примере Мшичинского экологического профиля Дарвинского заповедника // Материалы Вологод. обл. науч.-практ. конф. 2015. Вып. 11. С. 102–109.

FORMATION OF SMALL MIRES IN THE DARWIN NATURE RESERVE (VOLOGDA REGION)

O.V. Galanina, M.E. Legotin, P.A. Chernenko

This article is dedicated to mires and mire vegetation studies in the Darwin State Nature Reserve. The formation and development of small swamps occur in conditions of water fluctuating levels of the Rybinsk Water Reservoir. These small mires are often can be found near the coast and some of them have connection to the reservoir. But according to our data they are might be located at a considerable distance from the reservoir shore, which is up to 1.2 km. The tiny size and shallow peat deposits allow us to consider these natural objects as examples of modern dryland swamping.

РАЗВИТИЕ ОЗЕР В ВЫСОКОГОРЬЕ ГОРНОГО МАССИВА ТАВАН-БОГДО-ОЛА (АЛТАЙ) ОБСЛОВЛЕННОЕ ДИНАМИКОЙ ЛЕДНИКОВ

Д.А. Ганюшкин
Санкт-Петербургский государственный университет

Анализ разновременных космических снимков, дополненный данными полевых наблюдений позволил выявить увеличение количества (в 1,6 раз) и площади (в 3,2 раз) озер в высокогорье (в пределах зоны былого распространения ледников в максимум малого ледникового периода). горного массива Таван-Богдо-Ола в период с 1968 по 2020 гг. Изменения преимущественно связаны с возникновением и развитием приледниковых озер за счет таяния и сокращения ледников.

Новейшая тенденция к возникновению новых приледниковых озер, в горных районах Земли (Shugar et al, 2020), способствующая учащению опасных гидрологических процессов, отмечается и на территории Алтая (Пряхина и др., 2021; Пряхина и др., 2024; Распутина и др., 2022; Распутина и др., 2024). Общий тренд к деградации ледников здесь проявляется с окончания малого ледникового периода (МЛП). В горном массиве Таван-Богдо-Ола с МЛП ледники потеряли около 161 км^2 площади (Ganyushkin et al, 2022). Освободившиеся от ледников поверхности неустойчивы как в силу активной эрозии, так

и термокарста по погребенным льдам, формирующиеся у краёв отступающих ледников озера имеют, соответственно, изменчивые очертания. Цель данного исследования - оценка изменений озер в интервале 1968-2020 гг. в пределах зоны дегляциации после максимума МЛП массива Таван-Богдо-Ола.

Данная работа представляет развитие более ранних исследований (Ганюшкин, 2023) современной динамики высокогорных озер. Для всего массива проведен анализ космических снимков Corona (1968/08/10, пространственное разрешение 1,8 м), Spot 5 (2010/08/31, пространственное разрешение 2,5 м) и Sentinel 2 (2020/06/17, пространственное разрешение 10 м). Также для отдельных озер рассматривались аэрофотоснимки (1962/07/31) снимки Landsat 7 (2000 г.) Sentinel 2 (2024/08/15). Для снимков Sentinel 2 использовалась комбинация каналов «естественные цвета» (432). Использованные в работе оценки масштабов оледенения массива на максимум МЛП, 1968, 2010 и 2020 гг. были нами получены ранее (Ganyushkin и др., 2022). Также использовались результаты полевых многолетних исследований массива в период 1999-2021: повторные фотографии и GPS привязки озер северного склона массива. Дешифрирование озер производилось в ручном режиме. Выделенные озера по морфологии были отнесены к 3 типам: термокарстовые, приледниковые и моренно-подпрудные, представляющие собой следующую фазу развития приледниковых озер при потере ими контакта с отступающими ледниками. При каталогизации озер использовалась SRTM 3 (The NASA Version 3.0 SRTM Global 1 arcsecond). Она получена по состоянию на 2000 г., больше соответствуя реконструируемым прошлым временным срезам.

Объект исследования - горный массив Таван-Богдо-Ола (главная вершина г. Кийтын, 4374 м н.у.м., 87° 49′ в.д. и 49° 09′ с.ш.). Ближайшая метеостанция Бертек (высота 2200 м) действовала в период 1959-1982 гг., по ее данным у подножья массива климат холодный и аридный (средняя летняя температура 8/2°C, среднегодовое количество осадков 200,6 мм), в высокогорье массива количество осадков составляет от 300-400 мм на востоке до более 850 мм на западе (Ганюшкин и др., 2017). В ряде восстановленных средних летних температур для мст. Бертек за период с конца 1930-х по 2020 г. (Ганюшкин, 2023) выделяется скачок летних температур в конце 1990-х году, после чего они стабилизировались на высоком уровне. В отношении количества осадков, согласно данным расположенной к северо-западу от массива действующей мст. Кара-Тюрек, после 2010 отмечается снижение годовой суммы осадков (Ганюшкин, 2023).

К 1968 г. площадь оледенения массива Таван-Богдо-Ола по отношению к максимуму МЛП сократилась на 74,4 км^2 (на 21%). Если отнести максимум МЛП к 1850 г., то средняя скорость сокращения оледенения была относительно низкой (0,63 км^2/год или 0,18%/год). Большая часть ледников слабо отступила от своих позиций в МЛП, только фронты крупных долинных ледников отодвинулись на 800-1500 м. Всего было картировано 76 озер суммарной площадью 0,301 км^2. На 1968 г. отношение площади озер к площади дегляциации массива после МЛП составило 0,0040.

В период с 1968 г. по 2010 г. площадь ледников сократилась на 77,98 км^2 (на 28%), средняя скорость сокращения ледников составляла 1,86 км^2/год (0,67%/год). Число озер возросло до 103, а суммарная площадь до 0,681 км^2, отношение площади озер к площади дегляциации после МЛП также возросло (0,0045).

С 2010 по 2020 гг. площадь ледников массива уменьшилась на 8,59 км^2 (4,3%), т.е. на 0,86 км^2/год (0,67%/год). Несмотря на замедление дегляциации, число озер возросло до 124, а суммарная площадь до 0,961 км^2.Таким образом, площадь озер выросла на 41%. Отношение площади озер к площади зоны дегляциации после МЛП увеличилось до 0,0060.

Доля термокарстовых озер в суммарной площади озёр за весь период исследования существенно не менялась: в 1968 г. она составляла 6 %, в 2010 г. 5,4%, в 2020 г. 5,5%, что

подтверждает рост площадей озер данного типа (за счет развития термокарста по погребенным и мертвым ледниковым льдам). В то же время соотношение между моренно-подпрудными и приледниковыми озерами резко менялось: доля площади моренно-подпрудных озер в 1968 г. составляла - 44,2%, в 2010 г. - 73,8%, в 2020 г. - 63,2%; приледниковых - 48,9%, 20,9% и 31,2%, соответственно. Это колебание отражает скорость дегляциации: в 1968 г. большинство ледниковых озер только формировались, не потеряв контакта с ледниками, соответственно, преобладали приледниковые озера. Ускорение отступание на следующем этапе вызвало потерю контакта с ледниками и переход множества озер в разряд моренно-подпрудных. В 2010-2020 гг. скорость сокращения ледников несколько уменьшилась, в то же время появились новые приледниковые озера.

Рост площади озер происходил как за счет развития уже существовавших озер, так и формирования новых озер. Так в период с 2010 г. по 2020 г. возникло 33 новых озера, из них 14- приледниковые, 6- моренно-подпрудные, 13- термокарстовые, суммарная площадь появившихся озер составила 0,074 км^2, при этом 55% от данной площади приходилась на долю приледниковых озер. Напротив, исчезло 4 озера суммарной площадью 0,001 км^2, все они относились к термокарстовым.

Большинство озер со временем увеличивались в размерах (рис. 1). Так у озер, существовавших в 2010 году, суммарная площадь к 2020 г. выросла на 30%. Основные механизмы роста озер: увеличение озерной котловины за счет отступания ледников, расширение термокарстовых котловин при дальнейшем вытаивании подземных льдов и просадках грунта, заполнение уже существующих котловин за счет роста ледникового стока.

В некоторых случаях происходил регресс озер, когда озеро, достигнув максимальных размеров либо прорывалось, либо снижало уровень из-за сокращения ледникового стока по мере удаления от него ледников. Последнее, например, справедливо для озера Барсово (северный склон массива, басс. р. Аргамджи), данное озеро было спущено в 2022 г. (рис. 2).

Распределение площади озер по высоте в 1968 г. имело 3 максимума: 2800-2850 м (наибольшая площадь озер среди всех высотных интервалов), 2950-3000 и 3050-3100 м. К 2020 году эти максимумы сохранились, но два верхних стали очень размытыми и неявными в связи с формированием множества новых озер в диапазоне высот 2950-3100 м. Есть основания предполагать, что в перспективе основной максимум распределения площадей озер. В распределении числа озер по высоте в 1938 г. выделялось 2 четких равнозначных максимума: 2750-2800 и 2900-2950 м. К 2020 г. максимум распределения сместился на высоту 3000-3050 м, он стал носить размытый характер. Это также связано с формированием большинства новых озер в интервале высот 2950-3100 м.

Диапазон высот распространения озер изменился с 1968 г. по 2010 г. от 674 м до 507 м. Основной вклад в это изменение внесло появление термокарстовых озер в нижней части диапазона, отсутствие существенных изменений верхнего предела развития озер было связано с тем, что новые приледниковые озера появлялись на относительно низко расположенных ледниках.

Выявленное нами увеличение числа, а также абсолютной и относительной площади озер района исследования обусловлено изменением климата: потепление вызвало интенсификацию отступания ледников и развитие термокарстовых процессов. Вторая причина увеличения озерности – увеличение таяния ледников. Согласно расчетам абляции, проведенным для высоты границы питания (3380 м) для ледника Аргамджи-2 (Ганюшкин, 2023) (рис. 3) начиная с 1998 года таяние ледников резко возросло, причем в 2010-2020 гг. таяние еще увеличилось.

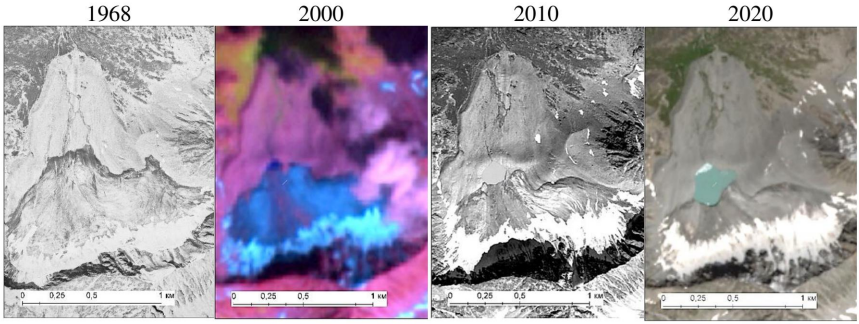


Рис. 1. Рост приледникового озера в бассейне р. Поштых, западный склон массива

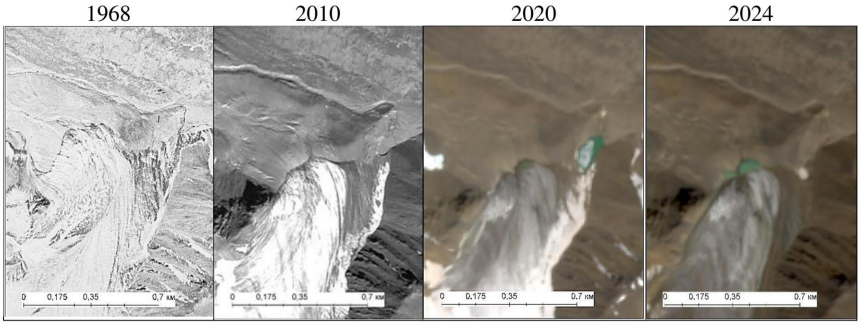


Рис. 2. Эволюция озера Барсово

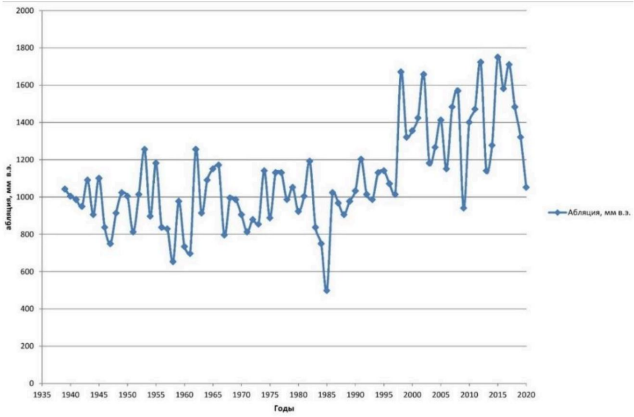


Рис. 3. Результаты расчетов абляции для ледника Аргамджи-2

Анализ спутниковых снимков по части массива на 2024 г. позволяет предполагать еще большее ускорение процесса формирования и роста приледниковых озер.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект 22-67-00020

Литература

Ганюшкин Д. А. Динамика озер в высокогорье горного массива Таван-Богдо- Ола (Алтай) // Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен / Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова. СПб: ООО «Издательство ВВМ», 2023. С. 132–137.

Shugar D.H., Burr A., Haritashya U.K., Kargel J.S., Watson C.S., Kennedy M.C., Bevington A.R., Betts R.A., Harrison S., Strattman K. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990 // Nature climate change. 2020. Vol. 10. P. 939-945.

DEVELOPMENT OF LAKES IN THE HIGHLANDS OF THE TAVAN BOGD MOUNTAIN MASSIF (ALTAI) CAUSED BY GLACIER DYNAMICS

D.A. Ganyushkin

Analysis of multi-temporal space images, supplemented by field observation data, revealed an increase in the number (by 1.6 times) and area (by 3.2 times) of lakes in the highlands (within the zone of former glacier distribution during the Little Ice Age maximum). of the Tavan Bogdo mountain range in the period from 1968 to 2020. The changes are mainly associated with the emergence and development of periglacial lakes due to the melting and shrinkage of glaciers.

ГИДРОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЗЁР ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

А.Т. Горшкова, В.П. Горбунова, Р.А. Рыков, Н.В. Бортникова, Д.А. Семанов
Институт проблем экологии и недропользования АН РТ

В статье рассматриваются пространственно-временные изменения количества и морфометрических характеристик озёр Республики Татарстан, их генезис и современные экологические проблемы. Представлены данные об изменении озёрного фонда республики за последние 55 лет, причины деградации природных водоёмов, влияние антропогенных факторов и климатических изменений. Особое внимание уделяется инвентаризации водоёмов с применением ГИС-технологий и оценке качества поверхностных вод. Предложены рекомендации по сохранению и мониторингу состояния озёр.

Пространственно-гидрографический анализ распределения озёр по территории Республики Татарстан стартовал на 75 лет позже изучения более богатой водными ресурсами речной сети. Директории базы данных автоматизированной системы оценки водных ресурсов (БД АСОВР) территории Республики Татарстан по рекам содержат сведения с периода их изучения конца XIX в., когда профессором Иваном Леваковским была предпринята первая попытка оценки водности по густоте речной сети Казанской Губернии. Основное внимание уделялось тогда крупным судоходным рекам (Волга, Кама и Вятка), на которых в этот период открывались уровенные посты (Верхний Услон, Камское Устье, Тетюши, Вязовые, Икское Устье, Елабуга, Сокольи Горы, Лаишево,

Чистополь, Мамадыш). Результаты проводившихся наблюдений (1881-1915 гг.) были впервые опубликованы Министерством путей сообщения как «Сведения об уровнях воды на внутренних водных путях» (Ресурсы ..., 1966). Это был первый гидрологический справочник, содержащий сведения об уровнях воды на больших реках. В последующем в связи с необходимостью строительства малых гидроэлектростанций и решения задач мелиорации было интенсифицировано исследование всей речной сети территории республики. Расцвет малой энергетики пришелся на середину XX в., но уже спустя десятилетие необходимость в малых станциях отпала в связи с запуском в эксплуатацию крупных гидроэлектростанций - ГЭС, ГРЭС и АЭС (Горшкова и др., 2014). Вырабатываемая мощными ГЭС электроэнергия была вдвое дешевле, к тому же гидроагрегаты ГЭС допускали работу на любых заданных мощностях в диапазоне минутного ускорения турбин, что обеспечивало исключительную маневренность режима работы с покрытием пиковых нагрузок и стало настоящим технологическим прорывом. Нагрузка на территориальные водные объекты снизилась, и озёра перестали рассматривать как стратегические резервные запасники воды.

Поскольку речной сток является квинтэссенцией поверхностного стока определённого водосбора, все последующие изыскания по изучению водоёмов и водотоков проводили по бассейновому принципу. Директории базы данных АСОВР расширились за счёт ввода блоков данных распределения локальных площадных и линейных объектов, количества и качества сточных вод (по 2-ТП водхоз), рассчитанных величин степени воздействия естественных и антропогенных факторов, индексации и районирования биологических, географических, гидрогеологических особенностей, также и расположения объектов сосредоточения водных ресурсов в озёрных котловинах.

Первые сведения об озёрах республики были получены в период 1965–1968 гг. (Кадастр …, 1969; Озёра Среднего Поволжья, 1976). В этих изданиях были собраны данные о 9754 озёрах. Работа по инвентаризации озёр территории Республики Татарстан конца XX в. и начала XXI в. показала тенденцию сокращения количества водоёмов данного типа до 8073, что отражено в справочнике «Водные объекты Республики Татарстан» (Водные ..., 2006). В настоящее время в результате климатических изменений (периода потепления) и крупных ландшафтных преобразований в бассейнах водохранилищ произошли изменения в показателях общего количества озёр и их морфометрических параметров. В списках гидрографического справочника 2018 г. представлено уже только 6621 озеро. Первые 1500 озёр были механически затоплены водами водохранилищ (1957-1978 гг.), с 1994 по 2006 исчезло 1452 озеро, с 2006 по 2018 – 1681. Для объяснения первопричин деградации отдельных природных объектов потребовалось применение методов дедуктивного системного широкомасштабного пространственно-географического анализа. Полученные результаты показали, что определяющими современную экологическую обстановку являются антропогенные факторы. В частности, серьёзными триггерами переформирования водного стока на территории Республики Татарстан явились техногенные преобразования бассейновых пространств, последовательно созданных за короткий по географическим меркам двадцатилетний период времени водохранилищ. Прогибы земной оболочки под напором водного столба новых нехарактерных для естественного рельефа резервуаров воды спровоцировали неотектонические процессы, вызвавшие проявление наведённой сейсмичности, и, как следствие, передислокацию горизонтов подземных вод и переформирование путей разгрузки поверхностного стока. Морфодинамические процессы, фиксируемые с подстилающей поверхности, такие как ускоренная трансформация гидрографической сети, выраженная в исчезновении одних водных объектов и появлении других, являются подтверждением перестройки морфолитогенной платформы под рельефом вновь образованных крупных бассейнов. В результате 84%

территории Республики Татарстан преобразовано в новые водосборы с обновлённым режимом формирования стока воды (Горшкова и др. 2018). В частности бассейн Куйбышевского водохранилища занимает 56% от общей площади республики, Нижнекамского – 21%, и несколько расширивший свои естественные границы за счёт создания Заинского и Карабашского водохранилищ бассейн Степного Зая ещё 7% (Горшкова, 2019).

Таким образом, причиной преобразования является усиление эрозионных процессов, сжатие и передислокация водоносных горизонтов, обусловившими подъем уровня грунтовых вод, что привело к перегруппировке путей поступления вод в бассейновых пространствах речных и озёрных структур. Сегодня 72.8% озёр территории республики являются малыми водоемами с площадью водного зеркала в пределах 0.5 га. Имеются и большие водоемы, площадь которых более 50.0 га. Преобладающее количество малых озёр располагается на возвышенных территориях Восточного Предкамья. Сосредоточены озёра в достаточно водообеспеченных муниципальных районах, среди которых по показателям площади их водного зеркала в пределах территории Республики Татарстан выделяются Елабужский, Лаишевский, Актанышский, Нижнекамский и Ютазинский. Как наиболее увлажненный и прохладный в климатическом отношении северный регион Предкамья лидирует среди других физико-географических провинций по величине площади водного зеркала 43.5% от общей площади водного зеркала озёр республики. Антиклиза Предволжья, природно-ландшафтные особенности которой, не позволяющие рекам достигнуть базиса эрозии и очень низкие значения модуля подземного питания (0-0.5 л/с·км^2) не благоприятствуют ни возникновению, ни существованию поверхностных водных объектов, характеризуется наиболее низкой площадью водного зеркала озёр – 8.1%. Относительно большую территорию занимают озёра низменного Западного Закамья – 17.3%, более засушливого, по сравнению с Восточным Закамьем, которое отличает более густая гидрографическая сеть, влияние Нижнекамского водохранилища на озёрность прилегающих территорий, а, следовательно, и большая площадь водного зеркала озёр – 31.1%.

Динамика изменения количества озёр по данным инвентаризации 1968 г. и 2023 г. представлена в таблице 1.

Суммарная площадь озер республики в настоящее время составляет 5963.56 га (59.64 км^2). За последние 55 лет произошло изменение численности озер в 37 муниципальных районах из 43. В Лениногорском, Арском, Камско-Устьинском и Черемшанском районах количество озер сократилось в 3-7 раз. Осталась прежней численность озёр Дрожжановского района. В Тукаевском, Кукморском, Мензелинском, Верхнеуслонском районах численность озёр увеличилась в 1.5-2.9 раза.

При проведении аналитических исследований следует понимать, что первое объединяющее начало формирования всех водных поверхностных структур – речных тальвегов, моренных водоразделов, озёрных котловин – является освобождённый почти 12 тысяч лет назад от ледникового покрова рельеф Восточно-Европейской равнины. Все неровности и рельефные углубления заполнялись водой, в местах с водоупорным слоем образовывались озёра и при постоянстве поверхностного и подземного притока воды их состояние постепенно стабилизировалось. Таким образом, всё разнообразие межхолмовых котловин дало начало постледниковым озёрам. Согласно общепризнанной классификации Дж.Э. Хатчинсона все озёра Русской равнины отнесены к ледниковым. В соответствии с ландшафтными особенностями и геоморфологией местности расположения водных объектов, а также условий поддержания водного баланса и характера питания типология классификации конкретизируется с учётом специфики генезиса и функциональности, как например наличие карста и пр. Легкая

складчатость образовавшегося рельефа обусловила разнообразие ландшафтов, в пределах которых расположились однотипные по генезису озёра. Надо понимать, что геологические процессы пролонгированы во времени, и сглаживание моренных структур поверхности происходит постоянно, изменяя ландшафт естественным мало заметным путём. Вмешательство человека, применяющего новые техногенные средства освоения пространства, ускоряет естественные процессы и позволяет увидеть существенные изменения в процессе деградации озёрных котловин в течение коротких временных рядов. Практика исследований показала, что водные структуры, расположенные в идентичных условиях формирования водного баланса единого ландшафтного комплекса, сформированного на однотипной морфолитогенной платформе и имеющие более чем на 50% схожие характеристики по типу воды не рентабельно изучать как единичные изолированные системы. Некоторые расхождения в характеристиках обычно касаются лишь незначительных флуктуаций видового состава гидробионтов или отклонений от стандарта ингредиентного химического состава при наличии, допустим, локальных источников поступления родниковых или сточных вод. Ландшафтный пространственный подход в первую очередь необходим при рассмотрении перспектив планирования территориального освоения, а также точного прогнозирования возможностей сохранения естественных водных объектов.

Таблица 1. Изменение количества озёр по муниципальным районам Республики Татарстан

№ п/п	Муниципальный район	Количество озёр		№ п/п	Муниципальный район	Количество озёр	
		1968 г.	2023 г.			1968 г.	2023 г.
1	Агрызский	260	211	23	Кукморский	32	53
2	Азнакаевский	444	237	24	Лаишевский	408	250
3	Аксубаевский	126	57	25	Лениногорский	63	19
4	Актанышский	298	259	26	Мамадышский	687	532
5	Алексеевский	349	120	27	Менделеевский	31	28
6	Алькеевский	594	343	28	Мензелинский	128	254
7	Альметьевский	146	71	29	Муслюмовский	478	443
8	Апастовский	318	181	30	Нижнекамский	655	370
9	Арский	79	19	31	Новошешминский	255	110
10	Атнинский	40	26	32	Нурлатский	310	230
11	Бавлинский	236	95	33	Пестречинский	244	128
12	Балтасинский	51	38	34	Рыбно-Слободский	178	136
13	Бугульминский	56	21	35	Сабинский	49	17
14	Буинский	257	177	36	Сармановский	38	23
15	Верхнеуслонский	43	127	37	Спасский	360	278
16	Высокогорский	165	125	38	Тетюшский	91	52
17	Дрожжановский	22	22	39	Тукаевский	65	100
18	Елабужский	621	304	40	Тюлячинский	70	24
19	Заинский	122	55	41	Черемшанский	69	10
20	Зеленодольский	426	227	42	Чистопольский	541	465
21	Кайбицкий	167	119	43	Ютазинский	364	243
22	Камско-Устьинский	120	22	44	Казань	-	285
Всего						10056	6906

Проанализированы три крупных ландшафтных комплекса озёр.

В первый обособленный ландшафтный комплекс площадью 73900 га входят звенья крупных озер Кабанной системы в границах г. Казани и озер Лаишевского муниципального района, в большинстве признанных особо охраняемыми природными объектами. Озерный комплекс расположен в зоне рельефа долины малых рек и

суходолов палеодолины Волги, вклинивающейся между подъемами III волжской террасы и направляющей поверхностный сток к югу в сторону Мешинского бассейна.

Второй комплекс расположен на обособленном участке супераквального ландшафта палеодолины Камы, где на площади 3350 га расположены 133 водоёма единого генезиса (Горшкова и др., 2024).

Третий проанализированный комплекс расположен на участке Волго-Свияжского водораздела на 37 га плоскогорного плато Вязовских гор, осложнённого выклиниванием карста тектонических поднятий Свияго-Улеминской ветви Вятско-Казанской плакантиклинали. На высоте 130 м БС исключительно за счёт питания артезианскими напорными водами, выклинивающимися по карстовым разломам расположена эксклюзивная серия Собакинских озёр (Горшкова и др., 2024).

В связи с возрастающим количеством запросов о подтверждении статуса водоёмов и водотоков, находящихся в границах г. Казань, организована работа по инвентаризации городских водоёмов, в результате которой идентифицировано 450 водоёмов против учтённых в 2000 г. в списках исполнительного комитета города 292. При этом 285 (63%) из общего количества водоёмов имеют естественное происхождение, оставшиеся – водоёмы антропогенного генезиса. Площадь городских водоёмов колеблется в пределах 0.01 га – 131 га. Обновлённые директории блока БД АСОВР по озёрам Республики Татарстан в современном варианте дополнены таким образом списком городских озёр, и при подготовке к печати дополненных и обновлённых новых кадастровых списков водных объектов Республики Татарстан, будет использована не только привязка по местности, но и координатноориентированная. Созданную по результатам инвентаризации городских водоёмов базу данных для работы в векторном формате ГИС рекомендуется обновлять чаще, чем периферийную, поскольку изменения экологического состояния объектов урбанизированной зоны более подвержены стрессовой деградации. Постепенно база пополняется информацией о качественном состоянии вод по результатам индексирования гидрохимического ингредиентного состава и анализа биоценотической ёмкости и экологической устойчивости среды. Обновлённые данные по водоёмам городской среды набрали высокий рейтинг спроса в связи с возросшим количеством проектных решений по развитию территорий и сохранением естественно-природного экологического каркаса. В настоящее время подготовлены рекомендации к публикации бюллетеня, как приложения к гидрографическому справочнику со списками и некоторыми характеристиками по внутренним водоёмам города для обеспечения доступа к информации для всех заинтересованных ведомств.

Следует заметить, что все внутригородские водные объекты согласно действующей версии ФЗ № 199 от 31.12.2005 г. 74-ФЗ ВК РФ (ред. от 08.12.2020 г. с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2025 г.), ст. 39 «Право собственности субъектов Российской Федерации и муниципальных образований на обособленные водные объекты (замкнутые водоемы)» были переданы в собственность исполнительных комитетов, и приоритет решения судьбы водных объектов определяли задачи Генеральных планов городов.

Городские озера значительно облагораживают ландшафт, и имеют большое культурное, рекреационное и историческое значение для Казани. Однако они подвержены сильному антропогенному воздействию, существенное ухудшение качества городских водных объектов вызывает поступление вод ливневой канализации и прямого поверхностного стока с техногенного перекрытого рельефа. Для сохранения водных природных объектов в черте города, безусловно, необходимо проведение полной инвентаризации и паспортизации всех водных объектов, включаемых в Программы оздоровления окружающей среды г. Казани. Также должна работать система мониторинга экологического состояния. Окончательным результатом работы должно

стать составление полного реестра водоемов Казани, а также нанесение малых водоемов на карты города.

Математический инструментарий информационной системы QGIS, используемой в настоящее время для работы АСОВР, позволяет оперативно получать достоверную информацию о морфометрических показателях структурных компонентов речной и озёрной сетей, проводить анализ морфолитогенной основы территориального расположения водных объектов, проводить расчёты склоновой эрозии, что в совокупности с архивными табличными и картографическими материалами позволяет оценивать как экологические ситуации, так и прогнозировать гидроэкологическую обстановку в любых границах оперативно-территориальных единиц. Техногенный прессинг эпохи интенсивного экономического развития и тотального преобразования территориального пространства затрагивает практически все природные механизмы функционирования экологического каркаса окружающей среды. При этом наблюдается ускоренное протекание географических процессов; в десятки, а то и в сотни раз быстрее пропадают и появляются реки и озёра, подтапливаются и заболачиваются пойменные участки речных бассейнов или, наоборот, обезвоживаются обширные водосборные территории. Скоростные изменения гидрографической сети особенно чётко проявляются в пределах вновь образованных бассейнов водохранилищ, воздействие подпора которых пролонгировано во времени и пространстве. Результаты геоинформационного пространственного анализа позволяют сегодня не только находить объяснение происходящих на подстилающей поверхности земли неординарных процессов, но и прогнозировать развитие ситуации на будущее.

В рамках совершенствования управления АСОВР разрабатываются новые методологические алгоритмы математического многофакторного и покомпонентного анализов, разработки критериев ранжирования и районирования бассейновых пространств, оценки качества и количества поверхностного стока, новых подходов к моделированию гидрогеоэкологических ситуаций. Все составляющие наработки интегрируются и используются в нужных вариантах ситуационной оценки. Решенные задачи, обеспеченные специализированными программными модулями, работающие на сформированных структурированных под них матрицах баз данных, являются самостоятельными разработками, защищаемыми патентами. В перспективе вся совокупность информации баз данных АСОВР будет использована для создания единой геоинформационной покомпонентной гетерогенной пространственно-координированной системы обработки информации.

Таким образом, преобразование речных и озерных комплексов обусловлено как естественными, так и антропогенными факторами, ускоряющими процессы трансформации водных объектов. Накоплен большой объем результатов многолетних исследований по водным объектам территории Республики Татарстан, систематизированных по отдельным блокам базы данных автоматизированной системы оценки водных ресурсов (АСОВР) и обеспеченной специализированными программными модулями. В настоящее время блок базы данных по озерам содержит 6906 наименований, и в ближайшее время будет готов к переизданию.

Литература

Водные объекты Республики Татарстан. Гидрографический справочник. Казань: ОАО «ПИК «Идель-пресс», 2006. 504 с.

Горшкова А.Т. Влияние водохранилищ на формирование поверхностного и подземного стока территории Республики Татарстан // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2019. №4. С. 64-67.

Горшкова А.Т., Горбунова В.П., Рыков Р.А., Бортникова Н.В., Семанов. Д.А. Особенности генезиса и геоэкологического развития карстовых озёр Вязовских гор Республики Татарстан // Успехи современного естествознания. 2024. №10. С. 37-42.

Горшкова А.Т., Рыков Р.А., Бортникова Н.В., Семанов Д.А., Горбунова В.П. Генезис озер однотипных ландшафтов речных долин территории республики Татарстан // Успехи современного естествознания. 2024. №6. С. 50-56.

Горшкова А.Т., Урбанова О.Н., Бортникова Н.В., Валетдинов А.Р. Изменения условий и характера формирования речного стока на территории Республики Татарстан в XXI в. // Вопросы географии. Гидрологические изменения Сб. 145 М.: Издательский дом «Кодекс», 2018. С. 219-232.

Горшкова А.Т., Урбанова О.Н., Ионова Ю.С. Белый уголь Республики Татарстан. XXI век // Сб. научных трудов ИПЭН АН РТ. Казань: Отечество, 2014. 528 с.

Кадастр озер Татарской АССР. Т. II. Пойменные и лесные озёра. Казань, 1969. 272 с.

Ресурсы поверхностных вод. Гидрологическая изученность. Т. 12. Нижнее Поволжье и Западный Казахстан. Вып. 1. Нижнее Поволжье. Л.: Гидрометеоиздат. 1966. 287 с.

Озера Среднего Поволжья. Л.: Наука, 1976. 236 с.

HYDROGRAPHIC STUDIES OF LAKES IN THE REPUBLIC OF TATARSTAN

A.T. Gorshkova, V.P. Gorbunova, R.A. Rykov, N.V. Bortnikova, D.A. Semanov

The article examines the spatial and temporal changes in the number and morphometric characteristics of the lakes of the Republic of Tatarstan, their genesis and modern environmental problems. The data on changes in the lake fund of the republic over the past 55 years, the causes of degradation of natural reservoirs, the influence of anthropogenic factors and climatic changes are presented. Special attention is paid to the inventory of reservoirs using GIS technologies and the assessment of surface water quality. Recommendations for the conservation and monitoring of lakes are proposed.

МОРСКИЕ ВОДОЕМЫ СЕВЕРА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ, ОТДЕЛЕННЫЕ ОТ МОРЕЙ ФИЛЬТРУЮЩЕЙ ДАМБОЙ

Н.А. Демиденко[1,2], А.С. Саввичев[3]

[1]Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН,

[2]Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова

[3]Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского ФИЦ Биотехнологии РАН

Результаты исследований гидрологических и микробиологических условий в меромиктических озерах на разных этапах изоляции искусственно отделенных водоемов губы Канда от Кандалакшского залива железнодорожной фильтрующей дамбой и опыт эксплуатации Кислогубской ПЭС является важным фактором при прогнозировании зарождения сероводородного заражения в придонной воде и в верхнем слое донных отложений при отделении акваторий от морских бассейнов, проектированию Северной ПЭС в губе Долгой Баренцева моря и экологическим последствиям сооружения защитных плотин, эстакад и насыпей при прокладке дорог. Целью настоящего исследования было получение количественных гидрологических характеристик и

интенсивности микробных процессов циклов углерода и серы в водной толще губы Канда и Кислой.

Гидрологические, гидрохимические и экологические исследования в морских изолированных бассейнах становятся все более актуальными в связи с возрастающим влиянием хозяйственной деятельности человека, в первую очередь на прибрежные экосистемы. Морское гидротехническое строительство – сооружение защитных дамб и плотин, эстакад и насыпей для прокладки дорог, создание рабочих бассейнов приливных электростанций (ПЭС) и т.п. – связано во многих случаях с необходимостью отсечения морских заливов, эстуариев, полузакрытых участков прибрежных акваторий и сопровождается уменьшением их естественного водообмена с морем. К искусственно изолированным морским акваториям относятся бассейны приливных электростанций, заливы и эстуарии, защищаемые дамбами от наводнений, отсекаемые железнодорожными и автомобильными насыпями, рыбоводные садки и т.д.

Морские полузакрытые бассейны отличаются высокой биологической продуктивностью и большими запасами хозяйственно ценных растений и животных. Перекрытие эстуариев может приводить к сокращению и полному исчезновению популяций проходных рыб, ограничению их ареалов. В промышленных районах изоляция части морского бассейна приводит к увеличению в воде загрязняющих веществ. При критической величине снижения водообмена в зарегулированных бассейнах могут происходить необратимые повреждения экосистем и полная потеря биологических ресурсов – макрофитов, моллюсков, рыб и т.п.

В связи с более быстрым протеканием процессов в искусственных морских бассейнах, их исследование может послужить моделью при реконструкции изменений прибрежных экосистем на разных этапах природной изоляции от моря полузакрытых водоемов. В северных широтах известно немало морских водоемов, находящихся на разных этапах естественной изоляции от основного, более крупного морского бассейна. Акватории, отделяющиеся от моря естественным путем, часто представляют собой глубоко врезанные в сушу узкие морские заливы, губы, эстуарии, фьорды и фиарды, а также их вершины и боковые ответвления.

В меромиктических водоемах с повышенной стратификацией, водообмен которых с открытым морем затруднен мелководным порогом или иной преградой, в результате деятельности бактерий–сульфатредукторов в донном осадке и в воде котловины может накапливаться сероводород. Осадок заражен обычно сильнее, чем вода, имеет на поверхности черный налет. Черный цвет по всей его толще указывает на постоянство заражения. Примером крайнего проявления такой изоляции водоема может служить оз. Могильное на о. Кильдин в Баренцевом море, которое отделено от моря естественной фильтрующей перемычкой (Реликтовое …, 1975).

В естественных морских водоемах с узким горлом и мелководным порогом, приводящим к понижению водообмена с морем, отмечается наличие сероводорода в придонном горизонте, но сохраняется в целом морской облик флоры и фауны. К таким водоемам можно отнести детально исследованные меромиктические озера–«изгои» в окрестностях Беломорской биостанции МГУ им. Н.А. Перцова (Краснова, Мардашова, 2020).

Искусственно отсеченные водоемы с полностью или частично уменьшенным водообменом образовались в неглубоких прибрежных лагунах ковшового типа на о. Большой Соловецкий, оз. Большие Хрусломины и оз. Банное на побережье Кандалакшского залива на о. Олений в губе Ковда, отделенные от моря искусственной дамбой в 1897 г. для целей опреснения и использования паровыми машинами лесозавода, губы Канда в вершине Кандалакшского залива Белого моря с 1916 г. после строительства

железнодорожной дамбы и с середины 60-х годов XX в. после строительства автомобильной трассы (рис. 1а) (Саввичев и др., 2017; 2023), в губе Кислой Баренцева моря (Западный Мурман) после строительства в 1965–1968 гг. Кислогубской приливной электростанции (Марфенин и др., 1995; Семенов, 1988).

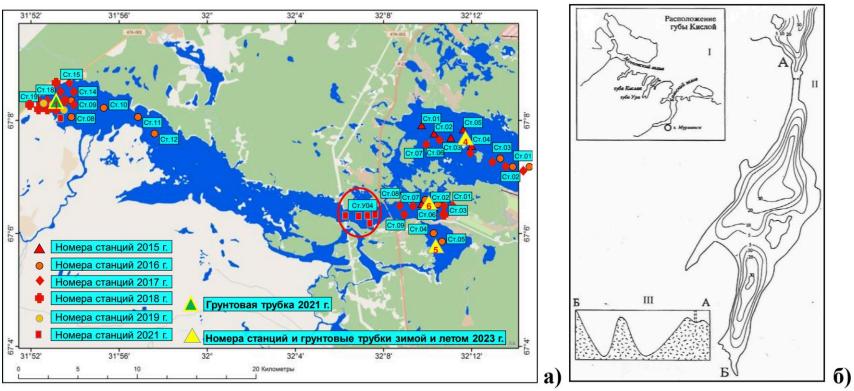


Рис. 1. Схема губы Канда и Кандалакшского залива с номерами гидролого-биологических станций 2015–2024 гг. (а). Местоположение Кислогубской ПЭС в Баренцевом море (I), карта глубин в изобатах (II), профиль губы Кислой (III), горло и кутовая часть губы (А, Б), пунктир – створ плотины (б)

Гидрологический режим губы Канда – это сложный и сжатый во времени техногенный вариант процесса отчленения от моря системы крупных озер. Большинство больших и малых озер, расположенных вблизи побережья Кандалакшского залива, по происхождению являются участками морских акваторий. Губа Канда – единственный крупный водоем, где этот процесс можно наблюдать в промежуточной стадии, когда устойчиво существуют пресноводные и морские водные массы. По характеру протекания микробных процессов губа Канда подобна о. Могильному на о. Кильдин (Реликтовые …, 1975). В конечном итоге на месте губы Канда будут меромиктические и пресноводные озера. Результаты исследований гидрологических и микробиологических условий в озерах на разных этапах изоляции водоемов губы Канда от Кандалакшского залива железнодорожной фильтрующей дамбой получены за зимние и летние периоды 2015–2024 гг. (Саввичев и др., 2017; 2023).

Гидрологическую структуру, состав, видовое разнообразие, численность и распределение фито- и зоопланктона, бентосное сообщество изучали по материалам собранным в августе 1991–1994 гг. в отсеченном бассейне Кислогубской приливной электростанции (ПЭС) и в водах, прилежащих к плотине со стороны моря, мелководной части губы Ура, Мотовского залива Баренцева моря (Марфенин и др, 1995; Семенов, 1988). В зимний период 2024 г. изучались гидрологические условия и микробные процессы в отделенной от моря губе Кислой (рис. 1б).

Бассейн опытной Кислогубской приливной электростанции (ПЭС) – это губа Кислая, представляющая собой вытянутую узкую акваторию 3,2 км длиной с площадью 1,1 км^2 с сужением в устье (горлом) до 65 м шириной и до 10 м глубиной. Дно акватории имеет две котловины: *верховую,* расположенную ближе к основанию губы, и *низовую*, ближе к выходу из губы (каждая глубиной до 36 м), разделенную между собой высоким

порогом глубиной около 5 м. В кутовую часть губы впадает небольшой ручей, несущий воду из ближайшего озера. До сооружения Кислогубской ПЭС (в 1965–1968 гг.) водообмен с морем был свободный, прилив – правильный полусуточный. В 1968 г. была сдана в эксплуатацию первая и пока единственная в России экспериментальная ПЭС.

Проведенные в 1991–1994 гг. исследования ученых ПИНРО, ММБИ и МГУ им. М.В. Ломоносова и сотрудников Института микробиологи им. С.Н. Виноградского и Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН зимой 2024 г. показали изменения гидрологических характеристик водоема: уменьшилась амплитуда приливов и их цикличность, сильно опреснился поверхностный слой воды, прекратился водообмен между поверхностными и глубинными водами, изменился ледовый режим. Бентосные исследования констатировали деградацию донного населения: на месте прежнего морского литорального было обнаружено солоноватоводное сообщество, полностью исчез богатейший пояс макрофитов, резко сократился качественный и количественный состав бентоса, глубже 20 м донное население вымерло в результате сероводородного заражения. Следовательно, губа Кислая по своим природным особенностям относится к категории бассейнов, изолированных от моря (Семенов, 1988).

До строительства Кислогубской ПЭС исследователи отмечали богатство и разнообразие донной фауны всех биотопов. Биота имела морской облик, солоноватоводные элементы обитали в вершине губы. Постоянное население и растительность составляли 210–220 видов, обычных для губ Мурмана. В результате зарегулирования губы Кислой значительно усилилось действие природных факторов, которые и ранее отрицательно влияли на морские компоненты биоты. Опреснение резко увеличивалось при снижении водообмена до 20% и ниже во время неправильной двухсменной эксплуатации ПЭС и длительных ее остановок при закрытых водоводах. Во время строительства ПЭС устье губы 4 года было перекрыто дамбой, и бассейн ПЭС превращался в пресноводно-морской меромиктический водоем (Семенов, 1988). Спустя 20 лет, следы сильного опреснения прослеживались по морской биоте (отсутствие литотамния, мертвая ракушка и др.). Признаки сероводородного заражения вод и донных осадков отмечались и в средней части бассейна, и в его вершине глубже 15–20 м. Морская фауна сохранилась на глубинах от 3–5 до 12 м большей частью в биоценозе ветвистого литотамния (Марфенин и др., 1995; Семенов, 1988).

В бассейне ПЭС один из сильнейших факторов, отрицательно влияющих на литоральную биоту и продуктивность экосистемы в целом – это техногенная трансформация прилива, приводящая к длительному осушению верхнего и затоплению нижнего отделов литорали. Она связана с неодинаковой водопропускной способностью ПЭС при работе в прилив и отлив, что приводит к повышению среднего уровня бассейна по меньшей мере дважды в месяц в периоды сизигийных приливов. Обитаемая осушная зона сокращается при этом в несколько раз, большая часть экологических литоральных комплексов не выживает. При стабильной работе ПЭС началось формирование в новых границах литоральных сообществ. В вершине губы сероводород в воде отмечался глубже 30 м, в донных осадках – с 20 м. Число макрофитов достигло первоначальной величины 33 видов. В верхней части литорали выживают виды, обитающие в грунте, выдерживающие длительное осушение или способные к перемещению. С момента полного прекращения работы Кислогубской ПЭС в 2023 г. и открытии водоводов происходит свободный водообмен с прилегающей акваторией моря. Экспедиционные исследования в апреле 2024 г. показали исчезновение сероводородного слоя в придонной части бассейна ПЭС и наличие остаточного количества сероводорода в верхней части донных осадков, в основном, в виде гидротроилитов. Производится дальнейшее исследование гранулометрического, геохимического и минералогического состава донных осадков.

В бассейне Баренцева моря в губе Долгой-Восточной ведутся изыскания и проектные работы по строительству Северной приливной электростанции (Северной ПЭС). Губа Долгая представляет собой удлиненный, ориентированный с северо-востока на юго-запад фьордоподобный залив Мурманского побережья Кольского полуострова, вдающийся в берег на 5,5 км. Губа относится к полнооборотным заливам, так как морские воды распространяются до ее вершины за один приливный цикл. Самая глубоководная (глубина 96 м) часть губы Долгой расположена к югу-востоку в 2 км от устья. Несмотря на наличие глубокой котловины и порога, естественную вентиляцию придонных слоев губы можно считать недостаточной для полного окисления сероводорода, который образуется в результате жизнедеятельности бактерий–сульфатредукторов, значительное количество которых характерно для губ Баренцева моря. Приток пресных вод в бассейн ПЭС в период весеннего половодья из р.Долгой и ручья приведет к распреснению верхнего слоя воды, формированию устойчивой стратификации и сероводородному заражению нижних слоев фиорда.

В связи с более быстрым протеканием биологических процессов в искусственных морских бассейнах из-за влияния технических сооружений на гидрологические характеристики водоемов: уменьшения амплитуды приливов, опреснения поверхностного слоя морской воды, частичного прекращения водообмена между поверхностными и глубинными водами, формирования устойчивой стратификации, изменения ледового режима, исследование антропогенных меромиктических водоемов может послужить моделью при реконструкции изменений на разных этапах изоляции прибрежных экосистем при увеличении природной изоляции от моря полузакрытых водоемов.

Исследования выполнены в ИО РАН в рамках Госзадания №FMWE–2024–0020.

Литература

Краснова Е.Д., Мардашова М.В. Как морской залив превращается в озеро // Природа. 2020. №1. С. 16–27.

Марфенин Н.Н., Малютин О.И., Пантюлин А.Н., Перцова Н.М., Усачев И.Н. Влияние приливных электростанций на окружающую среду. М.: МГУ, 1995. 125 с.

Реликтовое озеро Могильное. Л.: Наука, 1975. 298 с.

Саввичев А.С., Демиденко Н.А., Кадников В.В., Беленкова В.В., Русанов И.И., Горленко В.М. Состав микробных сообществ как индикатор состояния водоемов, расположенных на морском побережье (на примере залива Канда, Кандалакшский залив Белого моря) // Микробиология. 2023. Т. 92, №6. С. 595–608.

Саввичев А.С., Демиденко Н.А., Краснова Е.Д., Калмацкая О.В., Харчева А.И., академик РАН Иванов М.В. Микробные процессы в губе Канда – меромиктическом водоеме, искусственно отделенном от Белого моря // ДАН. 2017. Т. 474, №5. С. 637–641.

Семенов В.Н. Классификация морских бассейнов бореально-арктической зоны: экологический подход. Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1988. 26 с.

THE MARINE BASINS IN THE NORTH OF THE EUROPEAN TERRITORY OF RUSSIA, SEPARATED FROM THE SEA BY THE FILTRATED DAM

N.A. Demidenko, A.S. Savvichev

The results of studies of hydrological and microbiological conditions in meromictic lakes at different stages of isolation artificially separated reservoirs of Kanda bay from the Kandalaksha gulf by a railway filtration dam and the experience of operation of the Kislogubskaya TPP is

an important factor in predicting the origin of hydrogen sulfide contamination in the bottom water and in the upper layer of bottom sediments when separating areas from sea basins, the design of the Severnaya TPP in the Dolgaya bay of the Barents Sea and the environmental consequences of the construction of protective dams, trestles and embankments during the construction of roads. The aim of this study was to obtain quantitative hydrological characteristics and of the intensity of microbial processes of carbon and sulfur cycles in the water column of Kanda and Kislaya bays.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАНДШАФТНОГО ПОДХОДА И СОВРЕМЕННЫХ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ В МОНИТОРИНГЕ СОСТОЯНИЯ КРУПНЫХ ОЗЕР НА ПРИМЕРЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Д.С. Дудакова, В.М. Анохин
Институт озероведения РАН – Санкт-Петербургский ФИЦ РАН

Для Ладожского озера известны участки наиболее активного антропогенного воздействия, требующие продолжающихся наблюдений для оценки динамики их изменений. Ландшафтный подход и применяемый спектр современных дистанционных методов позволяет дополнить данные, получаемые с помощью стандартных биологических и гидрохимических методов. В подводном ландшафтоведении широко используются подводная и аэро-видеосъемка, а также гидроакустическое сканирование поверхности дна. В наших исследованиях Ладожского озера с использованием этих методов были получены данные о состоянии донных ландшафтов на всей акватории озера в целом и на участках антропогенного влияния, в частности. В ходе проведенной работы показаны достоинства ландшафтного подхода, предоставляющего возможность получать площадные оценки с помощью составленных крупномасштабных ландшафтных карт для анализа и оценки масштабов трансформации дна, а также дающего способы непосредственного наблюдения за объектами загрязнения, выявления формы изменения донных природных комплексов в зонах антропогенного воздействия при мониторинге состояния водоема.

Ладожское озеро является важным природным и хозяйственным объектом, что определяет потребность в мониторинге его экологического состояния. Рядом организаций, в том числе Институтом озероведения РАН подобный мониторинг проводится уже многие десятилетия (80 лет…, 2023). Большой интерес представляет расширение методов исследования, использование новых современных подходов. В частности, мало проработанным для крупных озер является ландшафтный подход, в рамках которого появляется возможность пространственной оценки местообитаний для биологических сообществ (расчеты запасов биологических ресурсов) через картирование биотопов и учет промысловых и кормовых видов, а также оценка пространственно-временных изменений состояния донной среды в местах наличия источников негативного воздействия и трансформации подводной среды в местах, наиболее подверженных антропогенному влиянию.

Среди современных методов подводного ландшафтоведения широко используется дистанционное зондирование, в частности фотовидеосъемка с подводных аппаратов, акустическая съемка с гидролокаторов бокового обзора и многолучевых эхолотов, аэросъемка прибрежной акватории (Изучение…, 2005; Петров, 2014).

Планомерные исследования донных ландшафтов с крупномасштабным картированием отдельных ландшафтных выделов начали проводится в институте

озероведения с 2014 г. (Дудакова и др., 2021). На настоящий момент используется весь комплекс современных дистанционных методов. Исследованиями охвачена вся акватория Ладожского озера от мелководного прибрежья до максимальных глубин на глубоководных впадинах. Массив полученных данных, на который опираются сведения о донных ландшафтах озера, включают 219 станций подводной видеосъемки дна (по результатам исследований 2014-2024 гг.), 101 видеопрофиль (протяженностью в среднем порядка 1 км каждый) со сплошной видеосъемкой дна и точной координатной и глубинной привязкой (диапазон глубин от 0,5 до 230 м), 45 участков аэрофотосъемки с БПЛА по всей береговой зоне Ладожского озера и его островов (2014-2017 гг.), 19 полигонов гидроакустических исследований (площадью до 2 км^2) с ГЛБО с получением мозаик сонограмм в прибрежной зоне до глубин от 0 до 30 м (2022-2024 гг.).

Имеющиеся данные позволяют провести типирование естественных природных ландшафтов разных частей и зон Ладожского озера. Это является фоном для выявления формы и характера нарушений на участках, подвергаемых изменениям при различных природных и антропогенных воздействиях. Для мониторинга негативных процессов в водных экосистемах особенно важно выявить изменения, происходящие в ландшафтах, в местах, наиболее опасных с точки зрения антропогенного влияния. Для Ладожского озера особенно выделяется прибрежная зона, являющаяся буферной переходной зоной между наземными и водными экосистемами (Литоральная …, 2011). Она первую очередь принимает поток вредных веществ и объектов от промышленных предприятий, рассеянных антропогенных источников и хозяйственной деятельности человека на акватории озера. В этой связи целью данной работы было выявление возможностей различных методов дистанционного зондирования при оценке антропогенного воздействия и состояния прибрежной зоны Ладожского озера в рамках ландшафтного подхода.

Как показали проведенные исследования, наиболее информативным является совмещение комплекса дистанционных методов, когда появляется возможность исследовать элементы ландшафтов в разных пространственных масштабах. Так подводная видеосъемка выявляет особенности мелких деталей: нанорельефа, характера поверхности и типа донных отложений, вплоть до отдельных абиотических и биотических объектов (твердые обломки: галька, мелкие валуны, отдельные живые организмы – моллюски, ракообразные и представители прочих таксонов, следы их жизнедеятельности), отдельных элементов антропогенного загрязнения, как например, твердые бытовые отходы. Гидролокация и аэросъемка позволяют охватить гораздо большие площади дна и выявить характер пространственного распределения более крупных структур, формирующих характер донных ландшафтов, такие, например, как зарастания макрофитами, подводные скальные выходы, подводные песчаные валы т.д.

Примеры элементов, связанных с антропогенным прессом на акваторию водоемов, которые выявляются данными методами, приведены на рисунке 1. Видеопрофилирование дна позволяет выявлять и учитывать отдельные объекты, относящиеся к категории твердых бытовых отходов (полимеры, отходы металлов, стекло, текстильные отходы, бумага, резина, отходы смешанного состава, в частности рыболовные сети, доски, фанера, опилки) (Рис. 1В: 3-5) (Дудакова и др., 2021), выявлять визуальный характер изменения поверхности дна и чрезмерного развития нехарактерных для естественных условий бактериальных / бактериально-водорослевых пленок, цвет и форма которых отличаются от естественного донного осадка и хорошо заметны на подводных фотоснимках (Рис. 1В: 7-8), обнаруживать последствия токсического воздействия стоков предприятий, вызывающих заморы ихтиофауны (Рис. 1В: 6). Акустическое сканирование и аэросъемка дают возможность производить пространственную оценку имеющемуся антропогенному воздействию, оценивать

масштаб явления, рассчитывать площадь занятую трансформированным дном или частоту встречаемости инородных объектов (Рис.1А, Б). Так, при анализе мозаик сонограмм было выявлено, что изменение характера дна (появление бактериальной пленки и повышенное накопление наилка) под садками форелевых хозяйств в летний период и в максимально интенсивный период производственного цикла (когда на дно происходит поступление органического вещества от остатков кормов и рыбных фекалий) выявляется радиусе в несколько десятков метров от них (Рис.1А: 1). На ландшафтных схемах такое трансформированное дно выделяется в отдельную фацию и на обследованных нами участках занимало до 10% площади обследованной акватории. При исследовании влияния на донные ландшафты форелевых хозяйств для уточнения распределения садков по исследуемому участку акватории и для их координатной привязки при последующем картировании важным источником информации являются снимки, полученные при аэрофотосъемке (Рис. 1А: 2).

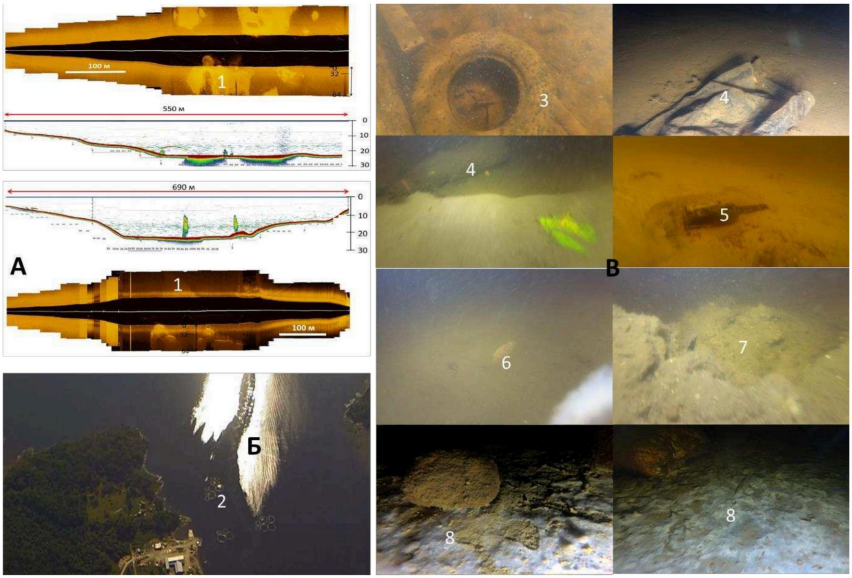


Рис. 1. Вид и элементы трансформированных донных ландшафтов, полученные при помощи различных дистанционных методов: А – гидроакустическая съемка дна в районе форелевых садков; Б – аэрофотосъемка с БПЛА в районе прибрежного участка акватории с форелевыми садками; В – видео-фотосъемка с подводного аппарата участков дна с объектами загрязнения твердыми бытовыми отходами (3-4), дном, загрязненным стоками ЦБК (6-7) и дно под форелевыми садками (8)

Приведенные примеры показывают высокую значимость и информативность методов дистанционного зондирования при мониторинге состояния крупного водоема с использованием ландшафтного подхода. Они позволяют оценивать, как точечные, так и рассеянные площадные изменения характера дна и структуры элементов донных ландшафтов. Получаемая информация пригодна для построения крупномасштабных ландшафтных карт с выделением антропогенно измененных элементов и расчета их

площадей, что невозможно сделать с помощью стандартных методов биологических и гидрохимических исследований, которые, однако, в свою очередь могут дать количественную информацию о состоянии среды и экосистемы водоема. Совокупность данных подходов позволяет осуществлять полноценные наблюдения за состоянием водной среды и может применяться для оценки и прогноза последствий загрязнения различного рода предприятий на акватории Ладожского озера и его мониторинга.

Публикация подготовлена при поддержке Гостемы ИНОЗ РАН–СПб ФИЦ РАН № FFZF-2024-0001 «Экосистемы Ладожского озера, водоемов его бассейна и прилегающих территорий в условиях воздействия природных и антропогенных факторов на фоне климатических изменений».

Литература

80 лет развития лимнологии в Институте озероведения Российской академии наук. М.: РАН, 2023. 263 с.

Дудакова Д.С., Анохин В.М., Дудаков М.О. Загрязнение мелководного донного ландшафта твердыми бытовыми отходами // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. М.: РАН, 2021. С. 529-533

Дудакова Д.С., Анохин В.М., Дудаков М.О. Донные ландшафты Ладожского озера // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. М.: РАН, 2021. С. 136-146.

Изучение экосистем рыбохозяйственных водоемов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи и переработки. Вып. 3. Методы ландшафтных исследований и оценки запасов донных беспозвоночных и водорослей морской прибрежной зоны. М.: Изд-во ВНИРО, 2005. 135 с.

Литоральная зона Ладожского озера. СПб.: Нестор-История, 2011. 416 с.

Петров К.М. Развитие комплексных исследований подводных ландшафтов // Известия РАН. Сер. географическая. 2014. №1. Р. 100-108.

THE USE OF A LANDSCAPE APPROACH AND MODERN REMOTE METHODS IN MONITORING THE CONDITION OF LARGE LAKES ON THE EXAMPLE OF LAKE LADOGA

D.S. Dudakova, V.M. Anokhin

The areas of the most active anthropogenic influence are known for Lake Ladoga and require ongoing observations to assess the dynamics of their changes. The landscape approach and the range of modern remote methods used make it possible to supplement the data obtained using standard biological and hydrochemical assessments. Underwater and aerial video photography, as well as sonar scanning of the bottom surface, are widely used in underwater landscape science. In our studies of Lake Ladoga using these methods, we obtained data on the state of bottom landscapes in the entire lake area in general and in areas of anthropogenic influence, in particular. In the course of the work carried out, the advantages of the landscape approach are shown, which makes it possible to obtain area estimates using large-scale landscape maps for analyzing and assessing the extent of bottom transformation, as well as providing ways to directly monitor pollution objects and identify the form of changes in underwater natural complexes in anthropogenic impact zones when monitoring the state of a reservoir.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПРОДУКТИВНОСТИ ВОДОЕМОВ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО МОНИТОРИНГА СОДЕРЖАНИЯ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА

О.Н. Ерина, С.И. Полухин, Д.И. Соколов
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Несмотря на высокую значимость озерных экосистем России, их экологическое состояние ухудшается под влиянием антропогенной нагрузки. Исследование параметров метаболизма Можайского водохранилища и озера Глубокое на основе автоматических логгеров кислорода выявило преобладание гетеротрофного режима, усиливающегося в условиях эвтрофикации. Пики продуктивности связаны с сезонной сукцессией фитопланктона и гидрометеорологическими изменениями. Применение высокочастотного мониторинга подтвердило его эффективность для оценки динамики продукционно-деструкционных процессов, критически важной для управления водоемами в условиях растущей экологической напряженности.

В последние десятилетия водоемы по всему миру испытывают серьезные экологические проблемы (эвтрофирование, снижение биоразнообразия, загрязнение вод). При этом временная неоднородность этих процессов крайне высока, интенсивность «цветения» водоемов может изменяться за считанные дни. В данном контексте особую значимость приобретает изучение короткопериодных колебаний экологического состояния водоемов, поскольку они позволяют выявить факторы, вызывающие изменения. При проведении таких исследований одним из ключевых понятий, определяющим экологическое состояние водоемов, является метаболизм их экосистем.

Для водных объектов под метаболизмом часто понимается баланс между процессами образования (валовая первичная продукция (GPP)) и биологическим окислением углерода (дыхание экосистемы (R)). Разницу между GPP и R называют чистой продукцией (NEP). В масштабах экосистемы оценки параметров метаболизма могут давать представление о балансе углерода и будущих изменениях экологического состояния водоемов (Batt et al., 2013).

Так как метаболизм водной экосистемы не может быть измерен напрямую, наибольшую популярность приобрели методики, основанные на измерении концентраций растворенного кислорода (РК) в течение суток. Метод суточных концентраций РК предполагает, что изменение концентрации кислорода происходит в результате его поступления в процессе фотосинтеза и потребления в процессе дыхания и деструкции. Продуцирование кислорода происходит только в светлое время суток, тогда как потребление – в течение всего дня.

Традиционным вариантом реализации данного метода принято считать скляночный или метод Винберга. Однако данный метод имеет ряд недостатков. Первым и главным можно считать его трудоемкость, так как он требует постоянного ручного закрепления склянок в водоеме, а также выполнения большого объема лабораторных анализов. Кроме того, метод дает дискретные оценки, что затрудняет его применение для изучения суточной динамики продукционных процессов. Еще одним недостатком является так называемый «скляночный эффект» – использование сосудов разного объема и материала, что может влиять на процессы газообмена и фотосинтеза (Винберг, 1971). В результате данные, полученные в разных исследованиях и для различных водоемов, часто сложно сопоставимы.

Однако с появлением автоматических логгеров регистрация концентрации РК стала возможна с большей дискретностью, а их использование позволило создать

единую методическую основу для исследований по всему миру, что значительно упростило сопоставление составляющих метаболизма различных водоемов между собой. Также в последние годы начали активно разрабатываться и публиковаться модели с открытым кодом, позволяющие оценивать параметры озерного метаболизма на основе автоматизированных измерений (Winslow, et al., 2016). При этом в России подобные исследования носят единичный характер и как правило ограничиваются одним или несколькими месяцами в течение одного года.

Объектами исследования работы являются озеро Глубокое и Можайское водохранилище, которые расположены в квазиоднородных природных условиях.

Можайское водохранилище находится на западе Московской области на территории Можайского района. Оно было образовано в 1960 г. в верховьях р. Москвы и входит в Москворецкую систему водоснабжения г. Москвы. Водохранилище относится к морфологически простым долинным водоемам, его протяженность составляет 28 км, площадь его зеркала при нормальном подпорном уровне (НПУ = 183 м БС) равна 30.7 км^2, а объем – 235.2 млн м^3. Средняя глубина – 7,6 м (Комплексные…, 1979). Можайское вдхр. является слабопроточным, среднегодовой коэффициент водообмена составляет 1.8 год$^{-1}$. Трофический статус по значениям первичной продукции и соответствует эвтрофным водоемам.

Озеро Глубокое расположено на территории одноименного государственного природного заказника в Рузском районе Московской области, в 90 км к западу от Москвы. Водосбор озера отличается малой антропогенной нарушенностью, что для Московского региона в настоящее время является редкостью. Максимальная длина озера составляет 1200 м, ширина – 850 м, максимальная глубина достигает 32 метров, средняя глубина – 9.3 м. Площадь зеркала составляет 593 тыс. м^2, объем – около 5.5 млн м^3. Вода в озеро поступает преимущественно из болот и канав. Трофический статус озера Глубокого по значениям первичной продукции соответствует малопродуктивным мезотрофным водоемам (Щербаков, 1967).

В основу работы легли данные, собранные при помощи автоматических регистраторов содержания растворенного кислорода PME miniDOT, установленных сотрудниками Красновидовской УНБ на Можайском водохранилище и озере Глубоком в течение периода открытой воды 2020–2023 гг. Логгеры были установлены в наиболее глубоких частях водоемов на глубине 0.5 м, с дискретностью записи содержания растворенного кислорода 1 раз в 10 минут. Среди фиксируемых логгером параметров: концентрация РК в мг/л и % насыщения, а также температура воды. Списывание данных, а также очистка датчиков проводились одновременно с проведением гидролого-гидрохимических съемок, примерно 1 раз в месяц. Дополнительно при анализе внутригодовой динамики использовались данные режимных наблюдений метеостанции г. Можайск за 2020-2023 гг.

Для оценки параметров метаболизма был использован пакет LakeMetabolizer на языке программирования R в среде R.studio. Этот пакет предназначен для расчетов компонентов внутриводного дыхания и первичной продукции на основе автоматизированных измерений концентраций растворенного кислорода. Основными входными данными являются: концентрации РК (мг/л), температура воды (°C), скорость ветра (м/с), глубина слоя перемешивания Z_{mix} (м). Последняя определялась за каждый день экспозиции по данным температурных кос, установленных на тех же плавучих станциях, что и кислородные логгеры.

Более подробно уравнения, используемые при расчете параметров озерного метаболизма описаны в (Winslow et al., 2016).

В настоящей работе была изучена динамика трех показателей озерного метаболизма: валовая первичная продукция GPP, затраты на дыхание R и чистая

первичная продукция NEP за 2020-2023 гг. в двух водоемах. Для начала рассмотрим характерные картины распределения по месяцам.

Наибольшие среднемесячные показатели GPP в Можайском водохранилище были зафиксированы в мае (3.3 мгO_2/л·сут). Это обусловлено, с одной стороны, весенним прогревом воды, а с другой — поступлением биогенных элементов с речным стоком в половодье, которые приводят к активному развитию холодолюбивых диатомовых водорослей. Однако деструкция в среднем превышает первичную продукцию (3.46 мгO_2/л·сут), что свидетельствует о непродолжительности весенней «вспышки» цветения. В дальнейшие месяцы величина первичной продукции снизилась, а деструкция росла, что связано с установлением прямой температурной стратификации, ограничивающей вертикальный массообмен и лимитирующей первичную продуктивность. Наименьшие значения GPP в Можайском вдхр. наблюдались в сентябре (1.46 мгO_2/л·сут), что связано с охлаждением эпилимниона и неблагоприятными синоптическими условиями, ограничивающими активность фитопланктона. Анализируя показатели NEP, можно сделать вывод, что в среднем, для экосистемы приплотинного района водохранилища характерен гетеротрофный режим. Особенно это заметно в июне в период «чистой воды», когда разница между R и GPP максимальна. Летом деструкция остаётся высокой ввиду высокой температуры воды – ключевого фактора, определяющего интенсивность данного процесса.

Для озера Глубокого наибольшие средние значения GPP достигаются в августе, однако на протяжении всего рассматриваемого периода они остаются низкими (0.60-0.76 мгO_2/л·сут). Это обусловлено отсутствием речного притока в озеро и низким содержанием питательных веществ в воде. В отличие от первичной продукции, деструкция в озере имеет более выраженный сезонный максимум (3.08 мгO_2/л·сут в августе), также приуроченный началу интенсивного охлаждения водной толщи и ветрового перемешивания. По показателю чистой первичной продукции экосистему оз. Глубокого также можно отнести в гетеротрофной.

Внутригодовое распределение параметров озерного метаболизма обладает большей информативностью по сравнению со средними значениями. Так, на примере 2022 г. видно, что в Можайском водохранилище для GPP, R и NEP характерен большой диапазон колебаний в течение вегетационного периода (рис. 1). Наибольший размах обнаруживается в водохранилище в начале-середине июня, когда после развития фитопланктона и увеличения значений первичной продукции, как правило, наблюдается фаза «чистой воды», которая связана с отмиранием диатомовых водорослей. Минимальный размах наблюдался в конце вегетационного периода, когда активность фотосинтезирующих организмов снижена, а интенсивность окисления органики уменьшается из-за выхолаживания водной толщи. Для озера Глубокого наблюдается такая же картина, однако размахи значений 3.7-4.6 раз меньше, чем в водохранилище, что связано с меньшей трофностью озера. Кроме фактора сезонной сукцессии фитопланктона, можно выделить и гидрометеорологический. Так, по данным метеостанции г. Можайск, в конце августа произошло изменение синоптической ситуации, которое привело к резкому снижению величин первичной продукции с 4.9 до 0.2 мгO_2/л·сут в поверхностном слое. Увеличение скорости ветра северо-восточного направления привело к сгону воды в районе установленной буйковой станции в приплотинном районе водохранилища, что спровоцировало подъем глубинных вод. Дальнейшее последовавшее увеличение размахов колебаний с 1.1 до 4.9 мгO_2/л·сут может быть объяснено тем, что сгон способствовал высвобождению биогенных элементов из афотической зоны и тем самым стимулировал развитие продукционных процессов.

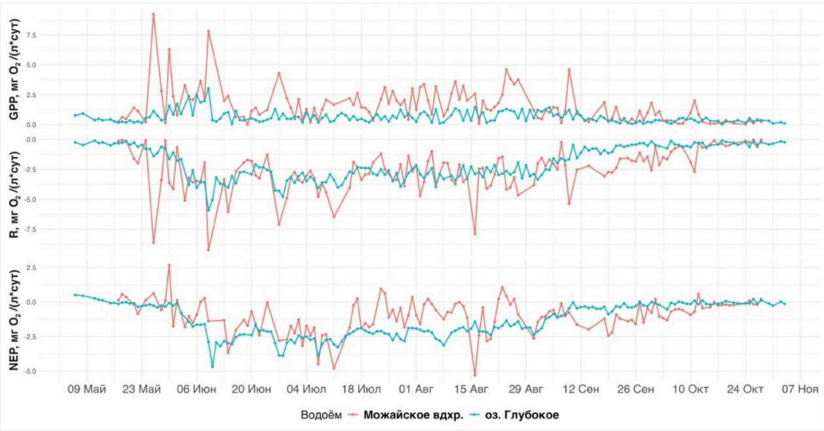


Рис. Значения GPP, NEP и R для Можайского вдхр. и оз. Глубокого за 2022 г.

При этом для озера данная синоптическая ситуация не повлияла на диапазон колебаний, в силу облесенности водосбора, меньшей площади водного зеркала и морфометрических особенностей. Кроме того, важно отметить, что на протяжении всего вегетационного периода 2022 г. баланс NEP был отрицателен, в то время, когда в Можайском водохранилище баланс был менее стабилен, иногда определяя экосистему водохранилища как автотрофную.

Расчёт и анализ параметров озёрного метаболизма за 2020–2023 гг. позволил выявить, что наибольшие колебания показателей характерны для начала вегетационного периода (29.8 мгO_2/(л·сут) по GPP в водохранилище и 3.01 мгO_2/(л·сут) в озере), а минимальные — в конце. При этом размах колебаний в Можайском вдхр. в среднем в 4 раза выше, чем в оз. Глубоком. Оба водоёма характеризуются преимущественно гетеротрофным состоянием, однако водохранилище обнаруживает меньшую устойчивость и периодически переходит в автотрофный режим. Средние значения NEP за рассматриваемый период составили -1.06 мгO_2/(л·сут) для водохранилища и -1.44 мгO_2/(л·сут) для озера). Также было выявлено, что размах колебаний увеличивается вместе с трофностью года, при этом в Можайском водохранилище, как водоёме, характеризующемся большей трофической напряжённостью, эта связь проявляется сильнее.

Полученные результаты согласуются с ранее проведёнными оценками озёрного метаболизма в исследуемых водоёмах. Рассчитанные средние значения первичной продукции в поверхностном слое озера Глубокого (0.63–0.76 мгO_2/(л·сут)) находятся в пределах ранее определённых значений для всего вегетационного периода (0.65–1.17 мгO_2/(л·сут)) (Щербаков, 1967), при этом данные о короткопериодных колебаниях показателей метаболизма для этого озера ранее отсутствовали. В Можайском водохранилище размах колебаний во многом зависит от года, однако полученные средние диапазоны (6.8–29.8 мгO_2/(л·сут)) также находятся в пределах существующих оценок (7.2–33.4 мгO_2/(л·сут)) (Эдельштейн и др., 2020).

Таким образом, использованный подход к оценке метаболизма водоёмов, основанный на анализе концентрации РК, позволяет получать непрерывные и репрезентативные ряды интенсивности продукционно-деструкционных процессов в течение вегетационного периода, и более точно выявлять факторы их изменений.

Литература

Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Л.: Наука, 1971.

Щербаков А.П. Озеро Глубокое. М.: Наука, 1967. 380 с.

Эдельштейн К.К., Гречушникова М.Г., Гончаров А.В. Влияние изменчивости погоды на биопродуктивность Можайского водохранилища // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2020. №2. С. 36-44.

Winslow L.A., Solomon C.T., Zwart J.A., Hanson P.C. LakeMetabolizer: an R package for estimating lake metabolism from free-water oxygen using diverse statistical models // Environmental Modelling & Software. 2016. V. 75. P. 273–282.

ESTIMATION OF METHABOLISM PARAMETERS FOR LAKES IN THE MOSCOW REGION BASED ON HIGH-FREQUENCY MONITORING OF DISSOLVED OXYGEN

O.N. Erina, S.I. Polukhin, D.I. Sokolov

Despite the high ecological importance of lake ecosystems in Russia, their condition is deteriorating under anthropogenic pressure. A study of metabolic parameters in the Mozhaysk Reservoir and Lake Glubokoe, using automated oxygen loggers, revealed a predominance of heterotrophic regimes, intensified by eutrophication. Productivity peaks were linked to seasonal phytoplankton succession and hydro-meteorological variability. High-frequency monitoring proved effective in assessing the dynamics of production and decomposition processes, critical for effective water resource management amid growing environmental stress. The results highlight the need for advanced monitoring tools to address ecological challenges in anthropogenically impacted aquatic systems.

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЗЁРНО-БОЛОТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРНОГО ПРИКАМЬЯ В КОНКТЕСТЕ ИХ ГЕНЕЗИСА И ВОЗРАСТА

Н.Е. Зарецкая[1], С.В. Копытов[2, 3], Е.Г. Лаптева[3, 4], П.Ю. Санников[2], С.С. Трофимова[4], Е.А. Новикова[2], Е.А. Мехоношина[2], А.А. Самаркина[2]

[1] Институт географии РАН

[2] Пермский государственный национальный исследовательский университет

[3] Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет

[4] Институт экологии растений и животных УрО РАН

В статье приводятся результаты многолетних исследований коллектива в бассейне верхней Камы. С использованием комплекса полевых и аналитических методов изучены озерно-болотные отложения из заполнений палеорусел, донных осадков озер, болот и погребенных торфяников. Реконструированы ландшафтно-климатические условия региона в позднеледниковье и голоцене, хронология русловых переформирований, скорости накопления торфа и бокового расширения болот.

Верхнее Прикамье – регион, расположенный на северо-востоке Европы в пределах Пермского края, занятый обширной широкопойменной долиной р. Камы и её крупных притоков. Территория Верхнего Прикамья покрыта болотами – как внутридолинными, так и занимающими междуречные пространства, и общая площадь болот занимает около 30%. Озёр, наоборот, мало, и они могут представлять собой как

остаточные водоёмы внутри обширных болот (такие, как оз. Новожилово, Челвинское и Большой и Малый Кумикуш), так и старичные водоёмы. В последние годы в результате проведения междисциплинарных исследований, направленных на реконструкцию природных условий расселения древних сообществ в Пермском Предуралье (Лаптева и др., 2017; Зарецкая и др., 2020; Demakov et al., 2022; Lapteva et al., 2023) и на реконструкцию ландшафтно-климатический условий Верхнего Прикамья в позднеледниковье и голоцене (Lapteva et al., 2023; Kopytov et al., 2024) был собран представительный материал, включающий в себя данные о типах, возрасте, истории развития и скорости осадконакопления в озёрно-болотных отложениях Верхнего Прикамья.

Во время полевых исследований проводилось бурение болот, погребённых торфяников из заполнений палеорусел, донных отложений озер, а также их изучение разрезов в естественных обрывах русел рек Камы, Вишеры и Колвы. Для получения аналитических данных применялись палеорусловой анализ, радиоуглеродное датирование, спорово-пыльцевой, палеокарпологический, гранулометрический, диатомовый, хирономидный анализы, измерение потерь при прокаливании и магнитной восприимчивости. Модели «глубина-возраст» строились в программах Bchron 3.1 (Лаптева и др., 2017) и байесовским методом в пакете Bacon среды R 4.3.2 (Kopytov et al., 2024).

Изученные объекты подразделяются на две подгруппы. Большой массив данных был получен в результате комплексных исследований заполнений палеорусел на пойме и террасах р. Камы, а также ее притоков (Лаптева и др., 2017; Трофимова и др., 2019; Зарецкая и др., 2020; Demakov et al., 2022; Lapteva et al., 2023). Когда активное русло реки в силу тех или иных причин отмирает, в нём чаще всего образуется старичное озеро, которое в процессе эвтрофикации превращается в болото; изучение толщи озёрно-болотных отложений как части заполнения палеорусла проводятся для палеорусловых реконструкций. Исследовались как погребённые торфяники в отдельных палеоруслах р. Камы, так и большие пойменные массивы – Дедюхинский и Соликамский, расположенные между городами Соликамск и Березники.

Мощность озёрно-болотных отложений в заполнениях палеорусел может достигать 4,5 м, в среднем составляет 1–2 м. Возраст подошвы органогенных отложений – не древнее 9000 кал. лет, основной массив дат расположен в пределах 7000-2500 кал. л.н. (Лаптева и др., 2017; Зарецкая и др., 2020; Lapteva et al., 2023).

Второй массив данных был получен из Дорышского и Кумикушского водно-болотных комплексов, вблизи озёр Нюхти, Челвинское и Новожилово, соответственно. На двух трансектах длиной 1 км каждая в краевых частях болот определена глубина минерального основания. Максимальная мощность торфа варьирует от 4 до 5 м. Набор радиоуглеродных дат базального торфа возрастом от 8000 кал. л.н. до современного позволил оценить скорости латерального расширения болот в голоцене.

Анализ скорости накопления болотных отложений в зависимости от генезиса, состава и возраста будет представлен на конференции.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-68-10023, https://rscf.ru/project/23-68-10023/ (палеорусловой, спорово-пыльцевой, палеокарпологический, гранулометрический, диатомовый, хирономидный анализы) и в рамках ГЗ ИГ РАН FMWS-2024-0003 (радиоуглеродное датирование, измерение потерь при прокаливании и магнитной восприимчивости).

Литература

Зарецкая Н.Е., Лычагина Е.Л., Лаптева Е.Г., Трофимова С.С., Чернов А.В. Пойма Камы: Реконструкция среды обитания древних и средневековых сообществ Среднего Предуралья // Российская археология. 2020. №1. С. 44–59.

Лаптева Е.Г., Зарецкая Н.Е., Косинцев П.А., Лычагина Е.Л., Чернов А.В. Первые данные о динамике растительности Верхнего Прикамья в среднем и позднем голоцене // Экология. 2017. №4. С. 267–276.

Трофимова С.С., Зарецкая Н.Е., Лаптева Е.Г., Лычагина Е.Л., Чернов А.В. Опыт использования методов палеоэкологических исследований для реконструкции природной среды голоцена // Экология. 2019. №6. С. 438–445.

Demakov D.A., Lychagina E.L., Zaretskaya N.E., Kopytov S.V., Chernov A.V., Lapteva E.G., Trofimova S.S., Kosintsev P.A. Kosa Mesolithic Sites in the Context of the Palaeoenvironmental History of the Upper Kama Basin in the Late Glacial and Early Holocene // Doklady Earth Sciences. 2022. V. 507. Suppl. 1. P. 92–103.

Kopytov S.V., Zaretskaya N.E., Konstantinov E.A., Lapteva E.G., Sannikov P.Yu., Sychev N.V. and Mekhonoshina E.A. Palaeoenvironment of the Upper Kama Region during the Late Glacial and Early Holocene (Novozhilovo Lake Sediments Case Study) // Doklady Earth Sciences. 2024. V. 519. Iss. 2. P. 2208–2216.

Lapteva E.G., Zaretskaya N.E., Lychagina E.L., Trofimova S.S., Demakov D.A., Kopytov S.V., Chernov A.V. Holocene vegetation dynamics, river valley evolution and human settlement of the upper Kama valley, Ural region, Russia // Vegetation History and Archaeobotany. 2023. V. 32. P. 361–385.

Lapteva E.G., Rudaya N.A., Zaretskaya N.E., Kopytov S.V., Sannikov P.Yu. Palaeoecological reconstruction of the Late Glacial and Early Holocene based on pollen data from lake Novozhilovo (Perm region, Russia) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. V. 4. P. 481–486.

INTERDISCIPLINARY STUDIES OF LAKE-SWAMP DEPOSITS IN THE NORTHERN KAMA REGION IN THE CONTEXT OF THEIR GENESIS AND AGE

N.E. Zaretskaya, S.V. Kopytov, E.G. Lapteva, P.Yu. Sannikov, S.S. Trofimova, E.A. Novikova, E.A. Mekhonoshina, A.A. Samarkina

We present the results of a long-term study conducted by our team in the Upper Kama region. Using a combination of field and laboratory methods, we have studied lake-swamp deposits from palaeochannels, swamp and lake bottom sediments and buried peat bogs. We have reconstructed the landscape and climatic conditions of the area during the Late Glacial and the Holocene, as well as the chronology of river channel changes, the rate of peat accumulation, and the lateral expansion of wetlands.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ТУРИЗМА НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКАНСКОГО ЗАКАЗНИКА «СМЫЧОК» (БЕЛАРУСЬ)

Н.А. Зеленкевич, Е.В. Мойсейчик Д.Г. Груммо
Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси

Обсуждаются перспективы развития экологического туризма заказника республиканского значения «Смычок» (Гомельская область, Беларусь). Приводятся

сведения об уникальных особенностях заказника, предельно-допустимых рекреационных нагрузках. Определены перспективные для развития экотуризма участки, где предложен комплекс мероприятий в рамках разработки «Стратегии развития экологического туризма для республиканского заказника «Смычок».

Ландшафтный заказник республиканского значения «Смычок» расположен на территории Жлобинского и Речицкого районов Гомельской области в 35 км южнее г. Жлобин, вблизи д. Нижняя Олба. Его площадь составляет 2635 га. Образован заказник в 2000 г. с целью сохранения в естественном состоянии уникального природного комплекса с популяциями редких и исчезающих видов растений и животных, занесенных в Красную книгу Республики Беларусь.

Заказник находится в междуречье Днепра и Березины, представлен мозаичным сочетанием естественных лугово-пойменных и лесо-пойменных, лесных надпойменных, старично-озерных и прибрежно-русловых природных комплексов. Имеется ряд памятников археологии, истории, архитектуры и этнографии. Существующие здесь в наше время поселения, расположенные в непосредственной близости к заказнику, имеют давнюю историю. Кроме того, у заказника «Смычок» есть и свои легенды. Все это формирует уникальные особенности заказника, которые могут быть положены в основу перспективных направления развития экотуристического потенциала территории:

1) *местонахождение* – заказник находится в междуречье рек Березины и Днепра. Место слияния рек – уникальное природное явление, которое можно наблюдать в данном заказнике;

2) *рельеф* – эрозионно-аккумулятивная деятельность Днепра (правобережная часть) и Березины (левобережная часть) сформировала и определила современный облик территории заказника (чередование возвышений и углублений, плоских участков поймы, многочисленных стариц и островов, пойменных озер);

3) *водные объекты* – водотоки – Днепр (первая по величине и водности река страны) и Березина, водоемы заказника являются уникальными объектами – пойменными озерами, крупнейшие из них это Проров и Плотичное. Озеро Проров, безусловно, жемчужина заказника «Смычок»;

4) *растительность* – междуречное положение, длительный поемный гидрологический режим, размещение на стыке подзоны широколиственных и смешанных подтаежных лесов обусловило растительный покров заказника, представленный широколиственно-лесными (неморальными), таежными и лесостепными элементами. Основную часть территории занимают, находящихся в малоизмененном естественном состоянии, пойменные луга низкого, среднего и высокого уровней, заболоченные понижения и суходольные гривы, пойменные дубравы и заросли кустарников. Наибольший интерес представляют уникальные и редко встречающиеся пойменные дубравы, занимающие в заказнике около 20% территории и пойменные луга, также занимающие порядка 20%;

5) *флора* – установлено произрастание 485 видов сосудистых растений, из которых 5 видов относятся к редким и находящимся под угрозой исчезновения, включенным в Красную книгу Республики Беларусь (Красная…, 2015);

6) *фауна* – зарегистрировано 140 видов наземных позвоночных животных (за исключением рукокрылых, насекомоядных, мелких грызунов, пролетных птиц) и 121 вид насекомых. Из них 13 видов (1 вид насекомых, 2 вида рыб и 10 видов птиц) относятся к редким и находящимся под угрозой исчезновения, включенным в Красную книгу Республики Беларусь (Красная …, 2015). В южной части заказника находится крупная колония бакланов, около 1,5-3 тыс. птиц;

7) *биотопы* – почти 75% заказника занимают биотопы, охраняемые в рамках национального законодательства (ТКП 17.12-06-2021 «Правила выделения и охраны типичных и редких биотопов, типичных и редких ландшафтов» (ТКП…, 2021); среди которых – пойменные дубравы, леса в долинах рек, озера, пойменные луга;

8) *археологические находки* – люди издревле предпочитали селиться в междуречьях, поэтому на данной территории существует ряд известных по раскопкам стоянок периода мезолита, курганные могильники периода раннего средневековья, городища периода раннего железного века и раннего средневековья, внесенных в «*Дзяржаўны спіс гісторыка-культурных каштоўнасцей Рэспублікі Беларусь*» (Дзяржаўны…, 2023)

9) *архитектура* – поселения (деревни, поселки и хутора), расположенные в непосредственной близости к заказнику, а также находящиеся на пути следования к заказнику, имеют давнюю историю и интересную архитектуру XIX–XX вв. Во многих поселениях хорошо сохранилась усадебная застройка середины XX в. Кроме этого, на территории заказника, в озеро Проров, на глубине нескольких метров через озеро проходят 2 каменные дороги неизвестного происхождения, 5-6 метров шириной и длиной около 40 метров;

10) *военно-исторические события 1941–1945 гг.* – во время Второй Мировой войны здесь шли ожесточенные бои, действовали партизанские отряды. Было сожжено несколько деревень, находящихся недалеко от границ заказника либо на пути следования к нему. В г.п. Стрешине действовало гетто. Событиям этого времени посвящен ряд памятников, монументов и памятных знаков;

11) *легенды* – у заказника «Смычок» есть свои легенды: «французский» холм-курган, затопленные дороги, памятные знаки на старых стволах и прочее.

Здесь развито любительское рыболовство, любительская охота, имеются туристические маршруты – туристическая тропа «*Барвинка*» и водный маршрут «*Днепра-Бярэзінскі смык на шляху з варагаў у грэкі*». На территории заказника оборудован «*Мобильный дом*», расположенный в живописном месте на берегу озера Проров, имеется дом рыболова-охотника в д. Нижняя Олба.

При рекреационном обустройстве территории и определении режима пользования следует учитывать рекреационную емкость природных сообществ и допустимые рекреационные нагрузки. Предельно-допустимые рекреационные нагрузки на естественные природные и рекреационные ландшафты (чел/га) рассчитаны на основании (Рекомендации…, 2019) и (Репшас, 1981). Для всей территории заказника «Смычок» предельно-допустимые рекреационные нагрузки составляют 33 107 человек в день или 12 чел/га в среднем. Карта предельно-допустимых рекреационных нагрузок заказника «Смычок» представлена на рисунке 1.

Туристско-рекреационная деятельность должна осуществляться способами, не наносящими вреда экосистемам, окружающей среде и здоровью человека, а также не препятствовать праву граждан пребывать в природе. Ее развитие должно базироваться на природоохранном законодательстве; учитывать экологическую ситуацию, наличие рекреационной инфраструктуры, рекреационную емкость и нагрузку; предусматривать организационное, информационно-коммуникационное и маркетинговое сопровождение (Рекомендации…, 2019; Репшас, 1981). Продвижение охраняемых территорий, как туристических объектов, может использоваться, как дополнительный механизм для экономического роста, вовлечение местных граждан для защиты биоразнообразия. Для развития туристической привлекательности необходима устойчивая консолидация органов власти и населения, развитие широкого партнерства организаций и предприятий на всех уровнях.

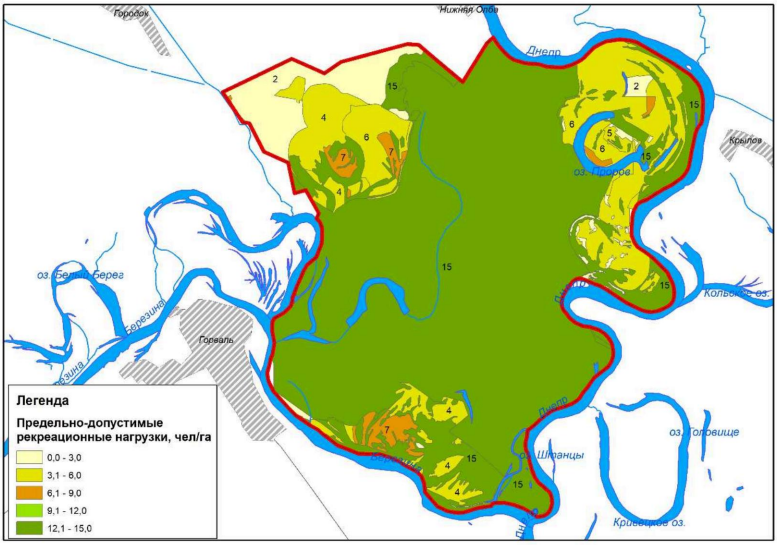


Рис. 1. Карта предельно-допустимых рекреационных нагрузок заказника «Смычок» (Гомельская Область, Беларусь)

Была разработана стратегия развития экологического туризма для республиканского заказника «Смычок», с основной целью – сохранение уникального природного потенциала заказника, организация устойчивого экологического туризма на местном, региональном, национальном и международном уровнях. В рамках стратегии предложен развернутый комплекс мероприятий (организационных, инфраструктурных, информационных, образовательных) по развитию инфраструктуры заказника, направленных на развитие экологического туризма на ООПТ «Смычок». В рамках стратегии на территории заказника «Смычок» перспективными являются участки (рис. 2):

1. Участок в д. Нижняя Олба. На базе туристического домика заказника организовать полноценный экоцентр с предоставлением спектра услуг по проживанию, аренде туристического инвентаря, информационным и экскурсионным услугам и т.д. Организовать местных жителей на предоставление услуг по питанию и демонстрации ремесленной деятельности, дополнительного проживания.

2. Участок основного размещения на въезде в заказник (стоянка № 1). Электрифицировать данный участок, создать спектр услуг по размещению, организации питания, информационного сопровождения и пр. Сформировать место для проведения больших мероприятий (например, фестиваля). Построить большой павильон для проведения торжеств (свадьбы, юбилеи и т.п.).

3. Участок «озеро Проров» (стоянка № 2). Хорошо сформированный на данный момент участок, требует дальнейшего поддержания нынешнего состояния по организации проживания, проката, прочего спектра услуг. Весьма перспективным было бы электрифицировать участок.

4. Участок «Колония бакланов». Оборудовать место наблюдения за птицами, организовать прокат биноклей.

5. Участок «Днепр». Организовать беседку на берегу реки для отдыха туристов на маршрутах (водных, велосипедных, пешеходных).

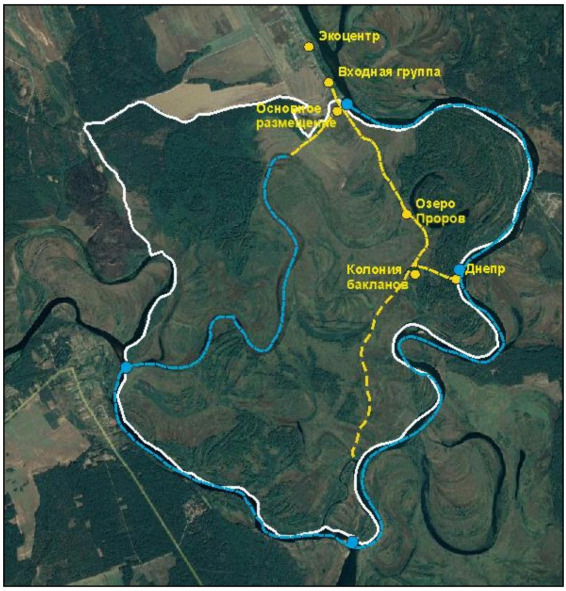


Рис. 2. Участки, перспективные для развития экологического туризма, рекреационного и иного использования, возможные туристические и образовательные маршруты

Возможные туристические и образовательные маршруты на территории заказника (рис. 2):

1. Пешеходный / велосипедный / автомобильный маршрут по территории заказника. Основная часть маршрута – от въезда в заказник до озера Проров – может быть автомобильной. Далее пешеходное или велосипедное продвижение до колонии бакланов и беседки на Днепре. Для желающих – продвижение вглубь заказника. Оборудование беседки на конце дальнего маршрута пока считаем нецелесообразным из-за низкой посещаемости, однако, с развитием туризма возможно возникнет необходимость установки беседки и там. Предполагается размещение по ходу основного маршрута скамеек для отдыха и информационных стендов, уход за территорией.

2. Водный маршрут. Вместе с имеющимся маршрутом от въезда в заказник до беседки на Днепре, предлагается организовать кольцевой маршрут с началом от въезда в заказник, затем с остановкой на беседке на Днепре, после добраться до впадения Березины в Днепр, затем подняться вверх по течению Березины и по озеру Плотичное подняться почти до исходной точки. Маршрут рассчитан на опытных байдарочников. В меженный период, вероятно, сложен для прохождения.

Таким образом, территория заказника «Смычок» имеет большие возможности для развития туризма вообще, и экологического туризма в частности, и обладает уникальным природно-ресурсным потенциалом, интересным историко-культурным наследием. Потенциал заказника довольно велик, однако, используется не полностью. Большую

роль в развитии экотуристического потенциала имеет подготовка кадров, совершенствование инфраструктуры и финансовая поддержка.

Литература

Дзяржаўны спіс гісторыка-культурных каштоўнасцей Рэспублікі Беларусь (Электронный ресурс). URL: http://gosspisok.gov.by/?AspxAutoDetectCookieSupport=1 (дата обращения: 01.08.2023).

Красная книга Республики Беларусь. Животные: редкие и находящие под угрозой исчезновения виды диких животных. Минск: Беларуская Энцыклапедыя імя Петруся Броўкі, 2015. 317 с.

Красная книга Республики Беларусь. Растения: редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды дикорастущих растений. Минск: Беларус. энцыкл. імя П. Броўкі, 2015. 448 с.

Охрана окружающей среды и природопользование. Территории. Растительный мир. Правила выделения и охраны типичных и редких биотопов, типичных и редких: ТКП 17.12-06-2021 (02120). Минск: Минприроды, 2021. 40 с.

Рекомендации по организации рекреационной деятельности в государственном лесохозяйственном учреждении: распоряжение Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь, 19.09.2019 г. 56 с.

Репшас Э.А. Определение состояния и экологической емкости рекреационных лесов. (Методические рекомендации). Каунас: ЛитНИИЛХ, 1981. 23 с.

POSSIBILITIES FOR THE ECOLOGICAL TOURISM DEVELOPMENT ON THE REPUBLICAN RESERVE «SMYCHOK» TERRITORY (BELARUS)

N.A. Zeliankevich, E.V. Mojsejchik, D.G. Grummo

The possibilities for the ecological tourism development in the reserve of republican significance “Smychok” (Gomel region, Belarus) discussed. Information about the unique features of the reserve and the maximum permissible recreational loads provided. Ecotourism development promising areas identified, where a set of measures proposed as part of the “Ecotourism Development Strategy for the Republican Nature Reserve "Smychok.”

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТЧЛЕНЕННЫХ ЗАЛИВОВ ТЕТЮШСКОГО ПЛЕСА КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

И.И. Зиганшин[1], Д.В. Иванов[1], И.М. Сафин[2]
[1]Институт проблем экологии и недропользования АН РТ
[2]Казанский (Приволжский) федеральный университет

Исследование посвящено анализу морфометрических характеристик отчленённых заливов Тетюшского плеса Куйбышевского водохранилища. В ходе исследования выявлено 105 отчленённых заливов с общей площадью водного зеркала 246 гектаров. По площади акватории они относятся к категории «малые водоемы», характеризуются преимущественно овальной и близкой к округлой формой и слабоизрезанными берегами. Полученные данные свидетельствуют о высокой вариабельности форм и размеров изолированных заливов, подчеркивая сложность процессов их формирования и эволюции, вызванных изменением уровня воды и характером гидрологических связей с акваторией водохранилища. Полученные результаты имеют практическое значение для

принятия решений в сфере природопользования и охраны окружающей среды, в том числе для сохранения уникальных природно-антропогенных прибрежных ландшафтов и выработке меры по поддержанию их экологической устойчивости. Особое значение полученные результаты приобретают в условиях расположения изучаемых объектов в буферной зоне объекта всемирного культурного и природного наследия ЮНЕСКО - историко-археологического комплекса «Древний город Болгар».

Куйбышевское водохранилище (КВ), является одним из крупнейших искусственных водоемов в мире с площадью акватории 5900 км² при нормальном подпорном уровне (НПУ) 53 м над уровнем моря (по Балтийской системе высот (БС)). Длина КВ составляет 510 км по р. Волге и 300 км – по р. Каме (Куйбышевское …, 2008). Для гидрологического режима КВ характерно сезонное регулирование стока: весной оно наполняется до НПУ, в остальное время идет сработка воды, из-за которой его уровень может понижаться на несколько метров, освобождая полностью от воды мелководья (Бамбуров и др., 1991).

Создание водохранилища привело к масштабным изменениям природных условий, как в зоне затопления, так и на прилегающих территориях. Следствием поднятия уровня до проектной отметки стало образование многочисленных заливов – более или менее глубоко вдающихся в сушу частей КВ, сохраняющих гидродинамическую связь с основной акваторией. К настоящему времени большая их часть подверглась полной или частичной изоляции от основной акватории, сформировав новый природно-антропогенный элемент прибрежных ландшафтов, использующийся в хозяйственных и рекреационных целях.

Государственный мониторинг водных объектов в обязательном порядке включает организацию систематических наблюдений за трансформацией морфометрических характеристик водных объектов. В связи с этим, изучение морфометрических параметров отчлененных заливов как нового типа водных объектов поверхностных вод суши являет важную научно-практическую задачу, решение которой позволит прогнозировать изменения, происходящие с их экосистемами в ближайшей и долгосрочной перспективе.

Акватория КВ представляет собой ряд озеровидных расширений и разделяется по морфометрическим условиям на 8 участков хозяйственного освоения, соединенных между собой сужениями в пределах старого русла. Сведения по отчленившимся заливам, включая их морфометрические показатели, ограничены Волжским плесом (Зиганшин, Иванов, Хасанов, 2021, 2022; Зиганшин и др., 2024).

В настоящей статье представлен анализ основных морфометрических характеристик отчлененных заливов Тетюшского плеса КВ, расположенного в среднем течении р. Волги, после слияния русел рек Волга и Кама, вблизи г. Тетюши. Северная граница плеса проходит по устью р. Камы, южная – чуть ниже устья р. Майна (рис. 1).

Общая протяженность Тетюшского плеса составляет порядка 80 км, а ширина варьируется от 3 до 20 километров в самой широкой части. Площадь водного зеркала – 766 км² (~13,2% от общей площади акватории КВ). Бóльшая часть плеса находится на территории РТ (80%) и небольшой участок на территории Ульяновской области (20%). Для Тетюшского плеса характерны значительные глубины (в среднем 10 м). Максимальные глубины достигают 20 м на судовом ходу, глубины в прибрежных зонах правобережья 5–10 м, на левобережье 2-5 м. Течения незначительные (средние скорости течения 0,5 м/сек), особенно в заливах, что способствует их заилению. Площадь литорали (до 2 м глубины) не превышает 10%, дно повсеместно песчаное, зарастаемость высшей водной растительностью отмечается только на левобережье. Берега р. Волги асимметричные: правый берег – высокий (до 100–150 м), крутой, местами обрывистый,

сложен известняками и глинами. Левый берег – пологий, подверженный затоплению и эрозии.

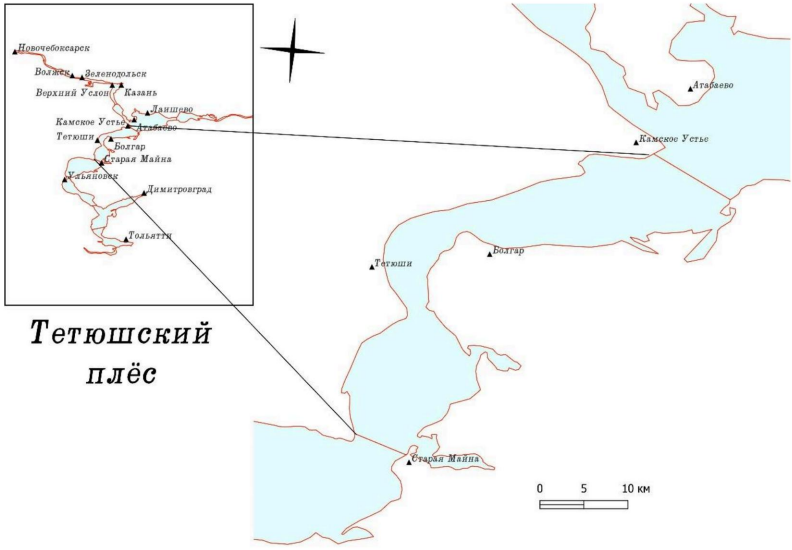


Рис 1. Месторасположение Тетюшского плеса Куйбышевского водохранилища

В качестве базовых материалов использовались данные полевых исследований за 2024 гг., спутниковые снимки Google Earth Engine и Sentinel-2. Процесс вычисления осуществлялся в ГИС QGIS 3.28.3 на летнюю межень 2024 г. при НПУ 52,7 м БС. Статистическая обработка данных выполнена с использованием пакета Statistica 8.0.

Анализ космических снимков и данных натурных обследований показал, что на территории Тетюшского плеса КВ на период летней межени 2024 г. диагностируются 105 отчленившихся от основной акватории заливов общей площадью 246 га. Бóльшая их часть расположена на многочисленных островах, образовавшихся в результате заполнения ложа КВ по левому берегу р. Волга (рис. 2). На островах, в буферной зоне объекта Всемирного культурного и природного наследия ЮНЕСКО – историко-археологического комплекса «Древний город Болгар расположено 64 водоема, входящих в состав государственного природного заказника «Спасский».

Правый р. Волга, в силу своей высоты не предрасположен к затоплению имеющихся там отрицательных форм рельефа. Слагающие его твердые породы (известняки, песчаники) меньше подвержены эрозии и размыванию водой, что также снижает вероятность образования здесь заливов. На правом берегу диагностирован только один залив, возникновение которого связано с затоплением образовавшейся котловины на месте снесенных при создании КВ домов и хозяйственных построек села Кирельское.

В отличие от Волжского плеса, где значительное число заливов искусственным образом было отделено от основной акватории водохранилища (Зиганшин и др., 2024), отчленение заливов в Тетюшском плесе происходило естественным образом. Во

входных створах заливов, возникших в результате затопления ранее существовавших отрицательных эрозионных форм рельефа (ложбин, балок, оврагов и др.) или проливов между островами и материковой частью суши происходило образование абразивно-аккумулятивных пересыпей, которые сначала частично, а в дальнейшем полностью изолировали водоемы от основной акватории водохранилища.

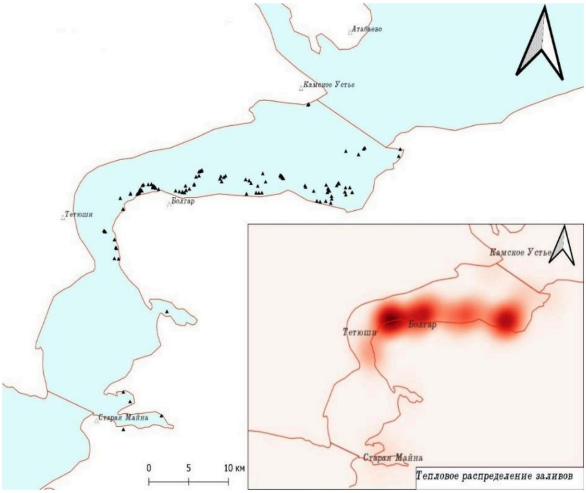


Рис.2. Пространственное распределение отчлененных заливов Тетюшского плеса КВ

По площади акватории (ГОСТ Р 59054-2020) отчленившиеся водоемы Тетюшского плеса КВ относятся к категории «малые водоемы» с площадью водной поверхности менее 1000 га. Согласно классификации озер И.С. Захаренкова (1964) исследуемые водоемы по площади водного зеркала относятся к классам малых (10–100 га), маленьких (1–10 га) озер и озерков (0.1–1 га). Преобладающая часть водоемов (94%) относится двум последним классам (табл. 2).

Таблица 1. Морфометрические показатели отчлененных заливов Тетюшского плеса КВ

Показатель	Среднее	Медиана	Min	Max
Площадь, га	2,3	0,8	0,1	29
Длина береговой линии, м	678	474	113	3770
Длина, м	280	198	34	1739
Ширина, м	103	73	28	608
Средняя ширина, м	56	40	12	273

Площади акватории водоемов изменяются в течение года вслед за колебаниями уровня воды в водохранилище. Анализ изменения площади акватории трех модельных отчлененных заливов, имеющих разную гидродинамическую связь с основной акваторией водохранилища, показал, что отмечается общая тенденция к уменьшению площади их водного зеркала. При этом, для залива 2, который в весеннее половодье заливается водами КВ, колебания площади его акватории существенно зависят от уровня воды в водохранилище (рис. 3).

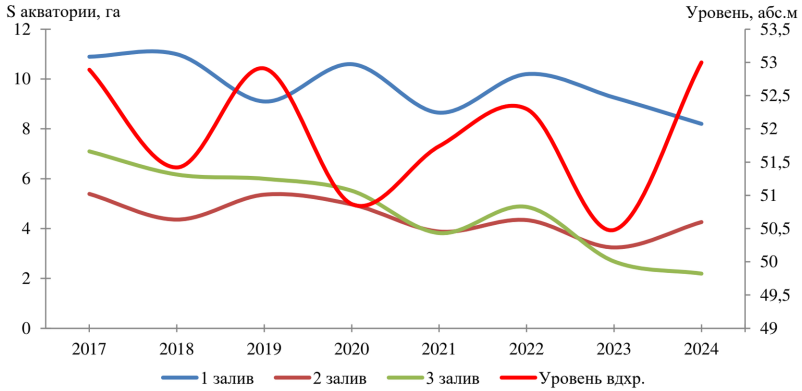


Рис. 3. Динамика площади акватории отчлененных заливов в зависимости от уровня воды и гидрологической связи с акваторией КВ в весеннее половодье (залив 1 периодически затапливается, залив 2 затапливается постоянно, залив 3 не затапливается)

Коэффициент удлиненности, определяемый как отношение длины водоема к средней ширине и характеризующий вытянутость озерной котловины, в отчлененных заливах Тетюшского плеса меняется в широком диапазоне значений – от 1,4 до 24,9, при среднем значении 5,3. В отличие от Волжского плеса, где отчлененные заливы в основном имеют форму, вытянутую в виде борозды, в Тетюшском плесе преобладающая часть водоемов тяготеет к овальной и круглой форме (табл. 2).

Таблица 2. Распределение отчлененных заливов по показателю удлиненности

Форма	Коэффициент удлинённости	Количество, ед.	% от общего числа
Округлые	менее 1,5	0	0
Близкие к окружности	1,5-3,0	27	26
Близкие к округлой	3,0-5,0	39	37
Близкие к овальной	5,0-7,0	23	22
Овально-удлиненные	7,0-10,0	7	7
Вытянутые в виде «борозды»	более 10,0	9	8

Статистическая обработка данных показала слабую связь между коэффициентом удлинённости и площадью акватории водоемов (коэффициент корреляции Спирмена $r=0,26$, $p<0,05$).

По изрезанности береговой линии преобладающая часть отчлененных заливов Тетюшского плеса относится к водоемам со слабоизрезанной береговой линией (табл. 4). Данные значения сильно разнятся по сравнению с Волжским плесом, где преобладают водоемы с сильно и средне изрезанной береговой линией (Зиганшин и др., 2024).

Таблица 3. Распределение отчлененных заливов по изрезанности береговой линии

Степень изрезанности	Коэффициент изрезанности	Количество, ед.	% от общего числа
Слабоизрезанные	Менее 1,5	101	96
Среднеизрезанные	1,5-2	4	4
Сильноизрезанные	Более 2	0	0

Проведенное исследование подчеркивает необходимость организацию регулярного мониторинга и детального анализа состояния отчленённых заливов.

Литература

Бамбуров И.С., Викулов А.И., Выхристюк М.М., Селезнев В.А. Изменчивость основных гидрологических факторов переформирования берегов // Динамика ландшафтов в зоне влияния Куйбышевского водохранилища. СПб: Наука 1991. С. 6–77

ГОСТ Р 59054–2020. Охрана окружающей среды. Поверхностные и поземные воды. Классификация водных объектов.

Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р. Генезис и морфометрическая характеристика озер охранной зоны Саралинского участка Волжско-Камского заповедника // Российский журнал прикладной экологии. 2021. №1. С. 36–43.

Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р. Осадконакопление в озерах охранной зоны Саралинского участка Волжско-Камского заповедника // Российский журнал прикладной экологии. 2021. №2. С.47–52.

Зиганшин И.И. Иванов Д.В., Хасанов Р.Р. Динамика морфометрических параметров Атабаевских озер Волжско-Камского заповедника // Экология родного края: проблемы и пути их решения / Материалы XVI Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием. Киров, 2022. С. 85-89.

Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р., Кочетков Д.А. Генезис и морфометрические особенности отчлененных заливов Казанского района переменного подпора Куйбышевского водохранилища // Российский журнал прикладной экологии. 2024. №4. С. 10–17

Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник) / Отв. ред. Г.С. Розенберг, Л.А. Выхристюк. - Тольятти: ИЭВБ РАН, 2008. 123 с

MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF DETACHED BAYS IN THE TETYUSHSKY POOL OF THE KUYBYSHEV RESERVOIR

I.I. Ziganshin, D.V. Ivanov, I.M. Safin

The study focuses on analyzing the morphometric characteristics of detached bays within the Tetyushsky pool of the Kuibyshev Reservoir. During the investigation, 105 isolated bays were identified with a total water surface area of 246 hectares. According to their water body size, these bays fall into the category of “small bodies of water,” predominantly characterized by oval or near-round shapes and weakly indented shores. The obtained data indicate high variability in form and size among the isolated bays, highlighting the complexity of their formation processes and evolution influenced by fluctuations in water levels and hydrological connections with the main reservoir basin. These findings have practical significance for decision-making in environmental management and conservation efforts, particularly concerning the preservation of unique anthropogenic coastal landscapes and maintaining their ecological sustainability. The results gain special importance given that the studied objects are located within the buffer zone of UNESCO's cultural and natural heritage site—the historical archaeological complex “Ancient City of Bolgar.”

ЛИМНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ МАЛЫХ АРКТИЧЕСКИХ ОЗЕР ОСТРОВОВ БАРЕНЦЕВА МОРЯ (ПО ЭКСПЕДИЦИОННЫМ ДАННЫМ 2024 г.)

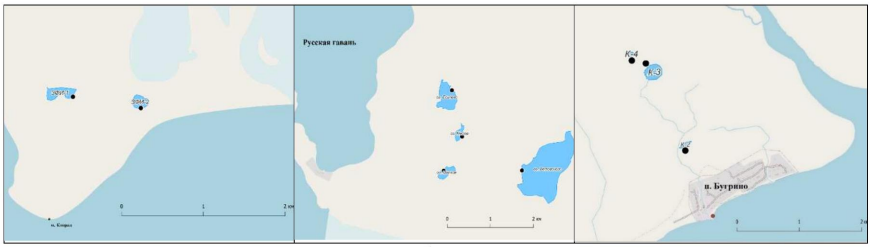
Н.В. Зуева[1], Е.Д. Дрюкова[1], А.М. Губина[2], Ю.А. Зуев[3], Н.А. Лис[4], М.И. Болотов[5], О.Г. Грушуткин[6], Е.Ю. Воякина[1,7]

[1] Российский государственный гидрометеорологический университет

[2] *Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова*
[3] *Санкт-Петербургский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л.С. Берга»)*
[4] *Арктический и антарктический научно-исследовательский институт*
[5] *Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лавёрова УрО РАН*
[6] *Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН*
[7] *Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН*

Обследованы 9 озёр на островах Баренцева моря. Это 2 озера на о. Мейбел (Земля Франца–Иосифа); 4 – о. Северный (Новая Земля); 3 – о. Колгуев. По площади большинство озер отнесены к очень малым, одно – к малым. Общая минерализация воды во всех водоемах очень низка. По значению активной реакции среды озера относятся к «ацидно–нейтральным» и «нейтрально–олигощелочным». Концентрации растворенного кислорода варьируют в пределах 6,8–12,5 мг/л. Концентрации хлорофилла *a* соответствуют олиготрофному уровню для водоемов о. Мейбл и о. Северный и мезотрофному – для о. Колгуев. Водные макрофиты относительно разнообразны в озерах о. Колгуев, максимальное видовое богатство 12 видов.

Полевые работы выполнены 2–12 июля 2024 г. в экспедиции «Арктический плавучий университет». Географические объекты исследования: 2 озера на о. Мейбел, на мысе Конрад (арх. Земля Франца–Иосифа); 4 озера на о. Северный, в районе Русской гавани (арх. Новая Земля); 3 озера на о. Колгуев, в районе п. Бугрино (рис.).



а *б* *в*

Рис. 1. Исследованные озера, (а) о. Мейбел, Земля Франца–Иосифа, (б) о. Северный, Новая Земля, (в) о. Колгуев

Отбор проб воды осуществлен из поверхностного горизонта в одной точке на каждом озере. Ряд характеристик воды определен *in situ* с помощью портативных анализаторов (температура, общая минерализация, pH). Гидрохимический анализ для определения концентрации растворенного кислорода, содержания фосфора фосфатов и форм кремния проведен в лаборатории на судне (Руководство…, 2003). Законсервированы пробы воды для определения соединений азота.

При гидробиологических работах использованы традиционные методические разработки (Катанская, 1981; Руководство…, 1992). Описание растительного покрова озёр выполнено на участке берега протяженностью 100 м, небольшие озера описаны полностью. Кроме того, выполнен отбор и фиксация проб макрозообентоса, зоопланктона и фитопланктона. Для определения концентраций хлорофилла *a*, пробы воды были профильтрованы через стекломикроволоконные фильтры (размер пор 0,7

мкм). Фильтры заморожены до прибытия в лабораторию, где значения концентраций хлорофилла *a* определены экстрактным флуориметрическим методом.

Морфометрические характеристики водоемов измерены с использованием инструмента ГИС–приложения QGIS Calculate Geometry, который позволил определить площадь озера по данным спутниковых снимков.

Площади изученных озер находились в диапазоне от 0,003 до 1,40 км^2. Самое крупное из них – озеро Ретовского (о. Северный), наименьшее – озеро без названия «К–4» (о. Колгуев). Средняя площадь озер 0,4 км^2. В соответствии с их площадью, по классификации П.В. Иванова, большинство исследованных водоемов можно отнести к категории «очень малые», а озеро Ретовского относится к «малым» (Китаев, 2007).

Остров Мейбл. На обследованных озерах ледяного покрова не было. Температура воды составила 3,6–4,5 °С. Озера мелководные, грунт с наилком, песком и гравием. Озеро без названия ЗФИ–1 расположено у подножия горы на террасе моренных отложений, имеет вытянутую форму. Озеро без названия ЗФИ–2 расположено в 300 м от побережья моря, его форма округлая. По минерализации воды озера относятся к «ультрапресным». Полученные данные входят в диапазон значений общей минерализации, выявленных в исследованиях водных объектов на о. Мейбел в 2016 г. (Krasheninnikov, 2022). По величине активной реакции (pH) оба водоема относятся к «ацидно–нейтральным», насыщение вод кислородом определяется как «среднее». Содержание кремния относится к категории «очень низкое». Концентрации фосфат-ионов в озерах очень близки – 36 и 41 мкг/л. Содержание хлорофилла *a* в воде озер составило 0,73 и 0,81 мкг/л, эти значения входят в диапазон характерный для олиготрофных водоемов (Китаев, 2007). Вдоль уреза воды на озерах встречались единичные растения *Alopecurus magellanicus* Lam.

Остров Северный. В районе Русской гавани на всех озерах наблюдался ледяной покров. Температура воды составила 2,3–5,5 °С. Самое крупное из обследованных – оз. Ретовского расположено у подножия горы, берег пологий каменистый, 70% поверхности озера покрыто льдом. Оз. Малое находится в понижении между низкими моренными холмами, с восточного берега вытекает ручей, 20–30% площади озера покрыто льдом. Оз. Мелкое расположено в плавном понижении рельефа, берег каменистый. С южной и северной сторон впадают ручьи, ледяной покров до 90%. Оз. Есипова окружено каменистыми пологими берегами, покрыто льдом до 60–70% площади.

По общей минерализации воды оз. Ретовского относится к «пресным», озера Малое, Мелкое и Есипова – к «ультрапресным». По величине активной реакции среды (pH) озера «нейтрально–олигощелочные». По сравнению с нашими данными 2023 г., значения минерализации и температуры воды в оз. Мелкое и Ретовского ниже. Это может быть обусловлено более поздним освобождением от ледового покрова в 2024 г. и опреснением поверхностного слоя озер талыми водами.

Наибольшее содержание биогенных элементов зафиксировано в оз. Малое и Мелкое, также они визуально характеризовались высокой мутностью. Содержание фосфат-ионов в озерах различается на несколько порядков (4–243 мкг/л). Концентрация кремния варьирует в диапазоне (369–871 мкг/л) и характеризуется как «очень низкая». Концентрация хлорофилла *a* в воде озер очень невелика, она находилась в диапазоне 0,07 и 0,30 мкг/л, что соответствует олиготрофии (Китаев, 2007).

Вдоль уреза воды на озерах в Русской гавани изредка встречались мхи родов Scorpidium и Calliergon.

Остров Колгуев. Вблизи п. Бугрино исследуемые безымянные озера находятся севернее населенного пункта. Их берега топкие, грунт илисто-торфяной. Температура воды составила 15,6–17,5 °С. Минерализация воды в озерах охарактеризована как низкая (23–58 мг/л), что согласуется со значениями, полученными в 2023 г. (22–49 мг/л). По

величине pH озера относятся к «ацидно–нейтральным» так же, как и в 2023 г. Для озер характерно более низкое, по сравнению с другими исследованными, содержание растворенного кислорода (6,81–8,84 мг/л). Содержание кремния в озерах изменяется в диапазоне 130–551 мкг/л и определяется как «очень низкое» (Китаев, 2007). Содержание фосфатов находится в диапазоне 13–23 мкг/л. Концентрации хлорофилла *a* составили 5,53–8,13 мкг/л, такие значения характерны мезотрофным водным объектам (Китаев, 2007).

Вдоль берега безымянного озера К-2 было развито сообщество сырой осоковой тундры. Сообщество сложено *Carex aquatilis* Wahlenb. (до 80%), относительно обильны *Carex rariflora* (Wahlenb.) Sm., *Eriophorum vaginatum* L., *Eriophorum polystachion* Sm., *Caltha palustris* L. Дно озера покрыто водным мхом рода *Warnstorfia.* Среди мхов в озере произрастают *Hippuris vulgaris* L. и *Sparganium hyperboreum* Laest. ex Beurl, реже встречаются *Potamogeton alpinus* Balb. и *P. berchtoldii* Fieber. Нужно отметить, что оба вида Potamogeton отмечены для о. Колгуев впервые – *Potamogeton alpinus* обнаружен в 2023 г. и *P. berchtoldii* Fieber – в 2024 г. По литературным источникам ранее виды отмечены на более южных территориях – в Тиманской тундре, в нижнем течении р. Печора и в Большеземельской тундре (Лавриненко и др., 2024). Общее число отмеченных на озере видов – 12.

Проективное покрытие сосудистых растений на озере К-4 около 80%. По урезу воды сформировано осоково-разнотравное сообщество, сложенное *Carex aquatilis*, представлены *Petasites frigidus* (L.) Fr., *Comarum palustre* L., *Caltha palustris*, *Hippuris vulgaris*. На кочках *Carex aquatilis* и мелководье формируются моховые сообщества с *Epilobium palustre* L. Общее число отмеченных видов – 7.

В безымянном озеро К-3 по урезу воды сформирована дернина с проективным покрытием 95% сложенная преимущественно *Carex aquatilis*, так же в составе присутствуют *Eriophorum vaginatum*, *Caltha palustris*, *Comarum palustre*. Общее количество отмеченных видов – 7.

Таким образом, в 2024 г. проведены обследования 9 арктических озёр на 3х островах Баренцева моря. Выполнен анализ некоторых их гидрофизических, гидрохимических, гидробиологических характеристик. По площади водной поверхности большинство исследованных озер можно классифицировать как «очень малые». В период работ самые низкие температуры поверхностного слоя воды были закономерно отмечены в северных районах – на озерах о. Мейбл и о. Северный, они изменялись в диапазоне 2,3–5,5 °С. Минимальные значения температуры были зафиксированы для оз. Есипова (о. Северный). На о. Колгуев значения температуры воды составили 15,6–17,5 °С. Общая минерализация воды во всех водоемах очень низка. По сравнению с исследованием 2023 г. минерализация ниже, что может быть связано с опреснением за счет более позднего снеготаяния. Максимально значение минерализации воды в самом большом из исследуемых озер – Ретовского (о. Северный). По значению активной реакции среды озера относятся к «ацидно–нейтральным» и «нейтрально–олигощелочным». Значения растворенного кислорода на исследованных озерах варьируют в пределах 6,8–12,5 мг/л. Минимальное количество растворенного кислорода определено в озере без названия К–2 (о. Колгуев). Высокие концентрации O_2 определены во всех озерах с низкой температурой воды (о. Мейбл и о. Северный). Концентрации хлорофилла *a* в воде соответствуют олиготрофному уровню для водоемов о. Мейбл и о. Северный и мезотрофному – для о. Колгуев. Водные макрофиты относительно разнообразны в озерах о. Колгуев, максимальное видовое богатство достигало 12 видов.

Благодарности. Авторы очень признательны руководству экспедиции «Арктический плавучий университет» за высокий уровень организации работ.

Литература

Катанская В.М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. Методы изучения. Л.: Наука, 1981. 187 с.

Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 395 с.

Лавриненко О.В., Лавриненко И.А., Цывкунова Н.В., Дьячкова Т.В. Водные и прибрежно-водные сообщества в водоемах Ненецкого автономного округа // Растительность России. 2024. № 49. С. 88–123.

Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / под ред. В. А. Абакумова. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 317 с.

Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.

LIMNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SEVERAL SMALL ARCTIC LAKES OF THE BARENTS SEA ISLANDS (ACCORDING TO THE EXPEDITION DATA OF 2024)

N.V. Zueva, E.D. Dryukova, A.M. Gubina, Yu.A. Zuev, N.A. Lis, M.I. Bolotov, O.G. Grushutkin, E.Yu. Voyakina

In July 2024, surveys were conducted on 9 Arctic lakes located on islands in the Barents Sea. These included 2 lakes on Meibel Island (part of Franz Josef Land), 4 lakes on Severny Island (Novaya Zemlya), and 3 lakes on Kolguev Island near the village of Bugrino. Most of the lakes were classified as very small. The total water mineralization in all the reservoirs was very low. According to the value of the environment in the lakes, they could be classified as acid–neutral and neutral–alkaline. Dissolved oxygen concentrations in the studied lakes ranged from 6.8 to 12.5 mg/l. Concentrations of chlorophyll *a* in the water are consistent with oligotrophic levels for Mabel and Severny islands, and mesotrophic levels for Kolguev. Aquatic macrophytes in the lakes of Kolguev island were relatively diverse (12 species).

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКОСИСТЕМЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА В ПЕРИОД С 1980 ПО 2020 ГОДЫ

А.В. Исаев, В.А. Рябченко

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Многочисленные обобщения, основанные на натурных исследованиях, показывают, что пространственно-временное покрытие Ладожского озера данными наблюдений недостаточно для надёжной количественной оценки межгодовой изменчивости характеристик и биогеохимических потоков в экосистеме озера. В настоящей работе представлены оценки межгодовой динамики основных характеристик экосистемы и биогеохимических потоков в озере в период с 1980 по 2020 гг., полученные с помощью верифицированной трёхмерной эко-гидродинамической модели Ладожского озера. По результатам моделирования выполнена оценка времени оборота фосфора в озере, которое составило 5.4 года для рассматриваемого периода времени 1980-2020гг.

Ладожское озеро является самым большим стратифицированным озером Европы расположенном на Северо-Западе России в бореальной зоне. Площадь водного зеркала

озера составляет 17680 км^2, а объем 848 км^3 (Ладога, 2013). Акватория Ладожского озера является важнейшим водным ресурсом Северо-Запада России, имеющим исключительное народно-хозяйственное значение. Водные ресурсы озера используются как источник питьевого снабжения Санкт-Петербурга и Ленинградской области, так и обеспечения многочисленных промышленных предприятий (Современное …, 2021, Поздняков, 2021). Во многом экосистема Ладожского озера уникальна в силу своего расположения в северных широтах. Поэтому исследование динамики экосистемы озера при антропогенном воздействии в условиях изменения климата является важной научной задачей, имеющей социально-экономическое приложение. К настоящему моменту выполнено достаточно много исследований изменчивости экосистемы Ладожского озера, основанных на данных натурных и дистанционных измерений (Летанская, 2012, Петрова, 1992, Петрова, 2010, Поздняков, 2009, Современной …, 2021). В результате этих исследований получены оценки реакции экосистемы на изменения поступления биогенных элементов и изменения климата. Обобщение этих исследований подробно изложено в недавней монографии (Современной …, 2021). Однако, в силу методических и организационных ограничений при выполнении натурных исследований, пространственно-временное покрытие данными акватории озера недостаточно для количественного описания сложных многофакторных взаимодействий и потоков в озерной экосистеме.

Для восполнения неполноты в оценке динамики экосистемы Ладожского озера по данным натурных наблюдении в настоящей работе выполнен анализ смоделированной межгодовой динамики содержания и потоков фосфора, а также биомассы и первичной продукции фитопланктона.

Межгодовая изменчивость экосистемы Ладожского озера была рассчитана с использованием трехмерной объединенной математической модели, которая включает в себя модели гидротермодинамики и биогеохимических циклов, подробное описание которой и ее верификация приведено в работах (Исаев, 2024а, Исаев, 2024б).

Межгодовая изменчивость температуры. Температура является одной из важнейших гидрофизических характеристик, которая обуславливает изменчивость в пространстве и времени биогеохимических характеристик. Поэтому, предваряя анализ пространственно-временной изменчивости биогеохимических характеристик, рассмотрим межгодовую изменчивость как среднегодовой, осредненной по всему объёму озера, так и средней за вегетативный период (май-октябрь), осреднённой по фотическому слою, температуры воды (рис. 1). Межгодовая изменчивость обеих этих характеристик за период исследований имеет выраженный тренд на повышение. Рост среднегодовой температуры всего озера за весь рассматриваемый период составляет 0,76°С, в то время как повышение средней температуры фотического слоя в летний период оказалось равным 1,5°С, т.е. примерно в 2 раза больше. Другими словами, реакция фотического слоя озера на изменения климата оказалась гораздо больше реакции его глубинных слоёв.

Временная изменчивость биогеохимических характеристик. Основными биогеохимическими параметрами, которые характеризуют изменчивость состояния экосистемы водного объекта, являются биомасса фитопланктона и его первичная продукция, а также биогенные элементы, лимитирующие производство органического вещества в процессе фотосинтеза, т.е. в случае фосфорной лимитации, существующей в Ладожском озере, – это различные формы фосфора.

Воспроизведенная межгодовая изменчивость содержания общего фосфора и минерального фосфора (рис. 2) в водной среде озера отражает динамику внешней биогенной нагрузки, хотя и сдвинуто по времени. Можно выделить период с 1980 по 1995 гг. с высокой среднегодовой концентрацией общего фосфора (25,8±1,16 мг/м^3), период её снижения в 1995 – 2003гг. и период 2003-2020гг., для которого характерна низкая

среднегодовая концентрация (16,3±0,87 мг/м^3). Воспроизведенное среднегодовое содержание минерального фосфора для периода с 1980 по 1995 гг. составляет 12,59±1,84 мг/м^3, а для периода с 2003 по 2020 гг. – 7,56±1,34 мг/м^3 Таким образом, снижение содержания фосфора в водах Ладожского озера между периодами высокой и низкой биогенной нагрузки составляет около 40 % как для общего, так и для минерального фосфора. Отметим временной сдвиг в 3-4 года между началом снижения внешней нагрузки и началом снижения содержания фосфора в озере. Ниже будет дано объяснение этому временному сдвигу.

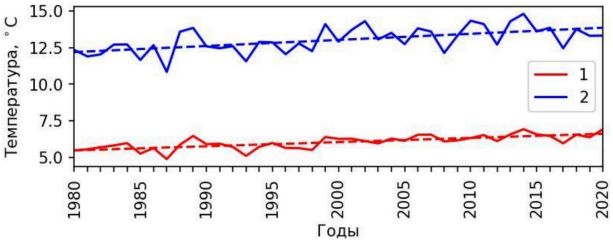


Рис. 1. Межгодовая изменчивость среднегодовой, осредненной по всему объему озера (1), и средней за вегетативный период (май-октябрь), осреднённой по фотическому слою (2), температуры воды по результатам моделирования

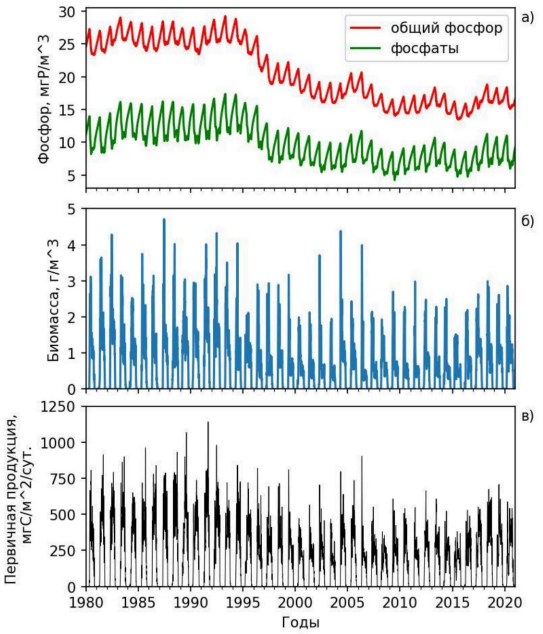


Рис. 2. Воспроизведенная среднесуточная динамика осредненных по объему озера общего фосфора и фосфатов (а), осредненной по фотическому слою биомассы фитопланктона (б) и интегральной (по фотическому слою) первичной продукции (в) в период 1980-2020 гг.

Изменения концентрации минерального фосфора аналогичны изменениям общего фосфора. Средняя многолетняя концентрация фосфатов в безлёдный период по результатам моделирования составляет 11,01±1,19 мг/м^3 в 1980 – 1995 гг. и 6,49±0,61 мг/м^3 в 2003 – 2020 гг.

Воспроизведенная долгосрочная динамика биомассы фитопланктона устойчиво воспроизводит характерную сезонную закономерность: сильное весеннее цветение фитопланктона, переходящее в летнюю квазистационарную фазу, за которой следует слабое осеннее цветение (рис.2). Что касается межгодовой динамики биомассы фитопланктона, отметим три описанных выше временных интервала с разным характером изменчивости, на которых, в отличие от фосфора, изменения биомассы фитопланктона выражены не столь ярко. Оценки средних по акватории озера значений рассчитанной биомассы фитопланктона показывают, что для периода 1980 – 1995 гг. средняя биомасса в вегетативный период (май-октябрь) составляет 1,5±0,7 г/м^3, а для периода 2003-2020 гг. 0,8±0,5 г/м^3. Максимальные значения биомассы в период весеннего цветения диатомовых водорослей достигают 4-4,5 г/м^3 в первый из обозначенных временных интервалов и 2-3 г/м^3 – во второй (рис. 2).

Биогеохимические потоки. На основе результатов моделирования был расчет годовых биогеохимических потоков осредненных за исследуемый период. Согласно проведенным оценкам средняя за период 1980-2020гг. годовая первичная продукция составляет 1021±208 тыс. т С в год, причем 20-ти процентное стандартное отклонение свидетельствует о значительной межгодовой изменчивости, которая обуславливается изменчивостью внешних условий, прежде всего, температуры воды. Также был рассчитан вклад различных источников фосфора в формировании первичной продукции. В целом для всего рассматриваемого периода 1980-2020 гг., вклад речного стока в обеспечении потребностей в фосфатах при производстве органического вещества составляет 8 % от общего потребления, поступление из донных отложений сопоставимо с поступлением из рек и составляет 10 %. Основной вклад в обеспечение фосфатами вносит процесс внутреннего рециклинга, который составляет 82 %. При этом 33% обеспечивается за счет экскреции зоопланктона, а 49% за счет минерализации, в которую включена минерализация органического вещества, поступающего с речным стоком.

Оценка времени оборота общего фосфора в водах озера. Для оценки времени оборота фосфора в озере воспользуемся следующей формулой: T = C V/F, где T = время оборота фосфора (годы), C – средняя концентрация фосфора в озере (мг/м^3), в качестве которой обычно используется концентрация фосфора в период максимального зимнего накопления, V – объём озера (км^3) и F – поступление фосфора в озеро (тонны в год). Согласно результатам расчетов, C= 26 (мг/м^3) и F=4271 тонн P/год в среднем для периода 1980-2020гг.; объём (в соответствии с расчетной сеткой) V=890 км^3. В результате получаем, что скорость оборота фосфора в Ладожском озере составляла примерно 5.4 года для периода 1980-2020гг.

Как было сказано выше, существует временной сдвиг в 3-4 года между началом снижением внешней нагрузки и началом снижения концентрации фосфора в озере. Оценки времени оборота фосфора показывают, что при сокращении внешней нагрузки, время приспособления озера к новым нагрузкам будет определяться скоростью вывода за пределы системы накопленных под воздействием повышенной нагрузки запасов биогенных элементов, которое определяется временем их оборота. В результате возникает указанный временной сдвиг между началом снижения фосфорной нагрузки и началом снижения содержания фосфора в озере.

Исследование выполнено при поддержке грантов Российского научного фонда (проект № 23-17-20010) и Санкт-Петербургского научного фонда (проект № 23-17-20010)

Литература

Исаев А.В., Рябченко В.А., Коник А.А. Воспроизведение современного климатического состояния экосистемы Ладожского озера // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. 17(2). С. 50-65.

Исаев А.В., Рябченко В.А. Модельные оценки межгодовой изменчивости характеристик экосистемы Ладожского озера в период с 1980 по 2020 годы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. 17(4). С. 32-42.

Ладога / Под ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева. СПб.: Нестор-История, 2013. 468 с.

Летанская Г.И., Протопопова Е.В. Современное состояние фитопланктона Ладожского озера (2005–2009 гг.) // Биология внутренних вод. 2012. №4. С. 17–24.

Петрова Н.А., Антонов С.Е., Протопопова Е.В. Структурные и функциональные характеристики фитопланктона // Ладожское озеро: критерии состояния экосистемы. СПб., 1992. С. 119-145.

Петрова Н.А., Петрова Т.Н., Сусарева О.М., Иофина И.В. Особенности эволюции экосистемы Ладожского озера под влиянием антропогенного эвтрофирования // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, №5. С. 580–589.

Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Расулова А.М., Коробченкова К.Д. Ладожское озеро – геостратегический водный объект Северо-Запада России и его зоны экологического риска // Гидрометеорология и экология. 2021. № 62. С. 139–161.

Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. М.: Изд-во РАН, 2021. 640 с

MODELLING INTERANNUAL VARIABILITY OF THE LAKE LADOGA ECOSYSTEM CHARACTERISTICS IN THE PERIOD FROM 1980 TO 2020

A.V. Isaev, V.A. Ryabchenko

Numerous generalizations based on field studies show that the spatiotemporal coverage of Lake Ladoga with observational data is insufficient for a reliable quantitative assessment of the interannual variability of the characteristics and biogeochemical fluxes in the lake ecosystem. This paper presents estimates of the interannual dynamics of the main ecosystem characteristics and biogeochemical fluxes in the lake for the period from 1980 to 2020, obtained using a verified three-dimensional eco-hydrodynamic model of Lake Ladoga. Based on the modeling results, an estimate of the phosphorus turnover time in the lake was made, which amounted to 5.4 years for the considered time period 1980-2020.

ОЦЕНКА АБИОТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕИЗУЧЕННЫХ МАЛЫХ И СРЕДНИХ ОЗЕР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

С.А. Кондратьев, С.Д. Голосов, И.С. Зверев, А.М. Расулова
Институт озероведения РАН, Санкт-Петербургский ФИЦ РАН

Предложена методика полностью дистанционной оценки характеристик термического режима неизученных озер серверной части водосбора Ладожского озера, расположенного в пределах Восточной Фенноскандии. С использованием средств ДЗЗ дешифрируется интересующий водный объект, находятся его географические координаты и площадь. На основе геостатистических соотношений между площадью и

глубиной, последняя оценивается для неизученных или малоизученных озер. По географическим координатам из баз данных метеорологического реанализа извлекается метеоинформация требуемого разрешения. Глубина озера и метеоданные являются входными данными в модель FLake, которая рассчитывает термические характеристики водоема, а также теплоперенос между водой и донными отложениями. При этом не требуются контактные измерения, что крайне важно для труднодоступных, неизученных или малоизученных северных территорий.

В настоящее время абсолютное большинство озер северных территорий России с площадью 0,1–100 км^2 можно отнести к категории неизученных или малоизученных, так как на них не проводятся какие-либо регулярные контактные измерения (Румянцев и др., 2021). К числу таких территорий относится и Восточная Фенноскандия, в пределах которой расположена северная часть водосбора Ладожского озера. Причиной этого является многочисленность и труднодоступность озер. С развитием технологий появились возможности получать информацию о труднодоступных озерах, не проводя трудоемких и дорогостоящих контактных измерений, дистанционными методами исследования (активными и пассивными). Использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) даёт возможность оценивать температуру воды, отслеживать образование льда, наблюдать за изменениями береговой линии и площади водоёмов, изучать флору и фауну озёрных экосистем. Такой подход значительно расширяет возможности исследования озер северных регионов, позволяя получить ценные данные для экологического мониторинга. Однако применение дистанционных методов ограничено многими факторами, основными из которых являются разрешающая способность датчиков, затрудняющая изучение мелкомасштабных объектов и процессов (обычно менее 10–30 м^2) и глубина проникновения электромагнитного излучения в водоем, что мешает получению информации о термических процессах в водной толще. Недостаток информации о водной массе многочисленных озер негативно влияет на планирование хозяйственной деятельности в северных регионах, а также на научную обоснованность прогнозов возможных изменений характеристик озер и их донных отложений в условиях климатических изменений.

Целью настоящего исследования является разработка методики дистанционной оценки характеристик неизученных озер Восточной Фенноскандии (в пределах водосбора Ладоги) с площадью менее 100 км^2 на основе методов математического моделирования с использованием имеющейся метеоинформации, данных ДЗЗ и геостатистических зависимостей между морфометрическими характеристиками водоёмов. Объектами изучения являются озера Восточной Фенноскандии, расположенные на водосборе Ладожского озера в природных зонах (Национальный атлас России, 2007) северной и средней тайги (рис.1).

Среди водоёмов Восточной Фенноскандии значительную часть составляют мелководные озёра и водохранилища со средними глубинами от 5 до 12 м и горизонтальными размерами от нескольких сотен метров до нескольких километров (Рянжин, Ульянова, 2000). Одной из основных особенностей таких водоёмов является существенная горизонтальная однородность поля температуры и преобладание процессов вертикального переноса тепла над адвективными. При моделировании термического режима водоёмов этого класса зачастую достаточно использовать простые одномерные модели, основанные на интегрировании уравнения вертикальной диффузии тепла и различных способах представления вертикального распределения температуры. Такие модели, как правило, не требуют задания коэффициентов вертикального турбулентного обмена, просты в реализации и удобны для проведения численных экспериментов.

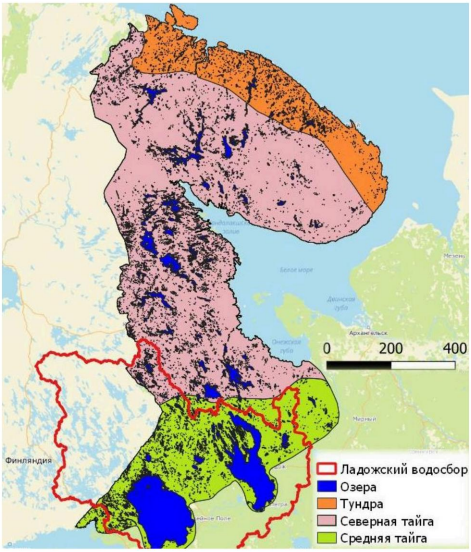


Рис. 1. Природные зоны и озёра Восточной Фенноскандии в пределах водосбора Ладожского озера

Примером модели такого типа является модель FLake, разработанная совместными усилиями сотрудников Института озероведения РАН, Института водных проблем Севера РАН, Института водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Службы погоды Германии (DWD) (Mironov, 2008; Golosov, Kirillin, 2010). Модель FLake является универсальной математической моделью гидротермодинамики озера, в которой реализованы последние мировые достижения в области физической лимнологии. На рис. 2 схематично представлено вертикальное распределение температуры в системе снег – лед – водная масса – донные отложения, временна́я динамика которого рассчитывается в модели.

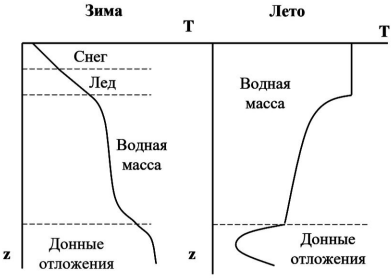


Рис. 2. Схема вертикального профиля температуры T в системе снег – лед – водная масса –донные отложения, реализованная в модели FLake

Объект моделирования должен удовлетворять следующим основным требованиям:

– протяженность не должна быть настолько велика, чтобы породить значительные климатические различия между отдельными участками акватории, и не настолько мала, чтобы вторичная ветровая циркуляция играла очень существенную роль;

– дно должно быть более или менее ровным и горизонтальным, чтобы его можно было аппроксимировать горизонтальной плоскостью;

– адвективные процессы не должны вносить существенного вклада в турбулентное перемешивание.

Модель FLake верифицирована по данным многолетних натурных наблюдений на многочисленных разнотипных озёрах мира и, в частности, расположенных в пределах

Восточной Фенноскандии – озерах Красном (60°33' с.ш., 29°42' в.д., площадь 9 км^2, средняя глубина 7 м) и Вендюрском (62°10' с.ш., 33°10' в.д., площадь 10,4 км^2, средняя глубина 5,5 м) (Mironov et al., 1991; Тержевик и др., 2010).

Для дистанционной оценки характеристик озера с использованием модели FLake необходимо иметь географические координаты объекта, его среднюю глубину (или площадь, по которой можно вычислить глубину) и привязанные к ним данные метеорологического реанализа семейства ERA5. Выборка необходимых для расчётов данных производится по координатам расчётной точки.

Информацию о площадях озёр можно получать различными дистанционными методами. Наиболее приемлемым в рамках настоящей работы методом определения площади водоёма является дешифрирование спутниковых снимков. При решении задачи дистанционной оценки характеристик неизученных озёр в годы различной водности использован глобальный набор данных Global Surface Water (GSW) (Global Surface Water Explorer; Pekel et al., 2016). Вопросам поиска геостатических (территориально общих) взаимосвязей между такими морфометрическими характеристиками озер как площадь (S) и глубина (h) посвящен ряд научных исследований как отечественных, так и зарубежных специалистов. В настоящем исследовании для северной и средней тайги Восточной Фенноскандии (рис.1) использованы эмпирические зависимости средней глубины озера от его площади, которые были получены в результате статистической обработки базы данных WORLDLAKE (Рянжин, Ульянова, 2000) по выбранным природным зонам: h = 2,8177 $S^{0,1689}$, R^2 = 0,4426 (северная тайга), h = 2,7218 $S^{0,2098}$, R^2 = 0,1912 (средняя тайга).

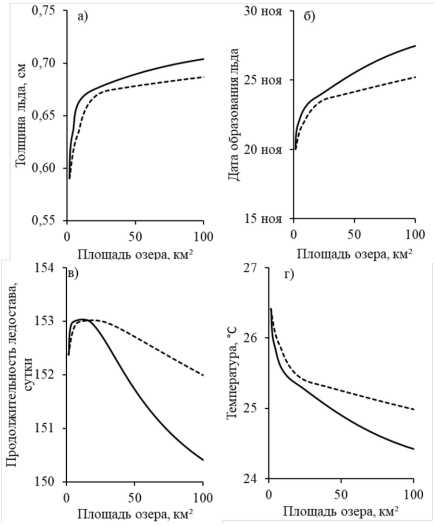


Рис. 3. Рассчитанные значения максимальной толщины льда (а), дат образования льда (б), продолжительности ледостава (в) и максимальной температуры поверхности воды (г) в зависимости от площади озера в зонах северной (пунктир) и средней (сплошная линия) тайги

Расчёты термических характеристик озер выполнялось для двух точек, расположенных на 32° меридиане в зонах северной (65°00' с.ш., 32°00' в.д.) и средней (62°30' с.ш., 32°00' в.д.) тайги с использованием привязанных к ним данных метеорологического реанализа семейства ERA5. По результатам проведённых расчётов построены номограммы, связывающие термические характеристики (максимальная толщина ледяного покрова, продолжительность периода замерзания и максимальная температура поверхностного слоя воды) озёр различных природных зон (серверной и средней тайги) Восточной Фенноскандии со значениями их площадей (рис. 3). Расчёты производились с использованием метеорологических параметров, осреднённых за тридцатилетний интервал – с 1990 по 2020 гг. В первом приближении здесь считалось, что гидрометеорологические входные параметры не

изменялись в пределах рассматриваемой природной зоны. Аналогичные графики могут быть построены и для таких гидротермодинамических характеристик, как температура и толщина верхнего перемешанного слоя в озере, теплообмен через границу раздела вода – дно, степень подледного прогрева водоёма и т.д.

Основным результатом настоящего исследования является методика приближенной полностью дистанционной оценки характеристик термического и кислородного режимов неизученных озер серверной части водосбора Ладожского озера, расположенного в пределах Восточной Фенноскандии. Основные этапы такой оценки сводятся к следующему алгоритму. С использованием средств ДЗЗ дешифрируется интересующий водный объект, находятся его географические координаты и площадь. На основе геостатистических соотношений между площадью и глубиной, последняя оценивается для неизученных или малоизученных озер. По географическим координатам из баз данных метеорологического реанализа извлекается метеоинформация требуемого разрешения. Глубина озера и метеоданные являются входными данными в модель FLake, которая рассчитывает абиотические характеристики водоема, а также теплоперенос между водой и донными отложениями. При этом не требуются сложно реализуемые контактных измерений, что крайне важно для труднодоступных, неизученных или малоизученных северных территорий нашей страны.

Исследование выполнено в рамках темы FFZF-2024-0001 Государственного задания Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН

Литература

Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология. М.: ПКО «Картография», 2007. 496 с.

Румянцев В.А., Измайлова А.В., Макаров А.С. Состояние озёрного фонда Арктической зоны Российской Федерации // Вестник РАН. 2021. Т. 91. №2. С. 115-126.

Рянжин, С.В., Ульянова Т.Ю. Геоинформационная система «озера мира» - GIS WORLDLAKE // Доклады Академии наук. 2000. Т. 370. № 4. С. 542-545.

Global Surface Water Explorer // Режим доступа свободный (Электронный ресурс). – URL: https://code.earthengine.google.com/ (дата обращения 05.09.2024).

Golosov S., Kirillin G.A. parameterized model of heat storage by lake sediments // Environmental modelling & Software. 2010. V. 25. №6. P. 793-801.

Mironov D.V. Parameterization of Lakes in Numerical Weather Prediction. Description of a Lake Model (No. 11), COSMO Technical Report // Germany: German Weather Service, Offenbach am Main. 2008. 44 p.

ASSESSMENT OF ABIOTIC CHARACTERISTIC OF UNSTUDIED SMALL AND MEDIUM-SIZED LAKES USING MATHEMATICAL MODELLING AND REMOTE SENSING METHODS

S.A. Kondratyev, S.D. Golosov, I.S. Zverev, A.M. Rasulova

The methodology of fully remote estimation of thermal regime characteristics of unstudied lakes of the server part of the Lake Ladoga catchment located within Eastern Fennoscandia is proposed. Using remote sensing equipment, the water body of interest is interpreted, its geographical coordinates and area are found. Based on geostatistical relations between area and depth, the latter is estimated for unstudied or poorly studied lakes. According to the geographical coordinates, meteorological information of the required resolution is extracted

from meteorological reanalysis databases. The lake depth and meteorological data are input to the FLake model, which calculates the thermal characteristics of the water body as well as the heat transfer between water and bottom sediments. No contact measurements are required, which is crucial in inaccessible, unexplored or poorly studied northern areas.

РАЗНООБРАЗИЕ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ В СОСТАВЕ ВОДНО-БОЛОТНЫХ УГОДИЙ РОССИИ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

О.Л. Кузнецов
Институт биологии Карельского научного центра РАН

Болотные экосистемы на территории России имеют высокое типологическое разнообразие и характеризуются значительной спецификой функционирования в разных природных зонах. Их типология базируется в первую очередь на признаках растительности. Классификация водно-болотных угодий (ВБУ) в Рамсарской конвенции (1972) базируется в основном на гидрологических критериях и нечетко отражает специфику основных типов болот. В статье проведено сопоставление классификации классов ВБУ и ботанико-географических типов болот на территории России и показаны особенности их функционирования.

Водно-болотные угодья (ВБУ), согласно Рамсарской конвенции (1972), к которой Россия (в составе СССР) присоединилась в 1975 г., охватывают очень широкий спектр как мелководных пресноводных и морских экосистем, так и увлажненных наземных. Международная классификация ВБУ (Водно-болотные …, 1998), принятая 6-ой Конференцией Сторон Рамсарской конвенции, разработана в первую очередь с учетом гидрологических условий и важности участков ВБУ для сохранения местообитаний водоплавающих мигрирующих птиц, а также путей их перелетов. Она трудно сопоставима с классификациями наземных экосистем, базирующихся в первую очередь на признаках растительности. Ярким примером этого является классификация болотных экосистем в Рамсарской конвенции, в которой болота отнесены к нескольким классам – Tp, Ts, U, Xf, Xp. Трактовка этих типов с позиций болотоведения требует уточнений и пояснений. Это сделано нами для болотных экосистем России с учетом их приуроченности к природным зонам.

Класс Tp включает постоянные пресноводные болота, а также мелководные водоемы, обводненные большую часть вегетационного периода – это фактически стадия зарастания мелководных водоемов в процессе формирования приозерных травяных болот. Такие ВБУ встречаются в России от тундровой до степной зоны. Они включаются в болотоведческих классификациях в класс низинных травяных болот (Юрковская, 1992). На них происходит накопление низинных травяных торфов и постепенная динамика от высокотравяных (тростниковых, рогозовых) сообществ в менее обводненные травяные и травяно-моховые болота, преимущественно осоковые. Такие болота в тундре и северной тайге являются местами гнездования многих водоплавающих птиц, а в более южных регионах местами остановок птиц на пролете.

Класс Ts понимается как сезонные/временные пресноводные болота, включая пойменные луга, осоковые болота. Из названия следует, что он включает наряду с болотами и луга, на которых нет торфонакопления. Только пойменные болота, а они в России не только осоковые, следует считать болотным типом ВБУ в рамках этого класса. Пойменные травяные болота характеризуются накоплением, как типичных торфяных

отложений, так и торфяно-аллювиальных с высокой зольностью, в зависимости от режима поймы, длительности ее затопления и количества приносимого аллювия (Пьявченко, 1958). Пойменные болота распространены от тундровой до степной зоны. Они включаются в классификациях в класс низинных травяных болот (Юрковская, 1992).

Класс U назван как безлесные торфяники, включая кустарниковые. Это очень широкое определение позволяет включить в него все типы открытых (безлесных и слабо облесенных) болот, встречающихся во всех природных зонах России. Это все типы верховых и переходных сфагновых болот, низинных травяных и травяно-гипновых за исключением пойменных, отнесенных в классы Tp и Ts. Эти типы болот характеризуются активным торфонакоплением и связыванием углерода в торфяных залежах (Кузнецов, 2011), являются регуляторами водного режима ландшафтов, природными фильтрами грунтовых вод и атмосферных осадков. Среди них болотоведами и выделяются несколько типов.

Кустарниковые болота встречаются в разных природных зонах и резко различаются по структуре растительного покрова и функционированию. В бореальной зоне это чаще всего ивово-травяные болота, приуроченные к поймам рек, и их целесообразно рассматривать в классе Ts, так как в них также идет аккумуляция торфяно-аллювиальных высокозольных отложений.

В тундровой зоне и частично в лесотундре преобладают мерзлые бугристые и полигональные болота, в растительном покрове которых на повышенных элементах микрорельефа развит кустарниковый (*Betula nana* s.l., *Salix* spp.), а чаще кустарничковый ярус с лишайниково-моховым напочвенным покровом. Такие болота целесообразнее рассматривать в классе Vt – тундровые ВБУ, в котором болота не упоминаются, но они занимают в тундровой зоне огромные площади и имеют большую специфику в функционировании. Мерзлые бугры в настоящее время активно тают и эродируют, на них активизируются процессы вторичного разложения торфа, возрастает эмиссия парниковых газов в атмосферу (Загирова, Мигловец, 2024). Процесс торфонакопления на буграх очень медленный, отлагаются кустарничковые или кустарничково-моховые торфа с психрофильными видами зеленых мхов, или вообще отсутствует и на поверхность бугров в результате эрозии выходят древние торфа возрастом 2-3 тыс. лет (Василевич и др., 2022). При этом мочажины и топи на бугристых болотах талые до дна или на 1-2 метра, в них активно идет накопление сфагновых и травяно-сфагновых торфов. Полигональные болота в подзоне северных тундр в основном мелкозалежные, низкопродуктивные, при этом с них идет интенсивная эмиссия парниковых газов. Эти болота также служат местами гнездования многих водоплавающих птиц.

Сфагновые верховые и переходные болота являются доминирующими в таежной зоне России, где занимают десятки миллионов гектаров и являются основными поглотителями углекислого газа, связывая его на века в торфяных отложениях. В этом их важнейшая биосферная функция. В пределах огромной площади таежной зоны России сфагновые болота разнообразны и разделяются на несколько классов и типов (Юрковская, 1992, 2010). Крупные верховые болота служат местами остановок птиц во время миграций, где они кормятся клюквой и травянистыми растениями. На них часто гнездятся журавли, а при наличии вторичных озерков лебеди, кулики, утки.

Низинные травяные и травяно-моховые болота, помимо пойм и приозерных котловин, встречаются в различных депрессиях с обильным увлажнением богатыми грунтовыми водами. В отличие от пойменных травяных болот на них активно идут процессы торфонакопления, отлагаются преимущественно нормальнозольные (до 12%) травяные и травяно-моховые торфа. На ключевых болотах, питаемых водами с высоким содержанием карбонатов, зольность торфов выше, иногда имеются прослойки болотной

извести (мергеля). Они также встречаются от тундр до степной зоны и значительно различаются по структуре покрова.

Аапа болота. Это минеротрофные болота с хорошо развитым микрорельефом, в центральных вогнутых частях которых преобладают топкие травяные мочажины и озерки. Пояс аапа болот простирается в подзонах северной и средней тайги от Скандинавии до Средней Сибири (Юрковская, 2010). В мочажинах разреженный растительный покров, поэтому в них замедлено или отсутствует современное торфонакопление, а травяно-сфагновые гряды торф аккумулируют (Кузнецов, 1982). Аапа болота являются активными поставщиками парниковых газов в атмосферу, особенно метана. На них гнездятся многие водоплавающие птицы.

Классы Xf, Xp названы пресноводные лесные ВБУ (Xf) и лесные торфяники (Xp), они включают как пойменные лесные болота (в первую очередь в России это черноольховые), так и лесные болота, функционирующие без воздействия весенних разливов. Сюда же отнесены мелкозалежные заболоченные леса. Эти типы болот распространены по всей бореальной зоне, по долинам рек пойменные черноольшаники встречаются и в степной зоне (Пьявченко, 1958, 1963). Лесные болота вне пойм имеют разный генезис и высокое типологическое разнообразие в зависимости от условий водно-минерального питания и характеризуются медленным торфонакоплением нормальнозольных торфов (Кутенков, Кузнецов, 2013). В пойменных черноольшаниках часто формируются торфяно-минельные отложения.

Литература

Василевич Р.С., Кузнецов О.Л., Лодыгин Е.Д., Зазовская Е.П., Панюков А.Н. Эволюция органического вещества бугристых болот побережья Баренцева моря в условиях меняющегося климата // Почвоведение. 2022. №7. С. 1-18.

Водно-болотные угодья России. Т. 1. Водно-болотные угодья международного значения. М.: Wetland International Publication № 47, 1998. 256 с.

Загирова С.В., Мигловец М.Н. Оценка экосистемных потоков CO_2 на крупнобугристом болоте крайне северной тайги // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее / Матер. 7-го Международного полевого симпозиума. Томск, 2024. С. 28-30.

Кузнецов О.Л. Структура и динамика грядово-мочажинных комплексов аапа болот // Ботан. журн. 1982. Т. 67. №10. С. 1394-1400.

Кузнецов О.Л. Прирост торфа в голоцене в Карелии // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее / Матер. 3-го Международного полевого симпозиума. Новосибирск, 2011. С. 28-29.

Кутенков С.А., Кузнецов О.Л. Разнообразие и динамика заболоченных и болотных лесов европейского севера России // Разнообразие и динамика лесных экосистем. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2013. Кн. 2. С. 152-204.

Пьявченко Н.И. Торфяники Русской лесостепи. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 190 с.

Пьявченко Н.И. Лесное болотоведение. М.: из-во АН СССР. 1963. 192 с.

Юрковская Т.К. География и картография растительности болот европейской России и сопредельных территорий. СПб., 1992. 256 с.

Юрковская Т.К. Меридиональная зональность и широтная дифференциация растительности болот России // Направления исследований в современном болотоведении России. СПб, 2010. С. 165-178.

DIVERISTY OF MIRE ECOSYSTEMS AMONG WETLANDS OF RUSSIA AND SPECIFIC FEATURES OF THEIR FUNCTIONING

O.L. Kuznetsov

Mire ecosystems in Russia exhibit high typological diversity and their functioning patterns vary highly among natural zones. Their typology is primarily based on vegetation traits. The classification of wetlands in the Ramsar Convention (1972) largely builds upon hydrological criteria and does not clearly portray the specific attributes of major mire types. The article draws a comparison between the classification into wetland classes and the botanical-geographical mire types of Russia and describes their specific functional features.

ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОЗЕРА КАМЕННОГО И МЕРЫ ПО ЕГО ОХРАНЕ В ЗАПОВЕДНИКЕ «КОСТОМУКШСКИЙ»

Е.В. Кузнецова, С.В. Тархов

Объединенная дирекция государственного природного заповедника «Костомукшский» и национального парка «Калевальский»

В государственном природном биосферном заповедника «Костомукшский» проводятся многолетние исследования, связанные с изучением оз. Каменное. На основе научных отчетов заповедника и печатных статей разных лет дается описание водоема, его гидрологические, химические и биологические особенности.

ГПБЗ «Костомукшский», созданный в 1983 г., расположен на территории, богатой водными объектами. Самым крупным является озеро Каменное, оно занимает почти 1/3 заповедника. Озеро принадлежит к бассейну Белого моря (водосбор р.Кеми) и является верхним водоемом в системе р.р. Каменная – Чирка-Кемь. Гидрографическая сеть р. Каменной выше оз. Лувозера сформирована 122 элементарными (не имеющими протоков) водотоками, из которых 43 непосредственно впадают в оз. Каменное, а также примерно 200 средними и небольшими ламбами. Средняя длина элементарных водотоков составляет 1,2 км, наибольшая – 8 км. Длина главного водотока до впадения в оз. Лувозера с учетом транзитного по оз. Каменному составляет 67 км. (Поверхностные …, 2001). В озеро впадают реки Каранкайоки, Люттяйоки, Мунанки, Лахтийоки и 42 ручья, вытекает р. Каменная (Ногеусйоки), воды которой через Лувозеро – Кимасозеро - Нюк впадают в р. Чирка- Кемь. Многолетние характеристики и внутригодовая изменчивость речного стока изучены по гидрометрическому створу р.Каменная – с.Лувозеро в 2,5 км выше озера Лувозера.

Характеристика водоема. Котловина имеет ледниково-тектоническое происхождение, длина 24,4 км, в самом широком месте 12,1 км. Площадь зеркала 95,5 км^2, объем озера 782,5 млн м^3, средняя амплитуда колебания уровня 43 см, водообмен замедленный.

Оз. Каменное вытянуто в меридиональном направлении, с четырьмя губами (заливами), расположенными в широтном направлении. Восточный берег сильно изрезан длинными, узкими и глубокими заливами. Для западного характерны плавные очертания, где серпообразные заливы чередуются с закругленными мысами. Всю акваторию озера можно условно поделить на 3 части, отделенными друг от друга островами. Плесы отличаются разным характером глубин, донных отложений, условиями нагревания водных масс и развития динамических процессов. Средняя глубина озера около 8 м. Наибольшие глубины приходятся на северную часть и

достигают 26 м, Средняя часть озера имеет блюдцеобразную форму ложа с глубинами, не более 15–17 м, самой мелководной является южная часть – от 5 до 15 м, рельеф дна здесь сильно пересечен. В южной части озера попадается озерная руда. На дне в пределах глубины 15 м встречается коричнево бурый ил, а на глубинах от 5 до 15 м – светлый серо-зеленый. Береговая зона состоит из песчаных и валунных отложений.

В озере 98 островов, общая S которых - 10 км^2. (Озера Карелии, 2013)

Склоны восточного побережья высокие (55-90 м), крутые, высота западных склонов – 30-50 м, они преимущественно пологие. В северной части озера преобладают высокие берега, в центральной – пологие, а в южной – низкие. Длина береговой линии с островами 252 км. Летом водоем хорошо прогревается. Слой температурного скачка не отмечен. Изменения температур в толще воды небольшие 2-3^o. Аккумуляция тепла водными массами в весенний период в различных частях водоема идет разными темпами: в глубоководной центральной области продолжительное время сохраняются низкие температуры при почти равномерном распределении по глубине; в губах и заливах, где в большей степени сказывается влияние водосборного бассейна и характера берегов, уже устанавливается прямая стратификация с повышением температуры воды в поверхностных слоях. Вода озера характеризуется высокой прозрачностью. В центральной части она достигает в летний период 5 м, зимой 4 м, в губах от 0,7 м до 2,8 м.

Химический состав воды в озере измеряется с 1972 г. По многолетним показателям озеро можно считать олигогумусным среднещелочностным слабокислым гидрокарбонатного класса, олиготрофным. Озеро Каменное отличается низким удельным водосбором (6,9) и, как следствие, для него характерна высокая доля атмосферного питания, что в определенной степени сказывается на состав воды. Согласно гидрохимическим наблюдениям в 1970-е гг. (Природные …, 1985), минерализация воды в озере колебалась от 11,5 до 24,1 мг/л. Среди анионов наиболее изменчиво было содержание гидрокарбонатов (1,3 – 9,9 мг/л). Концентрация хлоридов, сульфатов отличалась постоянством. В катионном составе преобладали ионы кальция. Озеро используется для водоснабжения Костомукши.

На протяжении нескольких десятков лет на территории заповедника проходят практику студенты факультета географии и геоэкологии СПбГУ. В 1997 г. ими был обследован полуостров северной части озера. Проведенные исследования на полуострове между Нильма и Бабьей губой, выявили 4 небольших внутренних озера ледникового происхождения (ламбы), 7 ручьев, протекающих по межхолмовых понижениям, 1 большое болото смешанного типа питания и много заболоченных участков. Все изученные объекты имели кислую реакцию среды. Исключение составляло озеро Каменное, реакция которой – нейтральная и имело величины pH от 5,8-5,6 до 6,87. В местах впадения ручьев в озеро Каменное вода подкислена до 5,8-5,9. В одном из ручьев, протекающих в центральной части полуострова, отмечалось повышенное содержание радона, поступающего по разломам из подстилающих горных пород. (Опекунова, 1997).

Биогенные элементы. Для воды в озере характерно низкое содержание биогенных элементов. Несколько повышенная концентрация железа наблюдалась в заливах Камалахта и Юго-восточной. Вероятно, это связано с обогащением воды за счет притоков, дренирующих заболоченные участки водосборов. В воде постоянно присутствует CO_2 и невысока интенсивность биологических процессов. В летнее время отмечался слабый дефицит O_2, в весеннее и осеннее время вода была им хорошо насыщена. В целом озеро сохраняет высокое природное качество вод. Отличия некоторых химических показателей 1970-х и 1990-х гг. связаны с использованием различных методов анализа.

Радиологические исследования. В 2012 г. на территории заповедника были проведены радиологические исследования ФГБУН Институт экологических проблем Севера Архангельского научного центра УРо РАН. Было выполнено < 4500 измерений, обнаружены сравнительно высокие концентрации техногенного изотопа Cs-137 в донных осадках оз. Каменное до 872 Бк/кг. Увеличение концентрации было обнаружено и во мхах и лишайниках в сторону границы. Появление Cs в озере исследователи объяснить не могли, но было отмечено, что существенного влияния на биосистему озера они не оказывают. Повторные исследования, проведенные в 2015 г., показали резкое снижение значений удельной активности Cs-137 до 76 Бк/кг. Были исследованы также донные отложения озера: искусственные радиоактивные изотопы – Cs-134 и Cs-137 и естественные – K-40, Ra-226, Th-232. В районе Костомукши находятся несколько радоновых источников, два - на территории заповедника. В воде оз. Каменного радон не обнаружен. (Киселев, 2015)/

Зоопланктон. Анализ видового состава зоопланктона оз. Каменное проводился несколько раз на протяжении 40 лет. Озеро определено как олиготрофный водоем с низкой продуктивностью планктонных сообществ. Обедненный планктон характерен для открытой части озера и прибойной литорали. В мелководных губах в его состав наряду с видами, относимыми к комплексу форм пелагиали, входят литоральные виды. В составе донных биоценозов озера отмечены 83 таксономических единицы. (Ryabinkin, 1997). Литоральная зона выражена слабо, занимает незначительную площадь и представлена в основном открытыми песчаными и каменистыми участками. Средняя численность организмов песчаных отмелей не превышает 900 экз./м^2. Значительно разнообразнее и богаче бентос илисто-песчаных и грубо-детритных грунтов зарослевой литорали. (до 3300 экз./м^2). Значительным биоразнообразием отличаются биоценозы бентоса заиленных песчаных грунтов зоны берегового склона. Донная фауна профундальной зоны очень бедна (Куликова …, 2009).

Позже в рамках комплексной программы биологического мониторинга водных объектов Республики Карелия в период с 2010 по 2012 гг. был вновь исследован зоопланктон озера Каменного. Результаты этих исследований показали, что зоопланктон представлен обычными для карельских водоемов видами, имеющими широкое географическое распространение, более половины из них эврибионтные. Это главным образом литоральные и фитофильные формы, которым свойственны широкие ареалы распространения. Пелагический комплекс представлен северными видами – обитателями озер зоны тундры и тайги. Также в состав фауны входят космополиты и обитатели зоны смешанных лесов., число этих видов незначительно. Данные, полученные в ходе комплексного исследования, сравнивались с предыдущими данными, собиравшимися на протяжении предыдущих 40 лет. Макрофиты, изученные в 2013 г., представлены 59 видами, в том числе редкими - лобелией Дортмана, урутьей очередноцветковой и другими. Зоопланктон представлен 75 таксонами, микрозообентос – 83 таксона. Из рыб обычны сиг, ряпушка, хариус, щука, плотва, лещ, язь, елец, гольян, уклейка, налим, окунь, ерш, девятииглая колюшка, обыкновенный подкаменщик. Обитает в озере атлантический лосось, занесенный в Красные книги Республики Карелия и России. Исследования подтвердили стабильность видового состава и структуры зоопланктона озера. По показателям сообщества зоопланктона экосистема озера Каменного сохраняет естественное состояние что позволяет рассматривать его в качестве эталонного водоема при проведении гидроэкологических исследований. (Ученые записки ПетрГУ…, 2014)

Рыбы оз. Каменного. Первые сведения о рыбах, обитающих в оз. Каменном (табл.), приводятся в сводке Олонецкого губернского земства «Естественные и экономические условия рыболовного промысла в Олонецкой губернии» (1915). Позже

были проведены работы для определения состояния рыбных запасов и разработки мероприятий по рациональному их использованию (Первозванский и др., 1977; Биологические ресурсы …, 1986; Первозванский, 1986). Последние комплексные исследования проведены в 2024 г. сотрудниками ИБ КарНЦ РАН.

В 2013 г. отмечены две популяции малотычинкового сига (мелкая и крупная), имеющие морфологические и экологические отличия. Единично встречается озерно-речной среднетычинковый сиг (Ильмаст, 2014). В 2017 г. состоялось обследование малых притоков оз. Каменного (бонитировка и паспортизация). Только в одном из 17 притоков обнаружено нерестилище пресноводной формы атлантического лосося (5 особей молоди). По данным опроса, в 1970–1980-е гг. по всей акватории оз. Каменного отлавливался крупный лосось весом 10-12 кг, в 1990-е годы он попадался в браконьерские сети. Можно предположить наличие обособленной популяции лосося в озере. В 2017 г. обнаружены одиночные моллюски жемчужницы на верхних порогах и Царь-пороге р. Каменной. Среди раковин преобладают старшие возрастные группы (12-14 см), однако наблюдаются и молодые особи (5-7 см) (Отчет …, 2017).

Таблица 1. Виды рыб оз. Каменном, зафиксированные с 1597 по 2024 гг.

	1597	2 пол. XVIII в.	1972-1973	1980	2009-2011	2017	2024
Окунь	+	+	+	+	+	+	+
Ерш		+	+	+			+
Плотва	+	+	+	+	+	+	+
Щука	+	+	+	+	+	+	
Язь		+	+	+			
Сиг	+	+	+	+	+	+	+
Ряпушка			+	+	+		+
Подкаменщик				+		+	
Уклейка			+	+	+		
Колюшка девятииглая			+	+			
Налим		+	+	+		+	
Лосось			+	+		+	
Гольян			+	+		+	
Хариус					+	+	+
Лещ		+					

Изучение и сохранение пресноводной формы атлантического лосося и жемчужницы европейской (Красная книга России) является одной из ведущих задач ГПБЗ. Особо охраняемые природные территории играют также важную роль в сохранении разнообразия гидробионтов пресноводных экосистем. Оз. Каменное – одно из немногих озер, которое не подвергалось влиянию хозяйственной деятельности человека, это основной источник питьевой воды для города. В настоящее время расход воды ниже допустимых значений. Остальные параметры: охранный статус, малонаселенность района, труднодоступность, близость государственной границы, позволяют проводить постоянные наблюдения, которые помогут оценивать состояния других озер Карелии. Озера, расположенные на ООПТ и не подверженные антропогенному воздействию, могут считаться эталонными при проведении научных исследований.

Литература

Естественные и экономические условия рыболовного промысла в Олонецкой губернии. Издание Олонецкаго Губернскаго земства / Оценочно-статистический отд. Олонецкой губернской земской управы. Петрозаводск: «Северная Скоропечатня» Р. Г. Кац, 1915. VII, 303, 135 с.

Ильмаст Н.В. Отчет «Оценка состояния популяции щуки в озере Каменном» // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2014. №6.

Ильмаст Н.В., Стерлигова О.П., Кучко Я.А., Савосин Д.С., Малянчук Н.П.Сиговые рыбы оз. Каменного (ГЗ «Костомукшкий») // Научные исследования в заповедниках и национальных парках России / Тезисы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 25-летию биосферного резервата ЮНЕСКО. Петрозаводск, 2016.

Куликова Т.П., Кухарев В.И., Рябинкин А.В., Чекрыжева Т.А.Гидробиологическая характеристика водных экосистем особо охраняемых природных территорий Республики Карелия. Зеленый пояс Фенноскандии // Труды КарНЦ РАН. 2009. №2.

Поверхностные воды Калевальского района и территории Костомукши в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск, 2001. 168 с.

Филатов Н.Н., Кухарев В.И. Озера Карелии. Справочник. Петрозаводск, 2013. 464 с.

Отчет «Ландшафтно-экологическая оценка территории Костомукшского государственного заповедника». СПб, 1997.

Отчет «Сохранение популяций пресноводной жемчужницы и лососевых рыб, комплексная экологическая оценка современного состояния биоты водоемов и рек, разработка путей сохранения и восстановления численности популяций редких видов ФГБУ ГПЗ «Костомукшский», 2017.

Отчет «Радиологические исследования в государственном природном заповеднике «Костомукшский» ФГБУН Институт экологических проблем Севера Архангельского научного центра УрО РАН, 2015.

THE HISTORY OF KAMENNOYE LAKE RESEARCH AND MEASURES FOR ITS PROTECTION IN THE KOSTOMUKSHSKY NATURE RESERVE.

E.V. Kuznetsova, S.V. Tarkhov

Kostomukshsky Biosphere Reserve is located on the eastern side of the West Karelian upland. The hydrographic network is based on the catchment area of Lake Kamennoye, the largest waterbody in the head water of Kamennaya-Nogeusjoki lake-river system. The lake has length 24,4 km, the length of shoreline is 252 km. The chemical indices indicate good water quality. The hydrochemical characteristics of the water studies correspond to those of natural water. Hydrobiological studies have revealed 59 algal species. Lake zooplankton is represented by 75 commonly occurring northern species. Lake Kamennoye, the only large water body in Karelia almost unaffected directly by negative human activities and the river Kamennaya, the largest river of the biosphere reserve. The lake is a unique nature complex which valuable as a model.

ВЛИЯНИЕ БРАУНИФИКАЦИИ НА ПОДВОДНЫЙ СВЕТОВОЙ КЛИМАТ И СОСТАВ ФОТОТРОФОВ В СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ВОДОЕМАХ, ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ОТ БЕЛОГО МОРЯ

Е.А. Лабунская[1], Ю.Г. Соколовская[1], В.И. Лобышев[1], С.В. Пацаева[1], Д.А. Воронов[2], Е.Д. Краснова[1]

[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

[2]Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

В последние десятилетия водоемы умеренных и высоких широт претерпевают повышение концентрации РОВ и, как следствие, браунификацию. Стратифицированные водоемы, находящиеся на разных стадиях изоляции от Белого моря, различаются по степени браунификации и представляют собой хорошую модель для изучения влияния браунификации на спектральный состав света под водой и состав сообществ фототрофов. Показана связь между оптическими характеристиками воды, спектральным составом света и структурой сообщества фитопланктона, а также аноксигенных фототрофных бактерий в ряду водоемов Карельского берега Белого моря.

Водоемы умеренных и высоких широт северного полушария в последние десятилетия испытывают нарастающее влияние глобального изменения климата. Одно из последствий этих изменений – явление браунификации, усиление интенсивности коричневого оттенка воды, связанное с повышением содержания окрашенной фракции растворенного органического вещества (РОВ), в большей степени аллохтонного происхождения. На побережье Белого моря вследствие послеледникового поднятия возникла серия водоемов, отделяющихся от моря, в разной степени изолированных от моря (Krasnova et al., 2018). Усиление изоляции приводит к уменьшению водообмена с морем, ослаблению вертикальной циркуляции, опреснению поверхностного слоя. Опреснение сопровождается увеличением РОВ в поверхностном слое воды, поскольку поверхностные воды в этом заболоченном регионе темные. Таким образом, возникает серия водоемов с разными оптическими характеристиками, которые выражаются в ослаблении прохождении света сквозь воду за счет «природного желтого светофильтра» РОВ в поверхностном слое. Несмотря на то, что последствиям браунификации уделяется достаточное внимание в научной литературе, на данный момент нет работ, анализирующих связанные с этим изменения в спектральном составе света под водой и влияние этого процесса на состав сообществ планктонных фототрофов. Цель данной работы: охарактеризовать изменения спектрального состава света под водой и состав фототрофов по мере усиления браунификации в изоляционном ряду водоемов, отделяющихся от Белого моря.

Три исследуемых водоема находятся на побережье Кандалашкского залива Белого моря в пределах 9 км друг от друга. Все три представляют собой остаточные водоемы, отделившиеся от морской акватории из-за послеледникового поднятия берега и представляют три последовательные стадии изоляции. Начальная стадия изоляции представлена Лагуной на Зеленом мысе (66°31′50″ N, 33°5′42″ E), которая сообщается с морем поверх каменистого барьера, который частично ограничивает поступление воды из моря во время прилива. Озеро Еловое (66°28′55″ N, 33°16′49″ E) находится на следующей стадии отделения. Изолирующий порог поднят достаточно высоко, чтобы полностью перекрыть путь приливам. Однако небольшое количество воды из моря, вероятно, фильтруется сквозь барьер, благодаря чему в этом озере, кроме пресного поверхностного слоя и нижнего соленого сульфидного, есть средний солоноватый слой без сероводорода. Третья стадия изоляции представлена озером Трехцветное (66°35′33″ N, 32°58′43″ E), полностью изолированным от моря, оно имеет полностью пресный миксолимнион и соленый монимолимнион с высоким содержанием сероводорода.

Полевые измерения и отбор проб проводили в летнее время в 2022-2024 гг. Пробы воды для определения РОВ и состава фитопланктона отбирали в самой глубокой точке озера погружным насосом по всей толще от поверхности до дна с шагом 0,5 м, а в градиентной зоне 0,1 м.

Для изучения РОВ перед спектральными измерениями все пробы воды были профильтрованы через нейлоновые фильтры с диаметром пор 0.22 мкм для отделения взвешенных частиц и коллоидного ОВ. Спектры поглощения РОВ природной воды

регистрировали при комнатной температуре относительно дистиллированной воды на спектрофотометре Solar PB2201 в диапазоне длин волн 200 до 800 нм с шагом сканирования 1 нм с использованием кварцевых кювет с длиной оптического пути 3 см. Кюветы с большей длиной оптического пути обеспечивают более точные измерения в пробах воды с низким содержанием РОВ. В дальнейшем оптические плотности приводили к длине оптического пути 1 см.

Интенсивность света определяли люксметром LuxLiner LMI-20 (MetronX, China), модифицированным для подводных измерений. Подводные измерения проводили одновременно с измерением интенсивности света при помощи спектрометра Ocean Optics QE65 Pro (Ocean Insight, United States) с погружным волоконно-оптическим зондом. Полученные спектры линейно нормировали по их максимуму и корректировали с учетом ослабления света на данной глубине.

Доминирующие формы фитопланктона оценивали путем световой и люминесцентной микроскопии в 30-кратном концентрате из 15 мл природной воды, полученном путем центрифугирования.

В качестве показателя содержания РОВ использовали оптическую плотность на длине волны света 350 нм. На рис. 1 приведены зависимости $D(350)$ для оз. Трехцветное, Еловое и Лагуны на Зеленом мысе. Наибольшей оптической плотностью $D(350)$ характеризуются сульфидные воды в озерах, которые в большей степени изолированы от моря, а в лагуне с ежедневными приливами вода более прозрачная. В поверхностном слое воды ослабление света за счет РОВ увеличивается в изоляционном ряду водоемов (рис. 1). Наибольшая $D(350)$ характерна для оз. Трехцветное, наименьшая для Лагуны на Зеленом Мысе, озеро Еловое занимает промежуточное положение.

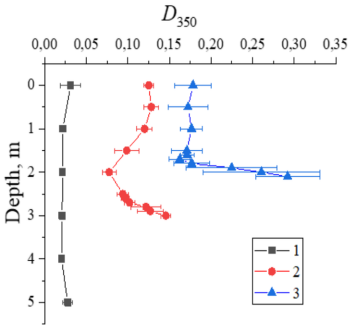


Рис. 1. Вертикальные профили оптической плотности D(350) в водоемах
(каждая точка – среднее за 3 летних сезона ± стандартное отклонение)
1 – Лагуна на Зеленом мысе, 2 – озеро Еловое, 3 – озеро Трехцветное

Следовательно, в исследуемых водоемах формируются разные световые ниши (Краснова и др., 2024). Изменения спектрального состава света по вертикали также различнаются: в Лагуне на Зеленом мысе спектр сужается постепенно, а в озере Трехцветное большая часть света резко ослабляется в первом метре (рис. 2).

Таким образом, ряд водоемов на разных стадиях изоляции от моря представляет собой удобную модель для сопоставления спектрального состава и количества света в разных слоях стратифицированных водоемов с распределением групп фототрофов.

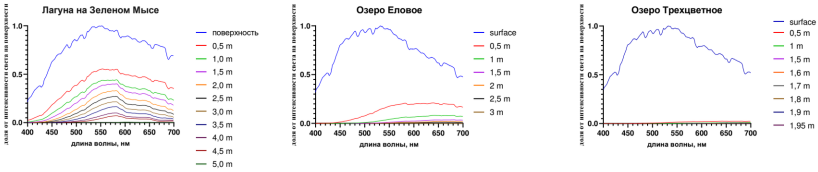


Рис. 2. Спектры солнечного излучения в исследуемых водоемах

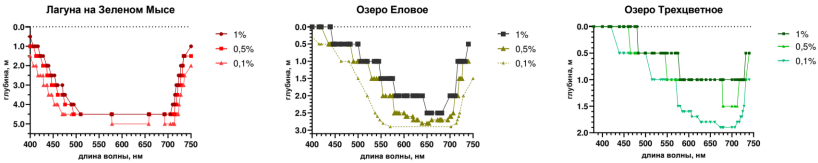


Рис. 3. Вертикальные профили 1%, 0,5% и 0,1% порогов солнечного излучения в водоеме по разным длинам волн в пределах ФАР (400-700 нм)

В Лагуне на Зеленом Мысе свет достигает глубины 5,3 м, это зона непосредственно под границей редокс-перехода. Граница фотической зоны (1% от интенсивности света на поверхности) находится между 4,6 и 4,7 м, а 0,5% и 0,1% пороги оказываются сразу под хемоклином (границей аэробной и сульфидной зон). Ослабление света во всем миксолимнионе (поверхностном слое воды, вовлеченном в сезонную циркуляцию) несущественно, за исключением зоны хемоклина, где располагается плотный слой с цветением криптофитовых, который поглощает свет, ослабляя его в слое 0,8 м более чем в 100 раз. В озере Еловое свет распространяется до глубины 3,2 м и ослабляется равномерно за счет РОВ: 1% порог распространения света находится на 1 м выше границы сульфидной зоны, а 0,1% граница лежит непосредственно в зоне редокс-перехода. Фотическая зона в оз. Еловое меньше, по сравнению с Лагуной на Зеленом мысе, из-за бóльших значений $D(350)$. В озере Трехцветное с самой темной водой распространение света ограничивается 2,2 м, 1% порог находится на глубине 1 м, 0,5% граница – между 1 м и 1,5 м, а 0,1 % - между 1,7 и 1,8 м. На границе сульфидной зоны в этом водоеме существует высокоплотная популяция аноксигенных фототрофных бактерий *Chlorobium phaeovibrioides*, которая получает менее 0,1% от света, падающего на поверхность: примерно 3 – 24 лкс, что соответствует 0,06 – 0,48 мкмоль квантов света/м^2·с. Таким образом, в ряду водоемов по мере усиления степени изоляции от моря происходит существенное ослабление распространения света. Резкое падение интенсивности света в слое хемоклина связано с плотными слоями фототрофных организмов.

Для количественной оценки спектрального состава света под водой для каждой длины волны в границах ФАР (400-700 нм) была определена глубина, до которой доходит 1%, 0,5% и 0,1% от интенсивности света с этой длиной волны на поверхности и построены диаграммы с профилями этих порогов (рис. 3).

Высокое разнообразие водорослевого сообщества в поверхностном слое Лагуны на Зеленом мысе соответствует широкому спектральному диапазону доступного света (рис. 5А): до 1 м доходит не менее 1% света практически всей области ФАР (от 440 нм). В толще воды от 1 м до глубины 4,5 м, где начинается плотный слой фототрофов, количество света плавно падает и до 4,5 м доходит не менее 1% света в пределах 510-705 нм. Следовательно,

на этих глубинах есть свет, доступный для широкого спектра фототрофов, найденных в данных слоях: диатомей, динофлагеллят, зеленых водорослей и цианобактерий. Глубже 4,5 м света мало и только зеленый, что позволяет существовать только микроорганизмам с особо чувствительными к нему красными пигментами. В этой лагуне сообщество хемоклина представлено криптофитовыми водорослями *Rhodomonas* sp. с PE-545 и пурпурными серными бактериями под ними, и они получают не менее 1% света, необходимого для фикоэритриновой антенны криптофитовых и каротиноидов пурпурных серных бактерий (520-587 нм) (Лунина и др., 2023).

В озере Еловое зеленый свет, пригодный для антенн диатомовых, динофлагеллят и золотистых водорослей (до 550 нм) преимущественно сосредоточен в поверхностной опресненной зоне до 1 м (не менее 1% от света на поверхности). Из перечисленных таксонов в этом слое присутствовали золотистые и диатомовые водоросли. До глубины 1,5 м есть доступный свет (не менее 1% от поверхностного) для криптофитовых водорослей с фикоэритрином. Тем не менее, они здесь не развиваются, что, возможно, связано с избыточной интенсивностью освещения. На всех глубинах до 2,5 м есть не менее 1% света, доступного для антенн фикоцианин-содержащих организмов - 640-645 нм, до 2,8 м – не менее 0,5%, до 2,9 м – не менее 0,1% от интенсивности поверхностного света. В соответствии с этим от 1,5 м до хемоклина присутствуют криптофитовые водоросли с фикоцианином. Зеленые серные бактерии *Chlorobium phaeovibrioides* в хемоклине получают 0,1% от света на поверхности в пределах диапазона используемых ими при фотосинтезе длин волн.

В озере Трехцветное от поверхности до хемоклина имеется доступный свет для зеленых, эвгленовых водорослей, а также обладателей антенн с фикоцианином. Этому соответствует распределение представителей Chlorophyta, криптофитовых водорослей и цианобактерий с фикоцианином либо аллофикоцианином – все они встречаются до глубины 1,8 м. При этом пик доминирования Chlorophyta приходится на 1 м, что соответствует 1% границе света в пределах 575-728 нм. Что касается обладателей антенн, адаптированных к поглощению сине-зеленого света, например золотистых, диатомовых водорослей и динофлагеллят, то 1% доступного для них света достигает 0,5 м, а 0,5% граница расширяет эту зону до 1 м. Это хорошо соответствует распределению золотистых водорослей. Лишь диатомовые нарушают это соответствие, так как их вертикальное распределение заходит ниже границы доступного для них света, до глубины 1,8 м. Возможно, диатомеи падают из более верхних слоев. Верхней части хемоклина достигает очень мало света: это узкая красная полоса 673-707 нм в количестве 0,1% от интенсивности света на поверхности. Среди аноксигенных фототрофных бактерий такой свет подходит для зеленоокрашенной формы *Chlorobium phaeovibrioides*. И действительно, их массовое развитие можно наблюдать в хемоклине. Отсутствие фикоэритрин-содержащих организмов можно объяснить тем, что доступный свет есть для них только возле поверхности (0-0,5 м), где освещенность для них избыточна.

В соответствии с теорией Энгельмана, выдвинутой в 1883 г., спектральный состав света может служить селективным фактором, влияющим на таксономический состав сообществ фототрофов. В стратифицированных водоемах различия сообществ фототрофов в разных слоях водоема особенно заметны. В таких сообществах спектральный состав света, достигающего соответствующих слоев, может являться одним из значимых лимитирующих факторов, определяющих состав сообщества.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-24-00008).

Литература

Краснова Е.Д., Лобышев В.И., Лабунская Е.А., Воронов Д.В., Соколовская Ю.Г., Жильцова А.А., Пацаева С.В. Спектральный состав света в хемоклине стратифицированных водоемов, находящихся на разных стадиях изоляции от Белого моря // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37, №4. С. 307–315.

Лунина О.Н., Груздев Д.С., Пацаева С.В., Жильцова А.А., Сузина Н.Е., Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Кокрятская Н.М., Веслополова Е.Ф., Саввичев А.С. Аноксигенные фототрофные бактерии меромиктического озера Большие Хрусломены (о. Олений, Кандалакшский залив, Мурманская область, Россия) // Микробиология. 2023. Т. 92, №6. С. 564-580.

Krasnova E., Matorin, D., Belevich T., Efimova L., Kharcheva A., Kokryatskaya N., Losyuk, G., Todorenko, D., Voronov, D., Patsaeva, S. The characteristic pattern of multiple colored layers in coastal stratified lakes in the process of separation from the White Sea // Journal of Oceanology and Limnology. 2018. 36. P. 1962–1977.

INFLUENCE OF BROWNIFICATION ON UNDERWATER LIGHT CLIMATE AND PHOTOTROPH COMPOSITION IN STRATIFIED WATER BODIES SEPARATED FROM THE WHITE SEA

E.A. Labunskaya, Yu. G. Sokolovskaya, V.I. Lobyshev, S.V. Patsaeva, D.A. Lobyshev, E.D. Krasnova

In recent decades, temperate and high-latitude aquatic ecosystems have exhibited elevated concentrations of dissolved organic matter (DOM), leading to a phenomenon commonly referred to as brownification. Stratified water bodies along a gradient of isolation from the White Sea demonstrate varying degrees of brownification, thereby serving as an effective natural model for investigating the impacts of brownification on the spectral composition of underwater light and the structure of phototrophic communities. This study elucidates the interrelations among the optical properties of water, the spectral quality of underwater irradiance, and the composition of phytoplankton assemblages, including anoxygenic phototrophic bacteria, across multiple reservoirs located on the Karelian coast of the White Sea. These findings contribute to understanding how brownification modulates light availability and influences the ecological dynamics of phototrophic organisms in northern aquatic environments.

ОЗЕРА В РАЙОНАХ РАЗВИТИЯ СУЛЬФАТНОГО КАРСТА ПЕРМСКОГО КРАЯ

Н.Г. Максимович, О.Ю. Мещерякова

Пермский государственный национальный исследовательский университет

В статье приведено описание нескольких озер, которые расположены в районах развития сульфатного карста Пермского края.

Карстовые озера являются характерным элементом ландшафта районов сульфатного карста. По сравнению с озерами других генетических типов и областей карбонатного карста они имеют в большинстве случаев небольшую площадь и глубину, хотя среди них и встречаются водоемы с глубиной более 50 м. Котловины озер представляют собой одиночные или слившиеся воронки и котловины, заполненные

атмосферными осадками или подземными водами. Наибольшую глубину имеют родниковые озера, в которые разгружаются напорные карстовые воды, а наибольшую площадь – озера сложного эрозионно-карстового, ледниково-карстового происхождения и котловины в районах соляно-гипсового или гипсово-соляного карста.

В Пермском крае сульфатный карст распространен на площади около 23 тыс. км^2 (15% территории края). Здесь выделено одиннадцать районов, где карст связан с сульфатными породами (рис.) (Горбунова и др., 1992)

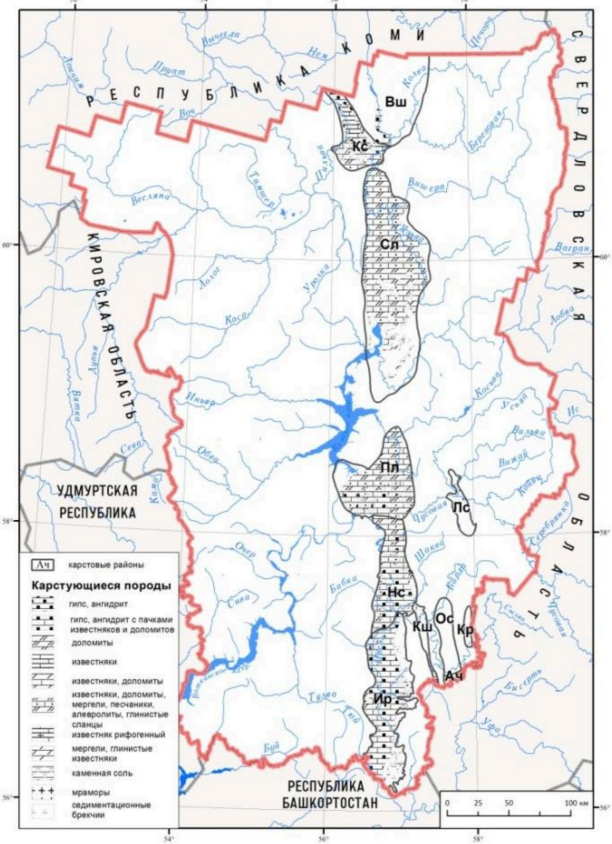


Рис. Карта сульфатного карста Пермского края (Горбунова и др., 1992; с дополнениями авторов)

На рассматриваемой территории расположено большое количество озер, зачастую имеющих карстовое происхождение. С эрозионно-карстовыми низинами связаны самые крупные озера Пермского края: Чусовское (19,4 км^2), Нюхти (6,3 км^2) и другие. Наиболее глубокое озеро края, Рогалек (61 м), находится в Дурнятской котловине – проточной карстовой депрессии.

В статье приведено описание нескольких озер, которые расположены в районах развития сульфатного карста (Максимович и др., 2021).

Ксенофонтовский район преимущественно сульфатного и карбонатного карста (Кс, рис.)

Озеро Кочь имеет подковообразную форму длиной 250 м и шириной 35–40 м. Дно озера вязкое, покрытое тонкой илистой грязью буроватого цвета, в которой содержится 36–42 мг/дм^3 сероводорода и 690–725,8 мг/дм^3 карбонатной углекислоты. Содержание неорганической углекислоты достигает 4752 мг/дм^3, что указывает на активные процессы разложения органических веществ. В водной вытяжке преобладают ионы гидрокарбонатов, сульфатов кальция и натрия, а выжимка относится к сульфатно-гидрокарбонатно хлоридно-кальциевой гидрохимической фации и к маломинерализованной группе.

Вода в озере прозрачная, голубовато-зеленого цвета, на вкус пресная с характерным жестковатым привкусом и со слабым запахом сероводорода. По химическому составу вода озера Кочь относится к группе мало минерализованных вод сульфатно-кальциевой гидрохимической фации.

Вишеркский район соляного и сульфатного карста (Вш, рис.)

Ларевские источники и озера – проявления высокоминерализованных вод и грязей. Они расположены в нижнем течении р. Нижняя Еловка, на левом берегу, в 800 м от устья или в 2,5 км юго-восточнее д. Ларевки. Здесь на площади около 8 га развиты заболоченные солонцы, представленные черной вязкой грязью с выцветами соли на поверхности и с резким запахом сероводорода. Поверхность солонцов покрыта корочкой грязно-бурового цвета с трещинами усыхания. Выход источников представлен небольшими грифонами. Вода источников мутная со слабым запахом сероводорода горьковато-соленого вкуса, высоко минерализованная хлоридно-натриевой гидрохимической фации.

К северо-западу от Ларевского источника находится группа соленых озер, питание которых осуществляется за счет разгрузки трещинно-карстовых вод гипсово-соляного карста и атмосферных осадков (Геологические памятники …, 2009).

Озеро Чусовское находится в обширной эрозионно-карстовой низине длиной около 40, шириной 2–7 км. Озеро образовалось в результате соляно-гипсового карста (Горбунова и др., 1992).

Соликамский район преимущественно соляного и сульфатного карста(Сл, рис. 1)

В северной части Соликамской депрессии у населенных пунктов Кузнецово, Губдор, Немзя расположены наиболее обширные карстовые впадины с поперечником до 10–15 км. Плоские днища впадин заболочены. Среди болот встречаются многочисленные мелководные озера, наиболее крупные из которых – Нюхти (5,5 км^2) и Дикое (1,5 км^2). Разделяющие возвышенности субмеридионального простирания поднимаются на 50–70 м над днищами впадин.

Полазненский район преимущественно сульфатного и карбонатно-сульфатного карста (Пл, рис.)

Шалашнинское озеро является геологическим памятником природы регионального значения площадью 0,7 га. Находится на правом берегу Чусовского плеса Камского водохранилища. Представляет собой карстовое проточное озеро длиной 120 м, шириной – 80 м и глубиной – до 7 м. Образовано из двух слившихся карстовых воронок. Не замерзает зимой из-за обильных выходов жестких сульфатно-кальциевых вод из бортов озерной котловины. Из озера вытекает ручей.

На пойме р. Пожвы расположена Дурнятская карстовая депрессия площадью около 2 км, где отмечены воронки и 11 озер. По условиям питания и химизму воды озера делятся на три группы. В центральную группу входят наиболее глубокие сточные озера (Белое и Рогалек глубиной 46 и 61 м соответственно) с преимущественно подземным питанием. Они имеют сульфатный и хлоридный составы воды при минерализации от 1,8 до 12,9 г/дм^3.

Озера западной и восточной групп находятся в разных стадиях развития: среди них есть и недавно возникшие – Новый Провал, а также покрытые сплавиной – Большое, Малое, Савушкин Ложок, Сидоровское. Они бессточные, содержат слабо минерализованную воду (Горбунова, 1985). У всех озер наблюдается уменьшение площади зеркала и глубины вследствие осадконакопления, заболачивания, нарастания сплавины.

В долине р. Вильвы известны 7 озер с поперечником от 40 до 250 м и глубиной от 4 до 12 м. Озера находятся в разных стадиях развития, имеют преимущественно сульфатную воду с минерализацией 2–3 г/дм^3 и более.

Сырник (Васьк-Иваново) озеро является геологическим памятником природы регионального значения площадью 0,9 га. Находится в 1,5 км юго-западнее д. Косогор Чусовского городского округа. Карстовое озеро овально-изогнутой формы со сплавиной. Длина озера составляет 104 м, ширина – 84 м и глубина – 9,5 м.

Большое II озеро ранее являлось геологическим памятником природы, второе по размерам карстовое озеро Пермского края (3,8 га). Находится на левом берегу р. Заозерной, в 6 км к северу от пос. Мутная. На дне зафиксировано 12 карстовых воронок (Особо охраняемые …, 2002).

Вильвенское озеро ранее являлось геологическим памятником природы, находится в пойме правого берега р. Вильвы. Представляет собой округлое чашеобразное карстовое проточное озеро диаметром 50–60 м. Имеет химически неоднородный состав воды на разных глубинах.

Нижнесылвинский район сульфатного и карбонатно-сульфатного карста (Нс, рис.)

Озеро Нужино является природным резерватом местного значения площадью 0,36 га на территории Заборьинского сельского поселения Березовского муниципального округа. Расположено в воронке на берегу р. Шаквы, на дне которой разгружаются несколько крупных карстовых источников. Из озера вытекает ручей, впадающий в р. Шакву.

Молебное и Провальное озера относятся к озерам смешанного, преимущественно подземного питания водами покровных и коренных отложений (Катаев и др., 2017). Для них характерна вертикальная гидрохимическая зональность, связанная с изменением химических показателей и типа вод с глубиной. Смена состава вод озера Провальное с кальциево-гидрокарбонатного на кальциево-гидрокарбонатно-сульфатный и резкое увеличение минерализации указывает на подток подземных вод из отложений кунгурского яруса. Повышение минерализации вод оз. Молебное связано с увеличением содержания ионов кальция и гидрокарбонат-ионов, а не количества сульфатов (Максимов и др., 2017).

Карстовые озера Сажинской депрессии имеют глубину до 17 м, диаметр – до 150 м. По преданиям, на поверхности крупнейшего озера Сажинской депрессии явился образ Божией Матери «Троеручица», в честь этого в 1799 г. на берегу был заложен храм Михаила Архангела.

Озеро Кротовское является геологическим памятником местного значения площадью 4,6 га и охранной зоной 2,1 га. Находится на территории г. Кунгура. Представляет собой карстовую воронку, заполненную водой.

Озеро Поваренное площадью 78 га находится на территории г. Кунгура. Представляет собой заполненную карстовую воронку, вода из которой с периодичностью 10–15 лет уходит под землю.

Кишертский район преимущественно сульфатного и карбонатно-сульфатного карста (Кш, рис.)

Белый камень и Карасье озеро – две ООПТ Кишертского района. Белый камень является ландшафтным памятником природы регионального значения площадью 90,3 га,

является классической карстовой депрессией с пятью озерами: Малое, Светлое, Черная Яма, Светлая Яма и озеро со сплавиной (Особо охраняемые …, 2017). Карасье озеро является геологическим памятником природы регионального значения площадью 22 га. Озеро со сплавиной размерами 100 на 500 м и глубиной 5,5 м, как и ООПТ Белый камень, расположено в пределах Мазуевской депрессии.

Иренский район преимущественно сульфатного и карбонатно-сульфатного карста (Ир, рис.)

В Иренском карстовом районе насчитывается более 500 карстовых озер, наиболее крупным из которых является Щучье озеро в Октябрьском районе. Весной 2019 г. вода в озере практически полностью ушла в карстовый провал, возникший в центральной части воронки. В 1950 г. исчезло озеро в д. Шляпники.

Озеро Самохвалово карстового происхождения является природным резерватом местного значения, находится в 3 км к северо-западу от с. Богородск.

Сеть озер Тураевка, Змеевка, Орловка расположены в 3 км южнее д. Новопетровки, в долине карстовой исчезающей р. Тесяк. Являются природным резерватом местного значения площадью 13 га. Гидрологические особенности озер изучены слабо.

Чаечное озеро является ландшафтным памятником природы площадью 14 га. Расположено в карстовой воронке юго-западнее с. Воскресенское. Предложено для охраны одной из крупнейших колоний озерных чаек. Озеро находится в стадии заболачивания, и на нем имеется сплавина.

Ачитский район сульфатного карста и кластокарста (Ач, рис.)

На западной окраине и в центральной части с. Сыра расположены многочисленные карстовые озера, крупнейшие из которых: Лубеное, Сименчи и Бурливое – находятся в различной стадии эвтрофикации.

Таким образом, ряд перечисленных озер являются уникальными, создают неповторимые ландшафты и имеют статус ООПТ. В связи с этим стоит обратить внимание на сохранность данных природных объектов.

Литература

Геологические памятники Пермского края. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2009. 619 с.

Горбунова К.А. Морфология и гидрогеология гипсового карста. Пермь: Перм. ун-т, 1979.

Горбунова К.А. Карстоведение. Вопросы типологии и морфологии карста: учеб. пособие по спецкурсу. Пермь: Перм. ун-т, 1985. 88 с.

Горбунова К.А., Андрейчук В.Н., Костарев В.П., Максимович Н.Г. Карст и пещеры Пермской области. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1992. 200 с

Катаев В.Н., Копанцева Е.Н., Ермолович И.Г. Современный химический состав вод озер зоны сочленения Уфимского вала и Предуральского прогиба // Вестник Пермского университета. Геология. 2017. Т. 16. №4. С. 332–346.

Максимов А.Ю., Позюмко Э.Н., Павлова Ю.А., Катаев В.Н. Метагеномный анализ микрофлоры карстовых озер Кишертского карстового района // История и методология физиолого-биохимических и почвенных исследований / Материалы науч. конф. Пермь, 2017. С. 93–94.

Максимович Н.Г., Кадебская О.И., Мещерякова О.Ю. Сульфатный карст Пермского края: монография. Пермь: ПГНИУ, ЕНИ ПГНИУ, ГИ УрО РАН, 2021. 302 с.

Особо охраняемые природные территории Пермского края. Пермь: Астер, 2017. 512 с.

Особо охраняемые территории Пермской области: реестр. Пермь: Книжный мир, 2002. 464 с.

LAKES IN THE AREAS OF SULFATE KARST DEVELOPMENT IN THE PERM REGION

N.G. Maksimovich, O.Yu. Meshcheryakova

The article describes several lakes that are located in the areas of sulfate karst development in the Perm region.

ЛЕСНЫЕ ОЗЁРА ПОСТРАДАВШИЕ ВО ВРЕМЯ КРУПНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ 1972, 2010, 2021 ГОДОВ В РЕСПУБЛИКЕ МАРИЙ ЭЛ

Я.С. Маланов
Государственный заповедник «Большая Кокшага»
Марийский государственный университет

Доступные данные о том, где и сколько озёр пострадало во время крупных лесных пожаров в Республике Марий Эл, отсутствуют. Вместе с тем, такие данные полезны для долговременного мониторинга эколого-биологического состояния озёр и их береговых линий.

Облик лесов Марий Эл заметно изменялся после лесных пожаров в 1972 и 2010 годах. По данным разных источников летом 1972 года во время лесных пожаров на территории МАССР (в настоящее время Республика Марий Эл) огнем было уничтожено по разным источникам данных 186-212. тыс. га лесных массивов. Спустя 38 лет во время засушливого лета 2010 года вновь наблюдались массовые лесные пожары. По официальным данным в Республике Марий Эл площадь, пройденная огнем на землях лесного фонда, составила 76,557 тыс. га. Погибли леса на площади 37,8 тыс. га (Доклад, 2012). При этом доступных данных о том, где и сколько озёр пострадало от огня немного. Вместе с тем, такие данные полезны для мониторинга эколого-биологического состояния озёр и их береговых линий. В связи с этим была поставлена цель: установить географическое расположение лесных пожаров 1972 и 2010 гг. и располагающихся в их границах лесных озер.

На территории Республики Марий Эл крупные лесные пожары (площадью более 150-200 га) регистрировались в 1815, 1823, 1848-1854, 1891, 1921, 1972 и 2010 гг. В лесах Нижегородской области также наблюдались крупные лесные пожары в 1839, 1841, 1891, 1901, 1912, 1914, 1920, 1972 и 2010 гг. (Денисов 1979; Калинин, 2012). Береговые линии озёр, которые пострадали во время лесных пожаров ранее 1972 года, установить в настоящее время не представляется возможным.

Сбор данных проводится с осени 2010 года по настоящее время на основе полевых выездов в летний период времени, фоторегистраций последствий пожаров, а также анализа картографических данных, официальных документов и литературных источников.

Во время лесных пожаров в 1972 году от огня пострадало 185-212,3 тыс. га лесных массивов. Озёра пострадавшие от лесных пожаров в 1972 году удалось установить на основе данных, которые представлены в статье, опубликованной в журнале Вестник МарГТУ (Воробьев, Курбанов, Губаев, Лежнин, Полевщикова, 2012). На выгоревших в 1972 году территориях располагается 49 озер, береговая линия которых могла пострадать в разной степени (табл. 1).

Жаркое и засушливое лето 2010 года вновь привело к массовым лесным пожарам. Образовалось 5 крупных лесных гарей. По официальным данным 2010 года в Республике

Марий Эл площадь, пройденная огнем на землях лесного фонда, составила 76,5 тыс. га. Погибли леса на площади 37,8 тыс. га.

Таблица 1. Лесные озера, располагающиеся на выгоревших в 1972 году территориях

№	Район	Озеро	Географические координаты
1	Килемарский	Лужьяр	56°29′50″N, 47°3′54″E
2	Килемарский	Покшелъяр	56°29′21″N, 47°2′21″E
3	Килемарский	Посьяр	56°24′26″N, 47°5′9″E
4	Килемарский	Шамьяры	56°22′4″N, 47°9′18″E
5	Килемарский	Шукшияр	56°20'25.0"N 47°06'11.6"E
6	Килемарский	Когояр	56°18′54″N, 47°9′16″E
7	Килемарский	Яран-куп	56°18′2″N, 47°8′1″E
8	Звениговский	Сорочье	56°25'47.3"N 47°21'58.4"E
9	Звениговский	Шордоер	56°26'01.2"N 47°28'11.8"E
10	Звениговский	Пучеер	56°25'34.8"N 47°28'43.2"E
11	Звениговский	Марьер	56°24'36.1"N 47°26'18.5"E
12	Звениговский	Мал. Марьер	56°25'18.5"N 47°26'04.3"E
13	Звениговский	Лисичкино	56°25'26.4"N 47°29'40.4"E
14	Звениговский	Кучкоер	56°23'43.1"N 47°27'36.8"E
15	Звениговский	Чуркан	56°25'13.4"N 47°41'56.8"E
16	Звениговский	Мал. Чуркан	56°25'43.6"N 47°42'50.4"E
17	Звениговский	Светлое	56°19'58.8"N 47°36'38.8"E
18	Звениговский	Линьковое	56°26'19.8"N 47°41'06.3"E
19	Медведевский	Паленое	56°32'42.0"N 47°15'30.6"E
20	Медведевский	Соленое	56°33'47.9"N 47°21'45.1"E
21	Медведевский	Ломашьер	56°29'00.6"N 47°26'06.6"E
22	Медведевский	Адерьер	56°28'30.0"N 47°20'22.0"E
23	Медведевский	Восьмерка	56°27'25.9"N 47°35'52.5"E
24	Медведевский	Щучье (Устье-Кундышское участкове л-во)	56°26'40.3"N 47°44'50.4"E
25	Медведевский	Сурок	56°26'30.3"N 48°07'16.8"E
26	Медведевский	Оланга	56°28'08.6"N 48°13'40.2"E
27	Медведевский	Ширенга	56°28'34.0"N 48°10'34.2"E
28	Медведевский	Сумка	56°27'14.6"N 48°01'54.8"E
29	Медведевский	Щучье (Суроκское л-во)	56°26'29.4"N 48°03'40.5"E
30	Медведевский	Лесная Сказка (Сороковое)	56°25'22.1"N 48°04'36.3"E
31	Медведевский	Первое	56°22'12.0"N 48°08'35.1"E
32	Медведевский	Второе	56°22'16.6"N 48°07'42.4"E
33	Медведевский	Гусиное	56°21'40.0"N 47°59'20.4"E
34	Медведевский	Большой Игирьер	56°19'21.4"N 47°56'01.0"E
35	Медведевский	Малый Игирьер	56°19'09.2"N 47°56'22.5"E
36	Юринский	Попова	56°29'54.8"N 46°18'31.2"E
37	Юринский	Шидьяр	56°32'23.1"N 46°16'49.7"E
38	Юринский	Ведерное	56°32'48.1"N 46°14'46.4"E
39	Юринский	Мал. Окунево	56°33'43.2"N 46°13'30.7"E
40	Юринский	Бол. Окунево	56°35'16.8"N 46°11'50.8"E
41	Юринский	Карасьяры (Копшаньяр)	56°35'49.8"N 46°15'13.2"E
42	Юринский	Шаламумер	56°38'17.1"N 46°14'25.1"E
43	Юринский	Безымянное	56°37'53.3"N 46°14'18.2"E
44	Юринский	Линево	56°37'46.4"N 46°14'53.7"E
45	Юринский	Эрикша	56°38'20.2"N 46°11'28.9"E
46	Юринский	Женское	56°22'05.3"N 46°11'23.6"E
47	Юринский	Гусинец	56°22'46.5"N 46°08'35.4"E
48	Юринский	Светлое	56°20'29.5"N 46°05'12.4"E
49	Юринский	Патьяр	56°30'20.2"N 45°41'37.6"E

В границах гарей оказались береговые линии озёр, ряд из которых входят в перечень памятников природы Республики Марий Эл (Исаев, Богданов, 2012):

1. Памятник природы «Озеро Марьер» – в настоящее время Государственный природный биологический заказник республиканского значения «Марьерский» (Звениговский район).

Береговая линия озера выгорела с северо-западной части озера. Протяженность участка выгоревшей береговой линии около 800 м.

2. Памятник природы «Озеро Лужьяр» (Килемарский район).

Расположено на территории Государственного учреждения Республики Марий Эл «Волжское лесничество» в юго-восточной части МО «Килемарский муниципальный район», в 10 км на северо-восток от поселка Визимьяры и в 8 км. На юго-запад от поселка Красный Мост. Озеро оказалось в зоне интенсивного пожара. Береговая линия выгорела по периметру. Сохранился небольшой участок с заболоченной восточной части, где расположен исток речки Лужа. Окрестности, включая моховые основания верховых болот, полностью выгорели. Охраняемые объекты – растительность, гнездования и отдыха водоплавающих птиц, а также околоводные животные в водоохранной зоне озера.

3. Памятник природы «Озеро Шамьяры» (Килемарский район).

Расположено на территории Государственного учреждения Республики Марий Эл «Волжское лесничество» в 4 км на северо-восток от деревни Большой Ермучаш и в 6 км на юго-восток от поселка Куплонга. Охраняемые объекты – растительность, гнездования водоплавающих птиц и околоводные животные в водоохранной зоне озера. Озеро выгорело по периметру; местами по береговой линии сохранились узкие участки растительности.

4. Памятник природы «Озеро Малый Мартын» (Звениговский район).

Выгорели северо-восточная, северная и северо-западная части, на южной и восточной части сохранился узкий участок леса; с юго-запада лес сохранился.

5. Памятник природы «Озеро Большой Мартын» (Медведевский район).

Расположено на юге МО «Медведевский муниципальный район» в 7 км к западу от поселка Устье-Кундыш. Охраняемые объекты – растительность, гнездования водоплавающих птиц и околоводные животные в водоохранной зоне озера. Озеро выгорело по периметру.

6. Памятник природы «Болото Мартын» (Медведевский район).

Расположено на юге МО «Медведевский муниципальный район» в 3,5 км к северо-западу от поселка Устье-Кундыш. Болото имеет региональное значение как гидроакумулятор для озера Большой Мартын (выгорело по периметру) и реки Малый Мартын, служит сохранению мест обитания животных. Пострадала большая часть территории болота. На выгоревшей территории располагаются также озера Большой Мартын, Подмартынник.

На территориях, пострадавших от лесных пожаров оказались озера, береговая линия которых в большей или меньшей степени пострадала (табл. 2).

В 2021 году на территории Таирского, Усть-Кундышского и Чернушинского участковых лесничеств во время крупного лесного пожара по периметру повторно выгорела береговая линия озера Щучье (Устье Кундышское участковое лесничество: 1 кв; 56°26'41.3"N, 47°44'49.8"E). Береговая линия этого озера подвергалась выгоранию в 1972 году. Также от огня пострадали шесть небольших озерец площадью менее 1 га.

В 1972 году в границах горельников оказались 49 лесных озер. В 2010 году от огня в разной степени пострадали 18 лесных озер, пять из которых выделены в качестве ООПТ (памятников природы). Дважды в границах горельников 1972 и 2010 года оказались лесные озера: Лужьяр, Покшелъяр, Посьяр, Шамьяры, Шукшияр, Когояр, Яран-куп, Марьер. Также в границах горельников 1972 и 2021 гг. дважды оказалась береговая линия озера Щучье.

Таблица 2. Расположение лесных озер Республики Марий Эл, береговая линия которых пострадала от пожаров 2010

№	Название озера	Расположение горельников	Географические координаты и места повреждения береговой линии озера
1	Водопойное (Пекшеевское)	Козиковский лесной участок	56°42′15″N, 46°1′23″E Выгорело по периметру
2	Перевесные озера	Козиковский лесной участок	56°41′1″N, 46°2′8″E, 56°41′6″N, 46°2′23″E Выгорела южная часть береговой линии озер
3	Тогашевское	Кумьинское участковое лесничество	56°45′12″N, 46°36′3″E Выгорела южная и восточная части береговой линии
4	Красное	Килемарское участковое лесничество	56°49′28″N, 46°49′29″E Выгорели северная, восточная и южная части береговой линии
5	Сорочье	Устье-Кундышское участковое лесничество	56°24′51″N, 47°45′42″E Выгорело по периметру
6	Карась	Устье-Кундышское участковое лесничество	56°23′58″N, 47°47′33″E Лес выгорел по периметру; сохранился узкий участок береговой линии, на которой происходит усыхание сохранившихся сосен
7	Ленек	Устье-Кундышское участковое лесничество	56°22′17″N, 47°45′12″E Выгорело по периметру
8	Мартын	Устье-Кундышское участковое лесничество	56°21′9″N, 47°44′52″E Выгорело по периметру
9	Мартын Малый	Таирское участковое лесничество	56°21′2″N, 47°42′47″E Выгорели северо-восточная, северная и северо-западная части, на южной и восточной части сохранился узкий участок леса; с юго-запада лес сохранился
10	Подмартынник	Устье-Кундышское участковое лесничество	56°20′41″N, 47°45′1″E Выгорело по периметру
11	Марьер	Красноярский лесной участок	56°24′39″N, 47°26′17″E Выгорела северо-западная часть береговой линии
12	Марьер Малый	Красноярский лесной участок	56°25′19″N, 47°26′2″E. Частично выгорела юго-западная часть береговой линии
13	Лужьяр	Куплонгское участковое лесничество	56°29′50″N, 47°3′54″E Выгорело по периметру; сохранился небольшой участок с восточной части
14	Покшел-яр	Куплонгское участковое лесничество	56°29′21″N, 47°2′21″E Выгорело по периметру; вблизи заболоченной береговой линии растительность частично сохранилась
15	Посьяр	Куплонгское участковое лесничество	56°24′26″N, 47°5′9″E Выгорели северная, восточная и южная части береговой линии
16	Шамьяры	Куплонгское участковое лесничество	56°22′4″N, 47°9′18″E Выгорело по периметру; местами сохранились узкие участки растительности
17	Яран Куп	Юксарский лесной участок	56°18′2″N, 47°8′1″E Расположено в болотах среди сплошных горельников; береговая линия не пострадала
18	Когояр	Юксарский лесной участок	56°18′54″N, 47°9′16″E Расположено в болотах среди горельников; частично пострадала южная часть береговой линии
19	Юлуксьер Большой	Уржумский лесной участок	56°11′40″N, 47°26′23″E Выгорела северо-восточная часть береговой линии

Литература

Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Губаев А.В., Лежнин С.А., Полевщикова Ю.А. Дистанционный мониторинг гарей в Марийском Заволжье / Вестник МарГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2012. №1. С. 12-22.

Денисов А.К. Лесные пожары в лесном Среднем Заволжье в 1921 и 1972 гг. и их уроки // Горение и пожары в лесу / Материалы I Всесоюзного совещания. Красноярск, 1979. Ч. III. С. 16-26.

Исаев А.В., Богданов Г.А. Современное состояние сети особо охраняемых природных территорий в Республике Марий Эл // Вестник МарГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2012. №1. С. 75-86.

Калинин К.К. Крупные лесные пожары в лесном Среднем Заволжье и система лесохозяйственных мероприятий по ликвидации их последствий. Йошкар-Ола: Изд-во Поволжского гос. технологического ун-та, 2012. 364 с.

Маланов Я.С., Маланов С.В. К вопросу о последствиях лесных пожаров 2010 года в Республике Марий Эл // Современное состояние окружающей среды в Республике Марий Эл и здоровье населения / Материалы VIII научно-практической конференции памяти профессора Н.В. Глотова. Йошкар-Ола: Национальная библиотека имени С.Г. Чавайна, 2017. С. 27-32.

Маланов Я.С. О последствиях лесных пожаров 2010 года и их воздействии на особо охраняемые природные территории в Республике Марий Эл // Мой первый шаг в науку / Материалы V Поволжского научно-образовательного форума школьников. Ч. 2. Лес. Экология. Человек. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2017. С. 153-155.

FOREST LAKES AFFECTED BY MAJOR FOREST FIRES IN 1972, 2010, 2021 IN THE REPUBLIC OF MARI EL

Y.S. Malanov

There is no available data on where and how many lakes were affected during major forest fires in the Republic of Mari El. At the same time, such data is useful for long-term monitoring of the ecological and biological state of lakes and their coastlines.

ОЗЕРА МАРИЙ ЭЛ: ПОСТРОЕНИЕ КАТАЛОГА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С.В. Маланов

Поволжский государственный технологический университет

Московский институт психоанализа

Обсуждаются перспективы построения и использования лимнологического каталога для планирования и реализации разнообразных комплексных исследований и обобщения данных на территории Республики Марий Эл, а также на прилегающих территориях Республики Татарстан, Чувашской республики, Нижегородской и Кировской областей. Такой каталог может послужить основой для непрерывного многолетнего мониторинга состояния уникальных для средней полосы России естественных озерно-болотных комплексов, сохранившихся в левобережье Волги.

Большую часть территории республики Марий Эл занимают лесные массивы, среди которых располагаются многочисленные озера. При этом до настоящего времени отсутствовал относительно полный лимнологический каталог. Такая задача была поставлена в 1998 году. За 25 лет все относительно известные озера получили краткое описание на основе полевого сбора и уточнения уже имеющихся данных. Множество небольших по площади водоемов получили описание впервые (Маланов, 2025).

Главным основанием при составлении каталога служили междуречья относительно крупных рек, впадающих в Волгу. В междуречьях, где большие площади занимают сельскохозяйственные угодья и обезлешенные территории, вводятся разделы, соответствующие границам сельских и городских поселений. Также в границах междуречий вводятся разделы, в которых представлены озера расположенные на прилегающих к границам Республики Марий Эл территориях Республики Татарстан, Нижегородской (междуречье Керженец – Ветлуга) и Кировской областей, а также Чувашской Республики. В пределах каждого подраздела озера каталогизируются по названию с указанием географических координат, районов, а также лесничеств (лесных участков / участковых лесничеств, соответствующих кварталов) или сельских / городских поселений (если озера расположены вне лесной зоны).

В каталоге представлены все озера Республики Марий Эл, имеющие естественное происхождение и площадь поверхности, превышающую 0,3-0,5 га, исключая пруды, а также старичные / старично-пойменные водоемы. Последнюю группу озер трудно каталогизировать, поскольку русла рек постоянно изменяются, образуя новые старицы, которые относительно быстро мелеют и заболачиваются. Не включаются в каталог также в «долгоживущие» и обширные по площади озера старичного происхождения в поймах Ветлуги и Волги. Исключение составляют некоторые озера и озерные группы в поймах рек, которые с большой вероятностью имеют смешанное старично-карстовое происхождение, а также некоторые пруды, прилегающие к лесным массивам. При этом включены в каталог озера, образовавшиеся на местах разработки песчаных, глиняных и известковых карьеров, а также в местах относительно глубокой разработки месторождений торфа. По истечении времени такие озера / карьеры становится нелегко отличить от озер естественного происхождения.

Первые исследования озер, расположенных на современной территории Марий Эл, проводились в начале XX века экспедициями из Томского и Казанского университетов. Руководили специально организованными исследованиями М.Д. Рузский и Н.И. Воробьев (Рузский, 1916; Воробьев, 1926). Результаты более поздних исследований на этой территории представлены в работах Н.Н. Лаптевой, А.В. Ступишина, А.В. Русских, А.Ф. Алимова, Н.М. Мингазовой и др. Результаты исследований озер на западной границе Марий Эл в междуречье Керженца и Ветлуги представлены в работах А.Е. Асташина, Н.Г. Баянова, Ф.М. Баканиной, В.П. Воротникова и других авторов.

Республика Марий Эл является частью Восточно-Европейской равнины (платформы). В геологическом строении платформы выделяется сложенный кристаллическими (магматическими) породами фундамент, образовавшийся от 3,5 до 2 млрд. лет назад, и осадочный чехол, накопленный за последние 2 млрд. лет. Кристаллический фундамент располагается на глубинах 2000 м и более. Осадочный чехол образуют отложения осадочных пород палеозойской эры (419-252 млн. лет), перекрытые покровными отложениями четвертичного периода кайнозойской эры (последние 2,58 млн. лет). При этом кайнозойские отложения нижнего палеогенового (66-23 млн. лет) и неогенового (23-2,58 млн. лет) периодов отсутствуют по причине денудации – процессов разрушения горных и осадочных пород с их переносом на значительные расстояния экзогенными процессами. По этой же причине на территории

Марий Эл отсутствуют отложения мезозойской эры (252-66 млн. лет). Таким образом, большая часть отложений осадочных пород накапливалась на протяжении палеозойской эры (419-252 млн. лет), когда здесь располагался океан. В геологическом строении осадочного чехла выделяются отложения девонской, каменноугольной и пермской систем палеозойской эры.

В составе верхних отложений пермской системы выделяются отложения казанского и татарского ярусов. Казанский ярус представлен типично морскими известняками, содержащими разнообразную фауну морских беспозвоночных организмов. Это был период теплого и влажного климата. Воды морского бассейна были богаты карбонатом кальция. Накопилась толща мощностью около 50 м. Отложения более древнего татарского яруса сложены пестрыми и красноцветными песчаниками, алевролитами и глинами с прослоями мергелей, доломитов и гипсов. Это типичные аллювиально-равнинные и континентально-бассейновые отложения (Школьный географический атлас Республики Марий Эл, 2020).

Рельеф территории Марий Эл на левом берегу Волги представлен в западной и центральной части Марийской низменностью и возвышениями Марийско-Вятского увала на востоке.

Марийская низменность (Марийское Полесье) в геоморфологическом отношении представляет собой равнину, образованную отложениями древнего русла реки Волга (аллювиальными отложениями), а также ее притоков, и флювиогляциальными (водно-ледниковыми) отложениями днепровского оледенения (период среднего плейстоцена 300-250 тысяч лет назад, когда ледники покрывали значительную часть Восточно-Европейской равнины). Флювиогляциальные отложения создавались потоками талых вод, протекающими на поверхности, в толщах и под слоем ледника, или же по земной поверхности за пределами ледника, и преимущественно представлены песками, в составе которых преобладает кварц (SiO_2). При этом в период самого последнего Валдайского оледенения (90-20 тыс. лет назад) территория Марийского полесья представляла сложный лабиринт водных потоков и песчаных дюнно-холмистых гряд. По мере таяния и отступления ледников преимущественно песчаный состав аллювия (речных отложений) и флювиогляциальных отложений предопределил развитие эоловых (формирующихся под влиянием ветров) форм рельефа – на основе выдувания и перемещения под действием ветра больших объемов рыхлого материала. Междюнные понижения при относительно высоком уровне грунтовых вод заполнялись водой – образовывались озёра. В результате таких процессов формировались котловины озер послеледникового и междюнного (эолового) происхождения, которые трудно строго идентифицировать. Более того, вероятно котловины послеледниковых озер не могли сохраниться до наших дней в результате последующих эоловых процессов (Баканина, Воротников, 2001, с. 15-16) На территории Марийского Полесья преобладают озера этого типа. Примерами могут служить такие озера, как Марьер, Абаж-яр, Вышкарьяр, Васьяр, Лужьяр, Касьяр, Посьяр, Шамъяры, Мартын, Степанкины озера и множество других (Маланов, 2025).

Толщи рыхлых слоистых и сцементированных песков и супесей местами могут достигать значений более 100 *м*. Песчаные породы обеспечивают хорошую фильтрацию атмосферных осадков. Просачиваясь сквозь пески, вода растворяет карбонаты (известняки и доломиты) и сульфаты (гипсы) в пермских породах, образуя в них пустоты – карсты. Развитие этого процесса приводит к обрушению сводов образующихся пустот и последующему возникновению карстовых провальных и карстово-суффозионных озёр. На территории Марийской низменности относительно глубокое залегание пермских отложений ведет к тому, что карстовые полости заполняются вышележащими сыпучими породами. Поэтому выделяется множество озер с вторичными, относительно

небольшими по площади карстовыми провалами, в которых известковые породы, с глубоко протекающими карстовыми процессами, могут быть скрыты под толщами песчано-иловых отложений. Например, это озера Безукладовское, Покшельяр, Чуркан, Соленое. Вместе с тем выделяются озера и с обширными глубокими котловинами-воронками, глубины в которых плавно нарастают от берегов к центральной части. Это озера Нужьяр, Карасьяр, Глубокое, Брюхан, Молевое, Кошеер, Оланга, Карась, Кузнечиха. При этом на основе только батиметрических данных и прямых наблюдений происхождение озер с глубинами до 8-10 м трудно установить (Маланов, 2025).

Восточную часть Республики Марий Эл образуют возвышенности Марийско-Вятского увала. Здесь на поверхность выходят или близко к поверхности залегают растворимые породы пермской системы – доломиты ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$), известняки ($CaCO_3$), а местами присутствуют гипсы ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). На этой территории развиты открытые, доступные непосредственному наблюдению и исследованию, карстовые формы рельефа. В результате опусканий или провалов поверхностных отложений в подземные полости карстового происхождения образуются воронки и котловины, которые могут заполняться как поверхностными, так и подземными водами.

Если опускание поверхностных отложений в карстовые полости протекают относительно постепенно (карстово-суффозионные процессы), то образуются характерные воронки округло-овальной формы. Например, это озера Мучашъер (Кутер-ер), Карагаер, озера у деревни У-Тумер (Мочыло-ер, Изи-ер, Кугу-ер, Покан-ер) система карстовых воронок Семиозерье (Яндубаева, Темнова, 2002; Маланов, 2025). Если же обрушение поверхности в карстовые полости протекает относительно быстро (иногда одномоментно), то при заполнении провалов водой образуются карстово-провальные озера. Такие озера могут иметь формы одиночных округло-овальных котловин или котловины образуются на основе объединения близко расположенных цепочек из провалов. Озерные котловины также формируются и вдоль движения подземных карстовых водотоков, которые образуют карстовые рвы (овраги). В последнем случае наблюдаются неровные часто узко-вытянутые котловины с крутыми отвесными берегами. Примерами первой группы провальных карстовых озер могут служить озера Морской Глаз (ныне исчезнувшее озеро), Чылдывиер, Келай-ер. Вторую группу могут иллюстрировать такие озера как Глухое (Сузо-ер), Конан-ер, Мушан-ер, Куж-ер, Шуть-ер. Интересно отметить, что самое большое по объему воды в Марий Эл озеро Яльчик, вероятно, образовалось на пересечении двух карстовых рвов с мощными подземными водотоками (Маланов, 2025).

Поскольку на территории Республики Марий Эл, а также на примыкающей с запада территории Нижегородской области (междуречье Керженец – Ветлуга) сохранились естественные озера, скрытые в лесных массивах, то на основе представленных в каталоге данных в перспективе может быть спланировано и организовано множество комплексных исследований, направленных на выяснение различных морфометрических и эколого-биологических закономерностей образования, развития и исчезновения озер. А исследования на территориях с воздействиями антропогенных факторов могут послужить источником сравнительных данных. Вместе с тем, некоторые интересные сравнительные данные по множеству разных оснований можно проводить на основе анализа тех данных, которые представлены в каталоге.

1. Например, если выделять озера Марий Эл с наибольшей площадью поверхности, то первыми в таком рейтинге будет карстовое озеро Яльчик Большой, имеющее площадь поверхности до 128,5 га. Но такая площадь поверхности регистрируется только весной после таяния снега. В летний период времени, как правило, площадь озера значительно сокращается до величины около 100 *га* и менее, и начинает уступать площади другого междюнного озера – Марьер (площадь поверхности

около 118 *га*). Отметим, что уровень воды в озере Яльчик Большой имеет значительные колебания в разные годы, что сказывается и на его площади. Вместе с тем, это озеро, имея большие глубины в карстовых провалах, является безусловным лидером по объему воды (объему котловины). В Марий Эл имеет еще 14 озер площадь поверхности которых превышает 60 *га*. Вместе с тем, полезно отметить, что самое большое по площади поверхности лесное озеро естественного происхождения в Волго-Вятском районе и в Среднем Поволжье – это озеро Плотово Большое (Першияр). Расположено на территории Нижегородской области в междуречье Ветлуга – Керженец (Воротынский район, Михайловский лесхоз). Имеет площадь поверхности 252-259 га.

В качестве иллюстрации полезно привести данные о распределении озер в трех междуречьях по площади поверхности:

	Количество озер, имеющих разные площади поверхности (в *га*)						
Междуречья:	0,1-10 га	10-25 га	25-50 га	50-75 га	75-100 га	>100 га	∑
Керженец-Ветлуга	22	9	6	4	1	2	44
Ветлуга-Рутка	19	6	6	3	1	0	35
Рутка-Б. Кокшага	41	16	7	6	4	1	75
∑	82	31	19	13	6	3	154

2. Данные о глубинах противоречивы. При этом на большой части озер батиметрические измерения не проводились. Имеется также тенденция завышать данные, полученные при измерениях глубин одного и того же озера в разные годы. Как правило, используются наиболее впечатляющие числа. А поскольку последовательных и масштабных исследований, основанных на единой методике измерений, никогда не проводилось (существуют исследования, избирательно охватывающие отдельные группы озер), то к имеющимся данным следует относиться осторожно. Полезно отметить, что большая часть «самых глубоких озер» скрывают в своих котловинах карстовые провалы. Такие провалы часто имеют незначительную площадь, в то время как большая часть котловины озера может быть относительно мелководной. Характерными примерами являются озера Кумъяр Среднее, Чуркан, Покшелъяр (Пошкольяр). Бесспорным лидером по регистрируемым глубинам оказывается карстовое провальное озеро *Зрыв* (*Табашинское*). Проводимые в разные годы измерения дают результат до 53-56 *м*! Это озеро считается самым глубоким в Среднем Поволжье. Располагается в Оршанском районе у поселка Табашино. Вторым в рейтинге по измеряемым глубинам оказывается озеро Карась, расположенное на территории Устье-Кундышского участкового лесничества. По результатам измерений в разные годы указываются глубины от 32 *м* до 42,2 *м*. При этом результаты последних измерений, проводимых под руководством П.Ф. Войтко, показали еще большие глубины – 46,1 *м*, что свидетельствует о многолетнем проседании донной поверхности из-за карстово-суффозионных процессов (Войтко, 2013, с. 109). До недавнего времени вторую / третью позицию занимало озеро Морской Глаз (Мӱшыл), расположенное в Волжском районе у деревни Шарибоксад. Отмечались глубины от 35,5 *м* до 41,7 *м*. Озеро находилось под высоким уступом Сотнурской возвышенности в относительно молодой глубокой карстовой воронке (вероятный возраст 120-300 лет). Уровень воды в этой воронке был намного выше, чем уровень движения грунтовых вод на дне рядом расположенного карстового рва, который соответствует поверхности озера Пужан-ер (расположено на расстоянии 1,3 *км* к юго-западу). В настоящее время образовались подземные карстовые полости-протоки, по которым вода из воронки отводится в направлении основного движения надземных и подземных вод в глубинах карстового рва. С 2022 года на месте озера сухая карстовая воронка. В Марий Эл имеется еще 16 озер, глубина которых превышает 20 *м*. Заметим, что самое глубокое озеро Нижегородской области – Шумское,

– располагается в лесных массивах недалеко от западной границы Марий Эл и имеет глубину 35,2 м (Маланов, 2025).

3. Имеющиеся данные различных исследований показывают, что в республике Марий Эл преобладают пресные озера с гидрокарбонатной минерализацией, что связано с растворением известняков ($CaCO_3$) и доломитов ($CaMg(CO_3)_2$) в древних осадочных породах. Но выделяется относительно небольшая группа солоноватоводных карстовых озер, имеющих высокий уровень сульфатно-карбонатно-кальциевой минерализации, которая связана с растворением гипсов ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) и ангидритов ($CaSO_4$). (Уникальные, 2001).

Почему среди карстовых озер, таких озер относительно немного? В южной части Вятского увала, которую часто обозначают как Марийско-Вятский увал, поверхностный рельеф слагают осадочные породы верхних пермских отложений – известняки и доломиты казанского яруса. Выпадающие атмосферные осадки проникают через толщи пород известняков и доломитов казанского яруса и достигают гипсово-ангидритовых отложений нижних ярусов осадочных отложений пермского периода. Отметим, что гипсы и ангидриты осаждались при усыхании древних морских лагун и солёных озёр богатых водными растворами сульфатов, образуя линзы и прослойки среди других осадочных пород. Здесь подземные воды насыщаются сульфатами и по тектоническим наклонам слоев осадочных пород движутся с Марийско-Вятского увала в понижения, где располагаются речные долины, приобретая все более выраженный напорный характер.

В пойменной долине Волги (на юге), в нижнем течении Илети (на западе) и Казанки (на юго-востоке) гипсово-ангидритовые отложения нижнего Пермского периода местами залегают уже на нулевых отметках высот. Здесь в трещиноватых породах казанского яруса минерализованные напорные воды разгружаются в долинах рек и понижениях рельефа, образуя родники и озера. Там где восходящие подземные воды насыщены сульфатами (результат растворения гипсов и ангидридов), образуются карстовые озера с высокой концентрацией сульфатов. К таким озерам могут быть отнесены Югидем, Карагаер (возле деревни Полевая), Шунгалтан, Юркино, расположенные в левобережье Илети. Не исключено, что солоноватоводными могут быть и рядом расположенные озера Ватынъер, Плер Большой и другие.

Имеются солоноватоводные озера также в пойме Большой Кокшаги, где насыщенные сульфатами напорные подземные воды, вероятно, обеспечивают питание озера Соленое, а выше по течению Большой Кокшаги в Кировской области – питают озера Мусерское и Кувшинское. В этих озерах отмечались относительно высокие концентрации хлоридов, что может свидетельствовать о вовлечении в циркуляцию подземных вод глубоких сульфатно-хлоридных отложений пермского периода. Подобные особенности подземного питания могут иметь и другие озера Кировской области, расположенные в пойме Большой Кокшаги – Рожок, Александровский Выселок, Красноярское и Пайбулатовское. К солоноватоводным озерам могут принадлежать и расположенные в Кировской области в долине речки Пижанка озера Лежнинское, Ахмановское и Никулятское, а также озеро Теремешинское, про высокую соленость которого в недавнем прошлом сохранились легенды. Все эти гипотезы требуют специальных исследований (Уникальные, 2001; Озера Среднего Поволжья, 1976; Русских, Иванов, 1992).

4. Также представляют интерес и *изменения береговых линий озер* в результате: 1) заиливания, зарастания и заторфовывания; 2) карстовых процессов; 3) последствий ветровалов. Если процессы заиливания и зарастания ведут к постепенному сокращению площадей озер, то карстовые процессы и ветровалы могут их увеличивать. При этом увеличение площадей озер под влиянием сил ветра отмечается нечасто. На лесных озерах подветренные участки береговых линий оказываются подвержены ветровалам.

Под влиянием сильных ветров по краю береговой линии деревья вываливаются вместе с корнем и поверхностным слоем дерна и грунта. На месте их корневищ образуются мелководья, а береговая линия постепенно расширяется. Примерами подобных процессов выступает озеро Карась, форма береговых линий которого заметно изменилась за последнее столетие. Отмечается, что первоначально озеро имело более узкую, вытянутую с севера на юг форму. Об этом свидетельствуют батиметрические данные от 1906 года, представленные в работах М.Д. Рузского (Рузский, 1926). Но преобладание ветров юго-западного и северо-восточного направлений привело к медленному разрушению и увеличению площадей соответствующих береговых линий. Вместе с тем, под действием гравитационных сил происходит медленное непрерывное смещение донных отложений от береговых мелководий к расположенным в центральной части озера глубинам (Войтко, 2013). Подобные процессы характеризуют и постепенное изменение береговых линий озер Чуркан и Щучье. Так на озере Щучье летом 2009 года последствия ветровала привели к увеличению площади озера справа от центральной приозерной поляны. В последние два десятилетия сильные ветровалы наблюдались на озеро Светлое (Ардинское лесничество), где на западной части береговой линии вдоль мелководий можно увидеть большое количество вываленных деревьев. Наблюдаются последствия недавнего ветровала и на восточной стороне береговой линии озера Кундуштурское (Маланов, 2025).

5. Топонимика и этимология. На территории Марий Эл существует множество озер, которые сохраняют марийские / финно-угорские названия. Вместе с тем исконные имена большой части озер утрачены, и их восстановление – это предмет непростого этимологического исследования. При этом можно отметить некоторые интересные наблюдения, связанные с топонимикой и этимологией:

Ряд названий озер, расположенных на разных территориях, повторяются, что свидетельствует о том, что в историческом прошлом возможные переселения мари на новые места сопровождались сохранением и перенесением ранее используемых топонимов на новые природные объекты. Например, существует попарные совпадения имен озер Марьер и Марьер Малый, расположенных в Красноярском лесном участке и на территории Шуйского участкового лесничества. Также попарно совпадают имена озер Шеренга (Шеренге-ер, Ширет) и Оланга (Оланге-ер) в Куярском участковом лесничестве и на территории Кокшайского лесного участка. При этом на разных территориях встречается несколько часто повторяющихся имен: Ошкуп, Изиер, Кугуер, Куж-ер / Кужеер, Шемъер и другие. Аналогичные повторы имен можно обнаружить и в названиях небольших лесных рек.

Названия множества озер с большой вероятностью берут начало от древних финно-угорских корневых морфем (гидронимов) и не могут быть однозначно интерпретированы. Также много озер, которым, вероятно присваивались антропонимные названия (Воронцова, Галкин, 2002). При этом с приходом русскоязычного населения марийские названия множества озер были утрачены и вряд ли могут быть восстановлены, поскольку отсутствуют живые носители ушедшей языковой культуры и соответствующие письменные источники.

Названия некоторых озер были калькированы в русскоязычные звуковые формы с заметными искажениями, которые не всегда позволяют установить исконных имена. Например, озеро Покшел-яр на топографических картах обозначается как Пошкольяр, озеро Кучегер (исходное имя Кӱчык энер / Кӱчык-ер) обозначается как Кичиер.

Некоторые имена озер калькировались или переводились на русский язык, а затем искажались или искаженно переводились в русскоязычные версии. Например: озеро Сузо-ер (исконное название) – Глухариное озеро (русскоязычный перевод) – Глухое озеро (ныне используемое имя); Шаръер (исконное название) – Сайвер (ныне

используемое название) – «Хорошее озеро» (перевод искаженного названия); озеро Кӱчык энер / Кӱчык-ер (исконное название) – Кучегер (искаженное название) – Кичиер (ныне используемое искажение) – «Солнечное озеро» (ошибочный перевод).

Современные русскоязычные названия озер не всегда являются переводами исконных марийских названий. Так озера Водопойные в прошлом имели марийское название Ош-яр, озеро Большое Плотово в Нижегородской области имело финно-угорское название Першияр, озеро Паленое в прошлом могло иметь марийские имена Шуранер и Кукшияр.

В заключение отметим, что создание и пополнение лимнологического каталога может послужить основой для планирования и реализации разнообразных комплексных исследований и обобщения данных, которые позволят вести непрерывный многолетний мониторинг состояния уникальных для средней полосы России сохранившихся в левобережье Волги естественных озерно-болотных комплексов.

Литература

Баканина Ф.М., Воротников В.П., Лукина Е.В., Фридман Б.И. Озера Нижегородской области. Нижний Новгород: ВООП, 2001. 165 с.

Баянов Н.Г. Опыт экологического мониторинга карстовых и пойменных озёр в заповедниках России: на примере Пинежского и Керженского заповедников: автореф. дисс. … докт. биол. наук. Петрозаводск, 2015.

Богданов Г.А., Демаков Ю.П., Исаев А.В. Схема развития сети особо охраняемых природных территорий Республики Марий Эл. Йошкар-Ола: ФГБУ «Государственный природный заповедник «Большая Кокшага», 2015.

Войтко П.Ф. Методы комплексного исследования карстовых озер Марийской низменности на примере озера Карась. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2013. 324с.

Воробьев Н.И. Озера Козьмодемьянского кантона Марийской автономной области. Материалы по лимнологии Волжско-Камского края // Труды об-ва естествоиспытателей при Гос. Казанском Университете. Т. LI. Вып. 3. Казань, 1926.

Воронцова О.П., Галкин И.С. Топонимика Республики Марий Эл: Историко-этимологический анализ. Йошкар-Ола: Изд-во Марийского полиграфкомбината, 2002. 424 с

Лаптева Н.Н., Ступишин А.В. Карстовые озера Марийской АССР // Ученые записки Казан. ун-та. 1967. Т. 127, кн. 6. С. 20-40.

Лаптева Н.Н. Озера Марийского полесья // Ученые записки Казанского университета. 1968. Т. 127. Кн.6. Вопросы геоморфологии Среднего Поволжья. Вып.5-6.

Лаптева Н.Н., Ступишин А.В. Озера лесной зоны (в пределах Марийской АССР) // Озера Среднего Поволжья. Л.: Наука, 1976. С. 23-57.

Маланов С.В. Озера Республики Марий Эл и окрестностей (электронный ресурс) URL: https://vk.com/club174662404 (дата обращения: 01.31.2025).

Рузский М.Д. Лимнологические исследования в среднем Поволжье (Озера северо-западной части Казанской губернии) // Известия Императорского Томского Университета LXV. Томск: Тип. Сибирского Товарищества Печатного Дела, 1916.

Русских А.В., Иванов А.Д. Пещеры и карстовые озера Волго-Вятского края. Нижний Новгород, 1992. 87 с.

Уникальные экосистемы солоноватоводных карстовых озер Среднего Поволжья. Казань: Изд-во Казанского университета, 2001. 256 с.

Школьный географический атлас Республики Марий Эл. Йошкар-Ола, 2020. 40 с.

Яндубаева К.С., Темнова Е.Б. Изменение глубин озёр Сотнурской возвышенности Волжского района // 7-я Международная научно-техническая интернет-конференция

«Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов» / Сборник научных трудов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. Сэ 98-104.

MARI EL LAKES: BUILDING A CATALOG AND RESEARCH PROSPECTS

S.V. Malanov

The prospects of building and using a limnological catalog for planning and implementing a variety of comprehensive research and data synthesis in the Republic of Mari El, as well as in the adjacent territories of the Republic of Tatarstan, the Chuvash Republic, Nizhny Novgorod and Kirov regions are discussed. Such a catalog can serve as a basis for continuous long-term monitoring of the condition of natural lake and marsh complexes, unique for the central part of Russia, preserved on the left bank of the Volga.

СОВРЕМЕННОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ КЛИМАТА И ДИНАМИКА ВИДОВОЙ СТРУКТУРЫ ПТИЦ АКВАТОРИИ И ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Ю.И. Мельников
Байкальский музей Сибирского отделения РАН

На основе долговременных исследований (1995-2024 гг.) доказано, что озеро Байкал отличается низким разнообразием гнездящихся птиц и упрощенной структурой их доминирования. Основу населения птиц составляют большой баклан, монгольская и сизая чайки, длинноносый крохаль, а на отдельных участках, черный и белопоясный стрижи. Узкоспециализированный ихтиофаг – большой баклан, появившийся здесь в начале XXI века, вытесняет крупные виды чаек, в питании которых рыба ранее имела большое значение. Плотность населения основных видов прибрежных птиц снижается. Основное значение в этом имеет заметный рост антропогенного влияния (сильное беспокойство в связи с массовым туризмом), а также сильное потепление климата. Высокая численность в отдельные периоды летнего сезона поддерживается исключительно миграционными процессами.

Современные тенденции к сильному потеплению климата в Центральной Азии, обусловили заметное увеличение видового богатства и разнообразия птиц Внутренней Азии в результате массового их выселения к северным границам ареалов (Мельников, Гагина-Скалон, 2016). В этом отношении не является исключением и котловина озера Байкал. В тоже время, само озеро, как глубоководный водоем с очень узкой прибрежной зоной мелководий, имеет незначительный спектр благоприятных условий для обитания птиц (Скрябин, 1975) и отличается от всей котловины по общему составу и соотношению различных их экологических групп (Mel'nikov, 1997). В гнездовой период оно имеет очень бедный видовой состав птиц. Большие приустьевые участки рек и их дельты с высоким разнообразием местообитаний и плотностью населения прибрежных птиц, отделены от озера либо постоянно перерабатываемыми песчаными отмелями (дельта р. Селенги - карга), либо наносными частично облесенными песчаными островами (дельта рр. Верхняя Ангара и Кичера - ярки). В целом, для оз. Байкал характерен очень своеобразный видовой состав птиц, сильно меняющийся на протяжении периода открытой воды. Представленные в данной работе материалы (1972-2024 гг.),

несомненно, имеют большое значение для более полной характеристики фауны птиц всего озера.

Общая протяженность Байкальской рифтовой зоны, имеющей очень важную роль в распространении птиц данного региона, превышает 2000 км. Байкальская котловина - наиболее глубокая ее центральная часть, в которой сформировалось одно из крупнейших пресноводных озер Мира, озеро Байкал (Биота…, 2009). Состав фауны птиц озера приводится без учета дельт и устьев впадающих в него рек, за исключением береговой кромки этих участков, обращенной к Байкалу. Работа выполнена с использованием моторных лодок и катеров, идущих вдоль берега на дистанции, обеспечивающей точное определение птиц с использованием оптических приборов. Время исследований приходилось на период после окончания весенней миграции птиц и летних перемещений линных селезней, но до начала массовой осенней миграции птиц (Скрябин, 1995; Скрябин, Тупицын, 1992; Мельников, 2003; 2006). Этот период имеет очень небольшую продолжительность, но именно в это время состав фауны птиц является характерным для всего озера – регистрируются птицы, гнездящиеся и летующие на оз. Байкал. Расчет плотности их населения проводился по стандартной методике (Равкин, Челинцев, 1990). Поправочный коэффициент принимался равным, в зависимости от погодных условий, 130-200 (получен на Байкале на основе длительных полевых исследований).

Население птиц озера Байкал чрезвычайно динамично и может сильно отличаться на разных его участках. Это определяется очень большими его размерами (общая протяженность 632 км) и несколькими магистральными и локальными путями пролета птиц, идущими с разных направлений. Весенняя миграция птиц сменяется миграциями селезней гусеобразных птиц на линьку, которая постепенно переходит в их летне-осенние миграции к местам зимовок. И только после резкого ослабления пролета селезней на линьку и перед началом массовой летне-осенней миграции птиц здесь встречаются, преимущественно, местные гнездящиеся и летующие их виды (25 июля-15 августа). Однако среди них постоянно, но в очень ограниченном количестве, отмечаются задержавшиеся на местах отдыха поздно пролетные виды весенней и летней миграций, а также виды птиц уже начавшие летне-осенние кочевки (табл. 1).

Основу населения птиц в конце XX столетия составляли наиболее массовые (доминантные) виды, характерные для озера в гнездовой период: монгольская и сизая чайки. Длинноносый крохаль входил в состав субдоминнатных видов, а черный и белопоясный стрижи, горбоносый турпан, большой крохаль, гоголь озерная чайка, речная и белокрылая крачки формировали группу фоновых птиц (табл. 1). Хохлатая чернеть, шилохвость, восточная черная ворона, перевозчик, огарь, кряква, малая чайка, серая цапля и ворон, а также еще 17 видов птиц, встречающихся единичными экземплярами (в это время на озере зарегистрировано 37 их видов), сформировали группу второстепенных видов птиц (табл. 1).

Однако, структура населения птиц резко изменилась в конце второго-начале третьего десятилетия XXI века. Большой баклан, недавно появившийся в Прибайкалье, наряду с монгольской и сизой чайками, вошли в группу доминантных видов. Черный и белопоясный стрижи, а также длинноносый крохаль сформировали группу субдоминантных птиц, а гоголь и огарь вошли в состав фоновых видов. Деревенская ласточка, серая цапля, восточная черная ворона, речная крачка, орлан-белохвост и горбоносый турпан, а также еще 13 единично встречающихся видов (в это время зарегистрировано 27 видов) вошли в группу второстепенных видов птиц (табл. 2).

Следовательно, появление только одного, но очень многочисленного вида резко изменило структуру населения и доминирования птиц акватории и прибрежной зоны оз. Байкал (табл. 1, 2). Отчасти, это, несомненно, было обусловлено спецификой этого горного, холодного и глубоководного озера. Оно предоставляло неплохие условия для

прибрежных птиц в дельтах и устьях, впадающих в него рек, но его акватория и прибрежная зона были мало пригодны для их обитания.

Таблица 1. Плотность и структура населения прибрежных птиц акватории и прибрежной зоны озера Байкал в середине лета (25 июля – 12 августа 1995-2000 гг.)

№ п/п	Вид	Средняя ширина учетной полосы, в м	Плотность населения, ос./км^2	Доля в общей структуре населения, в %
1	Монгольская чайка *Larus (vegae) mongolicus*	171,8-235,3*	36,2±0,1	43,7
2	Сизая чайка *Larus canus*	109,1-130,9	21,4±0,1	25,7
3	Длинноносый крохаль *Mergus serrator*	134,5-209,0	6,7±0,1	8,0
4	Черный стриж *Apus apus*	73,2-185,1	4,1±0,2	4,9
5	Горбоносый турпан *Melanitta deglandi*	182,4-250,1	3,4±0,3	4,1
6	Большой крохаль *Mergus merganser*	113,5-175,4	1,8±0,8	2,1
7	Белопоясный стриж *Apus pacificus*	200,4-320,1	1,5±0,3	1,8
8	Гоголь *Bucephala clangula*	90,0-145,8	1,3±0,7	1,6
9	Озерная чайка *Larus ridibumdus*	136,4-188,9	1,2±0,3	1,4
10	Речная крачка *Sterna hirundo*	75,3-152,4	1,1±0,7	1,3
11	Белокрылая крачка *Chlidonias leucoptera*	70,2-135,9	0,8±0,5	1,1
12	Хохлатая чернеть *Aythya fuligula*	102,3-156,3	0,7±0,7	0,9
13	Шилохвость *Anas acuta*	112,3-159,2	0,7±0,9	0,8
14	Восточная черная ворона *Corvus (corone) orientalis*	51,1-111,4	0,6±0,3	0,7
15	Перевозчик *Actitis hypoleucos*	11,5-38,6	0,5±0,5	0,6
16	Огарь *Tadorna ferruginea*	89,4-120,0	0,4±0,4	0,4
17	Кряква *Anas platyrhynchos*	99,3-156,9	0,2±0,6	0,2
18	Малая чайка *Larus minutus*	112,3-152,7	0,1±0,8	0,1
19	Серая цапля *Ardea cinerea*	163,6	0,1±0,7	0,1
20	Ворон *Corvus corax*	150,0-375,0	0,01±0,7	0,01
Всего		-	82,8	99,4**

*Средняя ширина учетной полосы указана для птиц, сидящих – зарегистрированных в полете либо отмеченных только в полете или только сидящими. **17 видов, встреченных единично, в сумме имеют долю в общей структуре населения птиц – 0,6 %.

Основная причина низкого разнообразия птиц и упрощенной структуры доминирования (преобладают немногие наиболее массовые виды) птиц, осваивающих акваторию и прибрежную зону оз. Байкал, связана с очень низким разнообразием гнездовых стаций и большими глубинами озера даже в прибрежной зоне. На эту особенность озера Байкал ранее было обращено особое внимание при описании фауны водоплавающих птиц (Скрябин, 1975). На основе продолжительных работ данным исследователем выделено две группы стаций, характерных только для акватории этого озера. I. Группа стаций – открытая глубоководная часть Байкала, охватывающая участки с глубинами выше 10 м и имеющая небольшое значение для птиц (в основном для отдыха и иногда для добывания рыбы из скоплений, идущих на небольшой глубине). II. Группа стаций, включающая прибрежные мелководья Байкала, с прилежащей полосой берега, и включающая три местообитания (стации) прибрежных птиц: а) прибрежная открытая акватория Байкала с мелководьями (глубина менее 10,0 м), опоясывающими глубоководные районы озера; б) мелководные, закрытые и защищенные губы и бухты, похожие на озера и, особенно, соры; в) участки побережья со скалистыми, обрывистыми берегами (Скрябин, 1975).

В последующих работах были предприняты попытки более детального изучения фауны птиц акватории и прибрежной зоны озера Байкал, но окончательный вывод по этому вопросу так и не был сделан. На основе современных исследований удалось

выяснить специфику населения птиц этого озера (Пыжьянов, Сонин, 1979; Мельников, 2003; 2006; 2021; Мельников, Гагина-Скалон, 2016; Mel'nikov, 1997). Ранее она была показана только для водоплавающих птиц (Скрябин, 1975). Основу населения птиц здесь составляют исключительно животноядные виды, питающиеся рыбой или насекомыми и их личинками, формирующими большие скопления на отдельных участках озера.

Таблица 2. Плотность и структура населения прибрежных птиц акватории и прибрежной зоны озера Байкал в середине лета (25 июля-12 августа 2018-2024 г.)

№ п/п	Вид	Средняя ширина учетной полосы, в м	Плотность населения, ос./км^2	Доля в общей структуре населения, в %
1	Большой баклан *Phalacrocorax carbo*	138,4-196,3*	14,7±0,1 (72,6) **	36,8
2	Монгольская чайка *Larus (vegae) mongolicus*	171,8-235,3	7,8±0,1	19,5
3	Сизая чайка *Larus canus*	109,1-130,9	7,1±0,1	17,7
4	Черный стриж *Apus apus*	102,4-186,2	4,1±0,1	10,0
5	Белопоясный стриж *Apus pacificus*	88,1-157,9	2,4±0,1	6,1
6	Длинноносый крохаль *Mergus serrator*	134,5-209,0	2,1±0,1	5,1
7	Гоголь *Bucephala clangula*	145,8-275,2	0,6±0,3	1,4
8	Огарь *Tadorna ferruginea*	89,4-120,0	0,4±0,2	1,1
9	Деревенская ласточка *Hirundo rustica*	45,3-89,2	0,4±0,4	1,0
10	Серая цапля *Ardea cinerea*	163,6	0,05±0,7	0,1
11	Восточная черная ворона *Corvus (corone) orientalis*	51,1-111,4	0,05±0,3	0,1
12	Речная крачка *Sterna hirundo*	70,0-152,9	0,01±1,2	0,02
13	Орлан-белохвост *Haliaeetus albicilla*	267,9-524,3	0,01±0,8	0,02
14	Горбоносый турпан *Melanitta deglandi*	152,2-189,1	0,01±0,9	0,02
Всего		-	40,7	98,9***

*Средняя ширина учетной полосы указана для птиц, сидящих – зарегистрированных в полете либо отмеченных только в полете или только сидящими. **Плотность населения большого баклана в годы формирования крупных предотлетных скоплений. ***13 видов, встреченных единично, в сумме имеют долю в общей структуре населения птиц – 1,1 %.

Выявленные изменения в структуре населения и численности прибрежных птиц обусловлены динамикой климата. Резкое его потепление вызвало практически полное исчезновение заболоченных территорий, а также обсыхание небольших и мелководных озер и сильное иссушение крупных водоемов Центральной Азии и южных окраин России (прежде всего Забайкалья). В связи с этим, ареалы прибрежных птиц ушли далеко на север, вплоть до Центрально-якутской равнины, а у ряда видов и до тундровой зоны, что вызвало резкое снижение их численности в Байкальском регионе. Другим важным фактором снижения их обилия является интенсивный туризм, резко увеличивший беспокойство птиц на местах гнездования и отдыха.

Полученные материалы подчеркивают, что озеро Байкал, как специфический глубоководный горный водоем, без окружающих его разнообразных стаций (Байкальская котловина), является малопригодным для обитания большинства видов прибрежных птиц. Высокой численности достигают только большой баклан, монгольская чайка, длинноносый крохаль и сизая чайка, а черный и белопоясный стрижи имеют локально высокое обилие. Вселение узко специализированного и многочисленного вида – большого баклана, резко изменило структуру доминирования и соотношение разных видов птиц, что, наряду с двумя вышеуказанными факторами, привело к существенным изменениям в общей структуре населения прибрежных птиц Байкала.

Литература

Биота водоемов Байкальской рифтовой зоны. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2009. 231 с.

Мельников Ю.И. Центрально-палеоарктический пролетный регион: линные миграции гусеобразных птиц // Труды госзаповедника «Байкало-Ленский». 2003. Вып. 3. С. 72-93.

Мельников Ю.И. Долговременный мониторинг птиц прибрежной зоны северо-западного побережья Байкала: проблемы и перспективы // Труды госзаповедника «Байкало-Ленский». 2006. Вып. 4. С. 234-241.

Мельников Ю.И. Прибрежные птицы мелководий Южно- и Среднебайкальского климатических округов озера Байкал (Восточная Сибирь) в летний период // Высшая школа: научные исследования / Мат-лы межвузов. междун. конгресса. М.: Изд-во «Инфинити», 2021. С. 90-102.

Мельников Ю.И., Гагина-Скалон Т.Н. Птицы озера Байкал (с конца XIX по начало XXI столетия): видовой состав, распределение и характер пребывания // Бюл. МОИП. Отд. биол. 2016. Т. 121. Вып. 2. С. 13-32.

Пыжьянов С.В., Сонин В.Д. Экология крохалей и нырковых уток Малого Моря (оз. Байкал) // Экология птиц бассейна оз. Байкал. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1979. С. 65-72.

Равкин Е.С., Челинцев Н.Г. Методические рекомендации по комплексному маршрутному учету птиц. Репринт. М.: Изд-во Госкомприроды СССР, 1990. 33 с.

Скрябин Н.Г. Водоплавающие птицы Байкала. Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1975. 244 с.

Скрябин Н.Г. Численность водоплавающих и прибрежных птиц литорального пояса западного берега Байкала // Природные ресурсы, экология и социальная среда Прибайкалья. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1995. Т. 2. С. 92-93.

Скрябин Н.Г., Тупицын И.И. Распределение околоводных птиц вдоль побережья Байкала // Экологические исследования Байкала и Байкальского региона. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1992. Ч. 2. С. 29-34.

Mel'nikov Yu.I. Biota of larger Lakes of the Baikal rift zone: species structure and its genesis // Ecologically equivalent species of Hydrobionths in the Great Lakes of the World. Ulan-Ude: Baikal Scientific Centre SB RAS Publ., 1997. P. 10-11.

CURRENT CLIMATE WARMING AND DYNAMICS OF THE SPECIES STRUCTURE OF BIRDS IN THE WATERS AND COASTAL ZONE OF LAKE BAIKAL

Yu.I. Mel'nikov

Based on long-term studies (1995-2024), it has been proven that Lake Baikal is characterized by a low diversity of breeding birds and a simplified structure of their dominance. The basis of the bird population is the great cormorant, Mongolian and glaucous gulls, long-billed merganser, and in some areas, black and white-rumped swifts. A highly specialized ichthyophage, the great cormorant, which appeared here at the beginning of the 21st century, is displacing large species of gulls, in whose diet fish was previously of great importance. Population densities of key coastal bird species are declining. Of major importance in this is the noticeable increase in anthropogenic influence (strong concerns about mass tourism), as well as the strong climate warming. High numbers during certain periods of the summer season are supported exclusively by migration processes.

КОНЦЕПЦИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ЭКОРЕАБИЛИТАЦИИ ТРАНСФОРМИРОВАННЫХ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Н.М. Мингазова, Э.Г. Набеева
Казанский (Приволжский) федеральный университет

Область восстановления и экореабилитации водных экосистем является сравнительно новой для России и многих других стран. Концепция, как совокупность взглядов и точек зрения на такое явление, как восстановление водных экосистем, находится в стадии разработки. В статье рассмотрены основополагающие работы, в которых даны научно-теоретические основы для области восстановления, дано представление о российских и зарубежных центрах в области восстановления, освещены методические подходы к вопросам экореабилитации водных объектов.

В области восстановления и экореабилитации водных экосистем к настоящему времени нет единого определения данной области, существует немало иных терминов-аналогов (деэвтрофирование, санация, мелиорация, оздоровление, омоложение, улучшение, оптимизация, регулирование, управление водными ресурсами и др.). Концепция и методология находятся в стадии разработки (Мингазова, Котов, 1989; Мингазова, 1999; Восстановление …, 1994; Макарцева, 1994; Дьяков, 2002; Сметанин, 2003; Мордвинцев, Омелаев, 2012 и др.).

Концепция восстановления, как совокупность мнений и точек зрения разных авторов на данное явление, должна включать в себя определение, научно-теоретические основы, принципы и критерии восстановления, средства, способы и методы осуществления. Методология понимается нами как совокупность разных методов и методических подходов, применяемых в определенном порядке, на определенных этапах работ по экореабилитации водных объектов.

Определения и понятия в области восстановления

В настоящее время в отечественной и зарубежной литературе имеются сведения по ряду мероприятий, способов и методов, направленных на оптимизацию состояния, предотвращение загрязнения, эвтрофирования, деэвтрофирования и др. В основном эти мероприятия касались либо предотвращения загрязнения, либо деэвтрофирования.

По мнению В.Г. Драбковой и М.Я. Прытковой (Восстановление…, 1994), восстановление следует понимать не как возврат экосистемы к ее начальному состоянию в далеком геологическом прошлом, а прежде всего как снижение биогенной нагрузки на озеро, прекращение поступления загрязняющих веществ (нефтепродуктов, тяжелых металлов, пестицидов и др.).

В работах сотрудников Института гидробиологии НАНУ восстановление понимается как частный случай управления водными экосистемами. В работе В.В. Русанова, Н.М. Мингазовой (1991) восстановление рассматривается как новое направление в гидробиологии, применяется термин “водная рекультивация”.

В 1980-е гг. вышел ряд обзорных работ по методам восстановления («Управление качеством воды в каналах», «Действие аэрации на природные воды» и т.д.). В 1990-е гг. создается Европейский союз восстановления рек, который детально анализировал методы восстановления речных экосистем.

Понятие «восстановление водной экосистемы» предполагает наличие сведений о начальном (естественном, ненарушенном) состоянии, к которому надо стремиться, которые могут быть получены по аналогии с другими водоемами, расположенными в том же природном районе и не подвергающимися антропогенному воздействию.

Основу научной концепции восстановления озерных экосистем составляют такие понятия и принципы, как природный потенциал экосистемы, трофический статус водоема и устойчивость его экосистемы. При этом природный потенциал озер оценивается величиной биогенной нагрузки на озеро, соответствующей естественному состоянию водоема. По М.Я. Прытковой (Восстановление …, 1994) необходимо выявление значения минимальной нагрузки, к которому надо стремиться при восстановлении экосистемы озера, но нельзя ставить задачу, связанную со снижением биогенной нагрузки до ее природных значений.

Нами предлагается понимать восстановление как природный процесс улучшения состояния водного объекта под влиянием процессов самоочищения и специальных восстановительных мероприятий, активизирующих эти процессы (Мингазова, 1999).

Под экореабилитацией водных объектов предлагается понимать применение специальных гидротехнических, физических, химических и биологических (биотехнических) методов, способствующих улучшению состояния водных объектов.

Соответственно, эти два понятия можно применять вместе (восстановление и экореабилитация водных объектов).

Принципы восстановления

С позиции закона об эволюционно-экологической необратимости, можно сформулировать два принципа для объяснения процесса восстановления экосистем и биоценозов, а также механизмов этого процесса:

1. Восстановление экосистем и биоценозов из-за связи с внешними условиями идет по пути возвращения прежних условий обитания и состава флоры и фауны (близких к прежним), сформулированный как принцип «генетической, или экосистемной памяти» (Мингазова,1999).

2. При восстановлении наблюдается не полная, а лишь частичная обратимость биоценозов и экосистем – принцип частичной обратимости при восстановлении (Мингазова,1999).

При этом нельзя ставить целью восстановления возвращение нарушенной водной экосистемы к исходному состоянию экосистемы, состоянию в далеком прошлом, до антропогенного воздействия (Мингазова, 1999). Это невозможно, согласно тому же закону эволюционно-экологической необратимости (лучшим выражением которого являются хорошо известные понятия: «Дважды нельзя войти в одну реку», «Все течет, все изменяется»).

Любое новое, достигнутое при оздоровительных мероприятиях состояние будет иным, так как полного восстановления экосистемы не может быть по причине потери отдельных компонентов биоценозов. Кроме того, эти состояния могут быть неустойчивыми. И целью восстановления является достижение устойчивого благополучного состояния экосистемы, со значительным снижением антропогенной нагрузки, приближение состояния экосистемы до периода максимальной антропогенной нагрузки, когда произошла деградация водной экосистемы.

Восстановление озерной экосистемы предусматривает и участие естественных процессов самоочищения (приводящих к самовосстановлению), и вмешательство человека по снижению нагрузки загрязняющих веществ с территории водосбора, или вторжению в экосистему для регулирования внутриводоемных процессов. Во втором случае восстановление за счет искусственных мероприятий, по сути, становится одним из видов антропогенного воздействия (управление, регулирование) (Мингазова, 1999).

Роль процессов самоочищения в восстановлении водных экосистем

Согласно концепции восстановления (Мингазова, 1999), гидробиоценозы в известной степени способны кондиционировать свою среду, противодействовать ее изменениям под влиянием внешних воздействий, т.е. представляют собой систему

биологического самоочищения, противостоящую эфтрофированию и загрязнению водоемов, направление и мощность работы которой в значительной мере определяют качество воды.

Самоочищение происходит в любых, даже самых загрязненных водоемах; самоочистительная способность связана с продукционно-деструкционными процессами. Восстановительные мероприятия, осуществляемые человеком, как правило, направлены на активизацию процессов естественного самоочищения.

Самоочищение водоема – это последовательность физических (осаждение, седиментация, перенос течением, растворение, испарение и др.), химических (нейтрализация, окисление, сорбция, коагуляция), биохимических и биологических процессов (окислительно-восстановительная минерализация, фотосинтетическая аэрация, биофильтрация, биоаккумуляция, биодеградация в телах гидробионтов, биоседиментация и т. д.), которая приводит к восстановлению природных свойств водоема.

Эффективность процессов самоочищения зависит от степени сапробности и трофического состояния водоема, а также от интенсивности течения в водоеме, процессов биологического самоочищения и др. Самоочищение водоемов с застойной водой (озерах, прудах) происходит медленнее, чем в проточных водоемах (реках).

Методология экореабилитации водных объектов

В отношении методологии восстановления и экореабилитации озер в литературе указывается, что для определения путей восстановления необходимо оценить современное состояние озера, выполнить комплексные (термические, гидродинамические и гидробиологические исследования, изучение донных отложений) исследования (в течение 2-3 лет) и обобщить сведения по изученным водным объектам типа данного региона. На основе этого разрабатывается проект восстановления конкретного озера и осуществляется его мониторинг. Только на основе оценки современного состояния экосистемы можно сделать вывод о необходимости вмешательства с целью ее оздоровления (Прыткова, 1994).

Методология восстановления понимается нами как совокупность применения методов восстановления в определенном порядке. Не могут одни и те же методы применяться в части экореабилитации в отношении разных типов экосистем, в отношении водоемов, находящихся на разных стадиях загрязнения, для которых выявляются разные последствия антропогенного воздействия (антропогенного эвтрофирования, загрязнения, термофикации, ацидификации, нарушения гидрологического режима и др.).

Для каждого случая необходим тщательный подбор мероприятий с учетом особенностей типа водной экосистемы, его современного состояния, характера и масштабов антропогенной нагрузки, типа водопользования и др. По сути это сложная матрица подбора мероприятий в зависимости от типа водных объектов и масштабов последствий антропогенного воздействия.

Во многих случаях для озер при начальном эвтрофировании нужны только профилактические мероприятия (запретительные, ограничительные, лесомелиоративные, небольшие гидротехнические мероприятия и др.). И только в тяжелых случаях требуется значительное вмешательство в озерную экосистему, такие как удаление части донных отложений, укрепление берегов, аэрация, экранирование, применение биотехнических мероприятий с целью восстановления экосистем и др.

Для каждого проекта необходимо детальное изучение состояния водного объекта и последующая проработка этапов проекта, включающая в себя: 1) подготовительные мероприятия; 2) гидротехнические мероприятия; 3) биотехнические мероприятия.

С использованием данных методических подходов в Казани вполне успешно были осуществлены проекты экореабилитации озер Кабан, Лебяжье, Харовое, Марьино, Чишмяле (Набеева, Шигапов, Мингазова, 2025).

Экосистемный и гидротехнические подходы

Важно помнить, что применение необоснованных мероприятий может нанести колоссальный вред, приведя фактически к уничтожению водной экосистемы, при этом в благих целях. Значительная часть проектов восстановления оказываются неуспешными.

Именно поэтому необходимо помнить про “экосистемный” подход при восстановлении, в отличии от традиционного “гидротехнического” подхода. При экосистемном подходе важно восстановить озерную экосистему, а не создать заново водоем, который будет, к примеру, уже не озером, а искусственным водным объектом, по сути, прудом.

Поэтому не следует совершать такие ошибки при восстановлении и благоустройстве городских озер, как:

1) откачка воды из озера для облегчения работы техники (это приведет к потере компонента “вода”, нарушению круговорота веществ и к уничтожению существующей водной экосистемы);

2) полное изъятие донных отложений из водоема (это приведет к потере компонента “донные отложения”, который необходим для круговорота вещества и энергии в водной экосистеме; рекомендуем к удалению не более 50 % площади);

3) изменение береговой линии, дноуглубление, изменение формы и глубин водоема (подобные мероприятия могут привести к нарушению водонепроницаемого слоя и “уходу” воды, а также уничтожению экотопов и мест обитания гидробионтов, усилению антропогенного эвтрофирования);

4) полное удаление водно-болотной растительности (удаление приводит к уничтожению экотопов и мест обитания гидробионтов, нарушению процессов биологического самоочищения; необходимо оставлять не менее 25 % растительности для целей биологического самоочищения);

5) жесткое благоустройство берегов (бетонирование и любое другое жесткое благоустройство берегов ведет к уничтожению экотопов и мест обитания гидробионтов, нарушению процессов биологического самоочищения; необходимо оставлять естественные берега или проводить мягкое берегоукрепление, используя местами геоматы, георешетки и габионы; при этом помнить, что попадание грунта в водоем может привести к заилению и вспышке в развитии водорослей, “цветению” водоема);

6) резкое сокращение территории водосбора (для озер с подземным питанием возможно сохранение естественного гидрологического режима при соотношении площади водоема к площади водосбора 1:1, для озер с атмосферным и поверхностным питанием соотношение должно быть значительно больше (до 1:10) для сохранения естественного гидрологического режима).

Гидротехнические подходы, применяемые при благоустройстве рек, по сути превращают их в каналы (жесткое берегоукрепление). Экосистемный подход заключается в сохранении речной экосистемы, и в этом случае в Европе успешно применяются концепция “Живой реки”, направленная на сохранение поймы, меандр и пойменных озер у рек, а также ревитализации рек, направленная на использование природоподобных технологий при восстановлении рек.

Центры восстановления водных экосистем

Из зарубежных организаций, успешно занимающихся вопросами восстановления водных экосистем, наиболее известны:

1) Центр восстановления ветландов в Институте водного хозяйства RIZA (г. Лелистад, Нидерланды) - как центр переподготовки специалистов в области восстановления рек, озер и болот;

2) Европейский союз восстановления рек (г. Лондон, Великобритания) - проводит конференции в области восстановления рек;

3) Институт передовой водной инженерии PACE (г. Фолленвайдер, Калифорния, США) - проектный институт, реализующий проекты создания водных объеков на базе сточных вод с очисткой стоков;

4) Институт озера Бива, озерный Фонд ILEC и Музей озера Бива (провинция BIWA, Япония) - как центры обучения, а также организации мировых озерных конференций.

Из российских центров восстановления следует отметить:

1) Институт озероведения РАН (г. Санкт-Петербург) - в 1980-2000-х гг. здесь разрабатывалась концепция восстановления озер, проведены конференции, из специалистов известны работы д.б.н. В.Г. Драбковой, д.г.н. М.Я. Прытковой и др.);

2) Лаборатория оптимизации водных экосистем, кафедра природообустройства и водопользования Казанского (Приволжского) федерального университета - с 1980-х гг. по настоящее время проводятся исследования в области экореабилитации и восстановления озер, разрабатываются и реализуются проекты восстановления, ведется подготовка студентов; из специалистов известны работы д.б.н. Н.М. Мингазовой, д.б.н. Деревенской О.Ю., к.б.н. Набеевой Э.Г. (Набеева, 2010), к.г.н. Шигапова И.С. и др.;

3) Институт водного хозяйства ФАВР (г. Екатеринбург) - проводятся исследования в области экореабилитации и восстановления рек, трансформированных добычей полезных ископаемых; переподготовка кадров; из специалистов известны работы д.э.н. Прохоровой Н.Б., к.б.н. Павлюка Т.Е. и др.

Успешность проектов восстановления водных экосистем во многом зависит от профессионализма экологов-реставраторов и детальности исследований, проводимых перед осуществлением проекта.

Литература

Восстановление экосистем малых озер. СПб: Наука, 1994. 143 с.

Дьяков О.А. Реставрация, воссоздание и реабилитация ветландов. Методология восстановления // Метеорология, климатология и гидрология. Одесса, 2002. Вып. 46. С. 245-249.

Макарцева Е.С. Биоманипуляция // Восстановление экосистем малых озер. СПб: Наука, 1994.

Мингазова Н.М. Антропогенные изменения и восстановление экосистем малых озер (на примере Среднего Поволжья): Дисс. … докт. биол. наук. Казань, 1999.

Мингазова Н.М., Котов Ю.С. Казанские озера. Казань: Изд-во КГУ, 1989. 172 с.

Мордвинцев М.М., Омелаев Т.Ю. Мелиорации водосборов малых рек // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2012. №3. С. 199-209.

Набеева Э.Г. Оценка восстановления и самоочищения разнотипных водных экосистем по показателям макрозообентоса: Дисс. ... канд. биол. наук. Казань, 2010. 160 с.

Набеева Э.Г., Шигапов И.С., Мингазова Н.М. Опыт восстановления городских озер. Казань: Типография «Абзац», 2025. 45 с.

Сметанин В. И. Восстановление и очистка водных объектов. М.: КолосС, 2003. 157 с.

CONCEPT OF RESTORATION AND METHODOLOGY ECO-REABILITATION OF TRANSFORMED AQUATIC ECOSYSTEMS

N.M. Mingazova, E.G. Nabeeva

The field of restoration and eco-rehabilitation of aquatic ecosystems is relatively new for Russia and many other countries. The concept, as a set of views and points of view on such a phenomenon as restoration of aquatic ecosystems, is under development. The article reviews the fundamental works that provide scientific and theoretical foundations for the field of restoration, provide an idea of Russian and foreign centers in the field of restoration, and highlight methodological approaches to the issues of eco-rehabilitation of water bodies.

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЭКОСИСТЕМЫ ВОДНОГО ОБЪЕКТА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

А.С. Миронов, А.А. Саенко
Тихоокеанский государственный университет

В статье рассмотрены вопросы современного моделирования экосистем природных объектов. Выявлены основные проблемы, возникающие при моделировании. Для их устранения предлагается использовать информационную системы «цифровой двойник» природного объекта. Предложена оригинальная структурная схема «цифрового двойника», включающего в себя экспертную систему принятия управленческих решений. Приведено описание процессов функционирования «цифрового двойника» природного объекта.

Экосистема – это единый природный комплекс, образованный живыми организмами и средой их обитания (атмосфера, почва, водоем и т.п.), в котором живые и косные компоненты связаны между собой обменом вещества и энергии (Безматерных, 2009). Моделирование экосистем водных объектов представляет собой одно из ключевых и современных направлений в гидрологии и экологии, так же результаты моделирования применяются при управлении природными ресурсами в различных отраслях народного хозяйства. Модели водных экосистем позволяют не только исследовать сложные взаимосвязи между физическими, химическими и биологическими, но и прогнозировать последствия антропогенных воздействий. В условиях роста глобальных экологических вызовов, таких как загрязнение, утрата биоразнообразия и истощение водных ресурсов, моделирование становится важным инструментом для принятия обоснованных управленческих решений (Федорович, 2022; Коряков и др., 2019).

В основном моделирование экосистем сводится к их математическому описанию, поэтому под моделью экосистемы понимается абстрактное математическое представление экосистемы системы (Day, Hall, 1992; Cosme et al., 2023). На сегодняшний день существует множество разработанных систем моделирования водных экологических (Patonai, Fábián, 2022) и экосистем (Bai et al., 2022), которые активно применяются в научной и практической деятельности: AQUATOX, SWAT (Soil and Water Assessment Tool), CE-QUAL-W2, Ecopath, Loop Analysis и STELLA. В общем

случае, согласно (Щепетова, 2015), существующие математические методы моделирования водных экосистем в зависимости от объекта или процесса исследования условно подразделяются на гидрофизические, биологические и динамические модели (представляют собой интеграцию биологических и гидрофизических моделей).

Преимущества математических моделей заключаются в том, что они позволяют делать предсказания, которые можно сравнить с реальными данными, поставив эксперимент или проведя необходимые наблюдения. Но следует помнить, что любая математическая модель учитывает лишь некоторые стороны реальности, но отнюдь не все. Количество возможных вычисляемых состояний экспоненциально возрастает с увеличением количества задействованных переменных или значений переменных, что затрудняет вычисление, анализ и создания модели. Помимо этого, недостатками моделирования являются отсутствие связи со объектом моделирования (физическим объектом) в реальном времени и нет возможности влиять или управлять физическим объектом.

Для того чтобы избавиться от недостатков при моделировании экосистем авторами предлагается использовать концепцию (информационную систему) – цифровой двойник. Цифровой двойник объекта определяется согласно ГОСТ Р 57700.37-2021 (ГОСТ …, 2021). Несмотря на явное техническое происхождение целевого объекта согласно ГОСТ, авторы считают возможным применить идеологию системы цифровой двойник к экосистемам природных объектов. Основные различия между математической моделью и цифровым двойником объекта представлены в таблице.

Таблица. Сравнение цифрового двойника и модели

Характеристика	Модель	Цифровой двойник
Связь с реальным объектом	Независима от объекта	Синхронно связана с объектом
Жизненный цикл объекта	Нет	Есть
Обновление данных	Вручную(редко)	Автоматически в реальном времени
Цель	Исследование, анализ, прогноз	Мониторинг, управление, оптимизация, анализ, прогноз
Пример использования	Симуляция поведения системы	Управление состоянием объекта

Цифровые двойники (ЦД) водных экосистем представляют собой одну из самых перспективных технологий для повышения безопасности и эффективности управления этими сложными природными объектами. Работая в режиме реального времени параллельно с их физическими оригиналами, цифровые двойники позволят не только осуществлять мониторинг текущего состояния экосистем, но и анализировать и прогнозировать их поведение, а также выступать инструментом для более обоснованных управленческих решений. Управленческое решение в данном контексте понимается как процесс выбора наиболее оптимального варианта действий на основе анализа данных, моделирования и прогнозирования состояния водных экосистем. Это решение направлено на эффективное управление водными ресурсами с учетом экологических, социальных и экономических факторов. Это обеспечивает возможность оптимизации режимов эксплуатации водных ресурсов с учетом экологических ограничений регионального, федерального и мирового масштабов, что особенно важно в условиях изменения климата и роста антропогенной нагрузки.

В настоящее время применение концепции цифровых двойников в рамках природных экологических и экосистем набирает популярность в мире. Так в статье (Шайтура и др., 2022) авторы предлагают создание инфраструктуры пространственных данных для цифрового двойника лесной экосистемы. Цифровой двойник EcoPro (Lee et al., 2024) предназначен для экологического прогнозирования, который позволяет моделировать изменения в различных экосистемах под воздействием факторов окружающей среды. Платформа EcoPro предоставляет доступ к модели «Earth System

Model». В работе (Hu et al., 2024) проводится оценка показателей уровня водной экосистемы в бассейне реки Янцзы на основе модели DPSIRM, а затем анализируется влияние технологии цифровых двойников на каждый показатель. Вместе с положительными качествами следует отметить и опасения, высказываемые некоторыми авторами. Например, в (Koning et al., 2023; Zaborowski et al., 2024) авторы предлагают исследователям и заинтересованным сторонам проявлять осторожность при разработке цифровых двойников, помня о том, что многие преимущества и проблемы вычислительного моделирования экосистем также применимы к цифровым двойникам.

В рамках текущей работы авторы считают, что разработка ЦД водного объекта может помочь в формировании устойчивой экосистемы, а также в создании надежной инфраструктуры и системы принятия решений. Целью данного исследования являлась разработка архитектуры цифрового двойника водной экосистемы.

Укрупненно модульная структура ЦД природного объекта (в том числе водного) представляется замкнутой рекурсивной системой и включает следующие основные модули (рис.): реальный природный объект (экосистема), устройства регистрации параметров природного объекта(датчики, системы сбора данных), геоинформационную систему (ГИС), экспертную систему, экспертную базу данных нормативных актов, экспертную базу данных параметров, моделей и процессов природного объекта, информационные каналы с субъектами природопользования, а также информационные каналы с органами регионального и местного управления.



Рис. Структура информационной системы «цифровой двойник» природного объекта

Связь между модулями позволяет организовать обмен данными, обеспечивая оптимизацию управления природным объектом. Отличительной особенностью предлагаемого ЦД является наличие модулей позволяющих осуществлять управление состоянием природного объекта за счет автоматической выработки управленческих решений. Структура системы цифрового двойника в рамках исследования предполагает наличие контура управления объектом исследования – природным объектом (экосистемой), через данные полученные с датчиков и переданных в модуль цифровой модели экосистемы природного объекта и из нее в модуль экспертной системы к органам местного и регионального управления, к субъектам природопользования и через них, за счет принимаемых решений к природному объекту.

В режиме реального времени система сбора данных фиксирует данные с датчиков мониторинга параметров экосистемы природного объекта в базе геопространственных данных (БГД). Эти данные составляют основу информационного наполнения системы. Собранные данные передаются в цифровую модель экосистемы, где они обрабатываются и анализируются. Основу цифровой модели составляют математические, физические и

вычислительные методы, которые позволяют воспроизводить динамику процессов, протекающих в природных экосистемах. В зависимости от типа задач и доступных данных применяются различные методологии моделирования (Dihan et al., 2024). Информация из БГД, а также данные из цифровой модели передаются в геоинформационную систему (ГИС). В этой системе информация визуализируется и становится доступной для пространственного анализа. Цифровая модель экосистемы предоставляет экспертной системе необходимые данные для проведения анализа и выработки рекомендаций. Экспертная система использует эти данные вместе с нормативными актами и параметрами, хранящимися в БГД, чтобы оценить текущее состояние природного объекта и предложить меры по его улучшению, рационализации использования или сохранению. Экспертная система играет важную роль в анализе законодательной базы и консолидации данных для построения прогнозов и содержит базы данных нормативных актов, связанных с процессом природопользования, модуль для анализа документов, экспертную базу данных, модуль поддержки и принятия управленческих решений, систему генерации отчетности о состоянии природного объекта. Нормативно правовая база актов включает: федеральные и региональные законы, регулирующие природопользование; нормативы и стандарты качества воды и состояния окружающей среды; международные соглашения и экологические программы по улучшению состояния окружающей среды. Современные методы обработки текста играют ключевую роль в работе экспертной системы. Для анализа и извлечения информации из нормативно-правовых документов, а также для генерации отчетов используются алгоритмы машинного обучения, искусственные нейронные сети, в частности большие языковые модели (Matveeva, Antonov, 2024). Эти алгоритмы способны выделять ключевую информацию из больших объемов текстов и проводить семантический анализ, сопоставляя содержание документа с текущей ситуацией. В экспертной системе большие языковые модели используются в таких модулях как анализ документов и системе генерации отчетности о состоянии природного объекта. Из модуля анализа документов выделенная семантическая информация сохраняется в экспертной базе данных для дальнейшей работы модуля поддержки и принятия управленческих решений. На основе новых данных, полученных из цифровой модели и семантических данных из экспертной базы данных корректирует внутреннюю работу и генерирует отчет о возможных нарушениях в экологической обстановке.

Решение по результатам работы экспертной системы, через систему генерации отчетности направляются субъектам природопользования, таким как компании, занимающиеся добычей полезных ископаемых, сельским хозяйством, лесозаготовкой и другими видами деятельности, оказывающими влияние на природные объекты. Это позволяет им адаптировать свою деятельность под текущие условия и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду. Субъекты природопользования и другие ЦД, используют результаты работы цифрового двойника для повышения эффективности своих операций. Органы управления, такие как Минприроды России, Росводресурсы, Росприроднадзор, Росгидромет, министерство по чрезвычайным ситуациям, а также региональные и местные власти, используют данные экспертной системы для принятия обоснованных решений. Эти решения касаются регулирования использования природных ресурсов, предотвращения экологических угроз и реализации природоохранных мероприятий. Органы управления вносят изменения в базу данных нормативных актов, отражающие новые законодательные инициативы и требования. Эти обновления затем используются экспертной системой при анализе и выработке рекомендаций. Решения, принятые органами управления оказывают непосредственное воздействие на субъекты природопользования, обязывая их соблюдать установленные

стандарты и ограничения. В свою очередь, это способствует минимизации воздействия на природные ресурсы и улучшению экологической обстановки.

Цифровой двойник экосистемы природного объекта в целом, и экосистемы водного объекта в частности, является передовым инструментом. Интеграция методов машинного обучения и анализа больших данных обеспечивает возможность выявления скрытых закономерностей, что значительно повышает качество управленческих решений. Предлагаемая архитектура цифрового двойника позволяет оперативно реагировать на изменения, оптимизировать процесс природопользования и предотвращать экологические кризисы. Это открывает перспективы для устойчивого управления водными ресурсами, давая органам управления инструмент прогнозирования и планирования, который работает на опережение и минимизирует экологические риски.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках проекта №24-11-20024 «Методы и средства построения цифровых моделей русла, береговой линии и водоохранной зоны реки Амур и ее основных притоков».

Литература

Безматерных Д.М. Водные экосистемы: состав, структура, функционирование и использование. Барнаул: АлтГУ, 2009. 97 с.

ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения.

Коряков А.Е., Шишкина А.А., Шишкина П.А. Математическое моделирование экосистем: уравнения и проблемы // Известия ТулГУ. 2019. № 9. С. 355-358.

Федорович Т.В. Математическое моделирование водных экосистем // Математические методы и модели техники, технологий и экономики / Материалы Всеросс. студенческой научно-практ. конференции. СПб: СПбГЛТУ, 2022. С. 66-69.

Шайтура С.В., Митрофанов Е.М., Жаров В.Г., Феоктистова В.М. Инфраструктура пространственных данных для цифрового двойника лесной экосистемы // Дизайн и технологии. 2022. №91-92. С. 160-168.

Щепетова В.А. Основы математического моделирования в экологии: монография. Пенза: ПГУАС, 2015. 122 с.

Cosme M., Thomas C., Gaucherel C. On the History of Ecosystem Dynamical Modeling: The Rise and Promises of Qualitative Models // Entropy. 2023. V. 25(11). P. 1526.

Day J.W., Hall C.A.S. Ecosystem Modeling in Theory and Practice: An Introduction with Case Histories // Journal of Animal Ecology. 1992. V. 61(1). P. 234–235.

Hu D., Zhou C., Xie F. Application of Digital Twin Technology in Assessing the Level of Water Ecological Civilization Construction in Yangtze River Basin // Hydraulic Structure and Hydrodynamics. 2024. P. 343–352.

Matveeva A.R., Antonov E.V. Methodology for forming a database of characteristics of a complex technological object using large language models. Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI». 2024. V. 13(5). P. 350-357.

Patonai K., Fábián V.A. Comparison of three modelling frameworks for aquatic ecosystems: practical aspects and applicability // Community Ecology. 2022. V. 23(3). P. 439-451.

DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN OF THE AQUATIC ECOSYSTEM TO SUPPORT MANAGEMENT DECISIONS

A.S. Mironov, A.A. Saenko

The article discusses the issues of modern modeling of ecosystems of natural objects. The main problems that arise during modeling are identified. To eliminate them, it is proposed to use the information system «digital twin" of the natural object». An original block diagram of a «digital twin» is proposed, which includes an expert management decision-making system. The description of the functioning processes of the «digital twin» of a natural object is given.

РЕКОНСТРУКЦИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 1700 ЛЕТ НА ОСНОВЕ ПАЛИНОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗ. ЗОЛОТОЕ

Г.Р. Нигаматзянова[1], А.А. Андреев[2], Х.-Ч. Ли[3], В.Д. Страховенко[3], Л.А. Фролова[1,5]
[1]Институт археологии и этнографии Сибирского отделения РАН
[2]Институт полярных и морских исследований им. А. Вегенера
[3] Национальный университет Тайваня
[4]Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения РАН
[5]Казанский (Приволжский) федеральный университет

В статье представлены результаты реконструкции растительного покрова вокруг озера Золотое на юге западной Сибири за последние 1700 лет на основе спорово-пыльцевого анализа донных отложений. Основываясь на палинологических данных, можно выделить 5 основных этапов изменений в растительном покрове на исследуемой территории: доминирование сосновых лесов в римский климатический оптимум; расширение степных сообществ в холодную эпоху раннего средневековья; повторное расширение сосновых лесов и сокращение степных компонентов в средневековой климатический оптимум; расширение широколиственных пород в малый ледниковый период и последующее замена лесной на степную растительность вследствие аридизации.

Палинологические данные предоставляют ценную информацию о распространении и численности видов растений, а также о состоянии климата в прошлом. Это позволяет проводить всесторонний анализ изменений климата и их воздействия на экосистемы с течением времени и в различных пространственных масштабах (Rudaya et al., 2022; Andreev et al., 2022; Нигаматзянова и др. ..., 2024). В данном исследовании представлены изменения растительного покрова юга Западной Сибири за последние 1700 лет и обсуждаются возможные причины этих изменений.

Озеро Золотое расположено на территории Алтайского края в южной части Западно-Сибирской равнины, недалеко от предгорий Алтая, и относится к системе Волчихинских озер (Ресурсы …, 1969). Водоем характеризуется небольшими размерами и глубинами. Берега озера пологие песчаные. В регионе преобладают полынно-злаковые степи с редкими сосновыми и березовыми лесами, произрастающими на холмах (Энциклопедия …, 1996). С севера побережье Золотого занято сосновым лесом (Дирин и др., 2017). В окрестностях озера произрастают осина, береза, ива, тополь, боярышник, шиповник, калина (Энциклопедия …, 1996). Во время совместной экспедиции сотрудниками Института геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева и Казанского федерального университета в июле 2022 г. была отобрана колонка донных отложений оз. Золотое (координаты точки отбора колонки 51°51,479' с.ш., 080°15,986' в.д.) мощностью 64 см. 32 образца керна были подвергнуты спорово-пыльцевому анализу согласно методу Фаегри-Иверсена (Faeigri, Iversen, 1989).

Определение возраста отложений проводилось в лаборатории NTUAMS Национального университета Тайваня методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS) датирования ^{14}C, и при помощи измерения содержания изотопов ^{210}Pb и ^{137}Cs в отложениях. Анализ позволил оценить общий возраст колонки отложений ~1690 кал. л.

Проведенный анализ выявил высокую концентрацию пыльцы и хорошую сохранность пыльцевых зерен. Основываясь на палинологических данных, можно выделить пять основных этапов изменения растительности. Первый этап характеризовался преобладанием хвойных лесов в период ~1690-1500 кал. л.н., что свидетельствует о наличии относительно теплого и влажного климата в эпоху римского климатического оптимума. Второй этап выявил распространение степных сообществ с ~1500 по ~1180 кал. л.н., что на указывает на похолодание и аридизацию климата во время холодной эпохи раннего средневековья. Третий этап зафиксировал более теплые и влажные климатические условия во время Средневекового климатического оптимума в ~1180-700 кал. л.н., что привело к распространению хвойных лесов и сокращению степных компонентов. Четвертый этап: дальнейшее распространение широколиственных пород отражало относительно теплый и влажный климат в диапазоне ~700-280 кал. л.н. Пятый этап включает временной отрезок после ~280 кал. л.н. с заметной тенденцией к аридизации климатических условий, а именно сокращение лесной растительности с заменой на степную. Резкие пики концентраций спор копрофильных, паразитических и сапротрофных грибов около ~1300-1180 кал. л.н. и -14 кал. л.н. (1964 г. н.э.), скорее всего, указывают на антропогенное воздействие.

Основываясь на пыльцевых данных колонки донных отложений оз. Золотое за последние 1700 лет в южной части Западно-Сибирской равнины отмечена тенденция сокращения лесной растительности при замещении ее степными сообществами.

Работа выполнена за счет НИР №FWZG-2025-0005.

Литература

Дирин Д.А., Мардасова Е.В., Рыгалов Е.В. Ресурсы оздоровительной рекреации в Кулундинской степи // География и природопользование Сибири: сборник статей. Вып. 24. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2017. С. 11-33.

Нигаматзянова Г.Р., Фролова Л.А., Нигматуллин Н.М., Юсупова А.Р., Нургалиев Д.К. Реконструкция растительности и климатических изменений позднеледниковья – голоцена Южного Урала на основе спорово-пыльцевого анализа донных отложений озера Большое Миассово // Геоморфология и палеогеография. 2023. Т. 54, №4. С. 179–194.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 1. Горный Алтай и Верхний Иртыш. Ч. 1 Т. 15. 1969.

Энциклопедия Алтайского края: в 2 т. Барнаул: Алт. кн. изд-во, 1995–1996. Т. 2. 1996. 484 с.

Andreev A.A., Nazarova L.B., Lenz M.M., Böhmer Th., Syrykh L., Wagner B., Melles M., Pestryakova L.A., Herzschuh U. Late Quaternary paleoenvironmental reconstructions from sediments of Lake Emanda (Verkhoyansk Mountains, East Siberia) // Journal of Quaternary Science. 2022. V. 37, iss. 5. P. 884-899.

Faegri K., Iversen J. Textbook of Pollen Analysis. The Blackburn Press, 1989. 328 p.

Rudaya N., Frolova L., Kuzmina O., Cao X., Karachurina S., Nigmatullin N., Vnukovskaya Y. Terrestrial vegetation and lake aquatic communities diversity under climate change during the mid-late Holocene in the Altai mountains (Ulagan Plateau) based on the pollen and cladocera data // Limnology and Freshwater Biology. 2022. №4. С. 1550-1552.

RECONSTRUCTION OF THE VEGETATION COVER OF THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA OVER THE PAST 1,700 YEARS BASED ON POLLEN DATA FROM LAKE ZOLOTOE BOTTOM SEDIMENTS

G.R. Nigamatzyanova, A.A. Andreev, H.-Ch. Li, V.D. Strahovenko, L.A. Frolova

The article presents the results of the reconstruction of vegetation cover around Lake Zolotoe in the south of western Siberia over the past 1,700 years based on the spore-pollen analysis of bottom sediments. According to the palynological data, five main stages of changes in the vegetation cover in the studied area can be distinguished: the dominance of pine forests during the Roman climatic optimum; the expansion of steppe communities during the cold era of the Dark Age; the re-expansion of pine forests and the reduction of steppe components in the medieval climatic optimum; the expansion of broadleaf species during the Little Ice Age and the subsequent replacement of forest vegetation by steppe vegetation due to aridization.

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ БИОРАЗНООБРАЗИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ЮГА П-ОВА ЯМАЛ В ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ

Г.Р. Нигаматзянова[1,2], Н.М. Нигматуллин[2], И.В. Федорова[3], Х.-Ч. Ли[4], Л.А. Фролова[1,2]

[1] Институт археологии и этнографии Сибирского отделения РАН
[2] Казанский (Приволжский) федеральный университет
[3] Институт ботаники имени А.Л. Тахтаджяна Национальной Академии наук Республики Армения
[4] Национальный университет Тайваня

Проведена реконструкция растительного покрова юга полуострова Ямал за последние 2500 кал. л. на основе спорово-пыльцевого анализа донных отложений Безымянного озера, а также оценка изменений фиторазнообразия на основе палинологических данных. Выделены 3 палинозоны, отражающие изменения в растительном покрове региона. Выявлено, что оценка разнообразия по палинологическим данным адекватно отражает тенденции изменения фиторазнообразия в прошлом.

Палинологические данные предоставляют обширную информацию о динамике растительного покрова в послеледниковую эпоху п-ова Ямал (Васильчук и др., 1983; Андреев и др., 1998; Панова и др., 2010; Nigamatzyanova et al., 2022). Однако не все эти данные подтверждаются результатами радиоуглеродного анализа. Новые данные о динамике растительного покрова п-ова Ямал, в сочетании с радиоуглеродными исследованиями, будут иметь высокую актуальность для восстановления палеоэкологических и палеоклиматических условий прошлого данного региона. Кроме того, пыльцевые зерна, сохранившиеся в отложениях, предоставляют возможность оценить изменения флористического разнообразия ландшафта в прошлом (Birks, Line, 1992; Giesecke, Ammann, 2014). В настоящей работе представлены результаты реконструкции динамики растительного покрова и оценка изменений биоразнообразия растительных сообществ юга п-ова Ямал в позднем голоцене.

Выбранное в качестве объекта исследования озеро не имеет названия и находится в юго-западной части полуострова Ямал в Ямальском районе Ямало-Ненецкого автономного округа вблизи Байдарацкой губы. Водоем входит в бассейн р. Еркутаяха (Еркута) и расположен в долине реки с выраженной поймой (Чернядьева, Кузьмина, 2001). Район исследования относится к южной части подзоны южных гипоарктических

тундр (Арктическая …, 1978; Чернядьева, Кузьмина, 2001). По берегу озера произрастают ивняки с разнотравьем. Террасы заняты кустарничково-моховыми тундрами и кустарничково-осоково-моховыми болотами с карликовой березой (Чернядьева, Кузьмина, 2001; Czernyadjeva, 2001). Водоем характеризуется небольшими размерами и глубинами (максимальная отмеченная глубина - 6,9 м).

В 2021 г. сотрудниками Казанского федерального университета с глубины 6,0 м Безымянного озера отобрана колонка донных отложений мощностью 124 см. В общей сложности 67 образцов данной колонки были подвергнуты спорово-пыльцевому анализу методом Фаегри-Иверсена (Faegri, Iversen, 1989). Оценка изменений биоразнообразия растительного покрова (альфа-разнообразие) определялось таксономическим богатством (N0), числом наиболее распространенных таксонов (N1) и количеством таксонов-доминантов (N2) по анализу Хилла (Hill, 1973), выравненность растительных сообществ (E) рассчитана как N2/N0 (Hill, 1973; Jost, 2007).

Определение возраста осадков Безымянного озера проводилось методом анализа изотопного состава углерода в лаборатории ускорительной масс-спектрометрии ^{14}C Национального Тайванского университета, г. Тайпей, Тайвань (NTUAMS Lab ^{14}C). Максимальный возраст колонки донных отложений составил 2500 кал. л.

Спецификой пыльцевых спектров колонки Безымянного озера является доминирование пыльцы, характерной для лесотундрового и тундрового ландшафта, а именно пыльцы арбореальных таксонов *Betula* sect. *Nanae*-type, *Betula* sect. *Albae*- type, *Alnus* spp. и пыльцы Cyperaceae из небореальных таксонов. Из споровых растений в большей степени были представлены споры *Sphagnum* spp.

Спорово-пыльцевая диаграмма была поделена на 3 палинозоны. Пыльцевые спектры палинозоны I (122-95 см; ~2500-1920 кал. л.н.) свидетельствуют о развитии кустарничковой растительности с редкостойными березово-еловыми лесами. Некоторое улучшение климатических условий отмечается по данным палиноспектров II палинозоны (95-15 см; ~1920-300 кал. л.н.) (максимум пыльцы *Alnus* spp., Ericaceae, более высокая концентрация пыльцевых зерен). Спектры палинозоны III (15-0 см; ~300- -16 кал. л.н.) отражают похолодание климатических условий по сравнению с предыдущей зоной и развитие кустарничково-ерниковой тундры.

Согласно полученным числам Хилла было выявлено относительно высокое таксономическое разнообразие (N0) пыльцы в отложениях оз. Безымянное. Максимальное значение N0 зафиксировано ~930 кал. л.н., что соответствует периоду улучшения климатических условий региона; минимальное N0 – ~1920 кал. л.н. Разнообразие таксонов (N1) снижается ближе к современности, что служит свидетельством ухудшения климатических условий. Так, максимальное N1 зафиксировано ~420 кал. л.н., минимальное N1 - ~140 кал. л.н. Количество таксонов-доминантов (N2) максимально ~1220 кал. л.н., минимально ~270 кал. л.н. Выравненность растительных сообществ на территории вокруг озера имеет пик ~1220 кал. л.н. и, как и другие показатели альфа-разнообразия, снижается к верхней части колонки: минимум зафиксирован ~270 кал. л.н.

Таким образом, в динамике растительности территории, окружающей Безымянное озеро, выявлены следующие изменения за последние 2500 кал. л.: развитие кустарничковой растительности с редкостойными березово-еловыми лесами ~2500-1920 кал. л.н.; пики распространения кустарников и увеличение концентрации пыльцы вследствие улучшения климатических условий ~1920-300 кал. л.н.; развитие кустарничково-ерниковой тундры на фоне похолодания климатических условий региона ~300- -16 кал. л.н. Данные реконструкции растительности подтверждаются оценкой изменений биоразнообразия растительных сообществ.

Работа выполнена за счет НИР №FWZG-2025-0005.

Литература

Андреев А.А., Тарасов П.С., Романенко Ф.А., Сулержицкий Л.Д., Терехов К.И. Растительность западного побережья Байдарацкой губы в конце позднего плейстоцена // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1998. Т. 6, №5. С. 96-101.

Арктическая флористическая область / Под ред. Б.А. Юрцева. Л.: Наука, 1978. 166 с.

Васильчук Ю.К., Петрова Е.А., Серова А.К. Некоторые черты палеогеографии голоцена Ямала // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 1983. №52. С. 73-89.

Чернядьева И.В., Кузьмина Е.Ю. Листостебельные мхи нижнего течения реки Еркутаяха (Южный Ямал, Западносибирская Арктика) // Новости систематики низших растений. 2001. Т. 34. С. 247-262.

Birks H.J., Line J.M.B. The use of rarefaction analysis for estimating palynological richness from Quaternary pollen-analytical data // Holocene. 1992. V. 2. P. 1–10.

Czernyadjeva I.V. Moss flora of Yamal Peninsula (West Siberian Arctic) // Arctoa. 2001. 10. P. 121-150.

Faegri K., Iversen J. Textbook of Pollen Analysis. The Blackburn Press, 1989. 328 p.

Giesecke Th., Ammann B. Palynological richness and evenness: insights from the taxa accumulation curve // Veget. Hist. Archaeobot. 2014. V. 23. P. 217–228.

Hill M. Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences // Ecology. 1973. 54. P. 427–432.

Jost L. Partitioning diversity into independent alpha and beta components // Ecology. 2007. V. 88. P. 2427–2439.

Nigamatzyanova G., Nigmatullin N., Tumanov O., Gareev B., Frolova L. Pollen data from bottom sediments of the tundra lake in the Yerkuta River basin on the Yamal peninsula // Data Brief. 2022. V. 44. 108539.

Panova N.K., Trofimova S.S., Antipina T.G., Zinoviev E.V., Gilev A.V., Erokhin N.G. Holocene dynamics of vegetation and ecological conditions in the Southern Yamal Peninsula according to the results of comprehensive analysis of a relict peat bog deposits // Russ. J. Ecol. 2010. V. 41, №1. P. 20–27.

ASSESSMENT OF CHANGES IN THE BIODIVERSITY OF THE VEGETATION COVER IN THE SOUTH OF THE YAMAL PENINSULA IN THE LATE HOLOCENE

G.R. Nigamatzyanova, N.M. Nigmatullin, I.V. Fedorova, H.-Ch. Li, L.A. Frolova

The vegetation cover in the south of the Yamal Peninsula has been reconstructed over the past 2,500 cal. year based on spore-pollen analysis of bottom sediments of an Unnamed Lake, as well as an assessment of changes in phytodiversity based on palynological data. Three pollen zones have been identified, reflecting changes in the vegetation cover of the region. It has been revealed that the assessment of diversity based on palynological data adequately reflects the trends of changes in phytodiversity in the past.

РАЗЛОЖЕНИЕ ОПАДА РАСТЕНИЙ ОЛИГОТРОФНЫХ БОЛОТ В МОДЕЛИРУЕМЫХ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ НА НАЧАЛЬНЫХ ЭТАПАХ ДЕСТРУКЦИИ

Л.Г. Никонова, Ю.В. Зубарева
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

Представлены результаты инкубационного эксперимента по влиянию температуры (2, 12, 22°С) и влажности (30, 60 и 90% полной влагоемкости, ПВ) на скорость разложения растительного опада основных растений болотных экосистем южнотаежной подзоны Западной Сибири (*Sphagnum fuscum, Chamaedaphne calyculata, Eriophorum vaginatum*, а также смешанных образцов) на начальных этапах разложения (1 месяц). Во всех образцах при снижении температуры при всех уровнях влажности зафиксировано снижение общих потерь углерода. Выявлен эффект смешивания растительного опада, который оказывает наибольшее влияние на среднюю скорость разложения при 12°С и 30% влажности, ускоряя разложение на 5,5-8,3 мкг С/г/час.

Болота играют климатообразующую, средообразующую роль, являются пулом углерода, накопленного в виде органического вещества торфа, а также считаются стратегическим источником больших запасов пресной воды (Семенова и др, 1998; Gorham, 1991; Vompersky, 1994). Интенсивность процессов разложения растительных остатков в значительной степени определяется гидротермическим режимом торфяной залежи (Guo et al., 2008; Peltoniemi et al., 2012). Наряду с влиянием абиотических факторов, таких как температура и влажность скорость деструкции растительных остатков в болотных экосистемах также определяется индивидуальными особенностями химического состава самих растений-торфообразователей (Головацкая, Никонова 2017; Peltoniemi et al., 2012). В связи с этим исследования, направленные на выявления вклада факторов в процесс разложения в контролируемых условиях модельного эксперимента, являются достаточно важными. Нами проведено исследование, основная цель которого заключалась в количественной оценке влияния температуры и влажности на начальную скорость разложения растительного опада олиготрофных болот южно-таежной подзоны Западной Сибири в условиях модельного эксперимента.

В 2024 году, в лабораторных условиях, проведен модельный эксперимент, в котором исследовали скорость разложения 6 видов растительных образцов: *Sphagnum fuscum, Chamaedaphne calyculata, Eriophorum vaginatum,* также, участвовали в эксперименте смешанные образцы состоящие из растительного опада в соответствии с долей каждого вида в типичном ряме – Mixed sample 1 *(S. fuscum 60% + Ch. calyculata 40%),* Mixed sample 2 *(S. fuscum 90% + E. vaginatum 10%),* Mixed sample 3 *(S. fuscum 60% + Ch. calyculata 35% + E. vaginatum 5%).*

Флаконы с растительным опадом увлажняли болотной водой до состояния, соответствующего 90, 60 или 30% их полной влагоемкости, выдерживали 7 дней при комнатной температуре (предынкубация), а затем помещали в термостаты для последующего непрерывного инкубирования. Измерения проводили регулярно в течении 1 месяца. В день проведения замера флаконы извлекали из термостата, проветривали в течение 10 мин в токе воздуха, герметично закрывали резиновыми крышками и опять помещали в термостат. Спустя 3-4 часа проводили определение концентрации CO_2 с помощью проточного инфракрасного газоанализатора LI-8100A (Li-COR Biosciences, США). Между замерами флаконы закрывали полиэтиленовыми пленками, которые пропускали воздух, но существенно сдерживали испарение влаги.

Для определения интенсивности разложения – динамики скорости выделения $C(CO_2)$ (decomposition rate, DecR, мкг С/г субстрата/час) использовали формулу (Kurganova et al., 2012; Kurganova et al., 2018):

$$DecR = \frac{dC \times M(C) \times V_f \times 10}{m \times V_m \times t} \quad ,$$

где dC – показания прибора с учетом нулевого значения, объемные %; *M(C)* – молярная масса углерода, 12 г/моль; V_f – объем флакона, мл; m – масса абсолютно сухого субстрата, г; V_m – молярный объем газа, 22,4 л/моль; t – время инкубации, час; 10 – переводной коэффициент.

Общие потери углерода из различных видов растительного опада при температурах (2, 12, 22 °C) и разных уровнях влажности (30, 60 и 90 % их полной влагоемкости) рассчитывали на основе экспоненциальной регрессионной модели (Olson, 1963; Berg, 2014):

$$C_{cum} = C_o \times \left(1 - e^{(-k \times T)}\right) \quad ,$$

где C_{cum} – суммарные потери $C(CO_2)$ в результате разложения растительного опада (мг С/г субстрата); C_0 – исходное содержание общего углерода в субстрате (мг С/г субстрата); T – время инкубации (сутки); k – константа разложения, $сут^{-1}$.

Согласно средним значениям, полученным в течении месяца, вне зависимости от влажности и вида растительного опада для большинства исследуемых образцов при снижении температуры происходило замедление интенсивности разложения (рис. 1). Прямая зависимость интенсивности разложения (DecR) от влажности обнаружена лишь для образцов, заложенных при 12ºС (r=0,5). Также, достаточно явно прослеживается прямая зависимость DecR ветоши *E. vaginatum* и от температуры, и от влажности. Самая высокая скорость разложения характерна для *Ch. calyculata* и *E. vaginatum,* в зависимости от температуры и уровня влажности в течении 1 месяца в среднем скорость разложения варьировала в пределах от 3,26 до 41,79 мкг С/г/час для листьев мирта и от 1,72 до 42,37 мкг С/г/час для ветоши пушицы. Минимальные средние значения DecR были характерны для *S. fuscum,* от 1,37 до 18,07 мкг С/г/час.

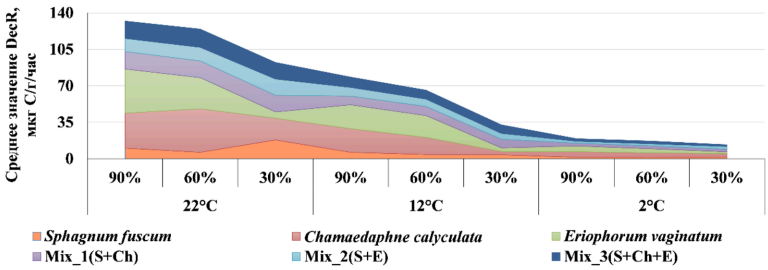


Рис. 1. Средняя скорость разложения (DecR) растительных образцов за 1 месяц при температуре 22, 12, 2 °C и разных уровнях влажности: 30, 60 и 90 % их полной влагоемкости, мкг/С/г/час

Для смешанных образцов обнаружена значительная вариативность интенсивности выделения $C(CO_2)$, колеблющаяся в среднем от 1,70 до 17,59 мкг С/г/час. При этом, среди смешанных образцов для *Mixed sample 2* наблюдалась минимальная активность во всех экспериментальных условиях. Для всех смешанных образцов

наблюдалось усиление скорости разложения при 12°С и 30% влажности по отношению к их отдельным компонентам, эффект смешивания повышал интенсивность разложения на 5,5-8,3 мкг С/г/час. Примечательно, что в условиях 30% влажности для *Mixed sample 1* при 22ºС и *Mixed sample 3* при 2ºС смешивание приводило к снижению скорости разложения относительно отдельных растительных образцов.

Период, в течение которого наблюдались самые высокие скорости разложения составлял первые 5 дней. При 22ºС значение DecR достигал в зависимости от влажности 16-251 мкг С/г/час, а при 12 и 2ºС максимальная скорость выделения $C(CO_2)$ не превышала 95 и 37 мкг С/г/час соответственно. В дальнейшем, происходило постепенное снижение темпов разложения, за исключением образца *S. fuscum* при 22 °С и 30% влажности, для которого отмечено активное увеличение выделения CO_2 на 25-й день инкубации. Кроме того, для *E. vaginatum*, при влажности 60% и 90%, активное выделение углекислого газа наблюдалось несколько дольше, до 13 дня при температуре 22 °С, до 18 дня при 12 °С, и до конца месяца при 2 °С. Как правило, после активных всплесков выделения углекислого газа значения достигают определенного плато (Nikonova et al., 2023). В нашем исследовании, в течении 31 дня относительно равномерного уровня выноса углерода достигли только образцы, инкубированные в условиях 22ºС и влажности 60 % от ПВ.

Снижение температуры и влажности, при которой проходила инкубация растительных образцов, как правило, вызывала уменьшение общих потерь $C(CO_2)$ в процессе их разложения (рис. 2).

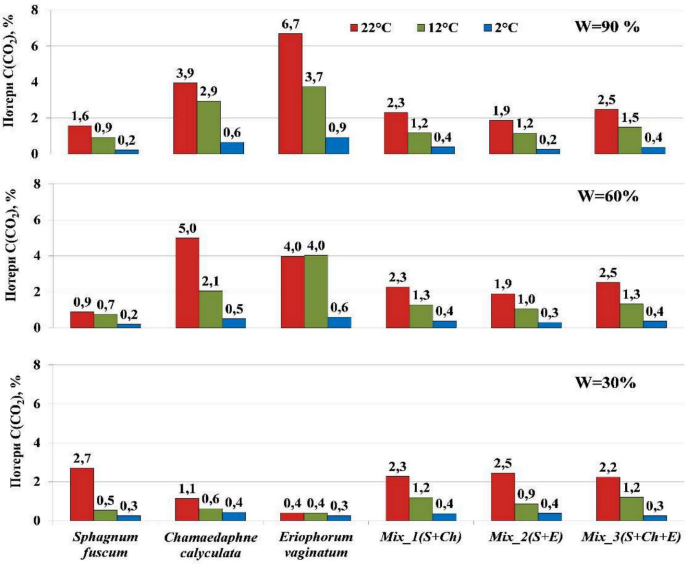


Рис. 2. Суммарные потери $C(CO_2)$ за 30 дней из различных видов растительного опада при температурах (2, 12, 22 °С) и разных уровнях влажности (30, 60 и 90 % их полной влагоемкости), % от исходного количества С в образце

При влажности 90 % от полной влагоемкости образцов общие потери углерода не превышали 6,7% от исходного значения, при 60% – 5%, при 30 – 2,7 %. Во всех образцах при снижении температуры с 22°С до 2°С при всех уровнях влажности зафиксировано снижение общих потерь углерода. Суммарное выделение С(CO_2) (C_{cum}) при 60 и 90% влажности было самым высоким из образцов *Ch. calyculata* и *E. vaginatum*, от 3,9 до 6,7 % при температуре 22°С и снижаясь до 0,5-0,9 % при температуре 2°С. Образцы *S. fuscum*, ожидаемо, демонстрировали самую высокую устойчивость к разложению, за исключением условий 22 °С и 30% влажности, при которых на очес мха и смешанных образцов, в состав которых он входил, приходились максимальные потери органического вещества. При снижении температуры в смешанных образцах, так же прослеживалось снижение общих потерь углерода.

Таким образом, в экспериментальных условиях установлено, что для болотных растений, на начальных этапах деструкции наблюдается интенсивное выделение С(CO2), с максимальной активностью в течение первых 5 дней. Для *Sphagnum fuscum* в условиях инкубации при 22°С и 30% влажности пик интенсивности разложения приходится лишь на 25-е сутки. Снижение температуры инкубирования и влажности вызывает не только закономерное уменьшение максимальных значений *DecR*, но и для некоторых образцов удлинение периода с наиболее высокой скоростью разложения, например для *Eriophorum vaginatum*. Во всех образцах при снижении температуры с 22°С до 2°С при всех уровнях влажности зафиксировано снижение общих потерь углерода. Эффект смешивания растительного опада оказывает наибольшее влияние на среднюю скорость разложения при 12°С и 30% влажности, ускоряя разложение на 5,5-8,3 мкг С/г/час.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, в рамках научной темы «Потоки и баланс углерода в лесных и болотных экосистемах юга таежной зоны Западной Сибири: комплексный мониторинг, анализ и прогноз» (FWRG-2025-0002, Регистрационный номер 1024100800092-1).

Литература

Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Влияние уровня болотных вод на процессы трансформации сфагновых мхов в торфяной почве олиготрофных болот // Почвоведение. 2017. № 5. С. 603–613.

Функционирование микробных комплексов в верховых торфяниках – анализ причин медленной деструкции торфа. М: Т-во научных изданий КМК, 2013. 128 с.

Berg B. Decomposition patterns for foliar litter: A theory for influencing factors // Soil Biol. Biochem. 2014. Vol. 78. P. 222–232.

Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming // Ecological applications. 1991. Vol. 1, № 2. P. 182–195.

Olson J. S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems // Ecology. 1963. T. 44, № 2. P. 322–331.

Peltoniemi K., Strakova P., Fritze H. et al. How water-level drawdown modified litter-decomposing fungal and actinobacterial communities in boreal peatlands // Soil Biology and Biochemistry. 2012. 51. P. 20–34.

Vompersky S. E. The role of marshes in the carbon cycle. Biogeocenotic features of bogs and their rational use // Nauka. 1994. P.5–37.

INITIAL STAGES OF PLANT LITTER DECOMPOSITION IN OLIGOTROPHIC PEATLANDS UNDER MODEL HYDROTHERMIC CONDITIONS

L.G. Nikonova, Y.V. Zubareva

One-month incubation experiments were conducted with various types of peat-forming plants (*Sphagnum fuscum, Chamaedaphne calyculata, Eriophorum vaginatum*, and a Mixed sample). The experiments were carried out at temperatures of 2, 12, and 22°C, with varying moisture levels (W = 30, 60, and 90% of their water holding capacity). In all samples, a decrease in total carbon loss was recorded with decreasing temperature at all humidity levels. The effect of mixing of plant litter was found to have the greatest effect on the average decomposition rate at 12°C and 30% humidity, increasing decomposition by 5.5-8.3 μg C/g/hour.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР ЗАПАДНОЙ ПЕРИФЕРИИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ

Н.А. Новик

Белорусский государственный университет

Ледниковые озера Восточно-Европейской равнины являются важными индикаторами палеогеографического развития территории, сформированной под воздействием завершающего этапа наступания и деградации последнего оледенения. Особенности местоположение озер в различных регионах позволяет проследить пространственно-временные закономерности в состоянии природной среды, характере ее изменений и динамики в послеледниковый период.

Скандинавский ледник оказал решающее воздействие на формирование рельефа, изменение климатических и природных характеристик. При реконструкциях природных обстановок важным направлением является изучение особенностей развития различных секторов ледникового покрова, сыгравшего основную роль в формировании озерных котловин с учётом темпов дегляциации конкретных территорий. В исследованиях различных авторов особое внимание уделяется изучению этапов формирования озер, для уточнения положения стадий и фаз ледникового покрова, направления движения потоков талых ледниковых вод, проявлению перигляциальных процессов.

Восточно-Европейская равнина - одна из крупнейших равнин земного шара, расположенная в большей, восточной части Европы. Ее западная периферия охватывает юго-восточный сектор территории, покрывавшейся последним вюрмским (поозерским, валдайским) покровным оледенением (Рисунок).

На севере она ограничена 60° с.ш., на юге доходит до 53° с.ш., на западе проходит по 19° в.д., на востоке доходит до 35° в.д. и целиком включает в себя территории Литвы, Латвии, Эстонии, а также частично, территории Беларуси (Белорусское Поозерье), Польши (Мазурское Поозерье), России (Калининградскую, Псковскую, Новгородскую, части Смоленской, Тверской и Ленинградской областей).

В геоструктурном отношении данная территория соответствует Восточно-Европейской платформе, на большей части которой кристаллические породы скрыты под толщей пологозалегающих осадочных пород, слагающих Русскую плиту (Спиридонов, 1969). В морфоструктурном отношении западная периферия Восточно-Европейская равнина представляет собой равнину с пластовым эрозионно-денудационным и аккумулятивным рельефом. Здесь мощный чехол платформенных

отложений залегает почти горизонтально, слагая аккумулятивные и пластово-денудационные низменности и возвышенности, отвечающим понижениям и повышениям складчатого основания доантропогенового возраста (Исаченко, 1995). На них наложены формы рельефа аккумулятивно-ледникового и водно-ледникового генезиса области последнего оледенения. Здесь протягиваются холмистые гряды и возвышенности: Балтийская, Валдайская, Вепсовская. К югу простирается область, покрывавшаяся более древними оледенениями, где первоначальный ледниково-аккумулятивный рельеф переработан эрозионно-денудационными процессами. Средняя высота равнины составляет около 170 м, относительные превышения в среднем составляют 20 – 60 м.



Рис. Местоположение западной периферии Восточно-Европейской равнины в пределах юго-восточного сектора последнего оледенения

Большая часть западной периферии Восточно-Европейской равнины относится к области умеренного пояса с постепенным переходом от морского климата к континентальному. Преобладает западный перенос атлантических воздушных масс, который ослабевает с северо-запада на юго-восток. Для территории характерна отчётливо выраженная природная зональность. Это зона с избыточным увлажнением, с преобладанием смешанных (хвойно-широколиственных) лесов.

В гидрографическом отношении территория принадлежат бассейну Атлантического океана. Сюда относятся реки, впадающие в Балтийское (Нева, Западная Двина, Неман, Висла), Чёрное (Днепр) и Каспийское (Волга) моря.

Отличительной особенностью западной периферии Восточно-Европейской равнины является обилие озер ледникового происхождения. Это области Поозерий с характерным для них обилием озёр. Многочисленные и разнообразные озера располагаются преимущественно в пределах ледниковых возвышенностей и понижениях между ними. В сочетании с положительными формами, озерные котловины

создают своеобразный холмисто-моренно-озерный ландшафт. Внешний вид и морфология большинства озерных котловин отличаются признаками молодости, которая выражается в сохранении ледниковой деятельности, значительной глубине вреза в моренные отложения, четком выражении бровки, склонов, подводного рельефа, отсутствии эрозионного расчленения и др. (Якушко, 1981). Озера преимущественно приурочены к цепям краевых образований соответствующих стадий и фаз отступания вюрмского (поозерского, валдайского) ледников. Каждый генетический тип озерных котловин занимает определенное положение в ледниковом комплексе имея подпрудное, ложбинное, гляциокарстовое, эворзионное, остаточное и сложное происхождения.

Мазурское, Илавское и Сувалкское Поозерья – крупнейший озерный регион на северо-востоке Польши входящий в пределы западной периферии Восточно-Европейской равнины и насчитывающий 2061 озеро (Choiński et al., 1989). Здесь преобладает ледниково-аккумулятивный рельеф с большим количеством моренных холмов высотами выше 300 м и межморенных котловин, часто занятых ледниковыми озёрами. Великие Мазурские озёра расположились на территории около 1700 км^2 и занимают четвёртую часть водных ресурсов Польши. Крупнейшими из озёр являются Снярдвы (113 км^2), Мамры (105 км^2), Нидзское, Негоцин, Езёрак, Рось, Даргин, Галадуш, Нарье, Сиде, Роспуда. Самые глубокие озера региона – Ханьча (108,5 м), Вельки Став (79,3 м), Вигры (73 м.).

На территории Литвы насчитывается около 2324 озёра, площадью более 1 га (Daubarienė et al., 2011). Общая их площадь составляет более 870 км². Все озёра занимают около 1,5 % всей площади территории Литвы. Озера распределены неравномерно; большинство из них расположено в пределах Балтийской гряды. Крупнейшими озёрами страны являются – Друкшяй (44,5 км^2), Диснай, Платяляй, Виштитис, Дуся, Метелис, Обелию, Кретуонас, Друсконис, Асвея, Таурагнас, Сартай, Айсетас, Даугай, Гальве. Самое глубокое озеро страны – Таурагнас (62,5 м).

На территории Латвии насчитывается более 2256 озёр площадью более 1 га, основная часть из которых ледникового происхождения. Озера занимают около 1,5 % площади страны (Konkovs, et al., 2021). Большая часть озерно-болотных угодий приходится на восточную часть страны – Латгалию. Крупнейшими ледниковыми озёрами Латвии являются – Лубанс (80,7 км^2), Разна, Буртниекс, Усмас, Лиепаяс, Сесавас, Слокас, Лиздолес, Алуксне, Звиргзденес. Самым глубоким является озеро Дридзис (66,2 м).

В Эстонии насчитывается примерно 1562 озера, площадью свыше 1 га. Озера вместе с другими водоемами покрывают примерно 5% территории Эстонии (Terasmaa, 2918). Чудское озеро и озеро Выртсъярв относятся к числу крупнейших озер Европы. Озера расположены крайне неравномерно. Большинство озер приходится на юго-восточную и южную части страны, где распространены крупнейшие краевые цепи ледниковых гряд. Напротив, на обширных пространствах западной и центральной Эстонии вообще нет озер. Крупнейшие озера - Чудское озеро (2613 км²), озеро Выртсъярв (269,19 км²), Нохипалу, Мустъярв, Нохипалу Валгъярв, Пюхаярв, Ульясте, Вийтна, Пиккярв, Эхиярв, Муллуту, Суурлахт. Наибольшую глубину имеет озеро Рыуге-Сууръярв (38 м).

Калининградская область России, отличается большим количеством озер ледникового происхождения. На территории области насчитывается около 300 с площадью, превышающей 1 га (Румянцев и др., 2015). Большинство озерных котловин образовалось во время южно-литовской фазы. Такие озера наиболее типичны для юго-востока области располагаясь в понижениях между моренными грядами. Здесь самым крупным и глубоким озером области является озеро Виштынецкое (17,8 км^2, 54 м). Другими наиболее крупными озерами юго-востока являются: Красное, Мариново,

Дорожное, Чистое, Плавни, Камышевое. На территории Смоленской области, затронутой последним оледенением, находится около 500 озер с площадями зеркала более 1 га (Румянцев и др., 2015). Около 90% от суммарной площади озер лежат среди моренных холмов, ледниковых равнин и озовых гряд, в пределах Смоленского Поозерье на северо-западе области. Почти все они имеют небольшие площади, самое крупное – оз. Акатовское (6,5 км^2). Озера располагаются в нескольких обособленных группах, приуроченных к краевым образованиям и включают в себя водоемы: Витрино, Диво, Букинское, Бол. и Мал. Рутовечь, Каспля, Чепли, Рытое, Велисто, Глыбай, Мутное, Чистик. Самым глубоким является озеро Баклановское (29 м). В Псковской области России насчитывается около 2300 водоемов с площадью более 1 га (Румянцев и др., 2015). По территории области озера распределяются неравномерно. Наиболее крупные Чудское и Псковское (709 км^2) озера, расположены на северо-западе области. Однако, основное количество озер сосредоточено в более возвышенной южной части – Себежское и Псковское Поозерья, где распространен зандровый и холмисто-моренный рельеф. Здесь многочисленные озера протянулись полосой в широтном направлении. В пределах озерно-ледниковых равнин численность озер невелика. К числу крупнейших относятся озера Жижицкое, Двинье-Велинское, Полисто, Иван (Большой и Малый), Себежское, Невельское, Алё, Свибло, Нечерица, Урицкое, Дубец. Самым глубоким является озеро Глубокое (36 м). В пределах запада Тверской области России насчитывается около 1500 водоемов, с площадью, превышающую 1 га (Румянцев и др., 2015). Это район так называемого Валдайского Поозерья, находящийся у границы максимального продвижения валдайского ледника. Самым крупным озером области является озеро Селигер (212 км^2). Среди других крупных озер – Волго, Вселуг, Стерж, Пено, Великое, Сиг, Пирос, Верестово, Шлино, Серема, Лучанское, Щучье, Удомля. Самым глубоким в области является озеро Бросно (41,5 м). На территории Новгородской области расположено около 1600 озер с площадью более 1 га (Румянцев и др., 2015). Наибольшая величина озерности характерна для восточной части области, где распространение имеет зандровый, холмисто-моренный рельеф, тогда как на западе озер значительно меньше, но здесь расположено самое крупное озеро – Ильмень (982 км^2) и частично расположенных в области оз. Селигер и Шлино. Крупнейшими озерами области также являются Велье, Меглино, Валдайское, Великое, Городно. Самым глубоким является озеро Валдайское (52 м). На территории платформенной части Ленинградской области количество озер с площадью более 1 га составляет около 2500 (Румянцев и др., 2015). Характерно чередование районов с широким распространения озер и обширных заболоченных пространств фактически без озер. В бассейне р. Луги, в краевом поясе Лужской стадии оледенения, расположены озера Самро, Вялье-Стречно, Врево, Черменецкое, Сяберское с площадью, превышающей 10 км^2. Самым глубоким здесь является озеро Верхнее Врёво (42 м).

Озерные водоемы Беларуси сформированные в результате деятельности последнего ледника и концентрируются на севере республики в Белорусском Поозерье в бассейне рек Западной Двины и Немана. Здесь их количество достигает 3500. В отдельных районах их общая площадь достигает 12 % площади водосбора (Якушко, 1981). Расположены озерные котловины преимущественно в пределах моренных возвышенностей и равнин. В пределах заболоченных низин распространены плоские остаточные котловины. Озера концентрируются преимущественно на севере (браславская цепь краевых образований) и юге региона (оршанская и витебская цепи краевых образований). Озера чаще всего образуют отдельные группы: Нарочанская, Браславская, Ушачская и др. Крупнейшими озерами региона является озеро Нарочь (79,6 км^2), Освейское, Лукомльское, Нещердо, Дривяты, Дрисвяты, Снуды, Лисно, Свирь. Самым глубоким является озеро Долгое (53,7 м).

Сочетание высоких моренных гряд и холмов с глубокими озерными котловинами, окруженными лесами и болотами, создает неповторимые ландшафты Поозерий западной периферии Восточно-Европейской равнины. Являясь неотъемлемой частью природного комплекса, озерные водоемы в значительной степени отражают его особенности, одновременно оказывая влияние на характер и направление природных процессов.

Анализ местоположения озер в ледниковом комплексе, а также возраста озерных осадков из различных регионов западной периферии Восточно-Европейской равнины, поможет реконструировать этапы начала озерного седиментогенеза в ледниковых котловинах, приуроченных к стадиальным границам отступания последнего покровного оледенения, а также позволит получить детальные реконструкции природных обстановок на локальном и региональном уровнях, в том числе при корреляциях межрегиональных схем.

Литература

Исаченко А.Г. Экологическая география Северо-Запада России. СПб., 1995. 208 с.

Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В. Озера европейской части России. СПб.: ЛЕМА, 2015. 392 с.

Спиридонов А.И. Геоморфологическое районирование Восточно-Европейской равнины // Землеведение. 1969. Т. 8. С. 76-110.

Якушко О.Ф. Озероведение: География озёр Белоруссии. Минск: Выш. шк.,1981. 223 с.

Choiński A., Lawniczak A., Ptak M., Sobkowiak L. Causes of Lake Area Changes in Poland // Journal of Resources and Ecology. 2011. 2. P. 175-180.

Daubarienė J., Valiuškevičius G., Asijavičiūtė V. The structure of the landscape of lithuanian lake shores of various sizes // Mokslas – Lietuvos ateitis. Vilnus, 2011, P. 100-106.

Terasmaa J. Estonia, the land of lakes // Dynamiques environnementale. 2018. P. 358-366.

SPATIAL AND TEMPORAL PATTERNS OF FORMATION OF GLACIAL LAKES IN THE WESTERN PERIPHERY OF THE EAST EUROPEAN PLAIN

N.A. Novik

Glacial lakes of the East European Plain are important indicators of the paleogeographic development of the territory formed under the influence of the final stage of the onset and degradation of the last glaciation. The location of lakes in different regions makes it possible to trace spatiotemporal patterns in the state of the natural environment, the nature of its changes and dynamics in the postglacial period.

ПЕРСПЕКТИВЫ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОЗЕРА ВИШТЫНЕЦКОГО В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ СТАТУСА ПРИРОДНОГО ПАРКА «ВИШТЫНЕЦКИЙ» С РЕГИОНАЛЬНОГО НА ФЕДЕРАЛЬНЫЙ

О.А. Новожилов, А.В. Алдушин, Ю.К. Алдушина
Калининградский государственный технический университет

Рассмотрено рыбохозяйственное использование озера Виштынецкого за многолетний период и дана оценка влияния промысла на экосистему водоема. Показано ее достаточно устойчивое состояние по большинству параметров, в том числе по структуре рыбных

сообществ. Наблюдаемые изменения в структуре уловов связаны, прежде всего, с изменением интенсивности промысла и мельчанием одного из массовых видов рыб данного водоема – европейской ряпушки. Показано, что рациональное использование запасов рыб озера Виштынецкого позволит снизить биогенную нагрузку на водоем и обеспечить местное население рабочими местами и продукцией из свежей рыбы.

Озеро Виштынецкое является уникальным водоемом для Калининградской области с точки зрения его происхождения, гидрологических особенностей, продуктивности всех трофических уровней, а также состава ихтиофауны. Оно является самым большим по площади (1,8 тыс. га) и самым глубоким (54 м), имеет ледниковое происхождение со сложным рельефом дна. По продуктивности всех трофических уровней озеро традиционно относится к олиготрофному типу водоемов, наиболее уязвимому при увеличении антропогенной нагрузки. В последние десятилетия значительно возросла его рекреационная значимость, прибрежная часть озера все чаще используется жителями области для «дикого» отдыха. Интенсивная антропогенная нагрузка может изменить его трофический статус в худшую сторону.

Кроме того, водоем имеет высокое рыбохозяйственное значение, обусловленное наличием в ихтиофауне ценных сиговых видов рыб – сига и европейской ряпушки, а также общепресноводного комплекса рыб (плотва, окунь, щука и др.). Рыбохозяйственная деятельность здесь активно велась в 70-80-х годах XX века и после некоторого перезапуска начала вновь развиваться в двухтысячные годы с перспективой дальнейшего его развития. Озеро относится к категории трансграничных водоемов, согласно договору между Российской Федерацией и Литовской Республикой Калининградской области принадлежит 80,7% площади акватории. Промышленный лов ведется только на российской части водоема тремя организациями. В литовской части акватории промышленный лов не ведется, существует только любительское рыболовство и осуществляется отлов сига в преднерестовый и нерестовый период в рыбоводных целях – для отбора и инкубации икры с целью подращивания молоди и зарыбления других водоемов Литвы, однако объемы его изъятия невелики (Шибаев, Соколов, 2008).

Смена статуса природного парка «Виштынецкий» на национальный парк федерального значения (Постановление …, 2024) привела к включению озера Виштынецкого в состав национального парка, что подразумевает более строгий контроль и регулирование деятельности на данной территории, включая акваторию водоема. В связи с этим, помимо оценки дальнейших путей развития рекреационного использования данной территории, необходимо оценить и возможности рыбохозяйственного использования озера Виштынецкого с учетом как его экологических возможностей, так и статуса как трансграничного водоема.

Целью настоящей работы является оценка перспектив использования рыбных ресурсов озера Виштынецкого в новых реалиях правового статуса и увеличения антропогенной нагрузки.

Озеро Виштынецкое в 1960-1980 годы характеризовалось высоким рыбохозяйственным значением: наряду с ценными видами сиговых рыб и речного европейского угря здесь присутствует и общепресноводный комплекс (плотва, окунь, ерш и др.). Всего насчитывается 17 видов рыб, относящихся к 8 семействам. Основными объектами рыболовства были ряпушка и плотва, а среднегодовой вылов водных биологических ресурсов составлял порядка 30 тонн. С начала 90х годов рыбная отрасль страны пришла в упадок, и уловы резко снизились. Лишь с начала 2000-х рыболовство стало снова возрождаться на водоеме, при этом объемы вылова стали заметно ниже (Шибаев, Соколов, 2008) (рис. 1).

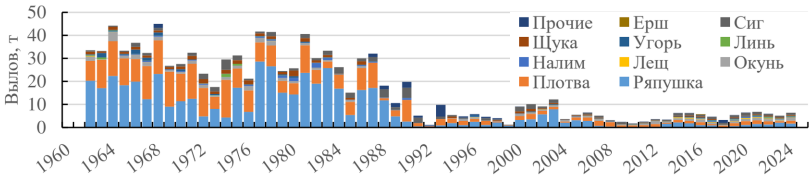


Рис. 1. Динамика вылова рыб на озере Виштынецком

На этой основе рядом авторов (Гущин, Федоров, 2007) высказывались мнения о чрезмерной промысловой эксплуатации рыб в советский период и закономерному, по их мнению, снижению запасов, особенно ценных видов, до низких уровней. Комплексные рыбохозяйственные исследования, возобновленные кафедрой водных биоресурсов и аквакультуры (ранее кафедра ихтиологии и экологии) КГТУ с 2006 года и проводимые ежегодно по настоящее время, включающие в себя изучение гидрологических и гидрохимических параметров озера, зоопланктона и зообентоса, а также рыбного сообщества озера позволили дать современную оценку экологического состояния водоема. Результаты показали, что по гидробиологическим показателям экосистема озера находится в достаточно стабильном состоянии, хотя по сравнению с 70-ми годами, к настоящему времени более явными стали черты мезотрофности в области литорали и сублиторали озера. Биомасса, видовой состав зоопланктона и зообентоса изменились за последние десятилетия несущественно (Shibaev et al., 2018). Поэтому возможность резкого снижения численности рыб в результате изменения состояния среды обитания представлялась маловероятной. В связи с этим детально была изучена структура сообщества рыб озера Виштынецкого, которая может выступать как характеристика состояния экосистемы в целом. Учитывая, что в водоеме имеется четкая дифференциация видов по биотопам, характеристика структуры проводилась отдельно для придонных горизонтов и пелагиали озера (Shibaev et al., 2018). Оценка видовой структуры рыбных сообществ озера Виштынецкого определялась на основании контрольных обловов набором разноячейных ставных сетей, гидроакустических съемок и экспериментальных тралений. Результаты исследований рассмотрены ниже.

Видовая структура донного сообщества рыб озера Виштынецкого была представлена 14 видами. По численности доминируют ерш, окунь, ряпушка и плотва; по биомассе наибольшее обилие приходится на окуня и плотву, биомасса таких видов, как плотва, ерш, ряпушка, сиг и щука существенно ниже (рис. 2).

При относительно стабильной структуре ихтиоценоза, наблюдаемые колебания индексов численности в отдельные годы (рис. 3) можно объяснить естественными межгодовыми изменениями в распределении и активности поведенческих реакций рыб, но не колебаниями общей численности популяций, за исключением видов с коротким жизненным циклом (ряпушка, уклейка, ерш), флюктуации численности для которых являются закономерными.

В пелагическом сообществе рыб доминирующим элементом является ряпушка, которой сопутствует ерш в том случае, когда нижняя подбора сети оказывается на расстоянии менее 1,5 м от дна, и окунь, когда сети выставлены менее 10 м от поверхности. Роль других видов рыб: налима, сига, уклейки, плотвы и щуки – существенно меньше, и они не играют большой роли в уловах (рис. 4).

Ряпушка является ценным объектом промысла, высказывались предположения о резком сокращении ее численности, в связи с чем дополнительно были проведены гидроакустические исследования данного вида. Результаты показали, что численность данного вида находится на достаточно высоком уровне (Aldushin, Deogenova, 2024) и

составляет в среднем порядка 12 млн. экз. при колебаниях от 7,2 млн. до 18 млн. особей (рис. 5), а снижение уловов данного вида промысловыми организациями связано с ее мельчанием (Гудим и др., 2024; Shibaev et al., 2018) и организацией промысла.

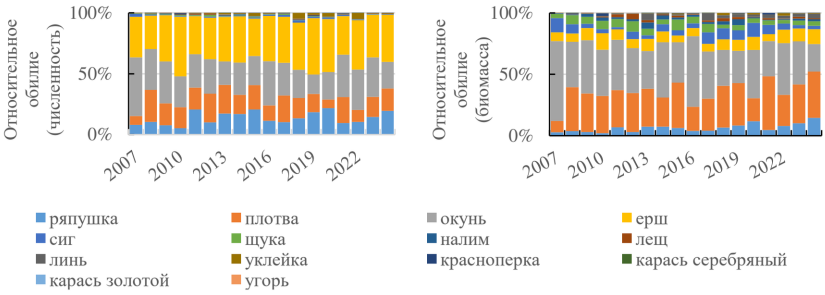


Рис. 2. Динамика видовой структуры донного сообщества рыб

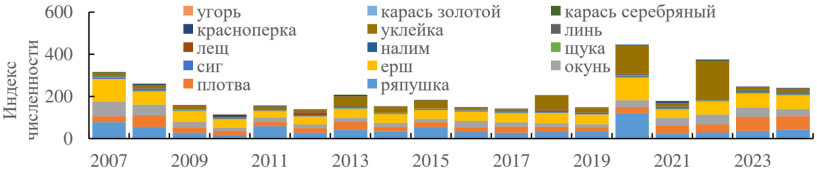


Рис. 3. Индексы численности и биомассы донного сообщества рыб

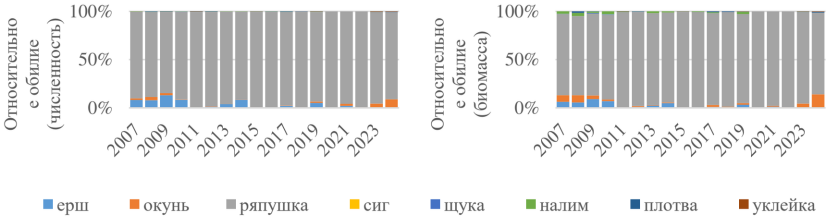


Рис. 4. Динамика видовой структуры пелагического сообщества рыб

Невысокие результаты промысла двух последних десятилетий связаны, прежде всего, со слабым развитием рыбодобывающей базы (примерно в 10 раз слабее, чем в период активного использования водоема в 1970е годы) и мельчанием одного из массовых и ценных видов рыб озера – ряпушки. Последнее связывают как с перенаселенностью данного вида ввиду низкой интенсивности промысла, так и с повышенной естественной смертностью крупных особей в результате воздействия паразитов. Таким образом, высокая плотность населения ряпушки привела к уменьшению темпов роста рыбы (вследствие меньшей доступности пищи) и экстенсивности заражения паразитами, как следствие, к повышению естественной смертности особей.

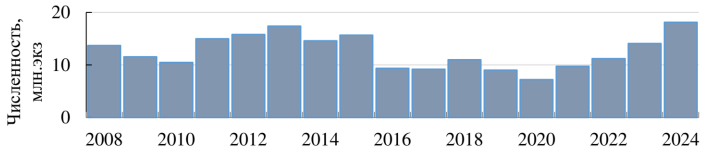


Рис. 5. Динамика численности ряпушки озера Виштынецкого

Снижение интенсивности промысла в 90е годы также способствовало снижению выноса биогенных элементов из экосистемы водоема. Содержание белка в рыбах, обитающих в оз. Виштынецком, составляет в среднем около 18%, а большинство белков содержат 16% азота (16 г в 100 г белка) (Бубырь, 2015), это позволяет, зная улов, рассчитать количество азота. В химическом составе пресноводных рыб содержится от 200 до 220 мг фосфора на 100 г веса рыбы, что так же позволяет рассчитать его вынос промыслом (рис. 6).

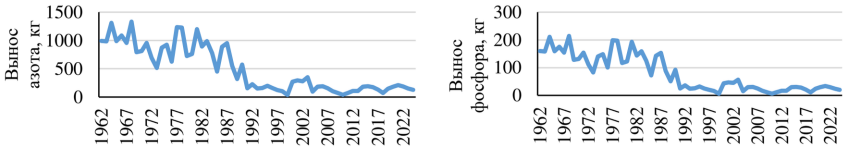


Рис. 6. Вынос биогенных элементов промыслом

Таким образом, максимальные величины по выносу азота промыслом в период интенсивного рыболовства составляли около 1300 кг (среднее – 875 кг), по фосфору – более 200 кг (среднее – 140 кг), т.е. изъятие биогенных элементов было довольно существенно. В постсоветский период, когда промысел существенно снизился, средние величины составили 157 кг и 25 кг по азоту и фосфору соответственно. Получается, что величина выноса биогенных элементов промыслом снизилась более чем в пять раз.

Учитывая, что организации мелкомасштабного рыболовства и вопросам продовольственной безопасности в настоящее время уделяется большое внимание, и приняв во внимание полученные результаты исследований, свидетельствующие о стабильной видовой структуре рыбных сообществ озера Виштынецкого и относительном постоянстве экологического состояния водоема, а также того факта, что рациональное использование водных биоресурсов, которые являются возобновляемыми, обеспечивает одновременно как их стабильное существование, так и удовлетворение пищевых потребностей местного населения, могут быть рекомендованы следующие принципы рационального использования запасов рыб в озере Виштынецком: 1) запасы рыб озера Виштынецкого могут и дальше использоваться промыслом при смене статуса природного парка на национальный в объемах на уровне научно-обоснованных величин вылова для каждого вида рыбы. Это, помимо всего прочего, позволит снизить биогенную нагрузку на экосистему водоема; 2) ряпушка, как доминирующий компонент пелагического сообщества рыб, имеющая высокую пищевую ценность и высокую численность популяции, может являться объектом специализированного промысла, при этом прилов сопутствующих видов будет практически полностью отсутствовать. Помимо этого, повышение объемов добычи ряпушки скажется на увеличении темпов ее роста за счет большей обеспеченности пищей.

Литература

Алдушин А.В., Шибаев С.В. Гидроакустические исследования пелагического ихтиоценоза озера Виштынецкое Калининградской области // Биология внутренних вод. 2016. №4. С. 54-63.

Бубырь И.В. Пищевая ценность пресноводных рыб Беларуси // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук: научный журнал. 2015. №1, Ч. 1. С. 57-64.

Гудим А.И., Алдушин А.В., Новожилов О.А. Особенности вертикального распределения ряпушки Coregonus albula (L., 1958) озера Виштынецкого летом 2022 и 2023 гг // Комплексные исследования в рыбохозяйственной отрасли / Материалы IX Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Владивосток: Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный ун-т, 2024. С. 27-34.

Гущин А.В., Федоров В.Е. Экологические проблемы и рыболовство озера Виштынецкое // Рыбное хозяйство. 2007. №4. С. 83-87.

Постановление Правительства РФ от 01.04.2024 №412 «О создании национального парка «Виштынецкий».

Шибаев С.В., Соколов А.В. Рыболовство // Озеро Виштынецкое. Калининград: Изд-во «ИП Мишуткина», 2008. С. 90–99.

Aldushin A.V., Deogenova K.E. Long-term dynamics of the spatial distribution of European vendace (Coregonus albula L.) of lake Vishtynetskoye, Kaliningrad Region // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry. 2024. №3. P. 33-41.

PROSPECTS FOR FISHERY USE OF LAKE VISHTYNETSKOE IN THE CONTEXT OF CHANGE IN THE STATUS OF THE NATURE PARK FROM REGIONAL TO FEDERAL

O.A. Novozhilov, A.V. Aldushin, Y.K. Aldushina

The article considers the fishery use of Lake Vishtynetskoye over a long period and assesses the impact of fishing on the ecosystem of the reservoir. Its fairly stable state is shown by most parameters, including the structure of fish communities. The observed changes in the structure of catches are associated, first of all, with a change in the intensity of fishing and the shrinkage of one of the mass fish species of this reservoir - the European vendace. It is shown that rational use of fish stocks of Lake Vishtynetskoye will reduce the biogenic load on the reservoir and provide the local population with jobs and fresh fish products.

RESERVOIR - ARTIFICIAL LAKE AS A DISTURBING FACTOR IN CHANGING THE MICROCLIMATE OF COASTAL AREAS

I.Sh. Normatov[1], G.N. Saburova[1], N. Shermatov[1], A.O. Rahimzoda[2], M. Kh. Khakimjonzoda[3]

[1]Tajik National University

[2]Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Tajikistan

[3]National Academy of Science of Tajikistan

Central Asia's water resources are formed in the headwaters of the region's transboundary rivers. About 90% of this water is used for irrigation of agricultural land. This highlights the need to build reservoirs for water storage and use during the growing season. The construction

of reservoirs is first and foremost a disruption of the natural flow of a watercourse to which the components of the ecosystem have been adapted for many years. The aim is to ensure the smooth operation of economic and, in particular, agricultural facilities and to develop mechanisms for their adaptation to the climatic conditions created under the influence of reservoirs.

The creation of large hydroelectric power plants on rivers leads to major changes in their natural flow and hydrological regime. As a result of the regulating effect of the reservoir, the river flow in the lower reaches becomes more uniform throughout the year. The regulating influence of reservoirs affects significant stretches of the river downstream of the dams and extends to the estuary. Conventionally, it can be assumed that the length of the lower reaches is determined by the limit of the restoration of the natural hydrological regime (mainly under the influence of large tributaries) (Kerimkul, Madibekov, 2021).

Changes in climatic conditions caused by reservoirs contribute to the mitigation of large-scale warming and drought trends, and indirectly to the reduction of greenhouse gas emissions through renewable energy production (Klein Tank et al., 2002).

This paper presents the results of research on the impact of the Nurek reservoir on the microclimate of the coastal agricultural areas of Dangara (660 m a.s.l, 38°10' N, 69°32' E), Faizabad (1215 m a.s.l., N, 38°15' N, 69°32' E) and Javan (632 m a.s.l., 38°32' N, 69°05' E).

Figure 1 shows a map of the study areas in relation to the Nurek reservoir and its geographical location.

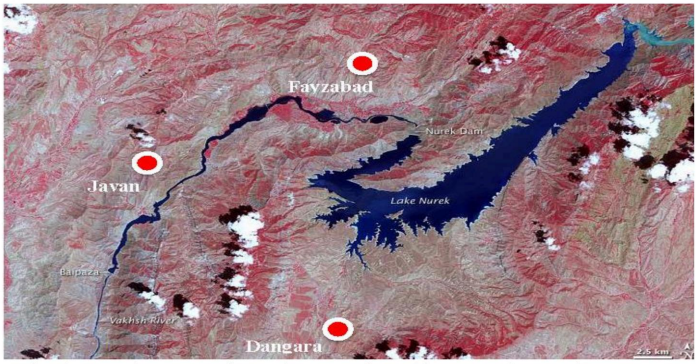


Fig. 1. Location map of Nurek reservoir and its coastal areas (Dangara, Yavan, Faizabad) (https://earthobservatory.nasa.gov/)

Dangara district

In order to determine the influence of the Nurek reservoir on the climatic characteristics, the temperature changes in Dangara district for the period 1950-2020 were considered for the periods before and after the operation of the reservoir. A characteristic feature of the temperature dynamics is that the trend of its change takes on a more pronounced growth character after 1980 (Fig.2 a, b). This can be seen by comparing the coefficients of determination for the two periods.

The temperature dynamics of the Dangara district for the period 1950-2020 is presented in Figure 3, as the ratio of the difference between the annual mean and the annual long-term to the annual long-term for the period under consideration. The increasing trend of the temperature dynamics in the Dangara area from 1950 to 2020 runs at a rate of 0.05 °C. The temperature dynamics of the Dangara area for the period under consideration is characterised by two

equations describing its changes for the periods 1950-1979 and 1980-2020. The temperature extreme, the transition from the 1950-1979 regimes to the 1980-2020 regimes, occurs, as can be seen from Figure 3, in 1980, the beginning of the Nurek reservoir operation.

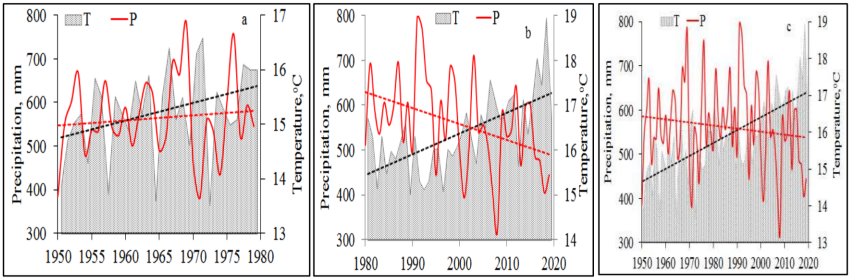


Fig. 2. Pattern of variation of mean annual temperature and precipitation in Dangara district for the periods: 1950-1980 (a), 1990-2020 (b) and 1950-2020 (c)

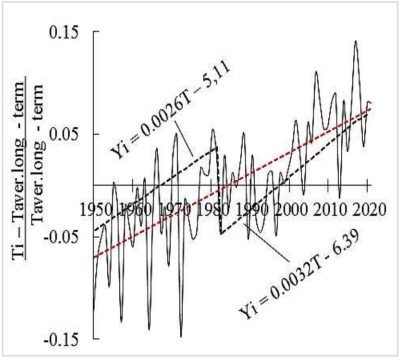


Fig. 3. Ratio of annual mean and annual long-term temperature difference to annual long-term temperature and temperature trend for Dangara district before and after reservoir construction

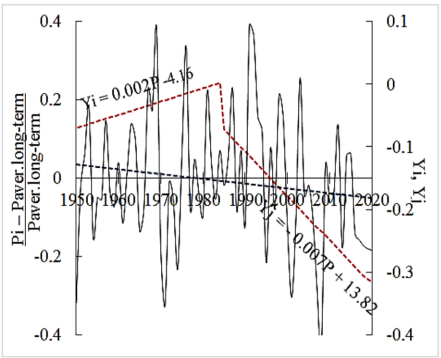


Fig. 4. Ratio of annual mean and annual long-term precipitation difference to annual long-term precipitation and precipitation trend for Dangara district before and after reservoir construction

the regime of the period 1981-2020, occurs in 1985, as can be seen in Figure 4. For the period under consideration, the dynamics of atmospheric precipitation in the Dangara district is characterised by a decreasing trend.

Yavan District

The elevation of the Yavan district is 678 m a. s. l., i.e. below the elevation of the Nurek reservoir (more than 800 m a.s.l). It is logical to assume that water vapor by molecular weight should sink downwards and thus provide Yavan district with sufficient precipitation. The dynamics of precipitation changes for the periods before and after the construction of the reservoir and for the whole period 1950-2020 is shown in Figure 6. As can be seen from Figure 6, precipitation in Yavan has maintained a weak decreasing trend throughout the observation period. It can be assumed that in the absence of the reservoir, the decreasing trend of precipitation would be accelerated.

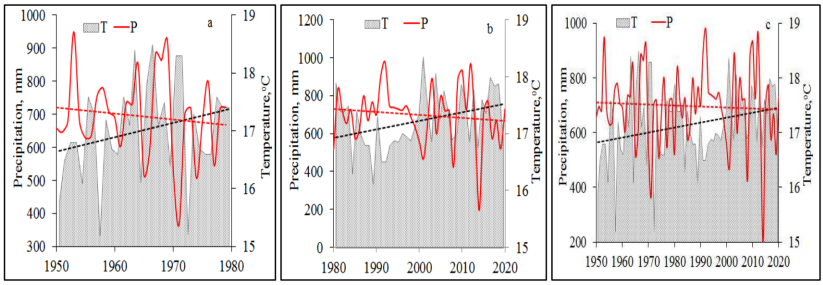


Fig.5. Pattern of variation of mean annual temperature and precipitation in Yavan district for the periods: 1950-1980 (a), 1990-2020 (b) and 1950-2020 (c)

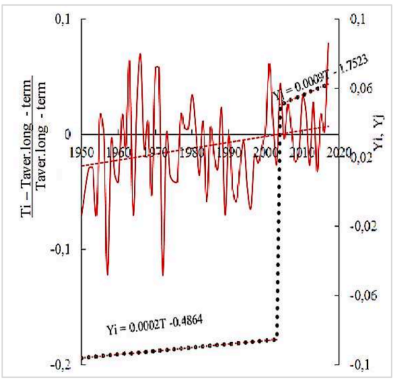


Fig. 6. Ratio of annual mean and annual long-term temperature difference to annual long-term temperature and temperature trend for Yavan district before and after reservoir construction

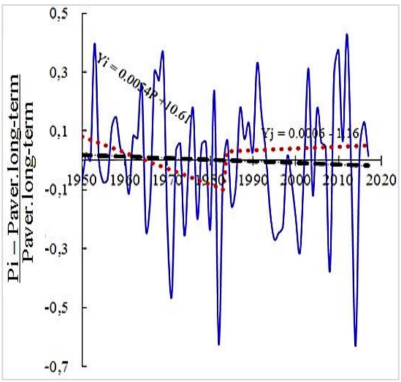


Fig.7. Ratio of difference between annual mean and annual long-term to annual long-term and trends of precipitation in Yavan before and after reservoir construction

Atmospheric precipitation in Yavan district has maintained a decreasing trend over the period 1950 - 2020. Fig. 7 shows that after 1983, there is a weakening of the decreasing pattern of precipitation change.

Mutual correlation of meteorological parameters of Dangara and Javan districts.

Figure 8 shows the correlations between temperature and precipitation in Dangara and Yavan districts.

The dynamics of temperature change in Yavan district in relation to the annual long-term is shown in Figure 6. The temperature dynamics in Yavan district from 1950 to 2020 has an increasing trend with the appearance of an extreme in 2004. According to our assumption, the accumulation of humid air masses caused by the Nurek reservoir becomes a kind of obstacle for the temperature increase in Yavan district.

Figure 8(a), which shows the correlation between the mean annual temperature values of Yavan and Dangara for the period 1950 -1980 (the period prior to the construction of the reservoir), shows their close relationship with a correlation coefficient of 0.93. Consequently, it can be expected that the occurrence of even small perturbations in the natural dynamics of

temperatures in the areas under consideration should be reflected in the correlation dependence of the meteorological characteristics studied. This is exactly the pattern that is evident in the correlation between the temperatures of Yavan and Dangara for the period 1981 - 2020. As can be seen in Fig.8 (b), the temperature correlation coefficient drops to 0.77. This graph means that the temperature regime in one of the areas considered has been subjected to an external perturbation. It is also important to assess the change in precipitation in areas adjacent to the reservoir in the presence of a suspected perturbation source.

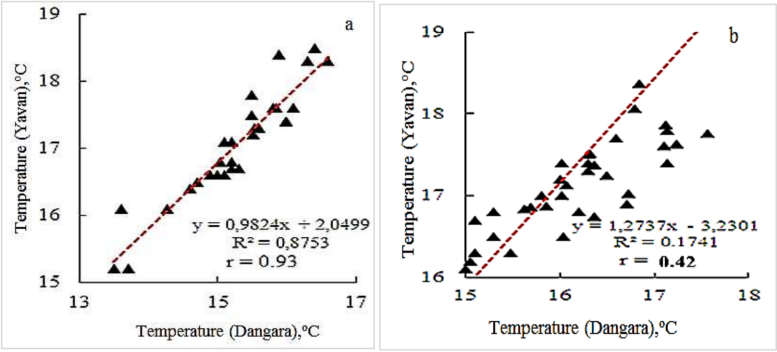


Fig.8. Correlation of mean annual long-term temperatures of Dangara and Yavan for the periods 1950-1979 (a) and 1980-2020 (b)

A comparison of the precipitation correlations shown in Fig. 9 shows that, as in the case of temperature, the precipitation of the Dangara and Javan areas is perturbed over the period 1981-2020, resulting in a decrease in the value of the precipitation correlation coefficient (Fig.9, b).

To explain the correlations between the temperature of Dangara and Javan districts for the period 1950 - 2020, we refer to Fig.10, which shows the values of mean annual temperatures in the study areas under consideration. Fig.10 shows that the mean annual temperature of Dangara for the period 1981 - 2020 has increased by 1.2°C compared to the period 1950 - 1979. For Yavan district, on the other hand, the temperature difference between the two periods is negligible, being only 0.2°C.

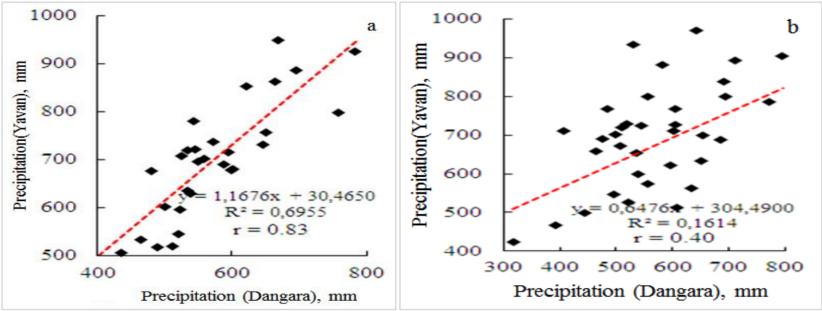


Fig. 9. Correlation of mean annual precipitation in Dangara and Yavan for the periods 1950 - 1979 (a) and 1980 - 2020 (b)

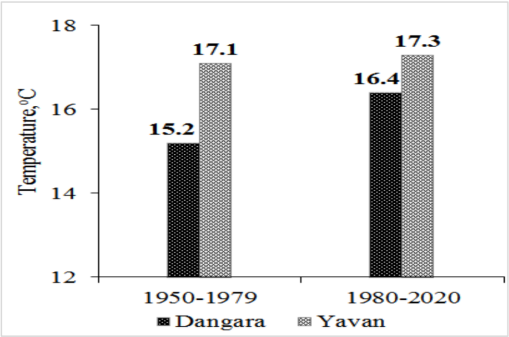


Fig.10. Annual long-term temperature of Dangara and Yavan districts for the periods 1950–1979 and 1980–2020

The decrease in the correlation coefficient of the temperature relationship between Dangara and Yavan districts is due to an increase in the temperature of Dangara district for the period 1980 - 2020. This can be considered as a factor of the influence of the Nurek reservoir on the climatic conditions of the considered districts.

References

Kerimkul A., Madibekov A. Influence of temperature regime on climate change of Kapshagai reservoir // Vestnik of KazNU. Geographical series. 2021. V.63 (4). P.36-44.

Klein Tank A.M.G., Wijngaard J.B., Können G.P., Böhm R., Demarée G., Gocheva A., Mileta M., Pashiardis S., Hejkrlik L., Kern-Hansen C. Daily Dataset of 20th-century Surface Air Temperature and Precipitation Series for the European Climate Assessment // Int. J. Climatol: J. R. Meteorol. Soc. 2002. V.22. P.1441-1453.

ВОДОХРАНИЛИЩЕ - ИСКУССТВЕННОЕ ОЗЕРО КАК ВОЗМУЩАЮЩИЙ ФАКТОР В ИЗМЕНЕНИИ МИКРОКЛИМАТА ПРИБРЕЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

И.Ш. Норматов, Г.Н. Сабурова, Н. Шерматов, А.О. Рахимзода, М.Х. Хакимджонзода

Водные ресурсы Центральной Азии формируются в верховьях трансграничных рек региона. Около 90 % этой воды используется для орошения сельскохозяйственных угодий. В связи с этим возникает необходимость строительства водохранилищ для хранения и использования воды в вегетационный период. Строительство водохранилищ - это прежде всего нарушение естественного течения водотока, к которому компоненты экосистемы были адаптированы в течение многих лет. Цель - обеспечить бесперебойную работу хозяйственных и, в частности, сельскохозяйственных объектов и разработать механизмы их адаптации к климатическим условиям, создаваемым под воздействием водохранилищ.

МАЛОЕ БОЛОТО КОСИЛОВО В КРАЕВОЙ ЗОНЕ ВАЛДАЙСКОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ: ЛАНДШАФТНЫЕ, КЛИМАТИЧЕСКИЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ

М.Б. Носова[1], Н.Г. Лавренов[1], Д.А. Куприянов[2], Н.Г. Мазей[3], Е.А. Зеленин[4]
[1]Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН
[2]Институт географии РАН
[3]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[4] Геологический институт РАН

Получены данные о возможных факторах формирования залежи малого болота в условиях флювиогляциального ландшафта в течение 10000 лет. С использованием комплекса методов показано, что на скорость накопления отложений и их состав влияли климат и растительность, положение болота в рельефе, свойства подстилающих отложений, пожарная активность. В начале голоцена пожары не формировали выраженных перерывов осадконакопления. До 4200 кал. л.н. залежь складывалась естественным образом, позже пожары, по-видимому, носят антропогенный характер и приводят к перерывам осадконакопления. Увлажнение нестабильно: рельеф и материнская порода способствуют обсыханию залежи и ее неоднократному выгоранию, формируется сосново-пушицевое болото, однако после 3000 кал. л.н. происходит резкое обводнение, а 2000 кал. л.н. олиготрофизация.

Территория Русской равнины в пределах зоны влияния Валдайского оледенения, имеет значительную ландшафтную дифференциацию в зависимости от положения относительно границы максимального распространения ледника.

В рамках проекта по изучению истории растительности и климата в краевой зоне Валдайского оледенения нами исследована торфяная залежь малого (0,5 га) болота Косилово (Торопецкий район Тверской области).

Болото расположено на «плече» борта озерной долины оз. Ручейского, по-видимому, являющейся ложбиной ледникового происхождения. Площадь залежи около 0,5 га, из болота выходит временный водоток в направлении озера, занятый черноольховым болотом. Берега болота имеют «бровки» высотой от 0–70 см и более, что заставляет предположить его трансформацию в хозяйственных целях. В схеме болотного районирования эта территория относится к Восточно-Балтийской провинции зоны грядово-мочажинных верховых болот (Боч, Мазинг, 1979).

Современная растительность изученной территории представляет собой, в основном, вторичные леса из разных сочетаний березы, ели, сосны, ольхи, осины с возрастающим участием широколиственных пород, существующие на месте вырубок и сельскохозяйственных угодий. Разнообразие почвенных условий обусловливает мозаичность растительности. Археологические исследования показывают, что озерно-ледниковые ландшафты Двинско-Ловатского междуречья были заселены начиная с мезолита и неолита (Микляев, Долуханов, 1986; Еремеев, Дзюба, 2010), являлись важным элементом Пути из варяг в греки в Средневековье (Еремеев, Дзюба, 2010), и были максимально освоены и заселены в 17–20 вв. В 100 м от болота Косилово расположено городище Раннего железного века (РЖВ) Косилово-1, в хозяйственную зону которого, очевидно, входило и болото. Это позволяет предполагать антропогенное воздействие на залежь, начиная с РЖВ, как в виде непреднамеренных палов, затрагивающих и поверхность болота, так и в виде преднамеренного осушения путем дренирования части залежи в направлении временного водотока (что в свою очередь, могло способствовать пожарам).

Отложения были исследованы с применением комплекса методов: радиоуглеродного (6 образцов), палинологического, антракологического анализов и анализа макроостатков (образцы отобраны с интервалом 3–5 см). Методы и основные результаты, за исключением антракологического анализа, описаны в опубликованной статье (Nosova et al., 2024). Биомизация была проведена по модифицированной и проверенной для региона методике (Tarasov et al., 2022).

Антракологический анализ 1 $см^3$ отложений проводили стандартным методом (Mooney and Tinner, 2011), при моделировании пожарной истории были использованы программные продукты “tapas” (Finsinger, Bonnici, 2022) и CharAnalysis в модифицированной версии (Higuera, 2009). Для оценки фонового CHAR применялась скользящая медианная сглаживающая кривая с окном сглаживания равным интервалу 1500 лет.

При отборе кернов были визуально определены четыре угольных горизонта разной мощности: 41–47 см, 69–77 см, 100– см и в придонном слое залежи (92 см). Поэтому при построении возрастной модели была учтена возможность «перерывов осадконакопления», а именно выгорания отдельных (неопределенных по мощности) слоев торфа. Модель была рассчитана с использованием программного обеспечения для вероятностного возрастного моделирования Bacon (Blaauw, Christen, 2011).

Анализ хронологической модели и графика скоростей аккумуляции (рис. 1) показали, что в течение голоцена неоднократно изменялась скорость осадконакопления. В раннем голоцене она составляла 0,4 мм/год, в период 8000–6000 кал. л.н. снизилась до 0,2 мм в год, далее вновь возросла с тенденцией к снижению; в период 4200–2500 кал. л.н. она составляла менее 0,1 мм/год, 2500–1500 кал.л.н. – от 0,1 до 0,2 мм/год, а затем около 600 л.н. резко возрастает до максимума – 1мм/год.

Результаты биомизации, сопоставленные с данными о пожарной динамике в течение голоцена (рис. 2), показывают, что в раннем голоцене, 10150–8200 кал. л.н., происходит 5 локальных пожарных эпизодов, а межпожарные интервалы составляют 240–640 лет. При этом вокруг преобладают умеренно-холодные лесные биомы, а локальная растительность болота показывает, что оно было сильно увлажненным и облесенным. Наличие углей в подошве залежи характерно для болот Центра Европейской части России (ЕЧР)– инициация болотообразования часто приурочена к теплым периодам, как и пожарная активность (Novenko et al., 2020).

В течение климатического оптимума (8200–5000 кал. л.н.) отмечено всего 5 локальных пожарных эпизодов, 4 из которых приурочены к середине периода (7500–6000 кал. л.н.). Это время максимального участия широколиственных пород в сложении биомов – на территории преобладают умеренные смешанные леса, которые препятствуют пожарам, но климат наиболее теплый.

Наибольший межпожарный интервал наблюдался в период после окончания климатического оптимума, когда лесной покров территории еще был сложен в значительной мере широколиственными породами, хотя таежный биом постепенно приходит на смену умеренным смешанным лесам, а климат стал более прохладным. Время 4200 кал. л.н., отмечено единственным локальным пожарным эпизодом суббореального времени. Очевидно, в это время ни климат, ни преобладающая растительность, ни возможное антропогенное воздействие не способствовали локальным пожарам.

После 1900 кал. л.н. снижается роль умеренных смешанных лесов и межпожарный интервал резко сокращается, что вероятно является результатом поэтапно возрастающей сельскохозяйственной активности в РЖВ, Средневековье и Новое время. В это время значения таежного биома, умеренных смешанных лесов и умеренно-

холодных хвойных лесов сближаются, а около 500 л.н. увеличивается значение открытых биомов в результате аграрного освоения водоразделов.

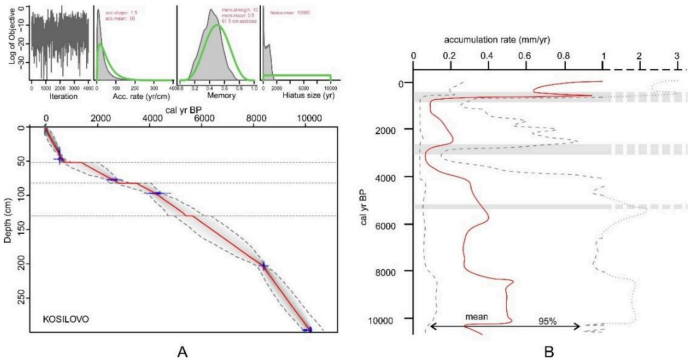


Рис. 1. Возрастная модель и график скорости осадконакопления, выполненные на основе данных радиоуглеродного датирования* (Nosova et al., 2024)

* Образцы датированы в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН (IGAN), Центре прикладных изотопных исследований (CAIS) Университета Джорджии, США, а также Институте геохимии Гуанчжоу, Академии наук КНР (GIGCAS)

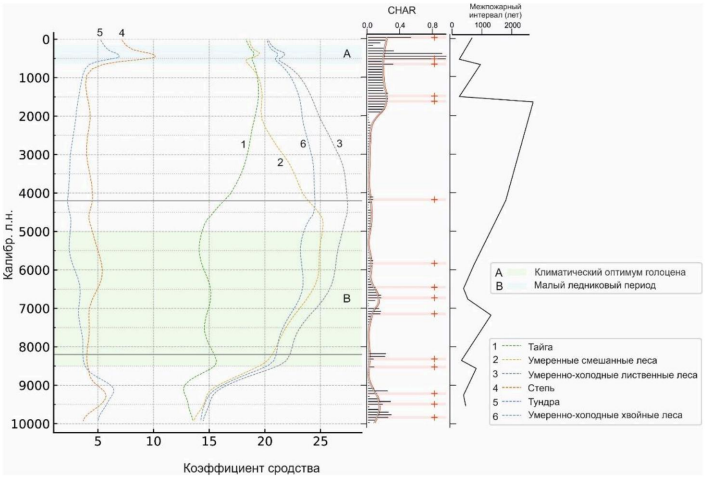


Рис. 2. Результаты биомизации и модель пожарной динамики: CHAR (charcoal accumulation rates) – скорость аккумуляции макрочастиц угля (частиц/см^2*год). Черной линией – интерполированные значения; серая линия – фоновые значения; красная линия – пороговая скорость аккумуляции для определения пиковых значений; красные плюсы – локальные пожарные эпизоды).

Угольная прослойка, которой соответствует дата IGAN 8777 97-99 см, 4277 кал. л.н., основанию которой соответствует хиатус, синхронна наиболее ранним (и повторяющимся!) находкам пыльцы культурных злаков в зоне хвойно-

широколиственных лесов (Nosova et al., 2025 в печати). Угольная прослойка 69–77 см имеет в основании дату IGAN 8451, 75–80 см, 2600 кал. л.н., а прослойка 41–47 см – в своем составе две даты GZ 10832, 41–43 см, 530 кал л.н. и IGAN 8450 кал. л.н., 45–50 см, 550 кал. л.н. То есть локальные пожары, затрагивающие залежь, вероятно, приходятся на периоды 4200–3000 кал. л.н. (бронзовый век) и 2600–500 кал. л.н. – РЖВ и Средневековье. Эти даты соответствуют выявленным на других объектах (Nosova et al., 2019; Nosova et al., 2025, в печати) периодам антропогенной трансформации ландшафтов, соответствующим появлению на территории культур РЖВ (2800-1500 кал. л.н.) и с ними – подсечно-огневого земледелия, и наиболее интенсивной распашке в Новое время (500–100 кал. л.н.). Слои, соответствующие Древнерусскому периоду с характерным увеличением доли аграрных ландшафтов, наблюдаемым в Центре и на Северо-Западе ЕЧР 1400–1000 кал. л.н. (Tarasov et al., 2019, 2022; Nosova et al., 2025 в печати) по-видимому, сгорели полностью или частично в локальных пожарах 500 кал. л.н.

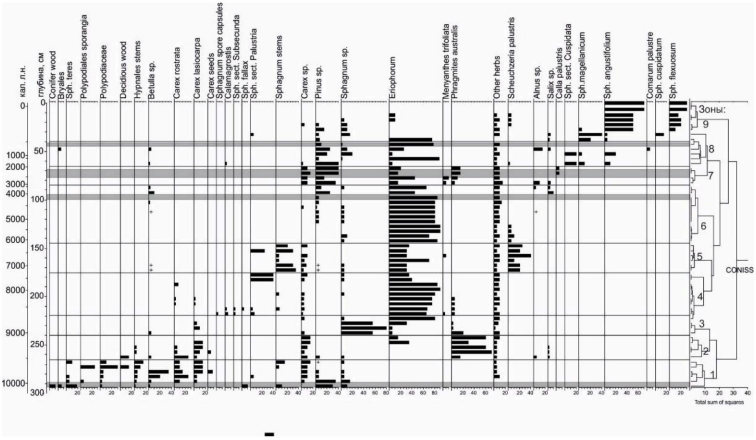


Рис. 3. Диаграмма содержания макроостатков в торфяных отложениях болота Косилово. Серыми полигонами обозначены угольные прослои, отмеченные визуально при отборе кернов

По результатам анализа макроостатков была построена диаграмма (рис. 3), разделенная на 9 зон с использованием кластеризации в программе CONISS (Grimm, 1987). На начальной стадии развития болота (зона 1), около 10000 кал. л.н. на «плече» озерной долины в понижении, существовало осоково-зеленомошное сосново-березовое эвтрофное болото, которое около 9500 кал. л.н. обводняется становясь тростниково-осоковой топью (зона 2), в зоне 3 болото теряет постепенно древесную растительность и превращается в тростниково-сфагновую топь. Следующий длительный период (зоны 4, 5 и 6, 8600-4000 кал. л.н.) вначале характеризуется преобладанием остатков пушицы и отсутствием остатков древесины. По-видимому, очень изменчива обводненность, что указывают изменения в составе осок, появление *Scheuchzeria* (зона 5) и резкие колебания содержания спор сфагновых мхов в палинологической диаграмме (Nosova et al., 2024), а также возможны и локальные пожары (3 локальных пожарных эпизода отмечены около 7200-6500 кал. л.н.). Около 5000 кал. л.н. измененяются условия – вновь появляются береза, ольха, ива и сосна, происходит эвтрофикация. Следующая зона (7) выделена в период формирования сплавины по возрастанию участия осок, *Menyanthes*, *Calla* и

Phragmites, а также максимальному участию остатков сосны, что говорит о высоком уровне воды, возможно, в результате выгорания верхних горизонтов торфяника в начале РЖВ. Выше (зона 8, 2000-500 кал. л.н.) появляются сфагновые мхи и происходит олиготрофизация. 500 кал. л.н. часть залежи вновь сгорает, возможно, в неоднократных пожарах, вновь происходит обводнение, залежь после этого растет быстро и сложена, в основном, сфагновыми мхами – формируется сходный с современным фитоценоз (олигомезотрофное пушицево-сфагновое сосново-березовое болото).

Таким образом, результаты биомизации и анализа макроуглей позволяют выделить 4 периода, каждый из которых характеризуется специфическим соотношением биомов и свойственной этому состоянию частотой пожаров. Локальные пожары в раннем голоцене не оказывали определяющего влияния на скорость торфонакопления и состав отложений. Начиная с 4200 кал. л.н., и особенно 1900 кал. л.н., пожары затрагивали верхнюю часть залежи и влияли на состав локальной растительности болота и свойства залежи: трофность, обводненность, положение в рельефе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-24-00201).

Литература

Боч М.С., Мазинг В. В. Экосистемы болот СССР. Л.,1979. 188 с.

Микляев А.М., Долуханов П.М. Из истории развития хозяйства древнего населения на правобережье Западной Двины и в верховьях Ловати (X тыс. до н. э.-начало II тыс. н. э.) // АСГЭ. 1986. №27. С. 3.

Еремеев И.И., Дзюба О.Ф. Очерки исторической географии лесной части Пути из варяг в греки: археологические и палеогеографические исследования между Западной Двиной и озером Ильмень. СПб: Нестор-История, 2010. 667 с.

Кац Н.Я., Кац С.В., Скобеева Е.И. Атлас растительных остатков в торфах. М.: Недра, 1977. 376 с.

Blaauw M., Christen J.A. Flexible paleoclimate age depth models using an autoregressive gamma process // Bayesian Anal. 2011. V. 6. №3. P. 457–474.

Finsinger W., Bonnici I. tapas: an R package to perform trend and peaks analysis. Zenodo. 2022. Available online: https://hal.inria.fr/hal-03607000/ (accessed on 27 August 2024)

Grimm E.C. CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares //Computers & geosciences. 1987. V. 13. №1. P. 13–35.

Mooney S., Tinner W. The analysis of charcoal in peat and organic sediments. Mires and Peat. 2011. №7. P. 1–18.

Nosova M.B., Mazei N.G., Zakharov A.L., Zazovskaya E.P. Kosilovo mire (Toropets district, Tver region, north-western Russia) // Grana. 2024. V. 63. №5-6. P. 398–401.

Novenko E.Y., Mazei N.G., Kupriyanov D.A., Kusilman M.V., Olchev A.V. Peatland initiation in Central European Russia during the Holocene: Effect of climate conditions and fires // The Holocene. 2021. V. 31, №4. C. 545-555.

Tarasov P.E., Savelieva L.A., Kobe F., Korotkevich B.S., Long T., Kostromina N.A., Leipe C. Lateglacial and Holocene changes in vegetation and human subsistence around Lake Zhizhitskoye, East European midlatitudes, derived from radiocarbon-dated pollen and archaeological records // Quaternary International. 2022. V. 623. P. 184–197.

SMALL MIRE KOSILOVO IN THE MARGINAL ZONE OF VALDAI GLACIATION: LANSCAPE, CLIMATIC AND ANTHROPOGENIC FACTORS OF DEVELOPMENT

Nosova M.B., Lavrenov N.G., Kupriyanov D.A., Mazei N.G., Zelenin E.A.

Data on possible factors of formation of a small swamp deposit in conditions of a fluvioglacial landscape over 10,000 years were obtained. Using a set of methods, it was shown that the rate of accumulation of deposits and their composition were influenced by climate and vegetation, the position of the swamp in the relief, the properties of the underlying deposits, and fire activity. At the beginning of the Holocene, fires did not form pronounced breaks in sedimentation. Up to 4200 cal. BP, the deposit was formed naturally; later fires were apparently anthropogenic in nature and led to breaks in sedimentation. Moisture is unstable: the relief and parent rock contribute to the drying out of the deposit and its repeated burning out, a pine-cotton grass swamp is formed, however, after 3000 cal. years ago, a sharp flooding occurs, and 2000 cal. years ago, oligotrophization.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СТАТУС ВОДОЕМА: МЕТОДИКА, ОЦЕНКА, ПЕРСПЕКТИВЫ

Н.А. Панютин, В.В. Дмитриев, М.М. Щетинина
Санкт-Петербургский государственный университет

Рассмотрен авторский опыт систематики сложной системы, позволяющий сравнивать состояние системы и ее подсистем в пространстве и времени; выявлять эффекты взаимосвязи и взаимодействия неаддитивные по отношению к внутрисистемным эффектам. В работе раскрывается авторский опыт в создании моделей-классификаций интегральной оценки экологического статуса водоемов. Интегральная оценка выполнялась на основе авторского понимания терминов экологический (геоэкологический) статус, экологическая (геоэкологическая) оценка. Предусмотрена возможность оценки двух составляющих: 1-диагностика состояния (экологическая регламентация) системы и 2-экологическое (системное) нормирование воздействия на нее. Приведены этапы интегральной оценки, акцентируется возможность интегральной оценки с учетом нечисловой информации о компонентном составе и приоритетах оценивания, возможность учета точности полученных результатов. Предложена первая типизация водоемов по результатам интегральной оценки их экологического статуса.

Актуальность построения и апробации моделей интегральной оценки экологического статуса природных и антропогенно-трансформированных систем определяется необходимостью развития представлений о системных свойствах и функциях природных объектов на основе различного сочетания продукционных возможностей биоты, изменения химического и биологического состава и токсического загрязнения среды, обусловливающих ее качество с позиций антропо- или биоцентризма; способности подсистем и системы в целом сохранять отмеченные свойства и параметры режимов или изменять их при изменении естественных и антропогенных условий и воздействий на систему. Базовым акцентом является возможность выделения антропогенной составляющей этих изменений на фоне естественного развития природных процессов, подсистем и системы в целом. Одновременно исследователь ставит перед собой цель – получение интегральной ответной реакции эко- или геосистемы в целом на совокупное (естественное и

антропогенное) воздействие на систему и нахождение ответа на вопрос, изменит ли система в целом свой статус (класс), в котором она находилась до воздействия после планируемого или случайного воздействия на систему. Развитие этого подхода позволит управлять природными системами в целом и планировать бескризисное, сбалансированное (устойчивое) развитие системы в близкой или отдаленной перспективе. В других случаях целью планирования может быть создание экосистемы, обладающей определенными, *a priori* важными для общества (региона) особенностями.

Главной целью работы является создание различных моделей-классификаций интегральной оценки экологического статуса (ЭС) и экологического благополучия (ЭБ) водоемов, которые основываются на данных натурных наблюдений и/или имитационного моделирования водных экосистем и реализуются на основе методов интегрального оценивания (Панютин, Дмитриев, 2024).

Под оценкой экологического статуса авторы понимают одновременную многокритериальную и многоуровневую интегральную оценку состояния системы водного объекта (и его подсистем), которая включает в себя следующие составляющие (субиндексы):

– ИПТ – субиндекс, отражающий способность системы создавать первичную продукцию (в наших публикациях для этого часто использовался термин «трофность»). В интегральной оценке трофности рассмотрены три субиндекса: гидрофизические признаки трофности, гидрохимические и гидробиологические критерии. При оценке экологического благополучия могут быть включены дополнительно: видовое разнообразие системы, наличие или отсутствие ценных биоресурсов и т.д.;

– ИПК – субиндекс, характеризующий химический и биологический состав и токсическое загрязнение системы. При оценке экологического благополучия водоема этот субиндекс, в свою очередь, дополняется несколькими субиндексами, характеризующими состав донных отложений и загрязнение береговой зоны, скорость загрязнения и скорость самоочищения водоема, наличие или отсутствие ацидификации, жесткость воды и др.;

– ИПУ – субиндекс, учитывающий потенциальную устойчивость водоема, т.е. устойчивость к изменению морфометрии (ИП1), климата (ИП2) и гидрологических параметров ИП3 (Панютин, Дмитриев, 2024). Во всех случаях нами учитывается два типа устойчивости (1 – адаптационная; 2 – регенерационная). При оценке экологического благополучия водоемов этот субиндекс, в свою очередь, дополняется субиндексами потенциальной устойчивости прилегающих ландшафтов (стокоформирующих комплексов).

Предполагается, что при оценке устойчивости первого типа (ИПУа) для субиндекса ИП1а высокая устойчивость в холодный период года обусловлена «стагнацией» процессов зимой (система «спит»). Физические процессы и процессы массообмена в системе проходят с низкими скоростями. Система слабо самоочищается. Бóльшей площади водного зеркала водоема соответствует бóльшая устойчивость водоема. Бóльшему объему водной массы соответствует бóльшая устойчивость водоема. Бóльшей максимальной глубине соответствует бóльшая устойчивость водоема. Бóльшей площади водосбора соответствует бóльшая устойчивость водоема. Принимается, что эта группа параметров не будет изменяться при переходе от холодного периода года к теплому (Овсепян, Панютин, Дмитриев, 2024).

Для субиндекса ИП2а для М1а - чем больше дней со штилями, тем выше адаптационная устойчивость. Меньшей средней температуре воды в холодный период года соответствует бóльшая устойчивость водоема. Большей продолжительности ледостава соответствует бóльшая устойчивость водоема. Более холодному периоду года соответствует бóльшая устойчивость водоема. Сезоны года: зима (М1а).

Для субиндекса ИП3а учитываются: сезонная стратификация, характер регулирования, вертикальное перемешивание. Бóльшей внутригодовой амплитуде колебания уровня соответствует меньшая устойчивость водоема. Бóльшему коэффициенту проточности соответствует меньшая устойчивость водоема. Бóльшему коэффициенту водообмена соответствует меньшая устойчивость водоема. Бóльшей скорости течения соответствует меньшая устойчивость водоема (Овсепян, Панютин, Дмитриев, 2024).

При оценке регенерационной устойчивости ИПУр для ИП1р высокая устойчивость в теплый период года обусловлена повышенными скоростями самоочищения (повышение температуры в отсутствии антропогенного воздействия увеличивает «естественное» самоочищение). Бóльшей площади водного зеркала водоема соответствует бóльшая устойчивость водоема. Бóльшему объему водной массы соответствует бóльшая устойчивость водоема. Бóльшей максимальной глубине соответствует бóльшая устойчивость водоема. Бóльшей площади водосбора соответствует бóльшая устойчивость водоема. Эта группа параметров не изменяется при переходе от холодного периода года к теплому. Однако изменяется шкала влияния температуры воды на устойчивость по сравнению с М1а. Бóльшей средней температуре воды в летний период соответствует бóльшая устойчивость водоема (бóльшая регенерация и самоочищение). Более теплому сезону года соответствует бóльшая устойчивость водоема. Сезоны года: лето-осень (М1р).

Для ИП2р для водоема выбирается другая шкала влияния ветрового режима, для М1р - чем больше дней с сильными ветрами, тем выше регенерационная устойчивость.

Для ИП3р наличию сезонной стратификации соответствует большая устойчивость водоема. Учитываются: характер регулирования, вертикальное перемешивание, большей внутригодовой амплитуде колебания уровня соответствует большая устойчивость водоема. Бóльшему коэффициенту проточности соответствует большая устойчивость водоема. Бóльшему коэффициенту водообмена соответствует большая устойчивость водоема. Бóльшей скорости течения соответствует большая регенерационная устойчивость водоема (Овсепян, Панютин, Дмитриев, 2024). На заключительном этапе, при расчете ИПУ выполняется сочетание ИПУа и ИПУр с обоснованием приоритетов в свертке показателей. Таким образом заложена возможность учитывать устойчивость систем с разной проточностью: от замкнутого водоема, проточного водоема, до транзитной речной системы.

Статус объекта предполагает его положение в соответствии с выполняемыми функциями, имеющимися параметрами или характеристиками в иерархической структуре объектов, что предопределяет неоднородность этой структуры. Вместе с тем, понятие статус имеет юридическое закрепление, а экологический статус системы «водоем-водосбор» включает совокупность установленных законодателями прав и обязанностей граждан перед государством и иными гражданами, определяющих их поведение при взаимодействии с водными объектами. Юридически всю примыкающую к водоему или водотоку землю нельзя включить в его состав, тем более что и скопление воды в водном объекте может быть временным или подвергаться сезонным, периодическим изменениям. Однако использование воды, земли, иных природных ресурсов целесообразно планировать и организовывать согласованно, не нанося ущерба природной среде и учитывая право людей на отдых на водных объектах.

Схожесть процессов и явлений, протекающих в гидросфере, во взаимосвязях и взаимодействии с атмосферой и биосферой, позволяет в качестве экологической системы различать отдельные водные объекты – природные или искусственные водоемы, водотоки, иные объекты постоянного или временного сосредоточения вод, в которых имеются характерные формы и признаки водного режима, то есть происходит

регулярное изменение во времени уровней, расхода и объема воды (Водный кодекс РФ, 2006).

Для территории стран Европейского союза применяется Рамочная директива по водным ресурсам, принятая в 2000 г (Directive …, 2000). Ее цель – достижение «хорошего» экологического статуса для водоемов к 2027 г. Она требует, чтобы экологическое состояние водоемов классифицировалось в соответствии со следующими критериями: 1 – биологическими элементами (фитопланктон, бентосные беспозвоночные, ихтиофауна, макрофиты и фитобентос); 2 – химическими и физико-химическими элементами (например, питательные вещества, кислород, прозрачность, соленость, температура и специфические загрязняющие вещества); 3 – геоморфологическими элементами. Водоемы классифицируются по пяти категориям статуса: 1 – высокий (отсутствие или незначительное антропогенное воздействие); 2 – хороший (незначительное антропогенное воздействие), это представляет собой требуемую минимальную цель для управления водными ресурсами; 3 – умеренный; 4 – плохой; 5 – очень плохой (WFD; EC, 2000). По мнению ряда европейских ученых в директиве остаются пробелы в отношении критериев трофического статуса, которая ввиду развития эвтрофикации водоемов из-за интенсивного использования сельскохозяйственных земель является актуальной задачей (S. Poikane et al., 2019).

Методы оценки составляющих ЭС в наши дни не соответствуют сформулированной в статье цели исследования. В ходе создания моделей многие авторы используют индикаторный (индикативный) подход, в котором все исследуемые критерии, имеющие натуральные оценочные шкалы, переводят в баллы по правилам, которые определяют сами авторы метода. После этого баллы суммируют и высчитывают итоговый результат с учетом или без учета приоритетов в свертке показателей. Полученный результат определяется нами, как косвенная оценка устойчивости (Панютин, Дмитриев, 2024). Сравнительно часто используется метод Паттерн (PATTERN - Planning Assistance Through Technical Evaluation from Relevance Number - помощь планированию посредством относительных показателей технической оценки) - первая методика системного анализа 1964 г., в которой были определены порядок, методы формирования и оценки приоритетов элементов, структур, целей (названных в методике «деревом целей») (Сивохип, 2024). Метод позволяет выполнять рейтингование объектов, однонаправленно изменяющихся с оцениваемым свойством.

Методика, этапы и оценочные результаты приведены в наших публикациях последних лет (Дмитриев и др., 2024). В данной работе отметим, что на основе интегральной оценки, нами рассчитаны интегральные показатели экологического статуса для водоемов, различающихся по степени трофности: 1-олиготрофные, 2-мезотрофные 1, 3-мезотрофные 2, 4-эвтрофные, 5-гиперэвтрофные; качества воды: 1-очень чистые, 2-чистые, 3-умеренно-загрязненные, 4-загрязненные, 5-грязные; потенциальной устойчивости водоемов: 1-очень низкая; 2-низкая, 3-средняя, 4-высокая; 5-очень высокая. Во всех случаях речь идет о 5 классах оцениваемых субиндексов и интегральном показателе последнего уровня свертки. Рассчитаны шкалы интегральных показателей всех уровней свертки. Выполнено построение ИП для сочетания всех 5 классов трофности, 5 классов качества, 5 классов устойчивости. Получены граничные значения классов для 125 комбинаций в пространстве признаков «трофность-качество-устойчивость» при равновесомом сочетании признаков на всех уровнях свертки показателей. Проведены эксперименты для выявления точности полученных результатов в зависимости от выбора приоритетов при задании весовых множителей при расчетах ИП. Выявлено, что максимальный разброс результатов интегральной оценки ЭС отмечен при равновесомом задании приоритетов оценивания.

Результатами исследования стало применение моделей на водоемах двух субъектов Российской Федерации: г.Санкт-Петербург и Ленинградская область. Это позволило определить значения интегральных показателей и их динамику, степень трансформации, благополучия/неблагополучия на различных временных интервалах.

Применение имитационного моделирования и построения композитных индексов показало хорошие результаты в оценке экологического статуса на нескольких водных объектах. Применение такого подхода в геоэкологии помогает в том числе прогнозам неблагоприятных изменений в водной среде в связи с эволюционными изменениями, происходящими по естественным причинам, антропогенным воздействием и опасными природными явлениями.

Литература

Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 08.08.2024).

Дмитриев В.В., Третьяков В.Ю., Зырянова Д.С., Овсепян А.А., Почепко С.Ю., Немчинова А.В., Каспин М.О. Оценка экологического статуса водоемов на основе построения композитных индексов: методика, результаты, перспективы // Гидрометеорология и экология. 2024. №75. С. 293-309.

Панютин Н.А., Дмитриев В.В. Интегральная оценка устойчивости системы «водоем+водосбор» // Геоэкология и рациональное недропользование: от науки к практике / Сборник материалов IV Всероссийской научной конференции молодых ученых. 2024. С. 27–33.

Панютин Н.А., Дмитриев В.В. Моделирование экологического статуса водных объектов // Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии: материалы VII Междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию каф. геогр. экологии Белорус. гос. ун-та. Минск, 2024. С. 155–160.

Сивохип Ж.Т. Географо-гидрологическое обоснование комплексного использования водных ресурсов трансграничных рек степной зоны (на примере бассейна реки Урал): Дисс. … докт. геогр. наук. Оренбург, 2024. 308 с.

Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23rd October 2000 Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy. Off. J. Eur. Communities L327/1 (European Commission, Brussels).

Poikane S., Phillips G., Birk S., Free G/, Kelly M.G., Willby N.J. Deriving nutrient criteria to support ‘good’ ecological status in European lakes: An empirically based approach to linking ecology and management // Science of the Total Environment. 2019. 650. P. 2074 – 2084.

Sedova S.A., Dmitriev V.V. Development of a methodology for the integrated assessment of the ecological status of water bodies on the example of small lakes in the northwestern Ladoga // European Journal of Natural History. 2020. №1. P. 37-44

ECOLOGICAL STATUS OF THE RESERVOIR: METHODOLOGY, ASSESSMENT, PROSPECTS

N.A. Panuitin, V.V. Dmitriev, M.M. Shchetinina

The author's experience in the systematics of a complex system is considered, allowing for the comparison of the state of the system and its subsystems in space and time; identifying effects of interrelation and interaction that are non-additive in relation to intra-system effects. The work reveals the author's experience in creating classification models for the integral assessment of the ecological status of water bodies. The integral assessment was carried out based on the author's understanding of the terms ecological (geoecological) status and ecological

(geoecological) assessment. The possibility of assessing two components is provided: 1 - diagnosis of the state (ecological regulation) of the system and 2 - ecological (systemic) normalization of the impact on it. The stages of integral assessment are presented, emphasizing the possibility of integral assessment considering non-numerical information about the component composition and evaluation priorities, as well as the possibility of accounting for the accuracy of the obtained results. The first typology of water bodies based on the results of the integral assessment of their ecological status is proposed.

ВЛИЯНИЕ ПЕПЛОПАДОВ НА РАЗВИТИЕ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ В СРЕДНЕМ И ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ НА ПРИМЕРЕ МАЛОГО БОЛОТА КУМРОЧ (СЕВЕРО-ВОСТОЧНАЯ КАМЧАТКА)

В.Е. Пименов[1], М.М. Певзнер[2], Н.Г. Мазей[1], А.Н. Цыганов[1], Ю.А. Мазей[1], Е.Г. Ершова[1]

[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[2]Геологический институт РАН

В работе проведена реконструкция динамики растительности болота Кумроч (северо-восточная Камчатка) в позднем голоцене, а также определена связь между извержениями (выпадением пепла) и динамикой болотного фитоценоза. С использованием ботанического анализа торфа, радиоуглеродного датирования и исследования тефростратиграфии торфяной залежи была выполнена комплексная палеоэкологическая реконструкция, временное разрешение которой не превышало 100 лет. Результаты исследования показали, что изменения в составе спектров ботанического состава торфа, в значительной степени, были связаны с изменениями локальной влажности. Влияние пеплопадов оказалось менее существенным, преимущественно локальным, не оказывающим значительного воздействия на смену доминантов и скорость вертикального прироста торфа.

Частые извержения вулканов и мощные пеплопады могут оказывать существенное воздействие на болотные экосистемы, вызывая значительные изменения в их составе и функции. Имеющиеся работы свидетельствую, что выпадение слоев пепла на вулканически активных территориях может существенно изменять структуру болотных фитоценозов (Hughes et al., 2017; Fujiki et al., 2019). Кроме того, даже более тонкие прослои дистальной тефры оказывают влияние на динамику болот и состав сообществ болотных микроорганизмов (Payne, Blackford, 2008).

Полуостров Камчатка, характеризующийся относительно слабым антропогенным воздействием, представляет собой уникальную территорию для изучения закономерностей трансформации экосистем, в том числе, — под влиянием вулканизма. Исследования, рассматривающие совокупность климатических, вулканических и ботанических данных и позволяющие выявить взаимосвязи между динамикой сообществ, изменением климата и выпадением пепла, крайне редки. Поэтому цель работы – реконструкция динамики болота Кумроч в северо-восточной части полуострова Камчатка в среднем и позднем голоцене.

Объект исследования – травяно-кустарничково-осоковое (мезотрофное) болото, расположенное в межгорном понижении (56.55259° N, 161.81798° E, 220 м н.у.м.), в предгорьях хр. Кумроч. Форма болота ромбовидная, размер 700×700 метров, высота окружающих гор — 300–500 м. На прилегающей территории, по долинам и

нижним частям склонов (200-300 м н.у.м.) произрастают леса, состоящие, главным образом, из каменной березы (*Betula ermanii*). На верхних частях склонов – заросли стлаников и кустарников.

Образцы торфа были отобраны в 2014 г из шурфа в ЮВ части болота (максимальная глубина 355 см). Всего получено 86 образцов объемом 5–10 $см^3$ через каждые 2–5 см в зависимости от мощности горизонтов торфа и пепла. Для ботанического анализа торфа образцы были подготовлены стандартным методом: торф помещали в слабый (5%) раствор KOH и отстаивали не менее 24 ч. После этого образцы промывали через сито с диаметром ячеи 250 мкм. Для идентификации растительных остатков использовали микроскоп и атласы-определители. Для построения модели торфонакопления были использованы 16 оригинальных радиоуглеродных датировок сцинтилляционным методом и данные о возрасте 26 прослоев тефры (Ponomareva et al., 2015).

Применение комплексного подхода позволило провести реконструкцию динамики болотной растительности и климата северо-восточной Камчатки в среднем и позднем голоцене. Совместное использование тефрохронологии и радиоуглеродного датирования для определения возраста торфяных отложений залежи болота Кумроч сделало возможным детально воссоздать историю эруптивной активности и ее влиянии на динамику экосистемы малого болота. Всего в отложениях торфяной залежи определено 28 прослоев тефры разной мощности, возраст нижнего идентифицируемого слоя составил 4892 кал. л.н. (Ponomareva et al., 2015). На настоящий момент исследуемый разрез — один из самых хорошо датированных на территории Камчатки. Высокая частота отбора образцов позволила получить реконструкцию с временным разрешением не более 100 лет. Из 28 выявленных прослоев тефры мощность десяти составляла один см, восьми — от двух до пяти см, семь пепловых прослоев имели мощность от пяти до девяти см, и только три тефры составляли десять см. Средний интервал между извержениями составил ~240 лет, среднее значение скорости вертикального прироста торфа (± ошибка среднего) — 0.63 ± 0,07 мм/год. Значимой взаимосвязи между скоростью вертикального прироста и величиной межпеплопадного интервала (коэффициент корреляции Спирмена = -0.26, p=0.25), так же, как и мощностью нижележащего прослоя тефры (коэффициент корреляции Спирмена = 0.008, p=0.97) не было выявлено.

Ботанический анализ торфа показал, что среди растений-торфообразователей изученной торфяной залежи на протяжении последних пяти тысяч лет преобладали (до 98%) осоки, такие как *Carex vesicata, C. gynocrates, C. saxatilis, C. middendorfii, C. canescens, C. rotundata, C. limosa*. Эти виды, характерные для низинных и переходных болот, распространены повсеместно, чаще – в лесном поясе до 1000 м н.у.м. (Якубов, Чернягина, 2004). В нижней части залежи (4890–2900 кал. л.н.) в небольших количествах также были встречены остатки неопределенных травянистых растений и семена ситника (*Juncus* sp.). В образцах, датированных 2900–1480 кал. л.н., обнаружены остатки сфагновых мхов (*Sphagnum* sp.) и коры ивы (*Salix* sp.). В верхней части залежи (с 1480 кал.л.н.), кроме осоковых, отмечены остатки *Betula, Vaccinium uliginosum, Salix, Sphagnum teres, Sphagnum subfulvum, Equisetum, Juncus, Eriophorum.*

Результаты исследования показали, что тонкие слои тефры (1–2 см), как и более мощные (до 10 см), не приводили к изменению скорости торфонакопления исследованной торфяной залежи за последние ~5000 лет. Также этот показатель был выше, чем в среднем для болот Камчатки (Захарихина, 2014). Это может свидетельствовать об устойчивости торфообразующих растений к пеплопадам подобной мощности. Хотя выпадения пепла могли изменять флористический состав болотного фитоценоза, они не приводили к полной смене доминирующих видов.

Данная стабильность может быть обусловлена преобладанием осок с хорошо развитыми подземными органами и способностью к вегетативному размножению, что повышает устойчивость фитоценоза к погребению пеплом (Perumal, Maun, 2006). Расположение болота в межгорной котловине могло обеспечивать привнос элементов минерального питания, что также могло влиять на стабильность фитоценозов после пеплопадов. Ответные реакции локальной растительности на выпадение пепла носили разнонаправленный характер, что, вероятно, связано со стадией развития болота.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-14-00065.

Литература

Захарихина Л.В. Скорость голоценового торфонакопления в условиях Камчатки // Почвоведение. 2014. №6. С. 670–676.

Якубов В.В., Чернягина О.А. Каталог флоры Камчатки (сосудистые растения). Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2004. 184 с.

Perumal V.J., Maun M.A. Ecophysiological response of dune species to experimental burial under field and controlled conditions // Plant Ecology. 2006. №1. С. 89–104.

THE INFLUENCE OF TEPHRA FALLS ON THE DEVELOPMENT OF PEATLAND ECOSYSTEMS DURING THE MIDDLE AND LATE HOLOCENE: A CASE STUDY OF THE SMALL KUMROCH MIRE (NORTHEASTERN KAMCHATKA)

V.E. Pimenov, M.M. Pevzner, N.G. Mazei, A.N. Tsyganov, Y.A. Mazei, E.G. Ershova

The study aims to reconstruct the vegetation dynamics of the Kumroch mire (northeastern Kamchatka) over the past 5000 years and to investigate the relationship between volcanic eruptions (ash fallout) and the dynamics of peatland plant communities. Using macrofossil analysis, radiocarbon dating, and the study of peat deposit tephrostratigraphy, a comprehensive palaeoecological reconstruction was conducted with a temporal resolution of less than 100 years. The results indicate that changes in the macrofossil composition were primarily driven by variations in local moisture conditions and other exogenous factors. The impact of ashfall was found to be less significant, largely localized, and did not result in substantial changes in plant community composition or the peat accumulation rate.

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЕ ЛИМНОГЕННЫХ СФАГНОВЫХ БОЛОТ НА ТЕРРАСАХ ДОЛИНЫ ВОЛГИ

Т.В. Рогова[1], О.В. Бакин[2], Г.А. Шайхутдинова[1], П.В. Хомяков[1]
[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет
[2]Волжско-Камский государственный заповедни»

Сфагновые болота террас левобережья долины Волги имеют лимногенное происхождение за счет процессов сплавинообразования на озерах, осложненных карстовыми провалами, и на неглубоких водоемах в депрессиях междюнных понижений песчаных террас. Низкая минерализация вод, подпитывающих болотные массивы, определяет возможность формирования сфагнового покрова и образования слоя торфа, толщина которого определяется глубиной водоема и возрастом нарастающей сплавины. Видовой состав сфагновых болотных сообществ определяется лесистостью ландшафта

и характером антропогенного использования. В условиях повышенного поступления биогенных элементов и эвтрофикации водоемов процесс торфонакопления и сплавинообразования затрудняется, возникает угроза существования редких видов растений (*Rhynchospora alba* (L.) Vahl, *Ledum palustre* L., *Vaccinium uliginosum* L., *Hammarbya paludosa* (L.) O. Kuntze и др.).

Развитие озер и болот, особенности болотообразовательного процесса непосредственно связаны с рельефом и характером четвертичных отложений, а в условиях Татарстана, по территории которого проходит изолиния коэффициента увлажнения Иванова равного 1, и величиной увлажнения. Одним из главных ограничений для развития редких в регионе сфагновых болот является качественный состав питающих болото вод. Развитие сфагновых мхов лимитируется растворенными в воде кальцием и магнием, входящими в почвенный поглощающий комплекс и обуславливающие степень насыщенности торфа основаниями и его кислотность (Лархер, 1978; Пьявченко, 1985). В этой связи, распространение сфагновых болот в Татарстане ограничивается литологическим строением территории, основу которой формируют пермские отложения.

Начальные стадии болотообразовательного процесса определяются особенностями депрессии, в которых формируется болотный комплекс (Боч, Мазинг, 1979). В Татарстане болотные массивы формируются в следующих типах депрессий: в замкнутых западинах эолового, эрозионного, суффозионного или криогенного происхождения; в замкнутых котловинах озер; в логах, представляющих собой неглубокие древние ложбины стока; у подножий склонов речных террас (в притеррасных понижениях); у подножий коренных склонов в полузамкнутых западинах; у речных плесов в поймах малых рек; на месте обмелевших заливов рек; в старицах (Бакин, 2008). В настоящее время большая часть экотопов последнего типа затоплена водами Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ. Формирование сфагновых болот на территории Татарстана связано главным образом с озерами боровых речных террас (в особенности волжских) подтаежной части региона, с ними же, в основном, связано образование относительно мощных торфяников.

В Среднем Поволжье долина реки Волга отличается хорошей разработанностью и асимметрией склонов. Левый склон представлен системой древнеаллювиальных террас, подстилаемой плиоценовой аллювиально-озерно-морской равниной (Средняя Волга…, 1991). Самым древним элементом долины является глубокий неогеновый эрозионный врез, который, согласно современным датировкам, имеет позднемиоценовый (понтический) возраст (Стратиграфический …, 2006) и служит системой отсчета времени существования всей Средней Волги (Брылев и др., 2010). На протяжении трех миллионов лет после образования вреза, русло Волги смещалось вправо с интенсивностью, зависящей от наличия препятствий в виде крупных тектонических структур Вятского и Жигулевского валов, со стойкими к размыву породами. Местами смещение русла достигает 90–120 км, но в районе г. Казани, из-за пересечения Волгой южной части Вятского вала, смещение составляет всего 6–8 км с образованием казанского поворота реки, определяющего характерный изгиб долины.

Позднемиоценовый врез повсеместно располагается левее современного русла Волги вблизи коренного склона долины, его глубина постепенно увеличивается вниз по течению от -50 м у г. Чебоксары до -350 м у г. Самара (Брылев и др., 2010). В условиях этой древней погребенной речной долины, заполненной преимущественно аллювиальными, озерно-аллювиальными, реже лагунно-морскими образованиями (Балабанов и др., 2010), в настоящее время формируются системы генетически однородных водоемов надпойменных террас, объединенных однонаправленными

трендами развития (Горшкова и др., 2024). Аллювиальные отложения, включая и четвертичные отложения самих террас, на которых, собственно, и находятся озёра, объединены водоносным неогеновым терригенным комплексом, участвующим в питании озёр. Подошва комплекса фиксируется на абсолютных отметках от 35 м до -80 м; водовмещающими породами являются разнозернистые пески с включениями гравия и гальки, с прослоями и линзами глин (Петрова, Сунгатуллин, 2021). Подземные воды преимущественно гидрокарбонатные кальциевые пресные с минерализацией 0.3-0.6 г/л. В пределах наиболее погребенных участков палеодолины минерализация достигает 1.0 г/л. В то же время воды озер палеодолины классифицируются как гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевые (Озера …, 1976) с минерализацией в среднем 0.17 г/л.

По размеру все озера Татарстана относятся к категории «малых» (Михайлов, Добровольский, 1991), т.к. у большинства площадь не превышает 1 га, а средняя глубина 2,5 м. Однако озера системы волжской палеодолины могут быть отнесены к числу наиболее крупных, что связано с распространением здесь карстовых процессов. По данным съемки, выполненной в июле 2016 г., площадь самого большого озера Ковалевское составляла 111.5 га, максимальная глубина 13.8 м (55.28 м. абс.) при средней глубине 3.2 м (рис. 1А); площадь второго по величине озера Архиерейское – 68 га, максимальная глубина 21.46 м (38.24 м. абс), средняя глубина 7.9 м (рис. 1Б). Дно этих озер осложнено карстовыми провалами и воронками, к которым приурочены наиболее значимые отметки глубин. Подобные глубокие карстовые озера в долине Волги, связанные с «водоносным неогеновым терригенным комплексом», подпитывающим озера водами низкой минерализации, чаще не имеют признаков сплавинообразования. Тем не менее, все карстовые озёра боровых террас потенциально способны образовывать сплавины, независимо от их глубины. В начале сукцессии сплавины часто травяные, затем с быстро поселяющимся на них сфагнумом переходящие в сфагновые, включая древесные формы в условиях окружающего лесного ландшафта. Например, оз. Глубокое в лесопарке «Лебяжье» в окрестностях Казани. То, что некоторые карстовые озёра не имеют сплавин часто связано с ветровым режимом открытых обезлесенных пространств, антропогенной эвтрофикацией озёр и прочими дигрессивными факторами (оз. Архиерейское и оз. Ковалевское).

Менее глубокие и малые по размеру озера волжской долины, не имеющие постоянного подземного питания, совместно с березняками и сосняками сфагновыми в междюнных понижениях песчаных боровых террас в настоящее время функционируют как болотные комплексы, однако, как правило, не являются большими по площади. Р.Н. Апкиным (2002) для Западного Предкамья указывается 1043 болотных объекта при средней площади массива 5 га. Полная серия болотной экогенетической сукцессии небольших по размеру озер в условиях умеренного климата включает следующие стадии: олиготрофные озера → мезотрофные озера → евтрофные озера → дистрофные озера → болота. В условиях малых глубин и относительно богатого минерального питания заболачивание озер происходит преимущественно путем зарастания по дну, когда активное отложение торфа начинается на стадии дистрофного водоема. Образование сфагновых сплавин характерно для более глубоких озер с низким содержанием в воде соединений кальция и магния.

Сплавинообразование начинается на стадии мезотрофного водоема, когда корневищные виды трав нарастают по поверхности воды, образуя сплавину. Наиболее распространенными в условиях долины Волги являются осоковые и осоко-сфагновые сплавины (*Carex lasiocarpa* Ehrh., *C. pseudocyperus* L., *C. diandra* Schrank*, C. rostrata* Stokes*).* В покрове сплавин велико участие видов кустарниковой (*Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Andromeda polifolia* L.*, Ledum palustre* L.*)* и древесной биоморф (*Betula pubescens* Ehrh.*, Pinus sylvestris* L., *Frangula alnus* Mill.), что особенно характерно

для лимногенных болот, сформировавшихся на отрезке волжской долины до казанского поворота (Зеленодольский район). Преобладание в растительном покрове болот определенных биоморф растений обусловлено количественной стороной увлажнения: при высоком уровне воды господствуют травы и мхи, при переменном увлажнении – древесные формы. Поэтому большое значение приобретает состояние ландшафтного окружения болотного массива. Лимногенные болота Зеленодольского района встроены в лесной ландшафт и в настоящее время представлены березняками и сосняками кустарниково-сфагновыми, под которыми мощность торфяной залежи составляет 2–4 м, местами достигая 9 м (озера Долгое, Гнилое, Светлое). Водоемы волжской долины после казанского поворота (Лаишевский район) расположены в условиях гораздо более освоенной и безлесной территории, что обеспечивает значительный поверхностный сток, препятствующий торфонакоплению и развитию болотной сукцессии (например, относительно молодая осоково-сфагновая сплавина на озере Моховое у пос. Габишево, Лаишевский р-н РТ).

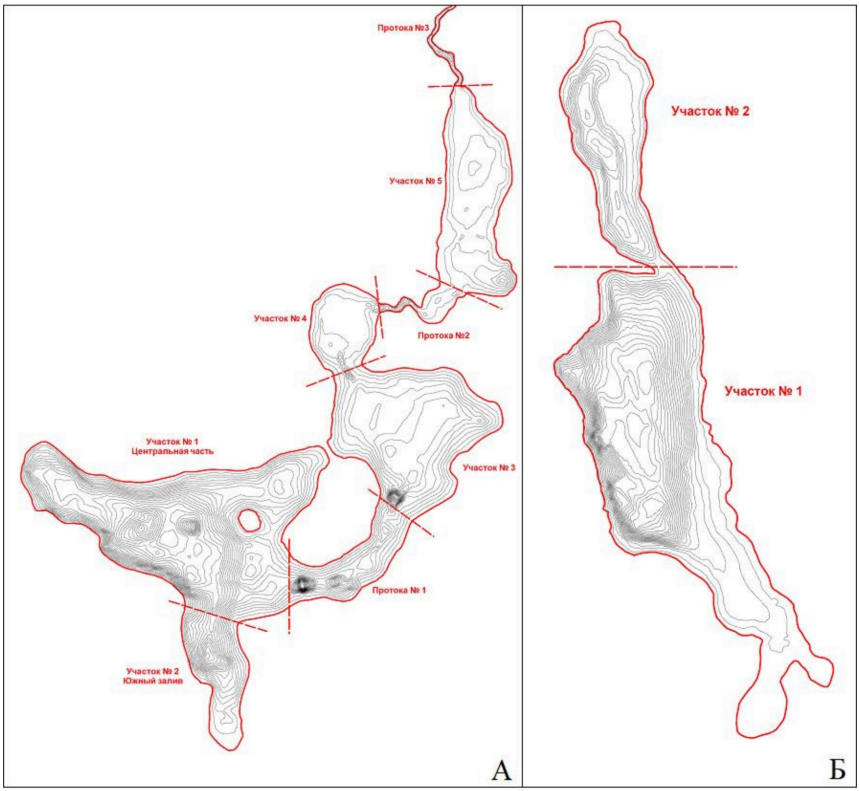


Рис. Планы озер по результатам батиметрической съемки 2016 г.
А – Ковалевское; Б – Архиерейское

Следует указать, что состояние озер и их растительного покрова в ландшафтах долины Волги определяется в значительной степени процессами, протекавшими в

прошлом в масштабе пространства палеодолины реки. Роль её неогеновых отложений, толщи которых работают как фильтр на пути подземного стока с водоразделов к руслу, в формировании вод низкой минерализации, определяют формирование сфагновых сплавин и в настоящее время. Снижение лесистости современных ландшафтов долины Волги, интенсивное использование земель в сельскохозяйственном производстве, развитая транспортная инфраструктура и увеличение площади селитебных и рекреационных зон увеличивают поступление минеральных биогенных и загрязняющих соединений с поверхностным стоком в озера, что вызывает их эвтрофикацию. Снижение видового и экосистемного разнообразия сфагновых болот лимногенного происхождения на террасах Волги является угрозой для существования ряда видов флоры сосудистых растений, включенных в Красную книгу Республики Татарстан (2016) и нуждающихся в охране (*Carex disperma* Dewey., *Carex limosa* L., *Rhynchospora alba* (L.) Vahl, *Drosera rotundifolia* L., *Andromeda polifolia* L., *Ledum palustre* L., *Vaccinium uliginosum* L., *Utricularia intermedia* Hayne, *Dactylorhiza fuchsii* (Druce) Soó, *Dactylorhiza maculata* (L.) Soó, *Hammarbya paludosa* (L.) O. Kuntze, *Salix lapponum* L., *Salix myrtilloides* L., *Scheuchzeria palustris* L.).

Литература

Апкин Р.Н. Закономерности распространения болот на территории Республики Татарстан. Казань: Экоцентр, 2002. 75 с.

Бакин О.В. История озер и болот на территории Татарстана в голоцене (в связи с поисками археологических памятников каменного века) // Проблемы изучения первобытности и голоцена в Волго-Камье. Казань, 2008. С. 113-141 (Археология и естественные науки Татарстана. Кн. 3).

Балабанов Ю.П., Линкина Л.И., Петрова Е.В. Неогеновые отложения Среднего Поволжья // Учен. Зап. Казан ун-та. Сер. Естеств. науки. 2010. Т. 152. Кн. 1. С. 192-214.

Боч М.С., Мазинг В.В. Экосистемы болот СССР. Л.: Наука, 1979. 188 с.

Брылев В.А., Мозжерин В.В., Панин А.В., Сидорчук А.Ю. Палеопотамология речной системы Волги. // Эрозионные и русловые процессы. Т. 5. М.: Макс-пресс, 2010. С. 116-147.

Горшкова А.Т., Рыков Р.А., Бортникова Н.В., Семанов Д.А. Горбунова В.П. Генезис озер однотипных ландшафтов речных долин территории Республики Татарстан // Успехи современного естествознания. 2024. №6. С. 50-56.

Красная книга Республики Татарстан: животные, растения, грибы / Министерство лесного хозяйства Республики Татарстан (и др.; гл. ред. Назиров А.А.). - Издание 3-е. - Казань: Идел-пресс, 2016. 759 с.

Лархер В. Экология растений. М.: Мир, 1978. 185 с.

Михайлов В.Н., Добровольский А.Д. Общая гидрология: учеб. для вузов. *М.*: Высш. шк., 1991. 368 с.

Озера Среднего Поволжья. Л.: Наука, 1976. 236 с.

Петрова Д.И., Сунгатуллин Р.Х. Гидрогеохимическая характеристика подземных вод неогеновых отложений Палео-Волги в пределах территории г. Казань // Вестник Воронежского государственного ун-та. Серия: Геология. 2021. №1. С. 114-123.

Пьявченко Н.И. Торфяные болота, их природное и хозяйственное значение. М.: Наука, 1985. 152 с.

Средняя Волга: геоморфологический путеводитель. / Под ред. А.П. Дедкова. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1991. 148 с.

Стратиграфический кодекс России. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2006. 96 с.

CONDITIONS OF FORMATION AND DEVELOPMENT OF LIMNOGENIC SHAGNUM BOGS ON THE TERRACES OF THE VOLGA VALLEY

T.V. Rogova, O.V. Bakin, G.A. Shaykhutdinova, P.V. Khomyakov

Sphagnum bogs of the terraces of the left bank of the Volga valley are of limnogenic origin due to the processes of rafting on lakes complicated by karst sinkholes and on shallow reservoirs in depressions of between dunes of sand terraces. Low mineralization of maters feeding the bog massifs determines the possibility of forming of sphagnum cover and a peat layer, the thickness of which is determined by the depth of the lake and the age of the growing raft. The species composition of sphagnum bog communities is determined by the forest cover of the landscape and the anthropogenic use. Under conditions of increased input of biogenic elements and eutrophication of reservoirs, the process of peat accumulation and rafting is hampered, and there is a threat to the existence of rare plant species (*Rhynchospora alba* (L.) Vahl, *Ledum palustre* L., *Vaccinium uliginosum* L., *Hammarbya paludosa* (L.) O. Kuntze, etc.).

ИНВЕНТАРИЗАЦИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР ШПИЦБЕРГЕНА

К.В. Ромашова[1], Р.А. Чернов[2]
[1]Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
[2]Институт географии РАН

На основе электронных карт и данных дистанционного зондирования Земли по состоянию на 2008-2012 гг. создана инвентаризация приледниковых озер архипелага Шпицберген, образование которых связано с сокращением оледенения и освобождением значительных моренных территорий с начала XX в. Определено три необходимых и достаточных морфологических признака для классификации приледниковых озер архипелага Шпицберген: положение озера относительно границ современного моренного комплекса, контакт с ледником и условие подпруживания. Сочетания признаков позволили выделить 5 типов озер: ледниково-подпрудные озера, моренно-подпрудных озера, озера, имеющие контакт с фронтом ледника, термокарстовые озера на морене и озера, расположенные за пределами моренного комплекса, но контактирующие с конечной мореной.

Архипелаг Шпицберген находясь под влиянием взаимодействия арктического воздуха с воздухом умеренных широт является уникальной территорией, климатические изменения на которой происходят в разы быстрее, чем в среднем по миру. Среднегодовая температура воздуха архипелага по современным оценкам составляет от -12 °C для северо-востока архипелага до -4 °C для его западного побережья (Isaksen et al, 2022). А за последние 30 лет средняя годовая температура воздуха Шпицбергена увеличилась на 1,5 °C (Hanssen-Bauer et al., 2019). Такие изменения климата сказываются на ледниковом покрове архипелага, который активно сокращается с момента последнего ледникового максимума в начале XX в., а темпы потерь ледниковых территорий в последние десятилетия заметно увеличились (Van Pelt, 2021). В настоящее время оледенение архипелага составляет порядка 55% его площади. Повсеместное сокращение площади ледников приводит к освобождению значительных территорий суши, на которых обнаруживается большое количество новых озер, лежащих в пределах моренных комплексов и называемых приледниковыми.

Целью работы было создание инвентаризации приледниковых озер архипелага Шпицберген, их классификация и выявление признаков, однозначно определяющих тип озера.

Пространственное положение приледниковых озер было определено по материалам картографического сервиса toposvalbard.npolar.no. Электронные карты сервиса построены на основе ортофотоснимков архипелага по состоянию на 2008-2012 гг. Высокое качество снимков аэрофотосъемки в основе картографического сервиса позволяет детально рассмотреть границы ледников, морен, береговую линию озер, русла ручьев и рек. Нами фиксировались озера в пределах границ современных моренных комплексов или на их границе длиной более 100 м, так как озера меньших размеров мелководны и полностью промерзают зимой. Подробная методика поиска и инвентаризации описана в работе (Ромашова, Чернов, 2023). Для каждого озера фиксировались: название питающего ледника, название области в соответствии с территориальным делением архипелага, площадь, длина озера, высотное положение, протяженность ледяного берега, координаты центра озера. Все характеристики озера за исключением площади определены посредством встроенных инструментов картографического сервиса toposvalbard.npolar.no. Оценка площади озер выполнена с использованием открытого векторного набора картографических данных суши Шпицбергена, имеющего контент, соответствующий серии карт Шпицбергена масштаба 1:100000.

По состоянию на 2008-2012 гг. на архипелаге Шпицберген выявлено 705 приледниковых озер общей площадью 187,4 км^2, что в два раза превышает площадь приледниковых озер Исландии (Shugar et al., 2020) и сопоставимо с площадью приледниковых озер центральной части Гималаев (Nie et al., 2013). Подробная характеристика приледниковых озер архипелага Шпицберген зарегистрирована в виде базы данных. Номер свидетельства 2024625734. Правообладатель – Институт географии РАН.

Приледниковые озера на архипелаге обнаруживаются повсеместно (рис. 1) несмотря на различие климата, типа и масштаба сокращения оледенения по территории. Половина из идентифицированных озер имеют ледяные берега общей протяженностью 268 км, что говорит о том, что процесс формирования озер еще не окончен и будет продолжаться. Преобладающее количество таких озер расположено в более холодной северо-восточный части Шпицбергена. Площадь приледниковых озер архипелага лежит в диапазоне от 0,002 до 17,34 км^2. Нами были выделены 35 крупнейших озер площадью более 1 км^2, суммарно составляющих около 2/3 площади всех озер (Чернов, Ромашова, 2024). Высота расположения озер достаточна обширна – от 1 до 840 м над уровнем моря, при этом 75% озер расположены ниже 200 м.

На основе полученной информации о разных озерах был разработан принцип классификации приледниковых озер, который построен на сочетании трех морфологических признаков (Чернов, Ромашова, 2024). Было выделено пять основных типов озер, которые различаются по местоположению относительно границ ледника и его конечной морены. Эти положения озер в ландшафте могут быть однозначно описаны тремя признаками, связанными с границами (ледника и его конечной морены). Признак 1 – принадлежность к территории моренных комплексов, признак 2 - контакт с границей ледника и признак 3 - условие подпруживания у границы. Условная схема классификации на основе взаимодействия признаков показана на рисунке 2. Эти признаки могут быть использованы в качестве машинного обучения для автоматизированного поиска озер, что исключает субъективизм, характерный для большинства подобных классификаций.

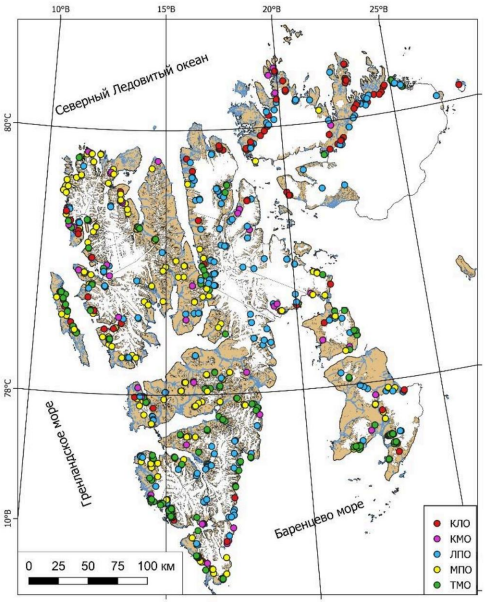


Рис. 1. Карта расположения приледниковых озер архипелага Шпицберген



Рис. 2. Схема классификации приледниковых озер Шпицбергена

В ходе проверки инвентаризации и классификации мы не обнаружили приледниковых озер неопределенных типов, т. е. все озера соответствовали предложенной схеме. Ниже представлено описание каждого типа озера.

Самый многочисленный тип приледниковых озер – термокарстовые (ТМО), образовавшиеся на моренах ледников по мере их отступания. Их развитие связано с термокарстовыми процессами на моренах вследствие таяния мертвых льдов. Эти небольшие и мелководные озера распространены на западном и юго-западном побережье Шпицбергена. Как правило они расположены с около моренных гряд, где образовались залежи мертвых льдов. Характерны для морен горно-долинных ледников, фронты которых ранее спускались на низкие гипсометрические уровни. В большинстве

они не имеют постоянного стока, но могут контактировать с мертвыми льдами и способствовать их таянию.

Морено-подпрудные озера. Наиболее масштабные и также многочисленны моренно-подпрудные озера, которые образовались вследствие подпруживания стока конечной мореной. Эта группа озер отличается значительными размерами. Их глубина достигает 25-30 м. При этом два десятка наиболее крупных озер типа МПО составляют около половины площади всех озер архипелага. Некоторые из этих озер не контактируют с ледниками, фронты которых уже отступили.

Контактные с ледниками озера (КЛО) непосредственно контактируют с фронтом ледника, занимают естественные котловины перед фронтом ледника в пределах моренных комплексов. Они отличаются от морено-подпрудных озер по признаку подпруживания (не подпружены). Наиболее часто встречаются около фронтов выводных ледников, которые отступили от береговой полосы вглубь долины. В области покровного оледенения архипелага КЛО распространены у края ледяных куполов в естественных впадинах, имеющих сток.

Ледниково-подпрудные озера (ЛПО). Положение ледниково-подпрудных озер не связано строго с территорией моренных комплексов. В области горного оледенения эти озера лежат выше нижней границы ледников и зачастую образованы стоком талой воды из боковых долин.

Среди приледниковых озер Шпицбергена выделяется группа озер, которые образовались на ранних этапах дегляциации архипелага. Эти озера расположены на внешней стороне конечных морен. Условно обозначили их как конечно-моренные озера (КМО). В период максимума развития ледников озера контактировали с ними, занимая приледниковые котловины, и в настоящее время эти озера примыкают к конечным моренам. Иногда при разрушении части моренного вала озера сливаются с МПО. Фактически все озера существовали до 1938 года, но большинство изменило конфигурацию в связи с пространственными изменениями морен и озерных ванн.

Отдельно по типам озер были рассмотрены их морфометрические характеристики, выявлены определенные различия в них. Отмечено, что при сопоставлении характеристик озер (высотное положение, площадь и длина) тип озера в большинстве случаев однозначно определяется (табл.).

Таблица. Характеристики приледниковых озер различных типов

Типы приледниковых озер архипелага	Количество озер	Доля озер, %	Средняя высота уреза воды, м	Средняя длина озера, м	Средняя площадь озера, км^2	Общая площадь озер, км^2
КЛО (контактные с ледником)	97	13,8	107	911±9	0,514±0,036	49,8±0,5
ЛПО (ледниково-подпрудные)	189	26,8	253	713±7	0,218±0,022	41,2±0,3
МПО (морено-подпрудные)	163	23,1	90	774±6	0,504±0,005	82,1±0,1
ТМО (термокарстовые озера на моренах)	198	28,1	39	260±8	0,024±0,001	4,8±0,1
КМО (конечно-моренныеозера)	58	8,2	135	624±5	0,163±0,008	9,4±0,1

На основе картографических материалов норвежского полярного института проведена инвентаризация приледниковых озер архипелага Шпицберген, формирование которых обусловлено таянием ледников с начала XX в. Всего обнаружено 705 озер площадью 187, 4 км^2. Установлено, что формирование озер продолжается, т.к. половина из них находится в контакте с ледниками. Определены 3 морфологических признака, связанных с расположением озера относительно моренного комплекса, наличием контакта озера с ледником и условием подпруживания однозначно определяющих 5 типов приледниковых озер архипелага.

Литература

Ромашова К.В., Чернов Р.А. Методика инвентаризации приледниковых озер архипелага Шпицберген //Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. №2. С. 157-170.

Чернов Р.А., Ромашова К.В. Крупные приледниковые озёра архипелага Шпицберген: их состояние в 2008–2012 г. и динамика с 1991 по 2022 г // Лёд и снег. 2024. Т. 63. №4. С. 525-539.

Чернов Р.А., Ромашова К.В. Классификация приледниковых озер Шпицбергена // Криосфера Земли. 2024. Т. 28. №5. С. 14-20.

Nie Y., Liu Q., Liu S. Glacial lake expansion in the Central Himalayas by Landsat images, 1990–2010 // PloS one. 2013. V. 8. №12. e83973.

INVENTORY AND CLASSIFICATION OF THE SPITSBERGEN PERIGLACIAL LAKES

K.V.Romashova, R.A. Chernov

Based on electronic maps and Earth remote sensing data as of 2008-2012, an inventory of periglacial lakes of the Spitsbergen archipelago has been created. The lakes were formed due to the reduction of glaciation and the release of significant moraine territories since the beginning of the 20th century. Three necessary and sufficient morphological features have been identified for classifying periglacial lakes of the Spitsbergen archipelago: the lake's position relative to the glacier boundaries, its contact with the glacier, and the damming condition. Combinations of features have made it possible to identify 5 types of lakes: glacial-dammed lakes, moraine-dammed lakes, lakes in contact with the glacier front, thermokarst lakes on the moraine, and lakes located outside the moraine complex but in contact with the terminal moraine.

К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ РЕКРЕАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ОЗЕР

А.Ю. Санин

Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова

При оценке рекреационного потенциала озер, как естественных, так и прудов и водохранилищ, должны учитываться как их физико-географические, так и социально - экономические характеристики. Выполненные оценки показали, что рекреационный потенциал озер не уступает или лишь немного уступает потенциалу туристических центров, расположенных на популярных для отдыха морских побережьях. Осуществление оценки по единой методике, предложенной автором, позволит выявить водные объекты, наиболее перспективные для внутреннего туризма. Создание именно на них туристических центров, например, в рамках программы «5 морей и озеро Байкал»

или других проектов, позволит получить от затрат на их создание при прочих равных условиях наибольший эффект.

Актуальность вопросов, связанных с рекреационным использованием озер (как естественного происхождения, так и прудов и водохранилищ) в последние годы возрастает в связи с ростом значимости внутреннего туризма и ростом туристических потоков на них, что подтверждается и статистическими данными. По данным Росстата, за первые 9 месяцев 2023 года число внутренних туристических поездок составило около 135 млн., что на 20 миллионов больше, чем годом ранее. Есть и другие оценки, от 70-90 до несколько сотен миллионов в год, в зависимости от методики учета поездок рекреантов. Важным представляется не только общая численность туристического потока, а и его достаточно быстрый рост, который имеет место в последние годы.

Туристическое использование предполагает необходимость сохранения рекреационного потенциала территории; развитие туризма, как правило, предусматривает создание новых объектов рекреационной инфраструктуры, для размещения которых при прочих равных обстоятельствах следует выбирать участки территории с наибольшим рекреационным потенциалом.

Увеличение числа внутренних туристических поездок не может не привести к росту популярности для отдыха прибрежных территорий, относящихся к морям и ко внутренним водным объектам. До 70-90% рекреантов предпочитают «водный или околоводный» (Андреева, 2017) отдых, следовательно, виды туризма, напрямую не связанные с водными объектами, удастся развивать наиболее эффективно, если их «наслаивать» на прибрежные зоны водных объектов. Большинство выделяемых в литературе (Николаенко, Николаенко, 1998 и др.) видов туризма уже получили развития в пределах прибрежных зон, относящихся к внутренним водным объектам, либо потенциально могут быть на них развиты. В частности, сельский, экологический, деловой туризм, хоть напрямую с водными объектами и не связаны, но в прибрежных зонах при прочих равных условиях развиваются успешнее, чем за их пределами.

Особую роль играет высокий эстетический потенциал водных объектов, важность которого при выборе места отдыха отмечена в литературе (Лихачева, 2015).

Значительный вклад в развитие внутреннего туризма в России внесет создание новых круглогодичных курортов в рамках программы «5 морей и озеро Байкал» (Стенограмма …, 2024). Предполагается, что новые курорты позволят привлечь до 10 миллионов туристов в год. Но из названия проекта можно сделать вывод – и он подтверждается имеющейся информацией по нему- что большинство курортов (7 из 10) планируются на морском побережье; из внутренних водных объектов будет «задействован» только Байкал. Безусловно, он характеризуется мощным и не до конца раскрытым туристическим потенциалом, однако для большинства россиян дорога к Байкалу сопряжена со значительными затратами; на берегах озера практически не возможна популярная среди многих туристов пляжно-купальная рекреация.

Прибрежные территории, относящиеся к внутренним водным объектам, представляются в значительной степени недооцененными и не сильно уступающими по рекреационному потенциалу и возможностям для туризма приморским территориям. На них также возможно развитие значительного количества видов туризма; по привлекательности для рекреантов (равно как и для местных жителей) они существенно превосходят смежные с ними территории.

В силу этого представляется необходимым рассмотреть вопрос о включении в программу «5 морей и озеро Байкал» проектов новых курортов на внутренних водных объектах. Критерии их отбора для включения в программу следующие: расположение в регионах с высокой плотностью населения, хорошая транспортная доступность,

возможности для развития значительного числа видов туризма и некоторые другие. Особую роль играют климатические характеристики, которые, в свою очередь, определяют возможность наиболее популярной среди туристов купально-пляжной рекреации (Митина, Санин, 2024). Некоторые примеры таких объектов: Можайское или Конаковское водохранилище в Московской области, участки побережья Волги в Среднем Поволжье, например, в Республике Татарстан или Самарской области, Цимлянское водохранилище на Дону. В порядке исключения представляется возможным рассмотреть включение в программу проекта нового круглогодичного курорта на Ладожском или Онежском озере. Несмотря на ограниченные возможности для пляжно-купальной рекреации данные водные объекты характеризуются высокой популярностью в силу их физико-географических характеристик, богатого природно-культурного наследия, а также сравнительной транспортной доступности.

Некоторые аспекты актуальности оценки рекреационного потенциала озер:

1. Ценность озер для туризма традиционно недооценивается, оценки их рекреационного потенциала показывают, что она сопоставима с ценностью более популярных приморских территорий.
2. Осуществление таких оценок позволит выделить наиболее ценные с точки зрения туристического развития прибрежные территории, относящиеся к озерам, что укажет потенциальным инвесторам на возможности для развития туризма на них.
3. Оценка рекреационного потенциала позволит выбрать наиболее подходящие объекты для включения в программу «5 морей и озеро Байкал» и другие государственные и частные проекты по развитию внутреннего туризма.

Существует достаточно много методик оценок рекреационного потенциала и примеров их применения, как правило, к отдельным объектам (ООПТ, водные объекты и т.д.), реже – к их группам. Разработками таких методик занимались В.С. Преображенский, Л.И. Мухина, Н.С. Казанская, Ю.В. Веденин, Н.Н. Мирошниченко, Н.М. Ступина (Кусков, 2003). Общим свойством имеющихся подходов оценки рекреационного потенциала можно назвать то, что они предполагают подробное изучение влияния ряда ресурсов, условий и факторов (в некоторых определениях также предпосылок, способностей и свойств) туристической деятельности. Среди них упоминаются «рельеф, климат, водные ресурсы, растительность, транспортная доступность, наличие рекреационной инфраструктуры (зданий, комплексов, инженерных систем)» (Котляков, 2020). Однако «единой научной парадигмы в области экономической оценки рекреационных ресурсов в целом и ресурсов рекреационного водопользования в частности не сложилось» (Андреева, 2017).

Группы параметров, которые учитываются при оценке рекреационного потенциала по методике, предлагаемой автором:

1. Природный рекреационный потенциал;
2. Состояние инфраструктуры для туристов;
3. Прочие социально-экономические факторы;
4. Рекреационные ресурсы прибрежной территории;
5. Неблагоприятные и опасные явления природы (НОЯ);
6. Конфликты между рекреационным и прочими типами природопользования;
7. Экологическая обстановка.

В свою очередь, большинство из выделенных параметров состоит из некоторого количества составляющих, из суммы баллов, выставленных для них, складывается общая оценка для группы параметров в целом. Так, к «прочим социально-экономическим факторам» относятся криминогенная обстановка (1–5 баллов), отношение местных жителей к туристам (1–5 баллов), уровень медицинского обслуживания (1–5 баллов), уровень развития т.н. «общепита» (1–5 баллов). Необходимо учесть количество и

разнообразие предлагаемых экскурсий (1–5 баллов), возможности для культурного досуга - театры, кинотеатры и т.д. (1–5 баллов). Важнейшую роль играет наличие и разнообразие историко-культурных достопримечательностей: исторических и религиозных памятников и пр. (1–15 баллов).

Разработанная методика оценки рекреационного потенциала была применена для оценки рекреационного потенциала Можайского водохранилища (Московская область). Результаты показаны в таблице.

Таблица. Результаты оценки рекреационного потенциала Можайского водохранилища

Параметр	Результат оценки	Примечание
Природный рекреационный потенциал		
Климатические характеристики региона и степень их благоприятности для массовой рекреации	5	Климат способствует развитию некоторых видов спортивного туризма (катание на лыжах, любительская рыбная ловля); при этом зима в регионе сравнительно мягкая и безветренная, что также благоприятно для организации отдыха. В летнее время возможна пляжно-купальная рекреация, занятие водными видами спорта. В целом в регионе доминирует пригородная рекреация, для которой наиболее благоприятным периодом традиционно считается время с апреля по октябрь.
ландшафтноеразнообразие	4	Естественные ландшафты – достаточно живописные смешанные леса - в значительной мере преобразованы человеком, значительный процент территории занимают урбанизированные ландшафты дачных поселков. Создание Можайского водохранилища обусловило существенное увеличение процента аквальных ландшафтов.
Эстетическая привлекательность территории	5	Ландшафты прибрежной зоны водохранилища достаточно разнообразные, что повышает эстетическую привлекательность района, однако в значительной мере и достаточно хаотически преобразованы человеком (имеют место элементы визуального загрязнения).
Наличие природных достопримечатель-ностей	3	Достопримечательностью, правда, скорее антропогенного происхождения, можно считать само водохранилище. Но в целом природных достопримечательностей мало.
Уровень развития рекреационной инфраструктуры		
Наличие подъездных дорог	4	Главным образом, автодороги, через близко расположенный Можайск проходит железная дорога.
Разнообразие средств размещения рекреантов	7	В прибрежной зоне доступны различные варианты размещения, от кемпингов до достаточно комфортных коттеджей и баз отдыха.
Обеспечение возможности добраться к месту отдыха различными видами транспорта	6	В расположенном рядом с водохранилищем Можайске останавливаются некоторые поезда дальнего следования. С Москвой город связан электричками и автобусами. Населенные пункты на Можайском водохранилище связаны с Можайском автобусным сообщением; многие туристы используют такси. Также активно используется личный автотранспорт.
Иные социально-экономические факторы		
Криминогенная обстановка	-2	Отдельные криминальные происшествия
Отношение местных жителей к туристам	2	Местные жители по числу (за исключением Можайска) уступают тем, которые приезжают на отдых; про отношение говорить довольно сложно, так как сложно разделять эти категории.

Параметр	Результат оценки	Примечание
Уровень медицинского обслуживания	3	Городская больница и поликлиника Можайска имеют достаточно низкий рейтинг. Имеются (примерно десять) частных медицинских центров с достаточно высоким рейтингом.
Уровень развития «общепита»	2	Кафе и ресторанов достаточно немного, как правило, они располагаются на территории туристических объектов и рассчитаны, прежде всего, на их гостей.
Количество предлагаемых экскурсий и их разнообразие	2	В районе Можайского водохранилища есть немало интересных для посещения мест (исторический парк Бородино, старинные храмы, национальные парки и т.д.), однако экскурсии можно приобрести только в Можайске, главным образом это обзорные по городу и на Бородинское поле, они редко включают посещение объектов на берегу Можайского водохранилища.
Возможности для культурного досуга	2	Кинотеатр имеется только в Можайске, театры отсутствуют; представлены главным образом возможностями для экскурсионного туризма.
Наличие и разнообразие историко-культурных достопримечательностей: памятников истории и пр.	9	В прибрежной зоне водохранилища и его ближайших окрестностях (Можайск, Бородино и т.д.) имеется ряд историко-культурных достопримечательностей, относящихся к различным эпохам, в том числе общероссийского значения (Бородинское поле). До нашего времени не сохранился Можайский кремль, что несколько снижает оценку.
Виды туризма, характерные в настоящее время и те, которые потенциально могут быть развиты	10	В настоящее время наибольшее значение имеет пляжно-купальная рекреация, некоторые виды спортивного туризма (особенно катание на лыжах и любительская рыбная ловля), а также дачная (пригородная) рекреация. В будущем возможен рост значения экологического, сельского, экскурсионного и некоторых видов спортивного туризма (дайвинг, велосипедный и т.д.).
Неблагоприятные и опасные явления природы (НОЯ), которые имеют место	-7	Острое проявление неблагоприятных и опасных явлений природы не характерно. На некоторых участках отмечается размыв берега, процессы подтопления и заболачивания, но все это выражено значительно слабее, чем в первые годы создания водохранилища (в 60е годы 20 века). Как и для средней полосы России в целом, в последние годы все чаще характерны аномально жаркие температуры, зимой возможны сильные морозы и снегопады, летом - обильные ливни.
Конфликты между рекреационным и прочими типами природопользования	-4	Острый конфликт между рекреационным и селитебным типами природопользования: в ряде случаев в дачных поселках органичен доступ к берегу, можно говорить о т.н. визуальном и шумовом загрязнении.
Степень неблагоприятности экологической обстановки	-5	В целом достаточно благоприятная, в частности, вода благодаря действующим ограничениям и значительному объему водохранилища достаточно чистая, но довольно часто на берегу отмечаются свалки бытового мусора; активная застройка приводит к увеличению объема поступающих сточных вод.
Плотность отдыхающих	-2	На некоторых участках достаточно значительная, особенно в выходные и в пик сезона летом.
Суммарная оценка	44	Несколько ниже, чем для некоторых популярных пунктов на морских побережьях, но в целом сопоставима с ними.

Ранее по данной методике были оценены туристические пункты, расположенные на побережьях морей и других внутренних водных объектов, приводим некоторые

результаты оценок. Город Феодосия, Крым – 68; зона отдыха Серебряный бор, Москва, река Москва – 44; г. Бердянск, Запорожская область – 44; г. Дербент, Дагестан - 71.

Для повышения рекреационного потенциала необходимо развитие транспортной инфраструктуры, решение экологических проблем, которые существенно смягчаются соблюдением норм действующего Водного кодекса, а также ограничение воздействия человека на природные ландшафты, по крайней мере, на наиболее ценные и уникальные из них.

Литература

Андреева И.В. Рекреационное водопользование: историография и стратегия изучения // Известия АО РГО. 2017. №3. С. 5-14.

Измайлова А.В. Водные ресурсы озёр Российской Федерации // География и природные ресурсы. 2016. №4. С. 5-14

Ланцова И.В. Геоэкологические аспекты рекреационного водопользования. Тверь: ООО «Издательство «Триада», 2008, 216 с.

Лихачева Э.А. Рельеф – его сущность и красота. М.: Медиа-ПРЕСС, 2015. 144 с.

Митина Н.Н., Санин А.Ю. Перспективы расширения проекта федеральных круглогодичных курортов «Пять морей и озеро Байкал» // Инновации и инвестиции. 2024. №6. С. 285-293.

Николаенко Д.В., Николаенко Т.В. Введение в рекреационную географию. Харьков: Международный славянский университет, 1998. 193 с.

Стенограмма совещания по вопросу создания федеральных круглогодичных курортов «5 морей и озеро Байкал», проведенного Президентом РФ 28 03 2024. Режим доступа: http://www.kremlin.ru/events/president/news/73754. Дата обращения: 14. 05.2024.

ON THE ISSUE OF ASSESSING THE RECREATIONAL POTENTIAL OF LAKES

A.Yu. Sanin

When assessing the recreational potential of lakes, both natural and ponds and reservoirs, both their physical, geographical and socio-economic characteristics should be taken into account. The performed assessments have shown that the recreational potential of the lakes is not inferior or only slightly inferior to the tourist centers located on popular seaside resorts. The implementation of the assessment according to the unified methodology proposed by the author will make it possible to identify the water bodies that are most promising for domestic tourism. The creation of tourist centers on them, for example, within the framework of the 5 Seas and Lake Baikal program or other projects, will make it possible to get the greatest effect from the costs of their creation, all other things being equal.

ПРОБЛЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ОЗЕРА БАЙКАЛ

В.Н. Синюкович

Лимнологический институт СО РАН

Рассматриваются проблемные аспекты использования водных ресурсов оз. Байкал и регулирования его уровня. Отмечается, что главной среди них является разработка наиболее оптимального режима стока через Иркутскую ГЭС, при котором уровенный режим озера не нарушает условия функционирования байкальской экосистемы и

сводятся к минимуму социально-экономические риски на прилегающей территории. Препятствием на пути решения данной проблемы является отсутствие новых правил использования водных ресурсов (ПИВР), классификации показателей водности и некоторых нормативно-правовых актов в сфере хозяйственных отношений в регионе.

С принятием закона «Об охране озера Байкал» (1999 г.) и нового Водного кодекса РФ (2006 г.) регулирование уровенного режима оз. Байкал осуществляется с учетом интересов основных потребителей, использующих байкальскую воду. Иркутская ГЭС в этой ситуации служит управляющим механизмом, функционирующим с 1956 г. Несмотря на длительную историю эксплуатации станции, проблема выбора режима ее работы и оптимального регулирования уровенного режима Байкала остается актуальной до сих пор (Бычков, Никитин, 2022; Синюкович, 2022). В значительной степени это следствие как уникальности самого озера (Байкал с 1996 г. входит в список объектов всемирного природного наследия Юнеско), так и необходимости решения комплекса проблем на прилегающей к озеру территории (с 1999 г. Байкальская природная территория, БПТ).

Проведенные в 2021-2023 гг. по заданию МПР и Минобрнауки специальные комплексные НИР в рамках Национального проекта «Экология», а также накопленные сведения о влиянии изменений уровня оз. Байкал на его экосистему и социально-экономические условия прилегающих территорий позволяют сформулировать основные рекомендации и требования к порядку регулирования уровенного режима озера (Бычков, Никитин, 2024). При этом становятся очевидны и ряд других проблем. В первую очередь, это необходимость изменения существующих правил использования водных ресурсов водоема, а также нормативно-правовых актов в сфере землепользования, застройки и развития территорий, разработки мероприятий по минимизации экологических и социально-экономических рисков и др. Большинство социально-экономических требований к уровню озера сводится к ограничению его предельных отметок, выход за которые создает угрозу затопления (подтопления), повышенной абразии берегов, или, наоборот, приводит к обсыханию мелководий, дефициту воды и нарушению нормального водообеспечения (главным образом в нижнем бьефе Иркутской ГЭС) и др. Экологические же требования имеют более сложный характер и требуют не только поддержания уровня на определенных отметках, не нарушающих условия обитания водных биологических ресурсов и околоводной фауны, но и соблюдения сезонного хода высоты водного зеркала в соответствии с сезонными циклами развития байкальской биоты. При этом, соблюдение того или иного выбранного режима регулирования может быть обеспечено только при определенных условиях водности, что при отсутствии надежных ее прогнозов предполагает подготовку нескольких вариантов регулирования уровня озера, с такими отступлениями от оптимального, которые минимизируют экологический ущерб в разных гидрологических условиях. Вместе с тем, законодательно утвержденная классификация водности для Байкала (как и других водных объектов) отсутствует и ее оценки осуществляются субъективно. В этой ситуации крайне неопределенным (неоднозначным) становится и толкование постановлений Правительства РФ о предельных уровнях озера, которые устанавливаются для разных условий водности – средней, высокой и низкой.

В практике гидрологических расчетов для проектирования и строительства (СП 33, СП 115, СП 482) применяются нормативы значений стока рек некоторых обеспеченностей (Р), однако они разработаны для разовых максимальных или минимальных расходов воды. Три категории водности используются в статистике работы ГЭС (Приказ …, 2010). Применительно к годовым объемам полезного притока в оз. Байкал известно (Абасов и др., 2017; Болгов и др., 2018) выделение пяти градаций

водности. На основе схемы, предложенной ГГИ (Sinyukovich, 2024), нами рассчитаны показатели различной водности для суммарного годового и экстремального месячного притока поверхностных вод в озеро из семи градаций (рис.). Расчеты выполнены за период 1961-2020 гг. с использованием трехпараметрического распределения Крицкого-Менкеля. Диапазон возможных изменений притока условно ограничен значениями обеспеченностей 0,1 и 99,9 % (вероятность реализации один раз в 1000 лет).

Показатели водности	P, %	Год, км^3	Июнь, км^3	Февраль, км^3
	0,1	102,4	21,2	1,50
Катастрофически высокая				
	1	90,5	18,4	1,26
Высокая				
	10	76,0	15,0	1,02
Умеренно высокая				
	40	64,4	11,9	0,86
Средняя				
	60	58,9	10,5	0,79
Умеренно низкая				
	90	49,4	8,00	0,69
Низкая				
	99	41,1	5,83	0,61
Катастрофически низкая				
	99,9	35,9	4,53	0,56

Рис. Граничные значения показателей водности притока поверхностных вод в оз. Байкал для годовых значений и экстремальных по стоку месяцев

Полученные результаты показывают, что наблюденный максимум приточности, составляющий 92,2 км^3 приходится на 1973 г. и соответствует катастрофически высокой водности. Минимальный же приток в 42,5 км^3 (2015 г.) имеет обеспеченность около 98 % и соответствует низкой водности, т.е. не самого критичного маловодья. В целом, представленные численные значения речного притока в озеро дают возможность объективно оценивать водность в бассейне оз. Байкал в отдельные годы, или месяцы. Это значительно облегчает разработку наиболее оптимального уровенного режима озера, обеспечивающего нормальное функционирование его экосистемы и минимальный экономический ущерб. Однако, специфика подготовки данных по стоку рек не позволяет оперативно получать годовые и месячные оценки общего притока. Анализ межгодовой и сезонной изменчивости приточности в озеро показывает, что ее значения достаточно надежно отражаются суммарным стоком трех главных рек (Селенга, Верхняя Ангара и Баргузин), поставляющих в Байкал около 2/3 поверхностных вод. Их расходы воды могут быть сразу же оценены по уровням, которые измеряются ежедневно. Связь многолетних колебаний притока со стоком Селенги, Верхней Ангары и Баргузина за последние 50 лет по коэффициенту корреляции составляет 0,90; 0,40 и 0,75, соответственно. Для суммарного стока этих рек искомый коэффициент достигает 0,96. Ниже приводятся (табл.) граничные значения суммарного стока трех главных байкальских рек расчетных обеспеченностей, позволяющие дифференцировать условия водности в бассейне оз. Байкал для семи градаций.

Таблица. Показатели водности расчетной обеспеченности суммарного стока трех главных рек, м^3/с

P, %	0,1	1	10	40	60	90	99	99,9
Год	2250	1960	1610	1310	1180	938	734	605
Июль	5860	4860	3670	2660	2220	1490	919	620
Февраль	393	320	250	204	185	158	137	125

Охарактеризованная схема, очевидно, может послужить основой более совершенной классификации показателей водности в бассейне Байкала, но потребует еще значительной работы по определению оптимальных границ для каждой градации вследствие разных требований к расходам и уровням воды рек со стороны разных сфер хозяйственной деятельности, или экологии. Кроме того, в каждом конкретном случае (для разных хозяйственных объектов, населенных пунктов, представителей биоты и т.д.) потребуется выбор своего гидрологического показателя (расход воды, уровень, площадь водной поверхности и т.д.) и задаваемого интервала осреднения (год, сезон, месяц, день), с определением численных граничных значений выбранных показателей. Не менее сложным будет и придание разрабатываемым критериям водности нормативно-правового статуса даже регионального масштаба.

Еще одной, важной проблемой оптимального использования водных ресурсов Байкала, остается необходимость расширения границ регламентированного Правительством РФ метрового диапазона колебаний его уровня (в два раза ниже естественного), которая обсуждается с 2001 г. Узкий диапазон существенно снижает возможности регулирования стока через Иркутскую ГЭС, но его расширение тормозится, как уже отмечалось, отсутствием законодательно утвержденной классификации условий водности для Байкала и некоторых нормативно-правовых актов в сфере хозяйственных отношений на БПТ.

Вместе с тем, объективных затруднений для решения перечисленных проблем в настоящее время не существует. Для Байкала и Иркутского водохранилища имеется проект ПИВР, который может быть доработан в короткие сроки. По итогам вышеупомянутых исследований 2021-2023 гг. (Бычков, Никитин, 2024) сформулированы предложения по внесению необходимых изменений в федеральное законодательство, а подготовленная экономическая и экологическая аргументация оптимального уровенного режима озера уже достаточна для его применения на практике.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ЛИН СО РАН по теме № 0279-2021-0004.

Литература

Абасов Н.В., Болгов М.В., Никитин В.М., Осипчук Е.Н. О регулировании уровенного режима озера Байкал // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. №3. С. 407-416.

Болгов М.В., Коробкина, Е.А., Филиппова И.А. Особенности временной изменчивости притока к озеру Байкал и водохранилищам Ангарского каскада ГЭС // Водное хозяйство России. 2018. №4. С. 6-19.

Бычков И.В., Никитин В.М. Современные проблемы регулирования уровня озера Байкал // География и природные ресурсы. 2022. №5. С. 13-24.

Бычков И.В., Никитин В.М. Регулирование уровня озера Байкал: результаты исследований // География и природные ресурсы. 2024. №3. С. 17-25.

Приказ Федеральной службы государственной статистики Минэкономразвития РФ от 13.11.2010 № 391 «Об утверждении указаний по заполнению формы федерального статистического наблюдения № 6-ТП (ГИДРО) «Сведения о работе гидроэлектростанций»».

Синюкович В.Н. Сезонные характеристики уровенного режима озера Байкал в естественных и зарегулированных условиях // География и природные ресурсы. 2022. №5. С. 45-53.

Sinyukovich V.N. Indicators of high and low inflow to Lake Baikal and the runoff of its main rivers // Limnology and Freshwater Biology. 2024. №3. P. 181-194.

PROBLEMS OF OPTIMAL USE OF WATER RESOURCES OF LAKE BAIKAL

V.N. Sinyukovich

The article considers problematic aspects of the use of water resources of Lake Baikal and regulation of its level. It is noted that the main one among them is the development of the most optimal flow regime through the Irkutsk hydroelectric power station, in which the lake level regime does not violate the conditions of the functioning of the Baikal ecosystem and the socio-economic risks in the adjacent territory are minimized. An obstacle to solving this problem is the lack of new rules for the use of water resources (RUWR), classification of water content indicators and some regulatory legal acts in the sphere of economic relations in the region.

СОВРЕМЕННОЕ ЗАБОЛАЧИВАНИЕ МАЛЫХ ОЗЕР: СУКЦЕССИИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ, ИХ НАПРАВЛЕННОСТЬ И СКОРОСТЬ.

В.А. Смагин

Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН

Рассмотрено современное заболачивание малых озер, вызванное антропогенным воздействием: понижением уровня воды и эвтрофированием. Изучению сукцессий растительности при этом процессе посвящена кандидатская диссертация автора. Материал собирался в 1981-83 гг. Затем, на ряде озер, расположенных вблизи С-Петербурга мониторинг, продолжен по сию пору. Кроме того, обнаружен еще ряд озер, заболачивающихся или полностью ставших болотами в недавнее время. Выяснено, что процесс заболачивания имеет скачкообразный характер, интенсивный сразу после обмеления, затем затухающий. В ходе сукцессий образуются сообщества по видовому составу типичные для болотной растительности. Однако, казалось бы, необратимому процессу может придать реверс деятельность бобров, становящаяся все заметнее в последнее время.

Заболачивание озер, интенсивно протекавшее после схода ледника, активизировалось в наше время из-за антропогенного воздействия. В наибольшей степени оно проявилось на внутриболотных озерах, при проведении торфоразработок. Вначале 1980-х гг., при сборе материала для диссертации «Смены растительности при зарастании мелких водоемов под влиянием антропогенного фактора» (Смагин, 1985) в 1980-83 гг., было непросто найти объекты исследования. Сейчас, доступность космических снимков, показала масштаб и географию явления – среди выработанных торфяников видны спущенные и в разной степени заболоченные озера. Помимо торфоразработок снижение уровня воды в малых озерах вызывает лесоосушительная мелиорация и осушение для расширения с/х угодий. Последнее отмечено на территории принадлежавшей Финляндии. Помимо спуска уровня воды заболачиванию озер способствовало и эвтрофирование, источником которого служили животноводческие фермы, реже промышленные (целлюлозо-бумажные комбинаты) предприятия. В

дальнейшем, за 40-45 летний период проводился мониторинг сукцессий на находящихся вблизи С-Петербурга заболачивающихся из-за обмеления озер (Смагин, 2003; Смагин, Бойчук, 2022; 2023). Кроме того, дважды, за двадцатилетний период, проведено исследование растительности заболачивающихся Раковых озер, находящихся в центре Карельского перешейка, спущенных в середине XIX века (Государственный …, 2022; Экосистемы …, 2011). В ходе исследования болот Северо-Запада обнаружен еще рад озер, ставших болотами в наше время. О недавнем их «озерном» прошлом есть достоверные свидетельства очевидцев, топографические карты и сведения в научной литературе

Спущенные озера заболачиваются «зарастанием от дна» и «образованием надиловых сплавин» (Ниценко, 1967). Последнее происходит при значительном понижении воды в болотном озере с ровным и плоским дном. При снижении уровня воды во всем озере до глубины около полметра, образование травяной и травяно-моховой растительности со значительным участием мхов рода *Warnstorfia* происходит одновременно по всей акватории. Наиболее быстро, естественно, вблизи берега, но и с многочисленными очагами зарастания в центральной части, появляющихся на отмелях, каркасах из коряг или в силу «посева» птицами. При зарастании только что спущенного озера важную роль имеют морфологические особенности растений, способствующие быстрому расселению. Растительность на начальном этапе зарастания отличает мозаичность, сообщества состоят из небольшого числа видов. Сукцессии протекают быстро, в течение короткого времени, порядка 10-15 лет, на образовавшихся на месте бывших озер болотах. травяные и травяно-гипновые сообщества сменяются травяно-сфагновыми, причем растительный покров утрачивает мозаичность, количество видов возрастает за счет внедрения типично болотных растений, включая представителей семейства орхидные. Через 20-30 лет образовавшееся на месте спущенного озера болото, если не знать его историю, не отличить от «обычного» травяно-сфагнового низинного болота. На отдельных его участках просматривается тренд к болоту переходного типа.

В условиях озер богатого минерального питания, часто проточных, на слое отложившегося сапропеля, при внешней схожести трансформации озерной экосистемы в болотную, сукцессионный ряд состоит из сообществ другого видового состава и не выходит со стадии низинного болота, тростникового, осокового, осоково-гипнового, где в травяном ярусе чаще доминирует *Carex diandra*, в моховом ярусе *Calliergon cordifolium*, *Calliergonella cuspidata*, *Helodium blandowii*. Посреди ставшего болотом проточного озера сохраняется пересекающий его водоток, вблизи русла которого в весенний период может образовываться временный водоем. Без внешнего воздействия такая экосистема остается стабильной длительное время.

При понижении уровня воды в озере с более глубокой центральной частью, заболачивание начинается зарастанием «от дна», на образовавшемся прибрежном мелководье и на вышедшей на поверхность части дна. Здесь образуются сообщества прибрежно-водной, а часто сразу травяной болотной растительностью, чаще осоково-сабельниковые сообщества. Для этой стадии зарастания характерна поясность. От берега к озеру наблюдается пространственный ряд сообществ: *Carex rostrata-Comarum palustre-Sphagnum riparium* → *Carex rostrata-Warnstorfia exannulata* → *Nuphar lutea- Warnstorfia exannulata*. Образование такого ряда растительности происходит очень быстро, почти сразу за понижением уровня воды, что нам удалось наблюдать в начале 1980-х гг. на ряде озер. Углубление каналов вблизи одного из озер, произошедшее на глазах автора в 1983 г., вызвало понижение уровня воды еще на 0.3 м., что отразилось на быстром расширении осоково-гипнового пояса и образования его на ранее свободном от растительности прибрежном участке. Спустя 10-15 лет при некотором расширении сплавины число звеньев ряда растительности сократилось. Осоково-гипновое сообщество исчезло,

сменившись осоково-сфагновым. Край сплавины резко обрывался к озеру, отделяясь от него узкой белокрыльниковой каймой. Внешне образовавшееся за 20-30 лет приозерное болото ничем не отличалось от обычных, часто встречающихся приозерных болот. Дальнейшие наблюдения показывают стабильность в отношении озерной и болотной экосистем. Сукцессии, причем медленные, идут внутри болотной растительности и направлены на увеличение видового состава сообществ за счет типичных для болот видов.

Мониторинг растительности заболачивающихся озер показывает активное поселение и рост на сплавинах деревьев и образование на них участков лесного болота. На мезоэвтрофных болотах появляются и расширяются черноольховые и березовые сообщества, на мезотрофных – березово-сосновые. Этому способствует нарастание вверх торфяной залежи и появление аэрируемого верхнего слоя торфа.

В последнее время часто встречаю заболачивающиеся, до полного превращения в болота, небольшие озера. Причем на топографических картах 1980-х годов они показаны озерами, в реальности же стали болотами. Участков открытой воды на них нет или почти нет. Сфагновый ковер простирается по всей поверхности. О недавнем озерном прошлом свидетельствуют «реликтовые виды» – *Nymphaea candida*, листья которой лежат поверх сфагнового ковра. Специфика заболачивания этих озер проявляется в том, что происходит нарастанием наводных сплавин, чему обычно препятствует воздействие волн. Эти же озерки укрыты от ветра лесом. Кроме того, такие озерки сразу становятся олиготрофным болотом. Видимых следов антропогенного воздействия вблизи них не замечено, видна лишь сеть лесоосушительных каналов, причем не новых. Дала ли она толчок процессу заболачивания не известно.

Примеров заболачивания озер из-за антропогенного эвтрофированияизвестно меньше. Нами такой процесс наблюдался лишь на двух озерах и ни на одном не привел к полному заболачиванию. Оба озера находились в скальном рельефе и отличались глубиной. Одно (Дроздово) было приемником стоков Приозерского целлюлозно-бумажного комбината, другое (Корбьярви) – звероводческой фермы. Эвтрофирование имело следствием заполнение чаши озера биогенным веществом, что вело к переполнению озерной чаши, подъему уровня воды и затоплению прибрежных участков. На этих участках происходило зарастание. Растительность отличалась своеобразием, имела иной состав, чем при заболачивании озер при обмелении. На одном из озер образовались сомкнутые заросли рогоза поверхность воды и ила под которыми закрывал ковер ряски. На другом озере вдоль берега образовалось подобие сплавины, покрытой ивово-осоково-белокрыльниковыми сообществами, а вблизи источника эвтрофирования и сообществами с доминированием *Cicuta virosa* и *Bidens tripartita* (Смагин, 1984). К настоящему времени источников эвтрофирования уже нет. Повторные наблюдения на озере Дроздово (Родионова и др., 1998) были проведены после прекращения поступления стоков. Рогозовые сообщества не изменили очертаний, наблюдалось включение в их состав ивы. На современном снимке видно, что площадь прибрежной растительности оз. Корбьярви осталась прежней, однако заметно образование сомкнутого кустарникового и древесного яруса из ивы и березы.

Процесс заболачивания озер, как бы далеко он не зашел не является необратимым. Мониторинг растительности, проводимый на протяжении десятилетий и сравнение современного состояния заболачивающихся озер с их описанием в литературе, позволяет увидеть и обратный процесс. Он может быть вызван как деятельностью человека, так и, в большинстве случаев, жизнедеятельностью бобров. Из шести наблюдаемых озер и бывших озер, на четырех поселились бобры и на трех оказали воздействие на ход сукцессий. Не без их участия происходили сукцессии и на двух внутриболотных озерах, описанных Богдановской-Гиенэф (1928). Бобры строят плотины

на отводящих от озер воду каналах, поднимают уровень воды на спущенных озерах и окружающей территории. Последствия этого проявляются в зависимости от подъема уровня воды и прежнего состояния экосистемы. На полностью превратившемся в осоково-сабельниково-сфагновое болото бывшем озере образуются небольшие водоемы. Происходит обратно направленный ряд сукцессий от осоково-сфагновых к осоково-сабельниковым и хвощево-сабельниковым сообществам. На болоте вокруг озера с сократившимся зеркалом воды, отмечен процесс разрушения краев сплавины и расширения зеркала воды. Причем разные части болота изменяются по-разному и направленность сукцессий на них отличается. Там, где торфяная залежь пропитывается водой и торф становится полужидким происходит смена видов сфагновых мхов на более гидрофильные. Травяно-кустарничковый ярус изреживается, в нем остается лишь редкая топяная осока. Происходит размыв обращенного к озеру края болота и увеличение зеркала озера. Там, где произошел отрыв и всплытие верхней части залежи, образуется «наводная сплавина» верхний слой торфа которой дренирован. Здесь продолжается дальнейшее нарастание сфагнового очеса вверх и нарастание дренированного слоя. На этом участке быстро формируется древесный ярус из сосны и березы. Накопившаяся масса торфа не позволяет прибывающей воде уместиться в озерной котловине. Происходит подтопление и заболачивание прилегающего к озеру суходола. Лесная растительность на нем гибнет, пространство между отмершими стволами покрывает густой белокрыльник, на месте которого постепенно формируются черноольховые сообщества, в том числе редко встречающиеся сообщества черноольшатников сфагновых (Смагин, Бойчук, 2023). Подобный ход развития наблюдается еще на ряде озер. И.Д. Богдановская-Гиенэф (1928, стр. 274) писала о полностью затянутом сфагновой сплавиной озере Сухом, посреди Таменгонтского болота, на котором в то время проводилось сенокошение. Осмотреть озеро еще не удалось, на космическом снимке видно, что на значительной площади оно опять с открытым зеркалом воды, причем уровень воды за счет перекрытия каналов бобрами, поднялся на очень большой площади. На окружающем крупном болотном массиве уровень воды стоит у поверхности. Подтоплен и окружающий болото лес, где засыхает и выпадает ель. На соседнем болоте Порзоловском (Богдановская-Гиенэф 1928) озеро в 1928 г. существовало. Затем, при торфоразработке было спущено и стало болотом, на части площади лесным. Сейчас оно представляет обводненное низинное болото с отмершим древостоем. Причина та же – бобры. Впрочем, бобры могут способствовать дренажу верхнего слоя торфа на образующихся приозерных болотах и даже их осушению вместе с понижением воды в озере. Первое наблюдал на озере Калищенском (Смагин, Бойчук, 2023), где приозерное болото пересекали частые бобровые канавы для «сплава» деревьев из ближайшего леса. Последствий для видового состава сообществ проследить, пока не удалось. Второе явление, вызванное перекрытием бобровыми плотинами впадающих в озера рек, наблюдал при маршрутных исследованиях на востоке Ленинградской и юго-западе Архангельской областей. Последствия похожи на спуск уровня воды при антропогенном осушении, ранее существовавшие приозерные болота стали расширятся в сторону озера. «Старые» и «новые» участки болота разделял заметный уступ. Процесс заболачивания озер может сдерживаться и направляться вспять и человеком, регулирующим уровень воды строительством гидротехнических сооружений. Примером этого служат Раковые озера в центре Карельского перешейка, ключевая орнитологическая территория России, охраняемая в статусе регионального комплексного заказника Ленинградской области. Поддержанию равновесия водных и болотных экосистем уделяются усилия на протяжении длительного времени (Государственный …, 2022; Экосистемы …, 2011).

Литература

Богдановская-Гиенэф И.Д. Растительный покров верховых болот русской Прибалтики // Тр. Петергофского естественно-научного ин-та. 1928. №5. С. 265–377.

Государственный природный комплексный заказник «Раковые озёра». СПб: Папирус, 2022. 384 с.

Ниценко А.А. Краткий курс болотоведения. М., 1967. 148 с.

Родионова А.С., Никитинский Ю.И., Джикович Ю.В., Смагин В.А. 1998. Влияние промышленных и бытовых стоков на флору и растительность малых озер (на примере озера Дроздово, Ленинградская область) // Бот. журн. Т. 83. №4. С.125-132.

Смагин В.А. О заболачивании озер под влиянием антропогенной евтрофикации (на примере озера Корбъярви, Южная Карелия) // Экология. 1984. №3. С. 76-78

Смагин В.А. Смены растительности при зарастании мелких водоемов под влиянием антропогенного фактора: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л., 1985. 18 с.

Смагин В.А. О сукцессиях при образовании и развитии болот на месте малых озер (Ленинградская область) // Бот. журн. 2003. Т. 88. №1. С. 76-87.

Смагин В.А., Бойчук М.А. Сукцессии при современном заболачивании озер Ленинградской области. // Бот. журн. 2022. Т. 107. №3. С. 269–286.

Смагин В.А., Бойчук М.А. Мониторинг растительности заболачивающихся малых озер в Ломоносовском районе Ленинградской области // Бот. журн. 2023. Т. 108. №2. С. 127–141.

Экосистемы заказника «Раковые озёра»: история и современное состояние // Труды Санкт-Петербургского об-ва естествоисп. 2011. Сер. 6. Т. 6. 297 с.

MODERN OVERGROWN OF SMALL LAKES: VEGETATION SUCCESSION, THEIR DIRECTION AND SPEED

V.A. Smagin

The modern waterlogging of small lakes caused by anthropogenic impact: lowering of the water level and eutrophication is considered. The author's PhD thesis is devoted to the study of vegetation successions in this process. The material was collected in 1981-83. Then, on a number of lakes located near St. Petersburg, monitoring has continued to this day. In addition, a number of lakes have been discovered that have recently become mire or completely overgrown. It was found that the process of overgrowing has uneven character, intense immediately after shallowing, then slowing down. In the course of successions, species composition communities typical for mires vegetation are formed. However, the seemingly irreversible process can be reversed by the activity of beavers, which has become increasingly noticeable recently.

МОРСКИЕ МЕРОМИКТИЧЕСКИЕ ОЗЕРА: ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ

А.Н. Строганов, Н.Н. Луговой, Е.В. Пономарева
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

На основе материалов из литературных источников, а также собственных исследований рассматриваются особенности формирования структуры вод прибрежных меромиктических озер бассейнов Северного Ледовитого, Тихого, Атлантического океанов. Анализируются отличительные черты в формировании и состоянии водного

баланса меромиктического озера на о-ве Кильдин в Баренцевом море, обеспечивающие его относительную стабильность в течение длительного периода.

Водоемы с устойчивой вертикальной стратификацией воды (за ними благодаря исследовательским работам И. Финденегга и Дж. Э. Хатчинсона закрепилось наименование меромиктических) (Краснова, 2021), возникающей вследствие различий в плотности ее слоев, представляют собой важный и привлекательный для гидрологических, биологических, палеогеологических, палегеографических и др. исследований природный феномен. Меромиктический водоем часто является и объектом охраны природной среды в связи с тем, что в силу специфичности экологических условий в таких водоемах создаются условия для формирования эндемичной фауны. Например, такой таксон подвидового уровня, входящий в Красную книгу России, как кильдинская треска из озера Могильного, благодаря целой системе адаптаций сформировал в очень небольшом для активного мигранта водоеме устойчивую, продуктивную, хотя и малочисленную популяцию.

В плане исследования эволюционных процессов, изучения формирования биоразнообразия наибольший интерес представляют эктогенные прибрежные морские меромиктические водоемы в форме лагунных (водоем, отделенный от моря наносной косой с узким проливом), фиордовых (залив, отделенный от моря узкой мелководной протокой и разделенный поперечными порогами на отдельные водоемы с разным уровнем вертикальной стратификации и поступлением пресной воды из впадающей в кутовой зоне реки), ковшовых (глубоководный водоем, соединенный с морской акваторией узким, длинным, мелководным проливом) озер, плотностная стратификация в которых образуется как результат перекрытия морской воды пресным стоком; при этом в большинстве случаев в придонной зоне формируется бескислородный слой (Лаппо, 1945; Показеев, Филатов, 2002).

Различного типа меромиктические озера известны в прибрежных зонах бассейнов Атлантического, Тихого, Северного Ледовитого океанов. Так, например, на Большом Соловецком острове в Белом море длительное время исследуется ковшовое озеро Долгое. На побережье и островах Кандалакшского залива Белого моря известен целый ряд меромиктических озер лагунного типа (лагуна на м. Зеленом, озеро на о. Тонисоар, вершина губы Глубокой около о-ва Сонострров и др.) (Краснова, 2021). На Аландских о-вах (Финляндия) в Балтийском море известны несколько меромиктических озер лагунного типа. Это достаточно большие озера площодью от 60 и до 200 га и глубинами от 18 до 35м (Hakala, 2004).

В литературных источниках, описывающих особенности биологии озерной трески, дается характеристика меромиктических прибрежных водоемов на Баффиновой Земле (Канада). Так, меромиктическое фиордовое озеро Огак (площадь 148 га, глубина 40 м) с выраженной слоистостью (опресненный, морской и бескислородный сероводородный слои) опресняется за счет подтока из реки, а подпитка морской водой происходит регулярно единожды в месяц за счет высоких сизигийных приливов (высота приливов в весенний период достигает 12 м). Сходная структура обеспечения пресными и морскими водами в другом озере на Баффиновой Земле под названием Квазигиалиминик (площадь около 1000 га, глубина 38 м). В меромиктическом ковшовом озере Тариярусвик (площадь 540 га, глубина 80 м) обеспечение пресной водой за счет небольших ручьев, а обеспечение морской водой также за счет высоких приливов (Hardie, 2003; Hardie et al., 2008).

Много полуизолированных лагун с разной степенью опреснения, в том числе меромиктических, известно на восточном берегу Камчатки, на о-ве Сахалин. Так, кардинальные изменения произошли в структуре вод лагунного оз. Тунайча (площадь

17400 га, глубина 34 м) после изоляции его намывной косой от акватории Охотского моря. В настоящее время водоем имеет двуслойную структуру с хемоклином на глубине 15 м и сероводородом под ним в концентрации до 300–320 мкг/л, постоянная связь с морской акваторией залива Мордвинова осуществляется через обмелевшую протоку. При этом через эту протоку в оз.Тунайча заходит большое количество морских и проходных рыб от наваги и сельди до кеты и горбуши. Пресная вода поступает в озеро за счет нескольких рек (Саматов и др., 2002; Полупанов, Лабай, 2016; Полупанов и др., 2016; Никитин, Метленков, 2016).

Таким образом, все упоминавшиеся прибрежные меромиктические озера характеризуются сходной схемой обеспечения структурированности водной толщи. Пресная вода приносится реками и ручьями, поступление морской воды идет по поверхности либо постоянно через протоки, либо периодически с высокими приливами. При этом североатлантический и северотихоокеанский регионы обладают определенными отличиями, обусловленными их ледниковой историей. Если материковые зоны атлантического побережья в период последнего оледенения «просели», испытывая воздействие многометровых ледниковых масс, а теперь находятся в процессе гляциоизостатического поднятия, то азиатское побережье Северной Пацифики ледникового воздействия такой мощности не испытывало и, соответственно, находится в стационарном состоянии. Этим, в частности, объясняется то, что здесь, практически, отсутствуют озера фиордового типа и ухудшение связи с морскими акватории происходит за счет расширения намывных кос, а не сопровождается поднятием преграждающих порогов, как это наблюдается и на побережье Белого моря, и побережье Балтийского моря, а также и в североамериканском регионе.

На фоне изложенного в значительной степени выделяется специфика формирования структуры водной массы небольшого прибрежного меромиктического озера Могильного (площадь 10 га, глубина 17м) на о-ве Кильдин в Баренцевом море, демонстрирующего в этом свою уникальность.

Коренные породы на о-ве Кильдин представлены позднепротерозойской терригенной осадочной толщей. Многочисленные гранитные валуны, рассеянные по поверхности острова, могли быть принесены тем же ледником, что покрывал Кольский полуостров. Этот ледниковый покров представлял собой северо-восточную оконечность Скандинавского ледникового щита, достигшего наибольшего развития 20–18 тыс. лет назад, гляциоэвстатическая регрессия в это время в Баренцевоморском регионе составляла –90 ÷ –100 м. (Митяев, Корсун, 2010). Используя данные этих авторов, Н.Н. Луговым предлагается оригинальная трактовка формирования перемычки и отделения озера от моря. Юго-восточный край террасового сегмента сформирован единым довольно крупным галечным древним береговым валом длиной 2,2 км и шириной местами более 100 м. Абсолютные отметки его гребня около 15 м над уровнем моря, что позволяет датировать его формирование временем среднеголоценовой трансгрессии тапес (около 6 тыс. лет назад). Западная оконечность этого вала примыкает к южному краю котловины оз. Могильного, а перемычка озера является его продолжением. Опираясь на эти факты, можно предположить, что вышеописанные береговой вал и сегмент террасы являются остатками некогда единой формы – окаймляющей косы, сформированной во время трансгрессии тапес и отчленившей от моря лагуну – будущую котловину оз. Могильного. Таким образом, оно впервые сформировалось как изолированный водоем уже 6 тыс. лет назад. Ядро современной перемычки озера представляет собой абразионный останец древней косы, с признаками современной пляжевой аккумуляции. По морфологическим признакам современного перехлеста морских вод через гребень перемычки уже не происходит. Принимая во внимание высоту штормового заплеска в 3 м и высоту гребня перемычки в 4,5 м, а также скорость

относительного подъема территории в позднем голоцене в 3-6 мм/год (Митяев, Корсун, 2010), можно вычислить, что перемычка перестала перехлестываться волнами довольно давно, около 500 - 250 лет назад.

Непреодолимая в современный период даже для штормовых волн и самых высоких приливов перемычка, имея значительную ширину, отличается высокими фильтрационными свойствами (коэффициент фильтрации ее породы принимают в пределах 520 куб.м/сутки). Видимо, формирование основания перемычки под ледниковым воздействием (с присутствием валунного материала разной окатанности, гравийно-галечниковых прослоев при отсутствии включений ракушечника и песка (Реликтовое озеро Могильное, 1975) создало условия для высокой фильтрационной способности, в результате чего по настоящее время сохраняется интенсивный обмен вод в системе озеро-море. При этом параметры этого обмена, по крайней мере, в последние более, чем 100 лет, сохраняются достаточно постоянными. За счет интенсивной фильтрации морских и пресных вод через тело перемычки, как и в конце XIX века, начале-середине XX века (Дерюгин, 1925; Реликтовое озеро Могильное, 1975), так и в наше время сохраняются амплитуды и периодичность приливно-отливных явлений в озере Могильном, что подтвердили наши измерения динамики уровня озера: амплитуда составляла 7-8 см, а максимальный отлив и максимальный прилив в озере, по сравнению с Кильдинской салмой, запаздывали приблизительно на 3 часа. В определенной степени устойчивое состояние озера подтверждают данные о его размерах. Площадь озера Могильного, определенная нами в июле 2012 г. с использованием данных GPS-навигации, составляла 104659 кв.м. Ранее на основе метода планиметрирования был получен похожий результат 106600 кв.м (Реликтовое …, 1975; Строганов и др., 2015).

Таким образом, по типу являясь лагунным, озеро Могильное формирует свою структуру несколько отличным образом, чем упоминаемые выше озера. Если поступление пресных вод поверхностное, то морская вода поступает не по поверхности, а методом фильтрации сквозь перемычку. В таких условиях озеро Могильное, находясь, как и другие озера североатлантических и арктических побережий, в условиях послеледникового поднятия, тем не менее сохраняет свою меромиктическую структуру, а не переходит в пресноводную (голомиктическую) фазу, как это происходит со многими прибрежными озерами.

Литература

Дерюгин К.М. Реликтовое озеро Могильное // Тр. Петергоф. естественно-науч. ин-та. 1925. №2. 98 с.

Лаппо С.Д. Справочная книжка полярника: Краткие сведения об океанографии, климате, животном мире и населении Арктики. М.: Главсевморпути, 1945. 423 с.

Митяев М.В., Корсун С.А. Геолого-геоморфологическое и неотектоническое строение восточной части острова Кильдин // Геоморфология. 2010. №1. С. 77-86.

Никитин В.Д., Метленков А.В. Структура ихтиоценозов, численность и биомасса рыб // Водная биота озера Тунайча (южный Сахалин) и условия ее существования. Южно-Сахалинск: Сахалинский НИИ рыбного хозяйства и океанографии, 2016. С. 200-203.

Полупанов П.В., Лабай В.С. Физико-географический очерк // Водная биота озера Тунайча (южный Сахалин) и условия ее существования. Южно-Сахалинск: Сахалинский НИИ рыбного хозяйства и океанографии, 2016. С.26-32.

Полупанов П.В., Лабай В.С., Золотухин Е.Г. Гидрологический очерк // Водная биота озера Тунайча (южный Сахалин) и условия ее существования. Южно-Сахалинск: Сахалинский НИИ рыбного хозяйства и океанографии, 2016. С.33-38.

Показеев К.В., Филатов Н.Н. Гидрофизика и экология озер. Т.1. Гидрофизика. М.: Физический факультет МГУ, 2002. 276с.

Реликтовое озеро Могильное. Л.: Наука, 1975. 298 с.

Саматов А.Д., Лабай В.С., Мотылькова И.В., Могильникова Т.А., Заварзин Д.С., Ни Н.К. Краткая характеристика водной биоты оз. Тунайча (Южный Сахалин) в летний период // Труды СахНИРО. 2002. Т. 4. С. 258-269.

Строганов А.Н., Криксунов Е.А., Зуйкова Н.В., Мухина Н.В., Бурменский В.А., Семенова А.В., Шадрин А.М. 2015. Особенности биологии кильдинской трески Gadus morhua kildinensis Derjugin, 1920 (Gadidae) // Биология моря. Т. 41. С. 395-402.

Hakala A. Meromixis as a part of lake evolution; observations and a revised classification of true meromictic lakes in Finland // Boreal Env. 2004. Res. 9 P. 37–53.

Hardie D.C. The Evolutionary Ecology of Arctic Fishes // Arctic. 2003. V. 56. №4. P. 430-433.

Hardie D.C., Renaud C.B., Ponomarenko V.P., Mukhina N.V., Yaragina N.A., Skjæraasen J.E., Hutchings J.A. The Isolation of Atlantic Cod, Gadus morhua (Gadiformes), Populations in Northern Meromictic Lakes - A Recurrent Arctic Phenomenon // Journal of Ichthyology. 2008. V. 48. №3. P. 230-240.

MARINE MEROMICTIC LAKES: FORMATION FEATURES

A.N. Stroganov, N.N. Lugovoy, E.V. Ponomareva

Based on literature sources and our own research, the article examines the formation features of the water structure of coastal meromictic lakes in the Arctic, Pacific, and Atlantic Ocean basins. Distinctive features in the formation and state of the water balance of the meromictic lake on Kildin Island in the Barents Sea, ensuring its relative stability over a long period, are analyzed.

ВЛИЯНИЕ РЕКРЕАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ НА ЗАРАСТАНИЕ ОЗЕРА БЕЛОЕ (ЛУНИНЕЦКИЙ РАЙОН БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ)

Н.Ю. Суховило

Белорусский государственный университет

В статье рассмотрена многолетняя динамика площади зарастания и структуры сообщества макрофитов озера Белое, испытывающего высокую рекреационную нагрузку. Описано сокращение площади зарастания озера более, чем в 10 раз, почти полное исчезновение полушника озерного, формирование пояса надводных растений, который ранее в озере отсутствовал.

Мягководные лобелиевые озера — это водоемы, характеризующиеся наличием водных растений из рода *Lobelia*, которые произрастают в мягких, кислых и бедных питательными веществами условиях. Такие водоемы отличаются уникальным сочетанием гидрохимических показателей (низкие минерализация воды, водородный показатель, концентрация биогенных элементов, высокая прозрачность), что отражается на их биоразнообразии. Присутствие лобелии и полушника в этих озерах может указывать на хорошее качество воды и пригодность среды обитания для определенных водных организмов. Однако в последние десятилетия, в связи с ростом антропогенной нагрузки на водоемы, происходят негативные изменения в их экосистемах. Поэтому

изучение уникальных озерных экосистем представляется актуальным для своевременной разработки комплекса мер по их сохранению.

Озеро Белое, расположенное в Лунинецком районе Брестской области, является ядром заказника республиканского значения «Лунинский». Котловина озера карстового происхождения, овальной формы, вытянута с юго-запада на северо-восток на 0,65 км при максимальной ширине 0,43 км (средняя ширина – 0,36 км).

Подводная часть котловины имеет воронкообразную форму. Литораль шириной 15–25 м (на юго-востоке – до 40 м) из четко выраженного уступа переходит в крутой сублиторальный склон. Ложе плоское, занимает ограниченную (13 % акватории) площадь, максимальные глубины приурочены к центру озера (Озера Беларуси…, 2004).

Площадь зеркала озера – 0,23 км^2, объем водной массы – 1,45 млн. м^3. Озеро среднеглубокое. Максимальная глубина составляет 17 м, средняя – 7,6 м.

За период исследований (с 1950 г.) минерализация воды в озере менялась от 27,93 мг/дм^3 в 2016 г. до 96,3 мг/дм^3 в 1950 г. Корректность данных 1950 г. вызывает некоторые сомнения, однако возможное объяснение высокой минерализации заключается в том, что до 1944 г. на берегу располагалась деревня Белое Озеро, и водоем испытывал антропогенную нагрузку. С 1989 до 2016 гг. минерализация в озере колебалась в пределах от 27,93 до 35,9 мг/дм^3. При отборе проб в 2022 г. минерализация воды в поверхностном слое была равна 51,09 мг/дм^3, в придонном она возрастала до 64,11 мг/дм^3. В 2023 г. она снизилась почти на 20 мг/дм^3, что может быть объяснено более влажными погодными условиями.

За последние 35 лет состав воды в озере существенно изменился. В 1989 г. вода относилась к гидрокарбонатному кассу кальциевой группы. В период 2001 – 2011 гг. вода озера относилась к сульфатному классу кальциевой группы, к 2016 г. снова трансформировавшемуся в зональный гидрокарбонатный класс кальциевой группы. В настоящее время в оз. Белое, как и во многих других озерах Беларуси, наблюдается переход в гидрокарбонатный класс магниевой группы. Достаточно высокая доля ионов натрия (до 10,6 %-экв.) свидетельствует о его привносе купающимися.

Минеральные формы азота в воде водоемов представлены во всех формах (нитратной, нитритной, аммонийной). Концентрация нитритов в воде не превышает 0,02 мг/дм^3, содержание нитратов колеблется в достаточно широких пределах – от 0,05 до 0,58 мг/дм^3 и находится в обратной зависимости с ионами аммония и в прямой – с количеством растворенного кислорода. Резкий скачок концентрации ионов аммония произошел в 2022 г., когда этот показатель возрос с 0,05 до 4,07 мг/дм^3, что превышает ПДК для хозяйственно-питьевого водоснабжения в 1,6 раза, для рыборазведения – в 6,3 раза. Основной причиной увеличения данного показателя является неограниченный поток отдыхающих, особенно в выходные дни. Зимой 2023 г. содержание NH_4^+ было ниже чувствительности метода, что свидетельствует о его окислении до нитратов, концентрация которых была равна 0,81 мг/дм^3.

В период с 2001 по 2011 г. в озере отмечался резкий рост концентрации фосфатов до 0,01 – 015 мг/дм^3, однако результаты анализа проб воды 2016, 2022 и 2023 гг. свидетельствуют о его отсутствии в поверхностном слое, что может быть связано с активным потреблением фосфора надводными макрофитами, площадь распространения и биомасса которых значительно возросла, а также фитопланктоном. В придонном слое в июле 2023 г. концентрация фосфат-иона составила 0,014 мг/дм^3.

В многолетнем разрезе наблюдается рост водородного показателя с 6,5 в 1989 г. до 8,4 в 2022 г., что вместе с деградацией ацидофильного вида полушника озерного позволяет сделать вывод о том, что озеро переходит из ацидотрофного состояния в эвтрофное (Гидрохимический …, 2023). Несмотря на изменение состава воды, озеро

отличается достаточно высокой ее прозрачностью – до 4–5 м в летний период, однако известны случаи ее снижения до 1,5–2 м.

В зимний период протекают процессы восстановления после высокой рекреационной нагрузки. В феврале 2023 г. водородный показатель опустился до 5,4, что соответствует природному значению.

Несмотря на то, что озеро расположено в заказнике, оно испытывает сильное антропогенное воздействие, основным направлением которого является рекреационная нагрузка. Всё восточное побережье озера представляет собой пляж с травянистой растительностью, которая к концу летнего сезона оказывается частично вытоптанной. Но наиболее существенные изменения происходят в самой водной массе из-за привноса биогенных элементов. Несмотря на наличие уборных, оборудованных с соблюдением водоохранного законодательства, многие отдыхающие их не используют. Мытье посуды осуществляется прямо в озере, здесь же отдыхающие проводят гигиенические процедуры с использованием СПАВ. Всё это приводит к изменению состава воды и отражается на развитии гидробионтов в целом и макрофитов в частности. На северном берегу расположен детский оздоровительный лагерь «Спутник», на южном – гостевой дом «Белое озеро», которые также являются источниками поступления эвтрофирующих веществ. На пляже присутствуют информационные стенды, регламентирующие правила пребывания, в местах произрастания охраняемых видов – полушника озерного и лобелии Дортмана – установлены таблички, предупреждающие о необходимости соблюдать режим охраны.

Наличие пункта мониторинга высшей водной растительности на оз. Белое обусловило хорошую изученность ее характера распространения и видового состава, а также позволило проследить их динамику.

В 2001 г. высшая водная растительность в озере была развита слабо и представлена двумя видами полностью погруженных гидрофитов и четырьмя видами аэрогидрофитов (полупогруженных растений). Растения с плавающими листьями в озере отсутствовали. У самого уреза воды на отдельных участках вдоль западного берега встречались осока, стрелолист стрелолистный, частуха подорожниковая, аир обыкновенный. В литоральной зоне на глубинах от 0,2 до 0,7 м вдоль всего побережья озера произрастал редкий, охраняемый вид растения лобелия Дортмана, образовывавшая почти непрерывное кольцо шириной 2–3,5 м. Вторым представителем погруженной растительности в озере являлся полушник озерный – редкий, охраняемый в Беларуси вид. Полушник произрастал почти повсеместно на литорали с глубины 1,0 м и сублиторальном склоне до глубины 5,0 м. Проективное покрытие достигало 90–100 %. Средняя биомасса полушниковых зарослей составляла 0,250 кг/м^2. Озеро Белое зарастало на 35% своей площади, как показано на рисунке.

К 2006 г. характер зарастания водоема существенно не изменился.

Обследование озера в 2011 г. показало, что степень и характер зарастания водоема (по сравнению предыдущими обследованиями в 2001 и 2006 гг.) высшей водной растительностью протерпели значительные изменения. Зарастало всего 15 % площади озера (в 2001 и 2006 годах этот показатель составлял 35 %).

Высшая водная растительность в озере была развита слабо и представлена двумя видами полностью погруженных гидрофитов и шестью видами аэрогидрофитов (полупогруженных растений). Растения с плавающими листьями были представлены одним видом – горцем земноводным. У самого уреза воды и до глубины 0,3 – 0,5 м на отдельных прибрежных участках встречались осока вздутая, тростник обыкновенный, рогоз узколистный, частуха подорожниковая, ситняг игольчатый, аир болотный. В литоральной зоне на глубинах от 0,2 до 1,0 м вдоль всего побережья озера произрастал редкий, охраняемый вид растения лобелия Дортмана, образующая почти непрерывное

кольцо шириной 2,0–3,5 м. Вторым представителем погруженной растительности в озере являлся полушник озерный – редкий, охраняемый в Беларуси вид. Полушник произрастал спорадически на глубинах 1,0 – 3,0 м. Единично встречался водяной мох.

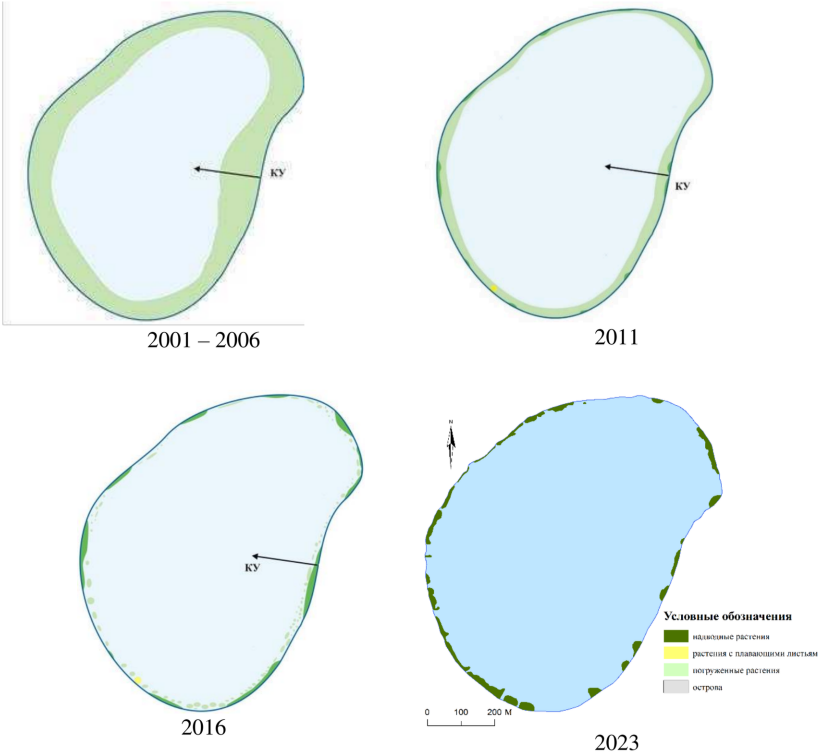


Рис. Динамика площади и характера зарастания оз. Белое (Лунинецкий район) в 2005–2023 гг.

Следует отметить, что в 2011 г. по сравнению с 2006 и 2001 гг. на мелководье, в литоральной зоне, появилось заметно больше зарослей аэрогидрофитов, зафиксировано произрастание горца земноводного (ранее растения с плавающими листьями в озере отсутствовали). Снизилась площадь зарастания полушника озерного, произраставшего ранее почти повсеместно на литорали с глубины 0,7 м и сублиторальном склоне до глубины 5,0 м. Степень зарастания водоемов полушникового подтипа, к коим относится и оз. Белое, напрямую и тесно связана с прозрачностью и минерализацией воды. Поэтому наблюдающиеся изменения в экосистеме озера можно связать с некоторым (хотя и незначительным) увеличением минерализации и уменьшением прозрачности воды. А появление в видовом составе и распространение тростника, рогоза и горца земноводного может указывать на тенденцию изменения типа зарастания озера с гидрофитного на гело-гидрофитный.

К 2016 г. увеличилась площадь зарастания аэрогидрофитами (надводными растениями). В начале 2000-х годов данная группа растений отмечалась единичными

экземплярами или небольшими группами на глубинах от 0,0 до 0,5 м. Надводные растения были представлены четырьмя видами, среди которых доминировала осока вздутая. За 15 лет они сформировали пояс, ранее отсутствовавший. Эти макрофиты прерывистой полосой, ширина которой составляла 2–15 м, были распространены по всему периметру озера. Они формировали, преимущественно, чистые ассоциации, состоящие из тростника обыкновенного и рогоза узколистного. Данные виды были выявлены в 2011 г. В 2016 г. они образовывали заросли с проективным покрытием до 30 %, обилие соответствовало 3 баллам. Среди зарослей рогоза и тростника в качестве примеси отмечались стрелолист стрелолистный, частуха подорожниковая и ситняг игольчатый.

Растения с плавающими листьями были представлены горцем земноводным. Вид произрастал единичными экземплярами или небольшими группами (по 3–5 растений) в юго-западной части озера. Погруженные растения были представлены лобелией Дортмана, полушником озерным и единичными экземплярами водяного мха.

Лобелия Дортмана отмечалась на глубинах от 0,3 до 0,8 м по всему периметру озера. Отсутствовала она только в пляжных зонах озера, т.к. там она вытаптывается отдыхающими. Ее обилие колебалось от 2 – 3 баллов на периферии зарослей до 4 баллов в оптимальных условиях произрастания. Проективное покрытие изменялось соответственно от 10 до 60 %, в 2011 г. величина покрытия достигала 80 %. Полушник озерный произрастал на глубинах 0,6–2,8 м, что свидетельствует о сокращении площади и глубины его произрастания.

Изменения в характере и степени зарастания озера Белое проявились в формировании пояса надводных растений, распространении новых видов (тростник обыкновенный рогоз узколистный), сокращении площади зарастания озера до 10 % площади, преимущественно, за счет погруженных растений. Видимо, такие изменения связаны с активной рекреационной деятельностью на прилегающих к водоему территориях. Здесь находятся оздоровительные лагеря, развит (в теплое время года) временный неорганизованный отдых на берегах озера.

В настоящее время полоса надводных макрофитов, представленных, в основном, тростником, сформировалась окончательно. Прерывается полоса тростника лишь у входов в воду. В западной части озера в формировании полосы воздушно-водных растений также участвуют осока вздутая и дербенник иволистный (*Lythrum salicaria* Blush), на востоке встречается ситняг игольчатый. Частуха подорожниковая отмечена не была. Полушник озерный произрастает отдельными угнетенными экземплярами у западного берега на глубинах 1,3–1,7 м. Лобелия Дортмана, ранее формировавшая сплошную полосу, распространена лишь у западного побережья озера на глубинах от 0,25 до 1,6 м. Горец земноводный обнаружен не был, поэтому ярус растений с плавающими листьями в озере отсутствует (Уязвимость…, 2024).

Таким образом, в озере наблюдается деградация высшей водной растительности, что выражается в уменьшении степени зарастания с 35 % площади акватории до 3,2 %. Практически полностью исчезли погруженные макрофиты, доминирующая роль принадлежит воздушно-водным. На участках берега, используемых для входов в воду, растительность отсутствует полностью. Для восстановления популяции полушника озерного необходимо жесткое ограничение потока отдыхающих и экологическое просвещение населения.

Литература

Суховило Н.Ю., Мороз А.И., Новик А.А., Власова Д.Б. Гидрохимический режим ацидотрофных озер Беларуси в условиях климатических изменений и антропогенной

нагрузки // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. 2023. №2. С. 47–58.

Озёра Беларуси: Справочник. Минск: БГУ, 2004. 284 с.

Проведение наблюдений за ресурсами водной растительности, а также за средой ее произрастания. Отчет о НИР. Минск: БГУ, 2000.

Уязвимость экосистем ацидотрофных озер Беларуси – мест обитания охраняемых видов флоры и фауны – к климатическим изменениям Отчет о НИР. Минск: БГУ, 2024. 101 с.

INFLUENCE OF RECREATIONAL LOAD ON THE OVERGROWING OF LAKE BELOE (LUNINETS DISTRICT OF BREST REGION)

N.Yu. Sukhovilo

The article is devoted to the long-term dynamics of the overgrowth area and the structure of the macrophyte community of Lake Beloe, which experiences high recreational load. It describes a reduction in the overgrowth area of the lake by more than 10 times, the almost complete disappearance of *Isoetes lasustris* L., and the formation of a belt of emerged plants, which was previously absent in the lake.

МИКРОПЛАСТИК В ЭКОСИСТЕМЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА: ОТ НАБЛЮДЕНИЙ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ МАССООБМЕНА И ТРАНСФОРМАЦИИ ВЕЩЕСТВА В ВОДНОЙ ЭКОСИСТЕМЕ

Д.А. Тихонова[1,2], В.В. Дмитриев[2]

[1]Институт озероведения РАН – Санкт-Петербургский ФИЦ РАН

[2]Санкт-Петербургский государственный университет

Загрязнение микропластиком представляет значимую экологическую проблему в водных экосистемах, где он служит субстратом для микробных сообществ («пластисферы») и влияет на процессы массообмена. Разработана математическая модель массообмена, учитывающая «лабильный» и «стойкий» микропластик как субстрат для бактериопланктона, участвующего в их гидролизе. Концентрация микропластика в Ладожском озере была впервые переведена из численной в массовую форму. Хотя доля микропластика во взвеси невелика, и основная его масса приходится на «стойкие» частицы, масса более мелких («лабильных») фракций, вероятно, превышает обнаруженную из-за увеличения их количества при уменьшении размера частиц.

Проблема изученности загрязнения микропластиком окружающей среды в целом и водных объектов в частности остаётся актуальной на протяжении нескольких десятилетий, однако данные о влиянии микропластика на процессы массообмена в водных экосистемах до сих пор остаются недостаточными. Исследованиями показано, что со временем на поверхности частиц микропластика формируются биоплёнки, состоящие из различных микроорганизмов, которые образуют своеобразную мини-экосистему, адаптированную к специфическим условиям обитания. В 2013 году американские исследователи ввели термин «пластисфера», описывающий сообщества микроорганизмов, развивающихся на пластиковых частицах (Zettler et al., 2013). Благодаря гидрофобным свойствам пластика и его медленному разложению, он

становится привлекательным субстратом для колонизации микроорганизмами (Чубаренко и др., 2021). Состав пластисферы включает фототрофов (цианобактерии и диатомовые водоросли), гетеротрофов (кокки, стебельковые бактерии, спирохеты), хищников (колонии мшанок, хоанофлагеллаты) и сапротрофов (грибные гифы) (Dey et al., 2022). В целом таксономическое разнообразие оказывается выше у бактерий, живущих на пластике по сравнению с бактериями, ассоциированными с органическим субстратом, или свободно плавающими бактериями (Dussud et al., 2018). Так, цианобактерии могут накапливаться на пластиковых частицах в более высоких концентрациях, чем в водной толще или на органических субстратах, однако вклад фотосинтетической активности таких цианобактерий в общую первичную продукцию морских экосистем остаётся малоизученным (Jacquin et al., 2019). Гетеротрофные бактерии, связанные с пластиком, также демонстрируют более высокую продуктивность по сравнению со свободноживущими бактериями (Dussud et al., 2018).

Хотя бактерии и грибы в составе пластисферы способны участвовать в деградации пластика, скорость этого процесса остаётся чрезвычайно низкой, т.к. большинство пластиков устойчивы к биодеградации, что обуславливает их долговечность, измеряемую десятилетиями или веками (Krueger et al., 2015). Некоторые виды пластмасс и добавки к ним выступают источниками органического углерода, который определённые микроорганизмы способны усваивать (Lear et al., 2021). Этот процесс может способствовать накоплению растворённого органического углерода (РОУ) в экосистемах с высоким содержанием микропластика (Huang et al., 2021). Так, в поверхностных водах наблюдается увеличение концентрации РОУ, высвобождаемого в результате разложения пластика (Galgani, Loiselle, 2021). Это стимулирует активность гетеротрофных бактерий и переработку органического вещества (Romera-Castillo et al., 2018), что, в свою очередь, усиливает бактериальное дыхание и потребление кислорода. Подобные изменения оказывают прямое воздействие на биогеохимический углеродный цикл на этой стадии (de Almeida et al., 2023).

По данным некоторых исследований, биомасса известной пластисферы составляет приблизительно 0,01–0,2% от общей микробной биомассы в поверхностных водах открытого океана (Mincer et al., 2016). В то же время практически отсутствуют исследования, посвященные пластисфере в пресноводных экосистемах. Также мало исследований посвящено влиянию микропластика на экосистему через его потребление зоопланктоном. Микропластик представляет собой непитательный побочный продукт, который зоопланктон может проглатывать вместе с пищей. Это уменьшает потребление зоопланктоном первичных продуцентов и связанных с ними питательных веществ. Согласно моделированию (Kvale et al., 2019), в водоёмах с высоким содержанием питательных веществ потребление микропластика зоопланктоном снижает выедание первичных продуцентов, что способствует увеличению их продукции. Однако этот эффект не выявлен в олиготрофных водоемах.

Микропластик, обнаруженный в ходе лабораторных исследований, теоретически может быть поглощен зоопланктоном, однако на практике эти организмы чаще потребляют более мелкие частицы микропластика (до 50 мкм (Botterell et al., 2022)) или нанопластик, который сложнее обнаружить в реальных условиях. Результаты наших предыдущих исследований показывают, что количество микропластика увеличивается с уменьшением его размера (Tikhonova et al., 2024a, Tikhonova et al., 2024b). При исследовании прибрежных вод Северной Атлантики ученые выявили, что концентрации микропластика при отборе проб сетью с диаметром ячеек в 100 мкм значительно превышали концентрации, полученные более крупными сетями (Lindeque et al., 2020). Экстраполяция этих данных предполагает, что при использовании сетей с размером ячеек 1 мкм концентрация частиц может быть выше в 300 раз. Это указывает на то, что

значительная часть мелкого микропластика остаётся неучтённой в натурных исследованиях, и в окружающей среде преимущественно присутствуют наиболее мелкие частицы. Вероятно, реальное количество микропластика, доступного для потребления зоопланктоном, значительно превышает данные, полученные при лабораторных исследованиях. Это связано с тем, что при отборе проб обычно используются сети с размером ячеек 100 мкм и более, что не позволяет учитывать более мелкие частицы.

Исследования микропластика в Ладожском озере проводятся с 2018 года, выявляя значительные различия в концентрациях частиц в зависимости от разных факторов (Tikhonova et al., 2024a, Tikhonova et al., 2024b). На основе существующих методов недавно была впервые проведена оценка содержания микропластика в Ладожском озере и некоторых других водных объектах в переводе на массовую форму выражения концентрации (Tikhonova et al., 2024b). Содержание микропластика в поверхностном слое озера с учетом предыдущих исследований составило 0,000001–0,000013 мг/л, из которых 86% приходится на более крупный («стойкий») микропластик. Для сравнения, средняя концентрация взвеси в Ладожском озере составляет около 0,6 мг/л, из которых на органическую часть приходится 30–70% в зависимости от сезона (Петрова, Игнатьева, 2021). Результаты не позволяют пока однозначно ответить на вопрос, зависит ли концентрация микропластика в пресноводных объектах от сезона года. Хотя доля микропластика во взвеси невелика, учитывая преобладание мелких частиц в водных экосистемах, масса «лабильного» пластика, вероятно, превышает ожидаемую.

Одним из этапов мониторинга микропластика в водной среде является изучение скрытых от непосредственного наблюдения процессов массообмена и трансформации веществ в водных экосистемах. Имеющийся многолетний опыт создания точечных, боксовых (резервуарных), непрерывных моделей водных экосистем (Сергеев и др., 2021) позволил нам вплотную приблизиться к разработке модели массообмена и трансформации веществ в пространственно-однородной водной экосистеме, в которую явно включены два компонента микропластика. В итоге была создана 20-и компонентная модель, учитывающая 146 скоростей процессов массообмена.

В состав компонентов модели вошли: агрегированный фитопланктон (*F,* мг сух.в./л); агрегированный зоопланктон (*Z*, мг сух.в./л), который может питаться как фильтратор и как хищник; суммарный ассоциированный с лабильным детритом (*D1,* мг сух.в./л*)* бактериопланктон (*B1*, мг сух.в./л), осуществляющий ферментативный гидролиз лабильного детрита; суммарный ассоциированный с стойким детритом (*D2,* мг сух.в./л*)* бактериопланктон (*B2*, мг сух.в./л), осуществляющий ферментативный гидролиз стойкого детрита (лабильность и стойкость детрита определяется в модели заданием экономических коэффициентов для *B1* и *B2*); суммарный ассоциированный с «лабильным микропластиком» (*П1,* мг сух.в./л) бактериопланктон (*ВП1,* мг сух.в./л), осуществляющий ферментативный гидролиз «лабильного микропластика» *П1*; суммарный ассоциированный со «стойким микропластиком» (*П2,* мг сух.в./л) бактериопланктон (*ВП2,* мг сух.в./л), осуществляющий ферментативный гидролиз «стойкого микропластика» *П2* («лабильность» и «стойкость» микропластика определяется в модели заданием экономических коэффициентов для *ВП1* и *ВП2*); «лабильный микропластик» (*П1*), - взвешенное в воде вещество «лабильного микропластика», сравнительно быстро подверженное бактериальному гидролизу и выраженное массой сухого вещества (мг сух. в/л); «стойкий микропластик» (*П2*), - взвешенное в воде вещество «стойкого микропластика», сравнительно медленно подверженное бактериальному гидролизу и выраженное массой сухого вещества (мг сух. в/л); *C, N, P* – углерод, азот, фосфор, входящие в состав растворенных в воде органических веществ и выраженные в мг С, мг N, мг Р в литре соответственно; *X* (мг Х/л) – вещество «сухого остатка» содержащееся в составе растворенных органических

веществ, не включающее в себя углерода, азота, фосфора, и др., но составляющее вместе с ними сухой вес живых компонентов модели и детрита; NH_4 , NO_2 , NO_3 – аммонийный, нитритный, нитратный азот, входящих в состав минеральных веществ, растворенных в воде, выраженный в мг $N\text{-}NH_4$, $N\text{-}NO_2$, $N\text{-}NO_3$ в литре воды соответственно; PO_4 - фосфор, входящий в состав минеральных веществ, растворенных в воде (минеральный фосфор, мг $P\text{-}PO_4$/л), CO_2 – углерод, содержащийся в воде в виде двуоксида углерода, растворенного в воде, мг $C\text{-}\ CO_2$/л; O_2 – растворенный в воде кислород, мг O_2/л.

Модель в итоге представляет собой систему существенно нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, содержащих в правых частях уравнений балансы скоростей массообмена для всех компонентов модели. Система открыта по веществу для всех компонентов. Интегрирование модели осуществляется методом Рунге-Кутты для годового этапа функционирования водной экосистемы с шагом моделирования 1 сутки.

Образование первичной продукции фитопланктоном в модели происходит с учетом изменения температуры воды, освещенности, минерального питания и влияния токсикантов по типу Л, М, или ЛМ моделей. Зоопланктон в модели всеядный. Дополнительно он может потреблять *П1*. В модели имеется возможность для реализации разных схем образования «отбросов пищи» зоопланктоном, соотношения в них твердых и жидких отбросов. Второй пластик *П2* – некормовой для *Z*. Учитываются: трофическое взаимодействие Z с компонентами пищи и её разная усвояемость. Валовая продукция бактерий зависит от температуры воды и содержания в воде потребляемого субстрата. Для живых компонентов также учитываются: естественное отмирание, траты на обмен, выедание зоопланктоном, внешнее поступление (изъятие) компонентов на шаге по времени. Лабильность и стойкость микропластика в модели определяется экономическими коэффициентами бактерий и также может зависеть от типа полимера и от размера частиц микропластика. Поскольку определить тип полимера можно только для ограниченной выборки частиц, при моделировании можно условно считать лабильным микропластик, с размером частиц <1 мм.

Работа Тихоновой Д.А. выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН (тема FFZF-2024-0002 "Современные угрозы водным объектам и инновационные методы их сохранения, восстановления и рационального использования").

Литература

Петрова Т.Н., Игнатьева Н.В. Взвешенные вещества // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. М.: Российская академия наук, 2021. С. 287-299.

Сергеев Ю.Н., Кулеш В.П., Дмитриев В.В. Пространственно-неоднородная модель экосистемы эстуария р. Невы. Имитации последствий строительства Санкт-Петербургской дамбы. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2021. 310 с.

Чубаренко И.П., Есюкова Е.Е., Хатмуллина Л.И., Лобчук О.И., Исаченко И.А., Буканова Т. В. Микропластик в морской среде. М.: Научный мир, 2021. 520 с.

Botterell Z., Bergmann M., Hildebrandt N., Krumpen T., Steinke M., Thompson R. C., Lindeque P. K. Microplastic ingestion in zooplankton from the Fram Strait in the Arctic // Science of the Total Environment. 2022. V. 831. 154886.

de Almeida M.P., Gaylarde C.C., Baptista Neto J.A., Delgado J.F., Lima L.S., Neves C.V., Pompermayer L.L. O, Vieira K., da Fonseca E.M. The prevalence of microplastics on the earth and resulting increased imbalances in biogeochemical cycling // Water Emerging Contaminants & Nanoplastics. 2023. V. 2. 7.

Dey S., Rout A.K., Behera B.K., Ghosh K. Plastisphere community assemblage of aquatic environment: plastic-microbe interaction, role in degradation and characterization technologies // Environmental Microbiome. 2022. V. 17. 32.

Dussud C., Hudec C., George M., Fabre P., Higgs P., Bruzaud S., Delort A.M., Eyheraguibel B., Meistertzheim A.L., Jacquin J., Cheng J., Callac N., Odobel C., Rabouille S., Ghiglione J.F. Colonization of Non-biodegradable and Biodegradable Plastics by Marine Microorganisms // Frontiers in Microbiology. 2018. V. 9. 1571.

Galgani L., Loiselle S.A. Plastic pollution impacts on marine carbon biogeochemistry // Environmental Pollution. 2021. V. 268. 115598.

Huang D., Tao J., Cheng M., Deng R., Chen S., Yin L., Li R. Microplastics and nanoplastics in the environment: macroscopic transport and effects on creatures // J. Hazard Mater. 2021. V. 407. 124399.

Jacquin J., Cheng J., Odobel C., Pandin C., Conan P., Pujo-Pay M., Barbe V., Meistertzheim A.L., Ghiglione J.F. Microbial Ecotoxicology of Marine Plastic Debris: A Review on Colonization and Biodegradation by the «Plastisphere» // Frontiers in Microbiology. 2019. V. 10. 865.

Krueger M.C., Harms H., Schlosser D. Prospects for microbiological solutions to environmental pollution with plastic // Applied Microbiology and Biotechnology. 2015. V. 99. P. 8857–8874.

Kvale K., Prowe A.E.F., Chien C.T., Landolfi A., Oschlies A. Zooplankton grazing of microplastic can accelerate global loss of ocean oxygen. Nature Communications. V. 12. 2358.

Lear G., Kingsbury J.M., Franchini S., Gambarini V., Maday S.D.M., Wallbank J.A., Weaver L., Pantos O. Plastics and the microbiome: impacts and solutions // Environmental Microbiome. 2021. V. 16. 2.

Lindeque P.K., Cole M., Coppock R.L., Lewis C.N., Miller R.Z., Watts A.J.R., Wilson-McNeal A., Wright S.L., Galloway T.S. Are we underestimating microplastic abundance in the marine environment? A comparison of microplastic capture with nets of different mesh-size // Environmental Pollution. 2020. V. 265. 114721.

Mincer T.J., Zettler E.R., Amaral-Zettler L. A. Biofilms on Plastic Debris and Their Influence on Marine Nutrient Cycling, Productivity, and Hazardous Chemical Mobility // Hazardous Chemicals Associated with Plastics in the Marine Environment. Springer International. 2016. P. 221–233.

Romera-Castillo C., Pinto M., Langer T.M., Álvarez-Salgado X.A., Herndl G.J. Dissolved organic carbon leaching from plastics stimulates microbial activity in the ocean // Nature Communications. 2018. 9. 1430.

Tikhonova D.A., Karetnikov S.G., Ivanova E.V., Shalunova E.V. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga // Water Resources. 2024. Vol. 51. P. 146–153.

Tikhonova D.A., Shalunova E.P., Karetnikov S.G. Comparing the efficiency of two water sampling methods for studying the content of microplastics in water bodies // Limnology & Freshwater Biology. 2024. V. 6. P. 1434-1453.

Zettler E.R., Mincer T.J., Amaral-Zettler L.A. Life in the «Plastisphere»: Microbial Communities on Plastic Marine Debris // Environmental Science & Technology. 2013. V47(13). P. 7137-7146.

MICROPLASTICS IN THE ECOSYSTEM OF LAKE LADOGA: FROM OBSERVATIONS TO MODELING OF MASS EXCHANGE AND SUBSTANCE TRANSFORMATION PROCESSES IN THE AQUATIC ECOSYSTEM

D.A. Tikhonova, V.V. Dmitriev

Microplastic pollution represents a significant environmental problem in aquatic ecosystems, where it serves as a substrate for microbial communities ("plastisphere") and influences mass exchange processes. A mass exchange mathematical model has been developed, accounting for "labile" and "persistent" microplastics as substrates for bacterioplankton involved in their hydrolysis. The concentration of microplastics in Lake Ladoga has been converted for the first time from numerical to mass form. Although the proportion of microplastics in the suspension is low, with most of its mass attributed to "persistent" particles, the mass of smaller ("labile") fractions likely exceeds the observed amount due to their higher numbers as their size decreases.

THE INFLUENCE OF ABIOTIC FACTORS ON OVERGROWTH OF LAKES IN THE PROTECTIVE ZONE OF THE SARALINSKY SECTION OF THE VOLGA-KAMA NATURE RESERVE

R.R. Khasanov, I.I. Ziganshin, D.V. Ivanov, A.B. Alexandrova, V.S. Valiev
Institute of Ecology and Subsoil Use, Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan

The study analyzes the influence of abiotic factors on the overgrowth of higher aquatic vegetation in lakes of various origins within the protective zone of the Saralinsky section of the Volga-Kama Nature Biosphere Reserve. The work examined 94 parameters, including morphometric characteristics of the lakes, physicochemical properties of bottom sediments, and hydrochemical indicators. Statistical data processing with Spearman's correlation coefficient revealed key patterns. The proportion of the littoral zone correlates with the accumulation of nitrogen ($r = 0.77$, $p < 0.05$) and organic matter in bottom sediments (BS), which stimulates vegetation development. The granulometric composition of the sediment affects plant distribution: cattails dominate in silty sediments (correlation with clay: $r = 0.72$, $p < 0.05$), while reeds thrive in sandy sediments. As lake area increases, the concentration of pollutants (ammonium, nitrates, phenols, COD) decreases due to the dilution effect ($r = -0.62$ to -0.74, $p < 0.05$). Heavy overgrowth (50–95% of the water area) is associated with eutrophication, increased pH in bottom sediments and water ($r = 0.61$–0.71, $p < 0.05$), and phenol accumulation in water ($r = 0.81$, $p < 0.05$).

Abiotic factors play a key role in shaping surface water quality and the dynamics of water body overgrowth by higher aquatic vegetation. Successional processes in aquatic ecosystems depend on a combination of factors, including morphometric, hydrochemical, sedimentological, and climatic parameters (Avakyan, Shirokov, 1990). Their role in the overgrowth of water bodies remains insufficiently studied, especially for specific types such as isolated bays of large plain reservoirs.

The isolated bays of the Kuibyshev Reservoir, formed by the separation of deeply indented water areas, represent unique research objects. Their specific morphology (small area, shallow depth, indented shoreline) increases their vulnerability to eutrophication, climatic fluctuations, and anthropogenic impacts, posing risks to biodiversity and necessitating sustainable development measures.

The study focused on 13 lakes in the protective zone of the Saralinsky section of VKNBR, located in the Laishevsky District of the Republic of Tatarstan (fig. 1). Field research data on bottom sediments and hydrochemistry from 2021–2024 (Ziganshin, Ivanov, Khasanov, 2021) were used as the basis, along with morphometric parameters obtained via geospatial technologies using Google Earth Engine satellite imagery. Morphometric calculations, bathymetric mapping, and mapping of overgrowth areas by aquatic vegetation were performed in GIS Mapinfo Pro 16.0. A total of 94 parameters were analyzed, including lake

morphometrics, physicochemical properties of bottom sediments, and hydrochemistry. Statistical processing was conducted using Statistica 8.0, with Spearman's correlation coefficient applied to assess relationships between overgrowth and water body parameters.

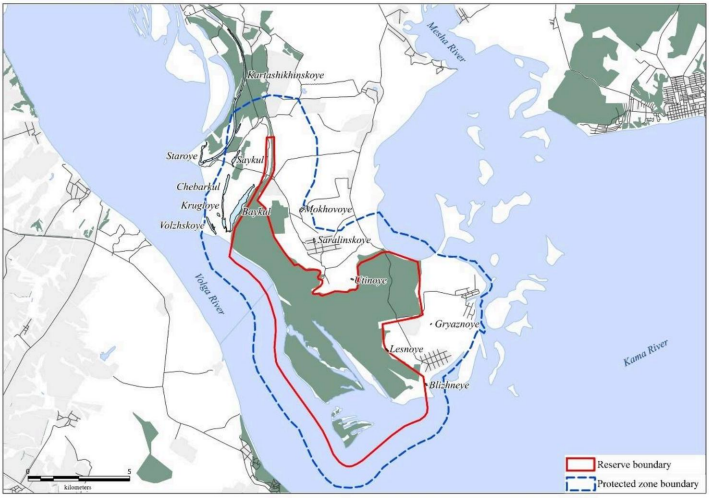


Fig. 1. Map of the study area

Most lakes are located on the second floodplain terrace of the Volga and are isolated bays of the Kuibyshev Reservoir. These water bodies formed due to the natural separation of deeply indented areas after the reservoir's creation, making them valuable for studying ecosystem evolution under anthropogenic influence. These lakes are relatively large with complex shorelines inherited from former bays (Ziganshin et al., 2024). The largest in the study are Kartashikhinskoye (58.2 ha), Baykul (52.2 ha), and Chebarkul (22.9 ha). These lakes feature extensive shallow zones (up to 2 m deep), making them particularly sensitive to hydrological changes. In contrast, lakes on the third floodplain terrace are smaller and of different origins (Ziganshin, Ivanov, Khasanov, 2021). Most formed through suffusion-karst (e.g., Gryaznoye, Lesnoye, Utinoye) or karst processes (Mokhovoye). Saralinskoye Lake in Tatar Saraly is an artificial pond.

Overgrowth levels in water bodies largely depend on depth and the proportion of shallow zones (Papchenkov, 2001). According to GOST R 59054-2020, the studied lakes fall into the category of small, shallow water bodies with low water volume, reflecting their origin.

The proportion of shallow zones (up to 2 m deep) varies significantly among the lakes, ranging from 13.7% in the deep karst lake Mokhovoye to 100% in small suffusion-karst lakes like Utinoye and Medovoye. This variability stems from genetic differences:

- isolated bays have moderate shallow zones (23.6–55.1%);
- suffusion-karst lakes are either entirely shallow (100%) or have high proportions (~90%);
- karst lakes have the smallest shallow zones (13.7%) due to deep funnels.

Five lakes (Utinoye, Gryaznoye, Blizhneye, Medovoye, Saykul) stand out, with shallow zones covering over 98% of their area, creating ideal conditions for macrophyte growth. Even genetically similar lakes show significant differences, highlighting the role of local factors (hydrodynamics, shoreline exposure, anthropogenic influence) in shaping depth structure.

Table 1. Origin, key morphometric parameters, bottom sediment thickness, and overgrowth degree of the lakes

Lake	Type*	Area (ha)	Depth (m)		Volume (thousand m³)	Littoral (%)	Overgrowth (%)	BS Thickness (cm)
			Avg	Max				
II Floodplain Terrace								
Baykul	III	52.2	1.4	2.7	747.5	23.6	19.5	27
Blizhneye	III	0.4	0.8	1.2	3.4	99.4	90.1	25
Volzhskoye	III	8.7	1.2	2.3	105.2	38	21.0	26
Kartashikhinskoye	III	58.2	0.8	2.7	465.4	55.1	1.5	40
Krugloye	III	1.5	0.8	1.3	12.2	50.1	88.3	13
Saykul	III	5.8	0.6	1.0	33.2	98.7	53.6	32
Staroye	III	10.6	1.5	2.9	158.9	25	0.1	48
Chebarkul	III	22.9	1.1	2.7	257.6	24.8	47.5	36
III Floodplain Terrace								
Gryaznoye	I	0.2	0.7	0.7	1.3	100	93.1	100
Lesnoye	I	0.6	0.8	1.2	4.6	89.8	34.7	100
Mokhovoye	II	1.9	3.6	8.2	69.9	13.7	56.4	105
Saralinskoye	IV	1.1	0.8	1.5	8.7	82.8	0.0	20
Utinoye	I	0.7	0.4	0.5	2.8	100	23.7	100

**Lake types: I – suffusion-karst, II – karst, III – isolated bays, IV – artificial (dug ponds)*

Based on Papchenkov's (2001) classification, lakes were categorized by overgrowth degree (Fig. 2):

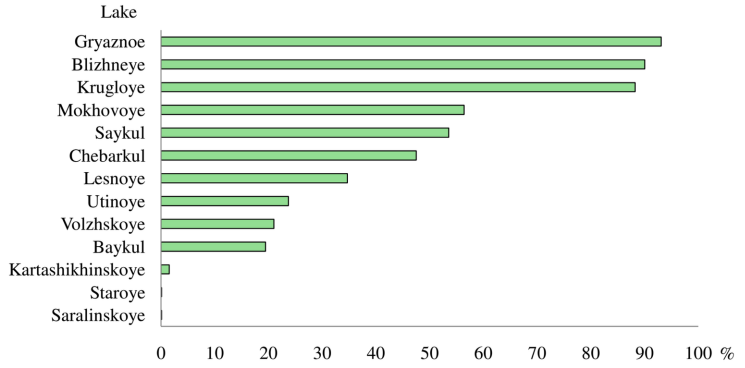


Fig. 2. Degree of lake overgrowth

1) non-overgrown or nearly non-overgrown – vegetation covers <1% of the water area (Saralinskoye, Staroye);

2) very lightly overgrown – 1–5% (Kartashikhinskoye);

3) moderately overgrown – 11–25% (Baykul, Volzhskoye, Utinoye);

4) heavily overgrown – 41–65% (Lesnoye, Chebarkul, Saykul, Mokhovoye);

5) extremely heavily overgrown – 66–95% (Krugloye, Blizhneye, Medovoye).

Shallow lakes (<2 m) are prone to rapid overgrowth, organic accumulation, and waterlogging. In 64% of the studied lakes, shallow zones (>50% of the area) explain their high vulnerability to overgrowth.

Correlation analysis revealed significant relationships between littoral zone overgrowth and nutrient accumulation. Increased vegetation area in the littoral zone correlates with organic matter and nitrogen accumulation in bottom sediments ($r = 0.66$; $p < 0.05$). A strong positive correlation exists between littoral area and nitrogen content ($r = 0.77$; $p < 0.05$), underscoring the role of shallow zones in nutrient accumulation.

Common reed (Phragmites australis) and narrow-leaved cattail (Typha angustifolia) dominate the littoral zone. These species show distinct preferences for sediment composition: reed predominantly inhabits sandy soils, while cattail clearly gravitates towards silty sediments, which is statistically confirmed by strong correlations with the content of fine ($r= 0.82$, $p <0.05$) and coarse ($r= 0.61$, $p <0.05$) dust, silt fraction ($r= 0.61$, $p <0.05$) and the proportion of clay in bottom sediments ($r= 0.72$, $p <0.05$).

It has been established that with an increase in the water area there is a reliable decrease in the concentration of biogenic elements: ammonium ($r = -0.62$; $p < 0.05$), nitrates ($r = -0.74$; $p < 0.05$), as well as a decrease in the values of chemical oxygen demand ($r = -0.69$; $p < 0.05$).

These trends are explained by the dilution effect in large water bodies. At the same time, in heavily overgrown bays (category 5 according to Papchenkov's classification), opposite processes are observed. Here, a statistically significant increase in the pH of bottom sediments was recorded ($r = 0.71$; $p < 0.05$), which is associated with the intensive accumulation of organic matter and the release of carbon dioxide during its microbial destruction.

The complex influence of abiotic factors on lake overgrowth highlights the need for an integrative approach to assess aquatic ecosystems. Shallow depth, extensive littoral zones, and silty sediments accelerate succession and eutrophication. Key relationships include littoral area, organic/nitrogen accumulation, and vegetation distribution tied to sediment type. Large lakes are less prone to pollutant accumulation, while shallow ones eutrophy faster.

These findings can aid in predicting the transformation of similar water bodies under climate change.

References

1. Авакян А.Б., Широков В.М. Комплексное использование и охрана водных ресурсов. Минск: Университетское; 1990. 240с.

2. ГОСТ Р 59054–2020. Охрана окружающей среды. Поверхностные и поземные воды. Классификация водных объектов.

3. Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р. Генезис и морфометрическая характеристика озер охранной зоны Саралинского участка Волжско-Камского заповедника // Российский журнал прикладной экологии. 2021. №1. С. 36–43.

4. Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р. Осадконакопление в озерах охранной зоны Саралинского участка Волжско-Камского заповедника // Российский журнал прикладной экологии. 2021. №2. С.47–52.

5. Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р., Кочетков Д.А. Генезис и морфометрические особенности отчлененных заливов Казанского района переменного подпора Куйбышевского водохранилища // Российский журнал прикладной экологии. 2024. №4. С. 10–17

6. Папченков В.Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль: ЦМП МУБиНТ; 2001. 214 с.

ВЛИЯНИЕ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЗАРАСТАНИЕ ОЗЕР ОХРАННОЙ ЗОНЫ САРАЛИНСКОГО УЧАСТКА ВОЛЖСКО-КАМСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

Р.Р. Хасанов, И.И. Зиганшин, Д.В. Иванов, А.Б. Александрова, В.С. Валиев

Исследование посвящено анализу влияния абиотических факторов на зарастание высшей водной растительностью озер различного генезиса в охранной зоне Саралинского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника. В работе проанализировано 94 параметра, включая морфометрические характеристики озер, физико-химические свойства донных отложений и гидрохимические показатели. Статистическая обработка данных с использованием коэффициента корреляции Спирмена выявила ключевые закономерности. Доля литоральной зоны коррелирует с накоплением азота ($r = 0,77$, $p < 0,05$) и органики в донных отложениях (ДО), что стимулирует развитие растительности. Гранулометрический состав грунта влияет на распределение растений: рогоз доминирует в илистых отложениях (корреляция с глиной: $r = 0,72$, $p < 0,05$), тростник – в песчаных. С увеличением площади озера снижается концентрация загрязняющих веществ (аммоний, нитраты, фенолы, ХПК) за счет эффекта разбавления ($r = -0,62$– $-0,74$, $p < 0,05$). Сильное зарастание (50–95% акватории) связано с эвтрофикацией, повышением pH донных отложений и воды ($r = 0,61$–$0,71$, $p < 0,05$) и накоплением фенолов в воде ($r = 0,81$, $p < 0,05$).

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРНО-РЕЧНЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ (НА ПРИМЕРЕ РЕКА СВЕТЛОГОРКА – ОЗЕРО ТИХОЕ, Г. СВЕТЛОГОРСК, КАЛИНИНГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Н.Н. Цветкова, О.В. Казимирченко
Калининградский государственный технический университет

Представлены результаты комплексного мониторинга реки Светлогорки и образованного на ней озера Тихого, расположенных в Калининградской области в городе-курорте федерального значения Светлогорске. Показаны гидрохимические особенности и микробиологическая специфика озерно-речной системы в условиях антропогенно освоенной среды.

Калининградская область относится к регионам, которые высоко обеспечены водными ресурсами. При этом большая часть водных экосистем относится к категории «малых», которые не охвачены государственной сетью мониторинга. Малые водные объекты, несмотря на то что расположены в одной климатической зоне, отличаются специфическими гидролого-экологическими особенностями: водный режим, как правило, проявляется азонально, абиотические и биотические условия характеризуются большой изменчивостью. Небольшая буферная емкость малых водных объектов определяет сниженную способность их к самоочищению и достаточно быстрый отклик на природные или антропогенные воздействия.

Мониторинг малых водных систем способствует выявлению и корректировке последствий антропогенных нагрузок и климатических изменений по таким параметрам, как изменение уровня воды, температуры, сезонного хода гидрохимических параметров, а также экосистемных процессов, в частности, сообщества микроорганизмов. Биохимическая активность, способность быстро реагировать на изменяющиеся условия

окружающей среды позволяют микроорганизмам, с одной стороны, выполнять функцию основного звена в процессах самоочищения водоема, с другой стороны – служить индикаторами загрязнений.

Связь особенностей загрязнения водоемов с характером изменений гидрохимических показателей, микробиологических процессов, количественного и качественного состава водных микробиоценозов определяет роль комплексных исследований при оценке состояния водных экосистем.

С целью оценки современного экологического состояния малых водных систем как индикаторов изменения состояния среды под влиянием антропогенных и природных факторов нами начаты комплексные исследования на реке Светлогорке и образованном на ней озере Тихом.

Река Светлогорка принадлежит к рекам бассейна Балтийского моря. Площадь водосбора – 25.4 км^2, длина водотока – 15.5 км, в том числе 1.5 км по территории города Светлогорска – курорта федерального значения. Водный режим реки относится к типу равнинных приморских рек. Тип питания – смешанный. Расход воды в устьевой части изменяется от 0.05 до 0.20 м^3/с. Река в городе Светлогорске была зарегулирована во второй половине XIII века, на ней образован пруд Тихий (Федорова, 2024). Традиционно пруд Тихий называют озеро Тихое, как «озеро» данный водный объект обозначается на общегеографических картах. Озеро овальной формы, вытянуто с запада на восток. Длина озера 0.74 км, средняя ширина 0.12 км. Площадь акватории составила 0.09 км^2. Средняя глубина – 1.7 м, максимальная – более 4.0 м. Характеризуется продольно-осевым типом проточности. По своим морфометрическим параметрам относится к прудам.

В настоящее время система река Светлогорка – озеро Тихое имеет большое значение для поддержания ландшафтной структуры города-курорта Светлогорска и является ключевым элементом в естественной составляющей природно-территориального комплекса городской среды.

Исследования на реке Светлогорке и озере Тихом проводили в период с 2017 по 2021 гг. на стандартных станциях (рис.). Периодичность отбора проб – ежемесячно.

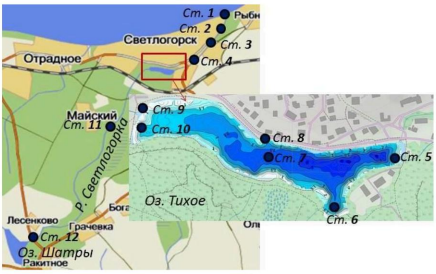


Рис. Станции мониторинга системы р. Светлогорка – оз. Тихое

При полевых исследованиях осуществляли стандартный комплекс гидрологических работ, согласно рекомендациям (Берникова и др., 2008). Пробы воды на гидрохимический анализ отбирали в пластиковые емкости из поверхностного горизонта (0.1-0.2 м). Химический анализ проб проводили по общепринятым методикам (Берникова и др., 2008) в течение суток после отбора.

Для микробиологического анализа воду отбирали с глубины 0.1-0.15 м от поверхности. Пробы воды из озера отбирали на расстоянии 2 м от берега и из центральной части, из реки – в центре водотока. Воду помещали в стерильные стеклянные бутылки с плотно закрывающимися пробками. Использовали метод десятикратных серийных разведений с последующим пересевом на питательные среды общего и специального назначения. Бактериальные культуры изучали по культуральным, морфологическим и физиолого-биохимическим признакам, идентификацию бактерий вели по определителям (Общая …, 2004; Методы …, 1989; Определитель …, 1997; Пивоваров, Королик, 2000; Вейант и др., 1999).

Концентрация основных ионов и минерализация в озере и реке мало отличались: воды средней минерализации, гидрокарбонатно-кальциевые, первого типа. Общая минерализация была несколько понижена в период паводков и половодий (230-340 мг/дм^3) и повышена в меженные периоды (400-470 мг/дм^3). Вода в исследуемых водных объектах – «мягкая» (2.01-2.72 мг·экв./дм^3), в меженные периоды – «умеренно жесткая» (3.04-3.49 мг·экв./дм^3). Прослеживался сезонный ход в концентрации макрокомпонентов. Воды в реке и озере слабощелочные, ближе к нейтральным. Нарушение сезонного хода pH в исследованных водоемах не выявляли. В озере Тихом pH изменялся от 6.97 до 7.10. В реке Светлогорке pH был выше на уровне 7.0-7.2.

Кислородные условия во все исследованные месяцы в реке и озере были относительно благополучными (за исключением ст. 6, где фиксировали дефицит O_2), хотя нельзя не отметить общий сниженный кислородный фон, причиной которого служит питание водотоков грунтовыми водами. Максимум кислорода отмечен в весенний и осенне-зимний период (при отсутствии ледостава). В это же время отмечалась максимальная прозрачность в озере – 1.5-2.0 м. Содержание кислорода летом было пониженным, прозрачность вод составляла 0.8-1.2 м. Годовой ход растворенного кислорода был относительно близок к правильному. Насыщенность воды кислородом в озере изменялась от 20-50 до 120% и более. Такая широкая амплитуда характерна для эвтрофных водоемов. В реке ход кислорода более сглажен и во все исследованные периоды относительное содержание кислорода находилось на уровне 70-100%.

Содержание органических веществ в озере и реке изменялось в широких пределах, однако в распределении органических веществ сезонный ход не прослеживался. В озере величина перманганатной окисляемости попадала в класс «повышенная» и «высокая» (5-20 и более мгО/дм^3), в реке – содержание органических веществ «среднее» (4-10 мгО/дм^3). Такая величина окисляемости позволяет говорить о повышенной продуктивности экосистемы озера Тихого, что естественно, учитывая положение водоема в нижнем течении реки, замедленный водообмен, а также дренирование городской территории. Водоем можно рассматривать как «ловушку» загрязнений, поступающих от различных природных и антропогенных источников.

В исследуемой экосистеме величина $БПК_5$ изменялось от 3.2 до 9.6 мгO_2/дм^3, достигая максимальных значений в озере Тихом. В зимний период наблюдали максимум $БПК_5$ на большинстве станций, что согласуется с естественным ходом. Однако в период активной вегетации величина $БПК_5$ не снижалась, а на некоторых станциях (ст. 5, 6, 10) даже увеличивалась, что позволяет говорить о нарушении процессов самоочищения и утилизации легкоразлагаемой органики.

Содержание азота аммонийного в реке и озере различалось мало. Сезонный ход азота аммонийного прослеживался слабо, отмечен максимум в весенний период, что не согласуется с его сезонными изменениями и может свидетельствовать о загрязнении. Сезонный ход нитритов также не просматривался.

Минимальное количество фосфора фосфатов в реке и озере было растворено в весенне-летний период, когда особенно велико его потребление автотрофами. Накопление фосфатов происходило осенью и зимой. В озере фосфатов было растворено больше (до 0.25 мгР/дм^3), чем в реке (до 0.15 мгР/дм^3).

Воды реки Светлогорки и озера Тихого перегружены соединениями железа. Больше всего железа было растворено в реке – 0.4-1.6 мг/дм^3, в озере концентрация общего железа изменялась от 0.2 до 1.2 мг/дм^3. Повышенные концентрации всех форм железа объясняются естественными причинами и свидетельствуют о большой доле подземных вод в питании водных объектов в течение всего года. Отчетливой сезонной закономерности в распределении железа в исследуемой экосистеме не просматривалось. Вероятно, поступление железа определяется сложными гидрогеологическими

особенностями территории.

Минимальные показатели содержания гетеротрофной микрофлоры в воде озера Тихое регистрировали весной, максимальные – в летний сезон года. Осенью показатель общей бактериальной обсемененности озерной воды составлял 4.7×10^4 КОЕ/мл. Зимой, несмотря на понижение температуры воды, выявили незначительное понижение общего количества сапрофитных бактерий до 8.9×10^3 КОЕ/мл, что может определяться продолжающимися процессами микробиологической деструкции органического вещества за счет анаэробных и факультативно-анаэробных бактерий. В весенний сезон года отмечали резкое снижение показателя общей бактериальной обсемененности озерной воды в среднем до 1.7×10^2 КОЕ/мл, что, вероятнее, определялось пониженной температурой воды в озере в момент отбора проб, связанной с особенностями погодных условий в период исследований. Летом при повышении температуры воды в озере количество гетеротрофов резко увеличивалось и составляло в среднем 3.6×10^6 КОЕ/мл. Вспышка численности гетеротрофов в воде в этот сезон, помимо температурного фактора, могла также определяться увеличением рекреационной нагрузки на озеро в связи с началом туристического сезона и дополнительным привнесением органического вещества со стоком реки Светлогорки, что согласуется с данными по величине $БПК_5$, перманганатной окисляемости и концентрации кислорода.

В реке, как и в озере, максимум численности гетеротрофных бактерий отмечали в летний сезон года, минимум – весной. В осенний сезон года количество сапрофитной микрофлоры в воде составляло в среднем 1.7×10^4 КОЕ/мл. Зимой, при понижении температуры воды в реке, не регистрировали существенных изменений общего количества гетеротрофов. Показатель общей бактериальной обсемененности речной воды в среднем составлял 1.2×10^4 КОЕ/мл. Развитие микрофлоры в воде реки Светлогорки в этот сезон может быть связано с повышенной температурой воды и отсутствием ледового покрова на реке в исследуемый период, а также с влиянием поверхностного стока с территорий населенных пунктов. Весной, при средней температуре воды + 7 °С, общая бактериальная обсемененность воды реки Светлогорки понижалась до 2.3×10^3 КОЕ/мл. Резкое уменьшение количества бактерий в речной воде могло, прежде всего, определяться температурным фактором, так как при таких значениях температуры активного развития мезофильной гетеротрофной микрофлоры еще не происходит. В летний сезон года общее количество сапрофитов в микробиоценозе воды реки Светлогорки вновь увеличивалось и достигало в среднем 5.7×10^6 КОЕ/мл. Так как река практически на всем протяжении мелководна, то летом происходит прогрев всей толщи воды, активное перемешивание, это создает благоприятные условия для развития аэробных и факультативно-анаэробных мезофильных бактерий. Кроме того, высокие показатели бактериальной обсемененности воды могут быть связаны с привнесением в реку аллохтонных бактерий кишечной группы, что на фоне нарушенного сезонного хода органических веществ и $БПК_5$ подтверждает наличие загрязнения.

Структуру микробиоценоза воды озера Тихое в большей степени составляли автохтонные группы бактерий, среди которых доминировали грамотрицательные бактерии рода *Pseudomonas* (55.7% штаммов). Грамотрицательные бактерии родов *Aeromonas*, *Flavobacterium*, грамположительные бактерии родов *Kurthia, Bacillus* в общем составе микрофлоры занимали 21.4% штаммов с практически равными долями. Незначительное разнообразие бактерий, возможно, связано с физико-химическими условиями обитания бактериопланктона в верхних слоях воды, а также с влиянием грунтовых вод, перегруженных железом, участвующих в питании водоема. По-нашему мнению, большая часть бактерий, участвующих в минерализации органического вещества, концентрируется в иловых отложениях в глубоких слоях озера. Доля

аллохтонной (привнесенной в озеро) бактериофлоры составляла 22.9 % штаммов, были идентифицированы бактерии фекальной группы родов *Enterobacter* (преобладали), *Citrobacter*, *Escherichia coli*. Привнесение кишечных бактерий в озеро происходит как с речным стоком, так и непосредственно с территории водосбора.

В составе микрофлоры воды реки Светлогорка преобладали факультативно-анаэробные грамотрицательные палочковидные бактерии. Количественное соотношение встречаемых в микрофлоре речной воды родов бактерий показало, что основной микробный фон реки формировался за счет кишечных групп бактерий (*E. coli*, *Enterobacter*, *Citrobacter*), привносимых с различного рода стоками (65,5% штаммов в общем составе бактериофлоры). Однако доминирование кишечных бактерий в речной воде не лимитировало развитие собственной гетеротрофной микрофлоры реки. Автохтонную микрофлору реки формировали в разных соотношениях грамотрицательные (бактерии родов *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Alcaligenes*, *Flexibacter*, *Flavobacterium*) и грамположительные бактерии (бактерии родов *Micrococcus*, *Bacillus*, *Sarcina*), составляя в общем микробном фоне 34.5 % штаммов.

Проведенные исследования позволяют заключить, что экологическое состояние озера Тихого и реки Светлогорки напряженное. Нарушение сезонного хода соединений азота, органических веществ, $БПК_5$ в озере Тихом указывает на изменения процессов продуцирования и деструкции органического вещества, замедление процессов самоочищения. Изучение состава микробиоценозов исследованных типов водоемов в сезонном аспекте выявило, что микрофлора реки Светлогорка, сформированная гетеротрофными группами бактерий как автохтонного, так и аллохтонного происхождения, оказывает существенное влияние на структуру микробиоценозов воды озера Тихое. В микробном фоне реки Светлогорка перед впадением в озеро постоянно регистрировали фекальных кишечных бактерий, это определяет санитарное состояние озера.

Санитарно-микробиологические исследования согласуются с данными по гидрохимическим показателям воды и свидетельствуют о повышенной антропогенной нагрузке на экосистему реки Светлогорки и озера Тихого. Озеро можно рассматривать как естественный геохимический барьер, с одной стороны, уменьшающий вынос загрязнений в море, с другой – способствующий росту загрязнения реки Светлогорки в нижнем течении и увеличению, таким образом, биогенной нагрузки на Балтийское море с речным стоком. В условиях городской среды изученные водные объекты особенно уязвимы, и требуют дополнительных мер по сохранению их экологического состояния. Такие системы являются важными объектами мониторинга, так как дают возможность косвенно отследить уровень антропогенного давления на природную среду.

Литература

Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 288 с.

Общая и санитарная микробиология с техникой микробиологических исследований. М.: Медицина, 2004. 576 с.

Определитель бактерий Берджи / Под ред. Дж. Хоулта. М.: Мир, 1997. Т. I. 432 с.

Пивоваров Ю.П., Королик В.В. Санитарно-значимые микроорганизмы (таксономическая характеристика и дифференциация). М.: ИКАР, 2000. 268 с.

Федорова М. Озеро Тихое: живописное место на окраине Светлогорска, как спланировать отдых у водоёма для всей семьи. 2024. (Электронный ресурс). URL: https://experience.tripster.ru/sights/ozero-tihoe/ (дата обращения 26.01.2025 г.).

ECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF LAKE AND RIVER SYSTEMS IN AN URBAN ENVIRONMENT (ON EXAMPLE THE SVETLOGORKA RIVER - LAKE TIKHOE, SVETLOGORSK, KALININGRAD REGION)

N.N. Tsvetkova, O.V. Kazimirchenko

The results of comprehensive monitoring of the Svetlogorka River and the Tikhoe Lake (formed on the river) located in the Kaliningrad region in the federal resort town of Svetlogorsk are presented. The hydrochemical features and microbiological specificity of the lake-river system in an anthropogenic environment are shown.

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРУДА ПЕЛАВСКОГО (Г. КАЛИНИНГРАД) ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО БЛАГОУСТРОЙСТВУ

Н.А. Цупикова[1], В.В. Моисеенко[1,2], Е.А. Севостьянова[1]
[1]Калининградский государственный технический университет
[2]Атлантический филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии

Приведены результаты комплексного исследования экологического состояния пруда Пелавского (г. Калининград) до и после проведения мероприятий по благоустройству его пляжной зоны. По показателям фитопланктона наблюдается увеличение биоразнообразия видов, характерных для чистых водоемов. Анализ видового состава, а также структуры численности и биомассы зоопланктона показывает изменения, характерные для чистых олиготрофных вод. В целом по гидробиологическим показателям отмечается уменьшение как численности, так и биомассы. Результаты гидрохимического исследования демонстрируют снижение сапробности лишь по отдельным показателям.

Расположение городских водоемов в пределах селитебных зон поселений делает их привлекательными объектами рекреационного назначения благодаря их легкой транспортной и пешеходной доступности. В связи с этим, при разработке карьеров для добычи полезных ископаемых на окраинах городов, наиболее распространенным способом рекультивации становится обводнение, что позволяет преобразовать их в водные объекты. Пруд Пелавский возник в начале 1950-х гг. в результате обводнения карьера, служившего для добычи строительных материалов (Цупикова и др., 2018). В настоящее время это – один из немногих внутригородских водоемов в Калининграде, который ежегодно получает положительное заключение Роспотребнадзора о пригодности для купания.

В 2022-2023 гг. в северной части пруда Пелавского проводили работы по благоустройству побережья. Изменения, произведенные на водоеме, представляют возможность сопоставить качество вод пруда до и после проведения мероприятий по благоустройству, а также оценить влияние данных мероприятий на его экологическое состояние.

Материалом послужили пробы, отобранные в летний период 2022 и 2023 гг., т.е. до начала осуществления работ по благоустройству и по окончании первого (основного) этапа. Отбор проб осуществлялся в трех точках, одна из которых расположена непосредственно у благоустраиваемого берега и две других – на южном и западном берегу с сохранившейся естественной прибрежно-береговой растительностью из

тростника обыкновенного (*Phragmites australis*), рогоза обыкновенного (*Typha angustifolia*), сусака зонтичного (*Butomus umbellatus*), которые являются хорошими фильтраторами и часто используются для создания биоплато. Определение кислородных условий и концентраций биогенных веществ осуществляли в гидрохимической лаборатории КГТУ стандартными объемным и колориметрическими методами (Руководство …, 1977, Характеристики …, 2016). Для сбора материала фитопланктона использовали цилиндрическую емкость, погружаемую в фотический слой водоема, с последующей фиксацией раствором Люголя с добавлением формалина и ледяной уксусной кислоты. Концентрирование проб проводили методом мембранной фильтрации, обработка осуществлялась по общепринятым методикам (Методика…, 1975; Руководство…, 1983). Отбор зоопланктона осуществляли путем процеживания 100 л воды сквозь гидробиологический сачок с последующей фиксацией раствором формалина. Обработка собранных образцов проводилась согласно Методам гидробиологических исследований …, 2024. Видовая идентификация беспозвоночных организмов осуществлялась с использованием соответствующих определителей (Определитель …, 2010).

Для большинства рассматриваемых гидрохимических показателей была характерна пространственная однородность по станциям наблюдения, особенно до благоустройства. Растворенного кислорода в водах пруда на протяжении всего периода исследования содержалось достаточно много, несмотря на явное снижение его концентрации в 2023 г. Перенасыщение воды кислородом (более 150 %), наблюдавшееся в 2022 г., в 2023 г. сменилось значениями, близкими к 100-110 %. Одновременно уменьшилась и величина перманганатной окисляемости, от средней до малой. При этом после благоустройства несколько выросло биохимическое потребление кислорода (рис. 1).

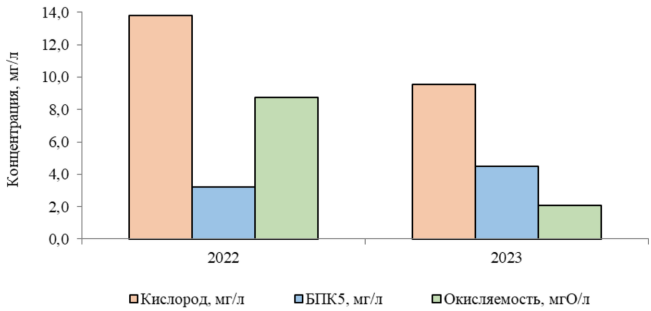


Рис. 1. Растворенный кислород, $БПК_5$, перманганатная окисляемость в вегетационный период 2022-2023 гг.

Концентрации исследованных биогенных веществ (соединения фосфора и азота) в 2023 г. изменились мало, но на всех станциях возросла доля фосфора фосфатов в общем содержании фосфора, что может быть связано как с антропогенным влиянием, так и естественными биологическими процессами в водоеме.

Сопоставление результатов гидрохимического анализа с ГОСТ 17.1.2.04-77 демонстрирует улучшение качества вод, выражающееся в снижении уровня загрязненности по некоторым показателям (табл.).

В ходе изучения экологического состояния водоема также обнаружены изменения в составе фитопланктона. Наблюдалось увеличение видового списка от 42 таксонов в

2022 г. до 68 в 2023 г., в основном, за счет представителей отделов диатомовых и зеленых водорослей. Основу флористического списка в оба года составляли виды бетамезосапробной зоны, в 2023 г. наблюдалось расширение числа видов олиго и олиго-бетамезосапробной зоны, что подтверждает улучшение экологического состояния водоема после мероприятий по благоустройству.

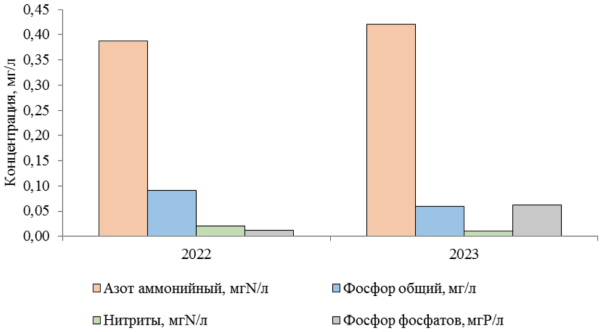


Рис. 2. Содержание соединений фосфора и азота в вегетационный период, 2022-2023 гг.

Таблица. Оценка качества вод согласно ГОСТ 17.1.2.04-77

Показатель	Сапробность	
	2022 год	2023 год
Насыщение кислородом, %	Альфамезосапробная	Олигосапробная
$БПК_5$, мг/л	Полисапробная	Полисапробная
Азот аммонийный, мгN/л	Бетамезосапробная	Бетамезосапробная
Нитриты, мг/л	Олигосапробная	Олигосапробная
Фосфаты, мг/л	Олигосапробная	Бетамезосапробная

При рассмотрении количественных характеристик можно отметить снижение средней численности (2022 г. – более 250 млн. кл./л, 2023 г. – до 9,2 млн. кл./л) и биомассы летнего фитопланктона (с 14,9 до 10,5 мг/л). Выявленные изменения объясняются ослаблением развития мелкоклеточных колониальных цианобактерий и нитчатых *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anagn. et. Kom., а также крупноклеточных динофитовых водорослей *Ceratium hirundinella* (O.F.Mull.) Dujard., ранее доминировавших в численности и биомассе. Отмечалась пространственная неоднородность распределения водорослей по станциям наблюдения, особенно выраженная после благоустройства.

Аналогичные изменения отмечены в количественных и качественных показателях зоопланктона: численность и биомасса снизились почти вдвое. За период исследований было идентифицировано 32 вида зоопланктонных организмов, в 2023 г. было обнаружено меньшее число видов коловраток и ветвистоусых. По численности в 2022 г. преобладали *Chydorus sphaericus* (O.F.Müller, 1776) и *Keratella cochlearis* (Gosse, 1851), характерные для эвтрофных водоемов (Андроникова, 1996). В 2023 г. по числен-ности преобладали науплии и копеподы Cyclopoida, что свойственно для городских водоемов Калининграда, прошедших мероприятия по очистке (Севостьянова и др., 2024).

Анализ структуры биомассы и численности зоопланктона показывает, что уменьшилась доля коловраток и увеличилась доля веслоногих до значительного преобладания (рис. 4), что является характерным признаком олиготрофных водоемов (Андроникова, 1996). Отмечаются различия и по станциям: в точке отбора, где было

проведено благоустройство наблюдается более низкая численность и биомасса с меньшей долей коловраток, что является характерным для чистых вод.

Таким образом, результаты анализа гидрохимических и гидробиологических показателей пруда Пелавского до и после благоустройства пляжной зоны, показывают, что по большинству исследованных параметров отмечается изменение сапробности и трофности в сторону улучшения экологического состояния данного водоема в рассматриваемый период. Понижение уровня кислорода и небольшое увеличение фосфора фосфатов, вероятно, связано со спадом в развитии цианобактерий в водоеме.

Исследования других малых водоемов Калининграда показывают, что такие мероприятия могут иметь кратковременный эффект без проведения профилактических работ по поддержанию экологического состояния водоема в целом на постоянной основе (Севостьянова и др., 2024).

В более ранних исследованиях отмечалось снижение качества воды в Пелавском в осенний период (Лозицкая, Цупикова, 2018), что подчеркивает важность ежесезонного мониторинга данного водоема при разработке таких профилактических мероприятий по улучшению качества вод и сохранению его экологического состояния, как частичное удаление донных отложений для снижения вторичного загрязнения, посадка биоплато, установление системы принудительной аэрации.

Работа выполнена в рамках инициативной НИР 01-44-002.2 «Изучение экологического состояния городских прудов Калининграда».

Литература

Андроникова И.Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб.: Наука. 1996. 189 с.

Лозицкая Е.А., Цупикова Н.А. Анализ некоторых гидрохимических показателей в пруду Пелавском (г. Калининград) в 2017 году. 62-я Международная научная конф. Астраханского государственного технического университета: материалы конференции. Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2018. С. 32.

Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 240 с.

Методы гидробиологических исследований внутренних вод. Ярославль: Филигрань, 2024. 592 с.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1 Зоопланктон / под ред. В.Р. Алексеева, С.Я. Цалолихина. СПб, 2010. 495 с.

Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 318 с.

Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 541 с.

Севостьянова Е.А., Кухарук Е.Д., Моисеенко В.В., Цупикова Н.А. Экологическое состояние водоемов городской черты Калининграда на разных этапах благоустройства // Вестник КамчатГТУ. 2024. №68. С. 75-88.

Характеристики загрязняющих веществ из раздела «II. Для водных объектов» «Перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды», утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 08.07.2015 г. № 1316-р. ФГБУ УралНИИ «Экология», 2016. 296 с.

Цупикова Н.А., Лозицкая Е.А., Алдушин А.В. Морфометрические характеристики пруда Пелавского (г. Калининград) // Известия КГТУ. 2018. №49. С. 55-66.

ANALYSIS OF CHANGES IN THE ECOLOGICAL CONDITION OF THE PELAVSKY POND (KALININGRAD) AFTER IMPROVEMENT

N.A. Tsupikova, V.V. Moiseenko, E.A. Sevostyanova

The article presents the results of a comprehensive study of the ecological condition of the Pelavsky pond (Kaliningrad) before and after the improvement of its beach area. According to phytoplankton indicators, there is an increase in the biodiversity of species typical for clean water bodies. Analysis of the species composition, as well as the structure of the abundance and biomass of zooplankton, shows changes characteristic for pure oligotrophic water. In general, hydrobiological indicators show a decrease in both numbers and biomass. The results of the hydrochemical study demonstrate a decrease in saprobity only for certain indicators

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БОЛЬШОГО ЛИМАНА (ВОЛГОГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Е.А. Чекмарева[1,2], С.Д. Сорокин[2]
[1]Иваньковская научно-исследовательская станция Института водных проблем РАН
[2]Политех «Дубна» (филиал)

Геоэкологическая характеристика пруда-испарителя Большой Лиман (Волгоградская область) подготовлена как информационная основа для оценки воздействия пруда-испарителя на окружающую среду с учетом множества природных и антропогенных факторов. В работе приведены статистические, архивные данные, а также данные собственных наблюдений, полученных летом 2023 года.

Территориально Большой Лиман находится в Среднеахтубинском районе Волгоградской области вблизи города Волжский и поселка Звездный на абсолютной высоте 14-15 метров. Большой Лиман был организован в заболоченном понижении (по картографическим данным 1936 г.) на месте естественного водоема и преобразован в техническое сооружение (пруд-испаритель). Питание природно-технического водоема осуществляется дождевыми, грунтовыми водами, а также нормативно очищенными производственными и хозяйственно-бытовыми стоками. Пруды-накопители вблизи полигона (№ 2, 3, 4, рис.), являются природно-техническими сооружениями, водоемами-приемниками, регулирующими уровень пруда-испарителя Большой Лиман. Длина береговой линии пруда-испарителя Большой Лиман составляет около 30 км, а площадь – 41 км^2, накопители 2, 3 и пруд Почтарик имеют площадь около 2,0 км^2. Береговая линия водоемов вне дамбы меняется от спрямленной, искусственного происхождения у накопителей до размытой у Большого Лимана, имеющего, изначально, естественное происхождение. Дамбы-дороги, разграничивающие пруды и создающие необходимый подпор воды, являются насыпными сооружениями из глин, суглинков и насыпного грунта.

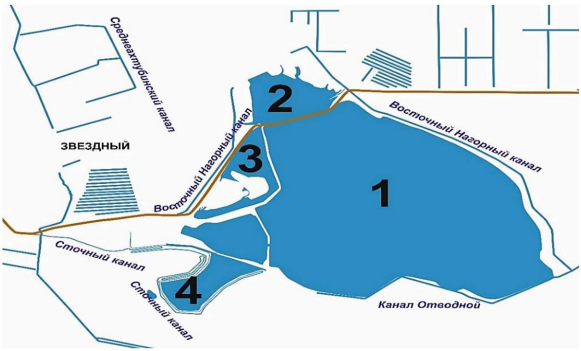


Рис. Карта-схема расположения Большого Лимана
1 - пруд-испаритель Большой Лиман; 2, 3 - пруды-накопители, 4 - пруд Почтарик

Большой Лиман окружает серия водоотводящих элементов - каналов: Восточный Нагорный канал огибает пруд-испаритель с запада на восток через северную часть; Среднеахтубинский канал расположен на западе (за п. Звездный); сточный канал на юго-западе огибает пруд Почтарик по береговой линии; к Большому Лиману подведены трубы для сброса сточных вод.

Одной из проблем Большого Лимана является контроль уровня воды в нем. Высокий уровень воды в водоеме создает угрозу разрушения берегов, в особенности со стороны частого нагона волн на берег. По границам водоемов вдоль дамбы проведены берегоукрепительные работы крупным щебнем и железобетонными плитами. В маловодные и жаркие периоды в системе прудов может сильно падать уровень воды до обнажения дна.

Водосборную территорию Большого Лимана в километровой зоне пересекает линейный объект – ЛЭП, рядом находятся подстанции (ПС): вблизи водоема на северо-западе ПС 500 кВт Трубная, на северо-востоке насосная станция с электрической подстанцией ПС НС 17, удалены от объекта и расположены восточнее ПС Химик, ПС Радужная. На северо-западе и северо-востоке от Большого Лимана находятся земледельческие поля орошения в пределах 5-6 км (элементы орошения: каналы, бетонные трубы и сооружения). Повсеместно встречаются противопожарные насыпи (до 4 м), рвы и канавы, сложенные глинами, суглинками и песками, линейно вытянутые лесополосы из невысоких деревьев и кустарников. В северной-северо-западной части территории находится пересохшая овражно-балочная сеть, относительно пологая, глубиной от 0,5 до 3-4 м, в которой происходит накопление пролювия, а в нижней части склона - делювия (за счет наполнения талыми и дождевыми, паводковыми водами), на дне произрастают различные виды макрофитов. Вблизи п. Волжский распространены территории с техногенными отложениями tH как насыпные со строительным мусором, так и полигоны строительного, производственного и бытового мусора. Полигоны с ТКО и ТБО часто горят в засушливый, летний период.

Большой Лиман расположен на Прикаспийской низменности, пологоволнистой аккумулятивной равнине морского происхождения раннехвалынского возраста ($Q_{III}hv_1$), на которой встречаются лиманообразные понижения. Почвы маломощные каштановые и светло-каштановые, занятые, преимущественно полями, которые используются как пастбище для скота и выращивания зерновых культур (в пределах 1 км зоны от Большого Лимана). Засоление почв по данным бурения летом 2023 года происходит до глубины 11 м, промывка почвы и нижележащих слоев слабая, происходит накопление солей и

увеличение гипсоносности почв. Осадочный чехол на территории представлен отложениями четвертичной системы верхнего звена неоплестоцена, терешкинский горизонт, хвалынский надгоризонт (нижнехвалынский мариний) $mIIIhv_1$, состоящий из глин, суглинков и супесей до 20 метров. В понижениях встречаются осадочные породы хвалынского надгоризонта, средней и верхней части новокаспийский горизонт, озерно-аллювиальные отложения $laIIIhv^{2-3}$–Hnk из илов, суглинков, супесей и песков до 10 м.

Таблица 1. Строение осадочного чехла в районе Большого Лимана (Геологическая…, 2009)

Ярус плейстоцена	Происхождение отложений	Состав пород	Мощность, м
неоплейстоцен терешкинский горизонт, хвалынский надгоризонт $laIIIat$ и $mIIIhv_1$	нижнехвалынская толща, морское (мариний)	глины, суглинки, супеси	20
	ательская толща, лиманное, аллювиальное	суглинки, супеси, глины, пески	20
неоплейстоцен нижнехазарский $allhz_1$	аллювиальное	пески, суглинки, супеси, глины, гравий, галька	45
эоплестоцен апшеронский mEap	морское	пески, глины, песчаники, ракушечники, гравий, галька	70

Фильтрационные характеристики осадочных пород, указанных в таблице 1 изменяются в широких пределах в зависимости от состава пород, пористости и других характеристик. Фильтрация глин составляет от 0,01 до 1,2 м/сут., суглинков от 0,07 до 1,5-2,0 м/сут. (Абдрахманов, 2018), супеси 0,1-0,7 м/сут., песок от пылеватого до мелкого 0,1-10 м/сут., песок от средней крупности до гравелистого 5-100 м/сут. (ГОСТ 25584-2016).

Климат в Волгоградской области умеренно-континентальный с холодной малоснежной зимой и продолжительным жарким и сухим летом. Средние температуры за период с 2019 по 2023 года представлены в таблице 2.

Таблица 2. Средние температуры в Волгоградской области за период с 2019 по 2023 гг. по сезонам (Доклад …, 2024)

Сезон	2019	2020	2021	2022	2023
Зима	-3.5	-1.4	-5.3	-0.7	-4.5
Весна	7.9	12.0	9.5	7.5	10.4
Лето	23.8	24.8	26.3	25.1	24.4
Осень	8.9	6.9	10.1	9.5	11.4

Среднегодовое количество осадков за период в 5 лет (2019-2023 гг.) изменяется от 147 до 175 мм в год (Доклад…, 2024). За счет интенсивного испарения с поверхности прудов в районе Большого Лимана формируются микроклиматические особенности, чаще связаны с незначительно повышенной влажностью и формированием ветровых нагонов по поверхности зеркала водоема.

Водосборная территория Большого Лимана относится к Северо-Каспийскому артезианскому бассейну 2-го порядка Нижневолжской области распространения подземных вод. Артезианский бассейн формируется в Прикаспийской синеклизе (Доклад …, 2024). В песках и супесях терешкинского горизонта встречаются безнапорные водоносные горизонты, которые вскрываются на глубине 8,8-11,4 м (по данным бурения летом 2023 г.). Дебиты скважин изменяются в широких пределах от 0,4 до 33,8 л/сек, минерализация в среднем до 1 г/дм^3, изменяется в пределах 0,2-3,3 г/дм^3. В нижнехазарском горизонте, который является напорным встречаются в основном

солоноватые и соленые воды с минерализацией 1-30 г/дм^3, дебиты скважин изменяются от 1 до 3,1 л/сек. Встречаются линзы пресных вод (до 1 г/дм^2) гидрокарбонатного натриево-кальциевого или кальциево-магниевого состава. Воды хазарского горизонта используют для водоснабжения населенных пунктов (Доклад…, 2024).

Использование Большого Лимана как водоема-приемника началась с 1964 года, когда был запущен в работу Волжский завод синтетического каучука (ОАО «Эктос-Волга»), достигнув максимума по выпуску продукции к 1983 году. С 2000 года был налажен выпуск метил-трет-бутилового эфира - МТБЭ из изобутана и метанола, а с 2005 года изобутилена, с 2010 года выпуск триизобутилалюминия - ТИБА (О производственной …, 2025). Волжский завод органического синтеза также направляет свои стоки в Большой Лиман. Завод выпускает метионин (серосодержащая α-аминокислота), сероуглерод синтетический, сульфат натрия, гидросульфид натрия, диметилдитиокарбамат натрия, ксантогенат калия бутиловый, ксантогенат калия амиловый (АО «Волжский оргсинтез» …, 2025).

Летом 2023 года в районе г. Волгоград (Красноармейский район) были отобраны пробы воды из двух прудов (таб. 3), куда направляют преимущественно производственные сточные воды. Данные анализа воды прудов и Большого Лимана свидетельствуют о содержании тяжелых металлов в пределах ПДК.

Таблица 3. Данные химического анализа по тяжелым металлам, лето 2023 г., мг/л

Объект	Mn	Pb	Cu	Zn	Ni	Cr
Пруд-накопитель 1, г. Волгоград	0.076	0.0031	0.0001	0.427	0.0008	0.0002
Пруд-испаритель 2, г. Волгоград	0.0002	0.0007	0.0002	0.138	0.0003	0.0002
Большой Лиман	0.019	0.0001	0.0003	0.004	0.0007	0.0003
ПДК$_{хоз.-быт.}$ (СанПиН 1.2.3685-21)	0.1	0.01	1.0	5.0	0.02	0.05

На акватории Большого Лимана зафиксировано орнитологическое разнообразие: баклан малый *Microcarbo pygmaeus*, большой баклан *Phalacrocorax carbo*, болотный лунь *Circus aeruginosus*, большая белая цапля *Ardea alba*, большой крохаль *Mergus merganser*, большая поганка *Podiceps cristatus*, большой улит *Tringa nebularia*, галка *Coloeus monedula*, грач *Corvus frugilegus*, грязовик *Calidris falcinellus*, европейская сорока *Pica pica*, зяблик *Fringilla coelebs*, каменка-плясунья *Oenanthe isabellina*, каравайка *Plegadis falcinellus*, кваква *Nycticorax nycticorax*, коноплянка *Linaria cannabina*, кряква *Anas platyrhynchos*, кудрявый пеликан *Pelecanus crispus*, кулик-сорока *Haematopus ostralegus*, обыкновенный гоголь *Bucephala clangula*, лазоревка *Cyanistes caeruleus*, лебедь-шипун *Cygnus olor*, лысуха *Fulica atra*, малая белая цапля *Egretta garzetta*, мородунка *Xenus cinereus*, нырок красноносый *Netta rufina*, обыкновенный скворец *Sturnus vulgaris*, обыкновенный фазан *Phasianus colchicus*, обыкновенная пустельга *Falco tinnunculus*, огарь Tadorna ferruginea, озерная чайка *Chroicocephalus ridibundus*, орлан-белохвост *Haliaeetus albicilla*, пеганка *Tadorna tadorna*, поганка черношейная *Podiceps nigricollis*, полевой воробей *Passer montanus*, розовый пеликан *Pelecanus onocrotalus*, розовый скворец *Pastor roseus*, свиязь *Mareca penelope*, серощекая поганка *Podiceps grisegena*, серая ворона *Corvus cornix*, серая цапля *Ardea cinerea*, сизая чайка *Larus canus*, степной жаворонок *Melanocorypha calandra*, тростниковая овсянка *Emberiza schoeniclus*, турухтан *Calidris pugnax*, утка серая *Mareca strepera*, фифи *Tringa glareola*, ходулочник *Himantopus himantopus*, хохотунья *Larus cachinnans*, цапля рыжая *Ardea purpurea*, чайконосая крачка *Gelochelidon nilotica*, черный коршун *Milvus migrans*, черная болотная крачка *Chlidonias niger*, черноголовый хохотун *Ichthyaetus ichthyaetus*, черноголовый щегол *Carduelis carduelis*, черноголовая чайка *Ichthyaetus melanocephalus*, чирок-свистунок *Anas crecca*, чирок-трескунок *Spatula querguedula*, шилоклювка *Recurvirostra avosetta*, широконоска *Spatula clypeata* (Большой Лиман…, 2025).

Учитывая дефицит водных объектов в данном регионе, птицы предпочитают обитать в Большом Лимане и рядом с ним. Сточные производственные воды по ряду мнений местных орнитологов могут способствовать избавлению от паразитов, которые скапливаются в перьях и на коже, что дополнительно привлекает птиц.

Были выделены негативные факторы влияния на территорию такие как высокая температура воздуха и засуха, пожары, сильные ветра и пыление, пыльные бури, водная эрозия, нарушение условий плоскостного смыва, разрушение дорожного полотна, формирование овражно-балочной сети, засоление, опустынивание и деградация почвенного покрова, паводки, сложности с регулировкой уровня воды в Большом лимане, накопление загрязняющих веществ в донных отложениях, макрофитах, рыбах и других обитателей водной экосистемы Большого Лимана.

Геоэкологическая характеристика Большого Лимана дает представление о строении осадочного чехла территории, понимание о возможности фильтрации поверхностных вод в нижележащие водоносные горизонты, накоплении и задержки солей в толщах горных пород. В районе пруда-испарителя находится хазарский водоносный горизонт питьевого и хозяйственно-бытового, воды которого должны быть защищены и изолированы от проникновения в них загрязняющих веществ от пруда испарителя и прудов-накопителей. По ряду данных в Большой Лиман попадают производственные стоки ОАО «Эктос-Волга» и АО «Волжский оргсинтез» с рядом специфических загрязнителей. В связи с чем для оценки качества воды Большого Лимана необходимы дополнительные исследования компонентов водной экосистемы (воды, донных отложений, макрофитов, рыб и др.). Отборы проб воды на тяжелые металлы лето 2023 года показали, что концентрации металлов находятся в пределах нормы $ПДК_{хоз.-быт.}$. Орнитологическое биоразнообразие свидетельствует об интересе местных птиц к Большому Лиману как к местообитанию.

Литература

Абдрахманов Р.Ф. Фильтрационные свойства неоген-четвертичных глинистых отложений и изменение их под влиянием техногенеза // Геологический вестник Уфа: Институт геологии, 2018. №2. С. 118-124.

АО «Волский оргсинтез» (Электронный ресурс) URL: https://www.zos-v.ru/ (дата обращения: 30.01.2025 г.)

Большой Лиман (Электронный ресурс). URL: https://www.inaturalist.org/ (дата обращения: 17.01.2025).

Геологическая карта Российской Федерации, серия М-38-XXVII. Волгоградская область. Второе издание. Карта четвертичных отложений. Нижне-Волжская серия. М: 1:200000. ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2009. (Электронный ресурс). URL: https://www.geokniga.org/ (дата обращения: 17.01.2025).

ГОСТ 25584-2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации.

Доклад «О состоянии окружающей среды Волгоградской области в 2023 году». Иркутск: ООО «Медиамир», 2024. 300 с.

О производственной площадке ООО «Эктос-Волга» (Электронный ресурс) URL: http://mtbe-vlz.ru/ru/about-group (дата обращения: 30.01.2025 г.).

СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

GEOECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE BOLSHOY LIMAN (VOLGOGRAD REGION)

E.A. Chekmareva, S.D. Sorokin

Geoecological characteristics of the Bolshoy Liman evaporation pond (Volgograd Region) are needed as information to assess the impact of many natural and anthropogenic factors on the environment. The work contains statistical, archival data, and field observation data from the summer of 2023.

ФОРМИРОВАНИЕ И ДИНАМИКА ВОДНО-БОЛОТНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ В СЕВЕРНОЙ ПОДЗОНЕ ТАЙГИ (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ) В ГОЛОЦЕНЕ ПО ДАННЫМ КОМПЛЕКСНОЙ ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ

А.Д. Чулей, Н.Г. Мазей, А.Н. Цыганов, Ю.А. Мазей
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Торфяные болота характеризуются специфическим комплексом видов и играют важную роль в круговороте углерода, а также позволяют реконструировать динамику природных экосистем. В исследовании изучался торфяной керн глубиной 140 см, отобранный в районе г. Апатиты. Мы использовали комплексный подход к палеоэкологическим реконструкциям, совмещающий различные индикаторы (пыльца, растительные макроостатки и раковинные амёбы) и подкреплённый данными стратиграфического анализа и радиоуглеродного датирования, для того чтобы оценить изменение различных факторов среды на разных пространственно-временных уровнях в течение большей части голоцена. Результаты исследования показывают, что экосистема водно-болотных угодий прошла классическую гидросерийную последовательность от озера к омбротрофному болоту, реагируя на изменения климата, зафиксированные в голоцене.

Воздействие климатических изменений на водно-болотные экосистемы представляет собой одну из наиболее актуальных проблем современной экологии. Для того чтобы понять, как данные экосистемы будут реагировать на растущую климатическую нестабильность, необходимо изучить их динамику в ответ на изменения условий среды в прошлом. Подобная оценка становится возможной благодаря использованию комплексных методов палеоэкологической реконструкции. Цель работы – реконструировать динамику формирования и развития болотной экосистемы в течение голоцена по результатам анализа торфяной залежи на Кольском полуострове с использованием методов комплексной палеоэкологической реконструкции. Для реконструкции процессов формирования и развития болотной экосистемы применялся метод комплексной палеореконструкции, включающий спорово-пыльцевой, ботанический и ризоподный анализы и радиоуглеродное датирование. Применение независимых и взаимодополняющих методов реконструкции позволяет оценить влияние изменения различных факторов на нескольких пространственно-временных масштабах: спорово-пыльцевой анализ - региональные изменения растительности и температуры, ботанический анализ - локальные изменения растительности и ризоподный анализ - локальные изменения влажности (Bunburry et al., 2012; MacDonald et al., 2006).

В качестве объекта было выбрано болото, расположенное в окрестностях г. Апатиты (67.568023° с.ш., 33.407187° в.д.). Для исследования процессов формирования и развития болотной экосистемы был отобран торфяной керн мощностью

140 см с помощью ручного торфяного бура. Керн был разрезан на последовательные образцы толщиной 2 см. Приготовелние образцов для основных методов палеоэкологической реконструкции осуществлялось в соответствии со стандартными методиками пробоподготовки (Birks, 2007; Mazei, Chernyshov, 2011; Moore et al., 2001). Определение возраста отложений проводили с помощью радиоуглеродного датирования (^{14}C AMS, Институт геохимии Китайской академии наук). Статистическая обработка полученных данных осуществлялась с использованием программы R.

Согласно радиоуглеродному датированию, возраст нижних слоёв керна датируется периодом около 8542 калиброванных лет назад (рис. 1). Так, образцы охватывают большую часть голоцена, начиная с конца бореального периода и заканчивая современностью (Mangerud et al., 1974). Средняя скорость накопления торфа была достаточно низкой (60 лет см$^{-1}$) по сравнению оценочных средних значениях данного параметра для Северного полушария в 20 лет см$^{-1}$ (Goring et al., 2012).

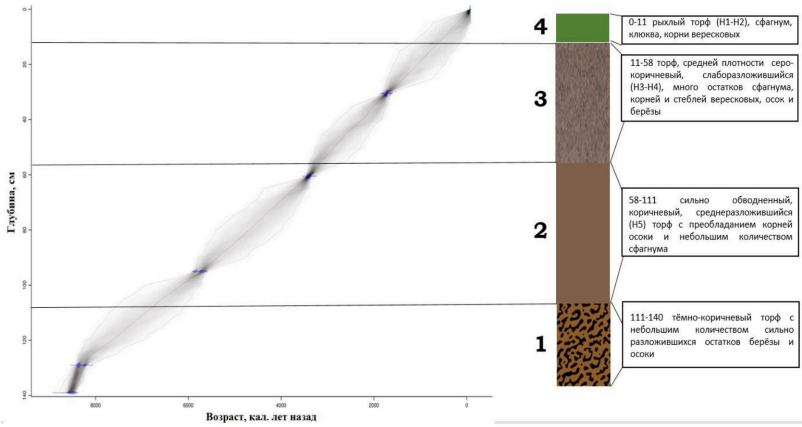


Рис. 1. Результаты стратиграфического анализа и радиоуглеродного датирования

Палинологический анализ позволяет выделить четыре различные стратиграфические зоны в исследуемом отложении (рис. 2). Зона 1 характеризуется доминированием в спектре пыльцы древесных растений, которая составляет более 95% пыльцевого спектра. Наибольшее обильны пыльцевые зерна сосны (*Pinus sylvestris*) – 58% и берёзы (*Betula* spp.) – 28%. Присутствие же большого количества спор плаунов и папоротников указывает на высокую влажность. Зона 2 демонстрирует тенденцию к усилению засушливости и повышению температур, что приводит к дальнейшему увеличению доли древесной пыльцы и снижение обилия травянистых и споровых растений. Зона 3 характеризуется усилением аридности, но с тенденцией к понижению температуры, что отражается в увеличении доли пыльцы холодостойких видов растений таких, как: ель (*Picea* sp.) и полынь (*Artemisia* sp.). В Зоне 4 отмечается резкое возрастание доли спор *Sphagnum* и пыльцы вересковых (Ericales), что может свидетельствовать о существенном закислении среды и начале процессов заторфовывания.

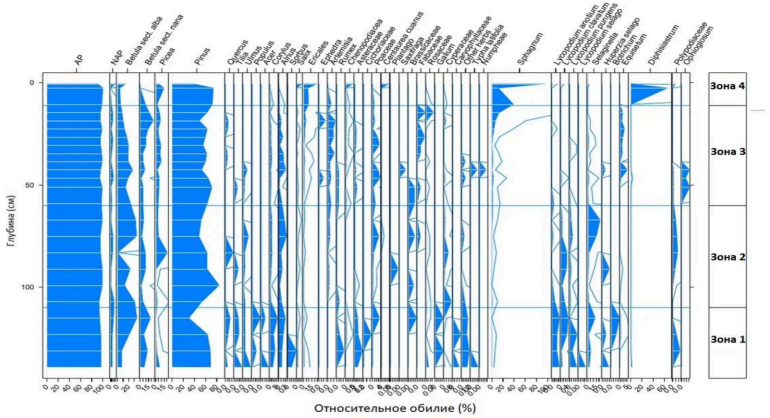


Рис. 2. Спорово-пыльцевая диаграмма торфяного керна из отложений болот в районе города Апатиты

Анализ растительных остатков в торфе также позволил выделить четыре зоны с различным ботаническим составом (рис. 3). На протяжении первой зоны достаточно обильными были макроостатки осок и злаков. Граница со второй зоной маркируется снижением участия остатков осок и появлением в больших количествах остатков бурых мхов. В третьей зоне продолжается тренд на снижение участия осок и бурых мхов, а также появляются остатки сфагнума и скорпидиума. Четвёртая зона четко выделяется резким увеличением встречаемости макроостатков сфагнума, который является типичным обитателем верховых и переходных болот, а его появление в спектре свидетельствует о начале активных процессов торфообразования.

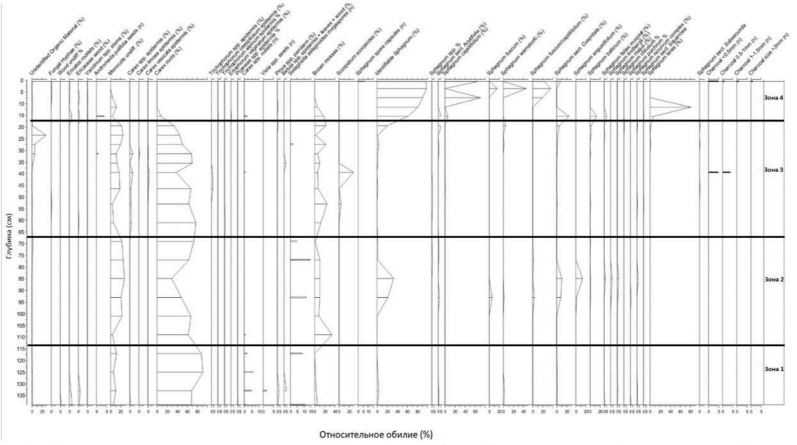


Рис. 3. Состав растительных макроостатков торфяной залежи в районе города Апатиты

Ризоподный анализ субфоссильных сообществ в торфяной залежи также позволяет выделить четыре зоны, отличающиеся по видовому разнообразию и структуре сообществ протистов (рис. 4). В первой зоне преобладают мелкие гидрофильные виды. Во второй зоне наблюдается последовательный переход от влаголюбивых к более засухоустойчивым видам. Третья зона характеризуется значительным присутствием как мелких засухоустойчивых видов, так и крупных типично сфагнобионтных видов. В четвёртой зоне сообществах практически полностью доминируют крупные типично сфагнобионтные виды раковинных амёб.

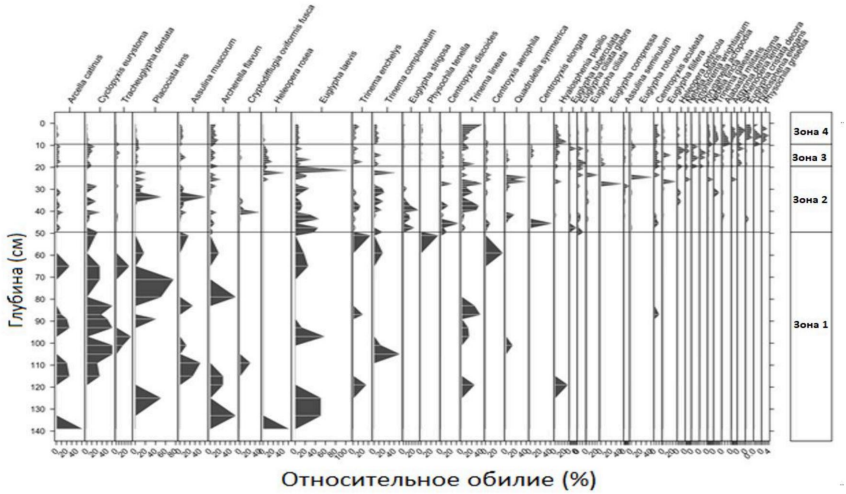


Рис. 4. Диаграмма видового состава субфоссильных сообществ раковинных амёб в торфяной залежи болота в окрестностях г. Апатиты.

Показаны наиболее часто встречаемыми таксоны (обнаружены в пяти или более образцах с относительным обилием ⩾1% по крайней мере в одном образце). Зоны выделены на основании последовательного кластерного анализа. Виды упорядочены по средневзвешенному значению глубин, на которых они присутствуют

Обнаружение большого количества пыльцы сосны и берёзы указывают на широкое распространение сосновых лесов с примесью берёзы на исследуемой территории. Наличие значительной доли спор плаунов и макроостатков бурых мхов и осок на начальных этапах свидетельствует о высокой влажности территории. Вероятнее всего, экосистема развивалась с открытых водных пространств, предположительно, озёр. Повышение температуры и увеличение сухости региона привели к зарастанию озера, что отражается в смене водной растительности через *Selaginella* к наземным видам. Данный процесс подтверждается результатами ризоподного анализа, демонстрирующего закономерную смену сообществ раковинных амеб: от доминирования гидрофильных групп к совместному доминированию ксерофильных и типично сфагнобионтных видов в период формирования болотной экосистемы. Начало этого процесса четко фиксируется по резкому увеличению доли сфагновых мхов в спектре макроостатков, вытесняющих остатки бурых мхов и осок. Полученные данные хорошо согласуются с ранее проведенными палеоэкологическими реконструкциями смежных территорий (Babeshko et al., 2021). Таким образом, комплексный подход к палеореконструкциям, основанный на использовании различных методов, оказывается эффективным инструментом для

изучения формирования и динамики развития водно-болотных угодий арктических территорий и определения изменений условий окружающей среды на разных временных масштабах.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-14-00065.

Литература

Birks H.H. Plant macrofossil introduction // Encyclopedia of quaternary science. 2007. V. 3. P. 2266-2288.

Bunbury J., Finkelstein S.A., Bollmann J. Holocene hydro-climatic change and effects on carbon accumulation inferred from a peat bog in the Attawapiskat River watershed, Hudson Bay Lowlands, Canada // Quaternary Research. 2012. V. 78. P. 275–284.

MacDonald G.M., Beilman D.W., Kremenetski K.V., Sheng Y.W.S.L.C., Velichko A.A. Rapid early development of circumarctic peatlands and atmospheric CH_4 and CO_2 variations // Science. 2006. V. 314. P. 285–288.

Mangerud J.A.N., Andersen S.T., Berglund B.E., Donner J.J. Quaternary stratigraphy of Norden, a proposal for terminology and classification // Boreas. 1974. V. 3. P. 109-126.

Mazei Y. A., Chernyshov V.A. Testate amoebae communities in the southern tundra and forest-tundra of Western Siberia // Biology Bulletin. 2011. V. 38. P. 789–796.

Moore P.D., Webb J.A., Collison M.E. Pollen Analysis. Blackwell: Oxford, UK, 1991.

FORMATION AND DYNAMICS OF THE WETLAND ECOSYSTEM IN THE NORTHERN TAIGA SUBZONE (KOLA PENINSULA) IN THE HOLOCENE ACCORDING TO THE DATA OF COMPLEX PALEOECOLOGICAL RECONSTRUCTION

A.D. Chulei, N.G. Mazei, A.N. Tsyganov, Yu.A. Mazei

Peatlands are characterized by a specific assemblage of species and play crucial role in the carbon cycle, as well as allowing to reconstruct the dynamics of natural ecosystems. In this study, a 140 cm deep peat core collected near Apatity was analyzed. We used an integrated approach of paleoecological reconstructions combining various indicators (pollen, plant macrofossils and testate amoebae) and supported by stratigraphic analysis and radiocarbon dating to assess the change of various environmental factors at different spatiotemporal scales during most of the Holocene. The results of the study indicate that the wetland ecosystem underwent a classic hydroserial sequence from lake to ombrotrophic bog, responding to climate changes recorded during the Holocene.

ОЗЕРА РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ ИХ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

Р.Р. Шагидуллин, Д.В. Иванов, И.И. Зиганшин, Р.П. Токинова, А.Т. Горшкова
Институт проблем экологии и недропользования АН РТ

В статье анализируются причины и динамика состояния озерного фонда Республики Татарстан в XX-XXI веках. Результаты работ, направленных на инвентаризацию озер региона, указывают на сокращение их численности за последние 80 лет, что связывается как с происходящими климатическими изменениями, так и рядом факторов антропогенного характера. В их числе – преобразование ландшафтов региона при создании Куйбышевского и нижнекамского водохранилищ, рост хозяйственной и рекреационной нагрузки на водные объекты, нарушения режима водоохранных зон.

Первые сведения об озёрах Республики Татарстан были получены в период 1965–1968 гг. Казанским отделом гидрологии и водных ресурсов АН СССР. Результаты работы были систематизированы и обобщены в виде «Кадастра озер Татарской АССР» (1969) и монографии «Озёра Среднего Поволжья» (1976). В этих изданиях были собраны данные о 9754 озёрах. Работа по инвентаризации озёр территории Республики Татарстан конца XX в. и начала XXI в. показала тенденцию сокращения количества водоёмов данного типа до 6621, что впоследствии нашло отражено в справочниках «Водные объекты Республики Татарстан» (2006, 2018). По предварительным оценкам, каждые десять лет территория республики теряет порядка полутора тысяч озёр. В некоторых муниципальных районах количество озер за последние 50 лет снизилось в несколько раз. При этом есть районы, в которых численность озер за указанный период увеличилась до 3 раз. Наибольшей трансформации подвержены естественные и искусственные озера, расположенные в черте населенных пунктов, а также в рекреационных зонах крупных городов республики.

В результате климатических изменений и крупных ландшафтных преобразований в бассейнах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ происходят изменения в показателях общего количества озёр и их морфометрических параметров.

До создания в 1957 г. Куйбышевского водохранилища самую многочисленную категорию озер на территории Республики Татарстан составляли пойменные озера (более 70% от общего количество). После наполнения его водами было покрыто 530 пойменных озер с общей площадью акватории 2700 га (в пойме р. Волги затоплено 260 озер суммарной площадью акватории более 1400 га, в пойме р. Камы – 270 озер, 1300 га).

С созданием водохранилищ связано возникновение нового типа водоемов – отчленившихся от их основной акватории заливов. В основном они характерны для Куйбышевского водохранилища. Формирование данного типа озер в основном связано с затоплением отрицательных форм рельефа II левобережной террасы Волги и Камы, а также проливов между новообразованными островами с последующей изоляцией от акватории водохранилища абразивно-аккумулятивными пересыпями или же искусственным путем (дамбы). В пределах Республики Татарстан при отметках уровня Куйбышевского водохранилища, приближенных к НПУ (53 абс. м), насчитывается 1402 водоема подобного типа с суммарной площадью 5632 га. В основном это мелководные водоемы (средняя глубина не более 2 м) с площадью акватории от 1 до 10 га. Площадь водного зеркала более 10 га имеют 105 отчлененных заливов, а площадь акватории пяти из них превышает 100 га. В пространственном отношении наибольшее количество водоемов данного типа расположено в Камском плесе (75%). Здесь же сосредоточены

более крупные по площади акватории водоемы (в среднем 7,5 га), включая крупнейший водоем данного типа – отчлененный залив у с. Балахчино, имеющий площадь акватории 390 га (второе по площади акватории озеро в РТ).

На экологическое состояние и количество пойменных озер сильнейшее влияние оказало аномально жаркое лето 2010 года, которое характеризовалось совокупностью экстремальных погодных явлений (превышение климатической нормы по температуре на 7–10 °С, дневные температуры до +40 °С, количество осадков на 60–80% ниже нормы), приведших к серьезным последствиям. Особенно значимы последствия оказались для засушливых регионов республики – Закамья и Предволжья, где возникла сильная засуха, значительно снизился уровень грунтовых вод, пересохли многие мелководные водоемы. При этом в последующие годы значительная часть утративших полностью или частично водную поверхность озер не восстановилась. Так, в пойме р. Карла, левого притока р. Свияги, протекающей в Предволжском физико-географическом районе, из 32 озер в результате засухи 2010 г. пересохло 25, сохранившиеся 7 озер за период с 2001 по 2024 гг. потеряли 68% водного зеркала.

Из нескольких тысяч озер Республики Татарстан 38 имеют статус памятников природы регионального значения. Большая их часть расположена в окрестностях г. Казани. Озера пригородной зоны Казани подвержены антропогенному эвтрофированию и иным видам химического и бактериального загрязнения, о чем свидетельствует низкое качество воды в них. Как правило, в этих озерах не соблюдается режим водоохранных зон: их прибрежные территории застроены, распашка земель практически под урез воды ведет к эрозии почв, накоплению донных отложений и зарастанию водоемов, снижению биологического разнообразия.

Акватории и прибрежные зоны преобладающего большинства особо охраняемых озер, несмотря на природоохранный статус, подвержены интенсивному антропогенному (преимущественно рекреационному) воздействию, что отражается как на состоянии их экосистем, водности и морфометрических показателях. Размеры акватории большинства озер за последние десятилетия уменьшились. Сокращение площади акватории – типичная тенденция для большинства озер региона. Например, площадь одного из крупнейших водоемов РТ – озера Ковалинское, по сравнению с 1939 г. (152 га) сократилась на 45% до 82,7 га. Основные причины: забор воды для питьевых и хозяйственных целей, размещение объектов жилой и промышленной застройки в прибрежной зоне, существенное уменьшение площади водосбора, размещение летних лагерей крупного рогатого скота и водоплавающей птицы.

Анализ экологического состояния водных объектов природных и урбанизированных ландшафтов РТ по биоиндикационным характеристикам планктонных и бентосных сообществ (микрофлора, фито- и зоопланктон, макро- и мейозообентос, водная растительность) обозначил остро стоящую региональную проблему антропогенного эвтрофирования и цианобактериального цветения воды, негативными последствиями которых становятся случаи гибели водных биоресурсов (рыб, водоплавающих птиц и животных),снижение хозяйственно-питьевого и рекреационного потенциала озер. Наиболее широкое распространение эти процессы получают в водных объектах высоко урбанизированных территорий, в связи с чем становятся актуальными задачи их экологической реабилитации и восстановления.

В частности, в рамках республиканской Программы развития общественных пространств в 2018 г. было выполнено обустройство набережных озера Нижний Кабан с двумя комплексами фито-очистных сооружений (ФОС). Исследования показали, что составе фитопланктона биопрудов подавляется развитие возбудителей «цветения» воды – динофитовой водоросли *Ceratium hirundinella* и синезеленой *Planktothrix agardhii*,

повышается качество и прозрачность воды. Макрофиты ФОС – природный биофильтр, очищающий воду от соединений тяжелых металлов.

На территории Республики Татарстан комплекс работ по экологической реабилитации выполнен на более чем 20 различных объектах. Он включал в себя обустройство и расчистку берегов, удаление накопленных донных отложений, высадку/удаление высшей водной растительности, установку систем искусственной аэрации и т.д. Опыт показывает, что сроки и ход восстановления разных водоемов после проведения оздоровительных мероприятий индивидуальны и могут иметь значительные отличия. В этой связи мониторинг состояние водных экосистем озер, качества воды и донных отложений на водных объектах, где планируются или уже выполнены работы по экологической реабилитации, являются приоритетной научной задачей, которую на территории Республики Татарстан сегодня решает профессиональная команда экологов.

LAKES OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN AT THE CURRENT STAGE OF THEIR NATURAL-ANTHROPOGENIC TRANSFORMATION

R.R. Shagidullin, D.V. Ivanov, I.I. Ziganshin, A.T. Gorshkova, R.P. Tokinova

The article analyzes the causes and dynamics of the state of the lake fund of the Republic of Tatarstan in the 20th-21st centuries. The results of work aimed at inventorying the region's lakes indicate a reduction in their numbers over the past 80 years, which is associated with both ongoing climate change and a number of anthropogenic factors. These include the transformation of the region’s landscapes during the creation of the Kuibyshev and Nizhnekamsk reservoirs, the increase in economic and recreational pressure on water bodies, and violations of water protection zones.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОЗЕРАХ

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ И ТЕРМОБАРИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ГИПОЛИМНИОНА ОЗЕРА БАЙКАЛ ПРИ ЛЕТНЕЙ СТРАТИФИКАЦИИ

И.А. Асламов, Р.Ю. Гнатовский, М.М. Макаров, И.Н. Тюрнев, В.В. Блинов
Лимнологический институт СО РАН

Проведено исследование устойчивости стратификации верхнего слоя гиполимниона озера Байкал в период летней температурной стратификации на основе данных CTD зондирований с 1996 по 2024 г. Выявлены случаи возникновения термобарической неустойчивости, и апвеллингов. Исследованы пространственные распределения интенсивности этих процессов по акватории озера и их связь с ветровыми условиями. Проанализированы произошедшие за последние три десятилетия климатические изменения в средних вертикальных профилях температуры воды в отдельных котловинах озера Байкал.

Вертикальный обмен в озерах играет ключевую роль в формировании стратификации воды, определении их температурного и газового режима, а также влияет на интенсивность круговорота веществ и протекание биологических процессов в озерах. Термин «термобарическая неустойчивость» был впервые предложен Кармаком и Вайсом в 1991 году (Carmack et al., 1991) для описания неустойчивости стратификации, связанной с изменением температуры максимальной плотности воды ($T_{мп}$) с глубиной. При нормальном атмосферном давлении $T_{мп}$ близка к 4ºС и понижается на ~0,2ºС на каждые 100 метров глубины.

Термобарическая неустойчивость, возникающая в случае, когда холодная вода располагается над теплой, была подробно описана для Байкала в ряде исследований (Weiss et al., 1991; Шимараев, Гранин, 1991). В таких ситуациях конвекция и обновление глубинных вод могут происходить поздней весной и ранней осенью, когда вода с температурой ниже температуры мезотермического максимума вынужденно опускается глубже профиля $T_{мп}$. Процессы и механизмы для обратного случая, когда теплая воды расположена над более холодной впервые исследована в работе (Grannin et al., 2000). Проведенные авторами наблюдения позволили впервые обнаружить, что, благодаря параллельности профиля температуры профилю $T_{мп}$, условия для термобарической неустойчивости могут возникать в том числе и летом, в верхних 50-250 метрах при прямой температурной стратификации. Близость профиля температуры к $T_{мп}$ определяет малую величину коэффициента температурного расширения воды, а при равенстве температуры $T_{мп}$ он принимает нулевое значение. Таким образом, зависимость плотности воды от её температуры в этой области минимальна, и имеют место нелинейные эффекты плавучести, не описываемые классической теорией свободной конвекции. Конвекция, возбуждаемая в случае рассматриваемой термобарической неустойчивости? может способствовать переносу биогенных элементов, таких как нитраты, фосфаты и кремний из более богатых вод гиполимниона в фотическую зону, где они потребляются фитопланктоном, увеличивая первичную продукцию. Кроме того, она может способствовать поддержанию клеток диатомовых в деятельном слое, что особенно важно в летний период, когда стратификация воды препятствует

естественному перемешиванию. Такой тип неустойчивости был назван термобарической неустойчивостью второго типа (Grannin et al., 2000). Исследованию её проявления в озере Байкал и посвящена настоящая работа.

В качестве исходных материалов использованы данные о температуре воды озера Байкал в июле-августе 1996-2024 гг., полученные с помощью CTD зондирований водной толщи. Всего было обработано более 2 тыс. файлов с данными. Измерения выполнялись CTD зондом SBE-25 с точностью ±0,002°C и разрешением 0,0003°C. Выбор июля и августа обусловлен тем, что это одни из самых спокойных по ветровой активности летних месяцев. В это время уже сформирована устойчивая температурная стратификация, и еще не начались осенние шторма.

Свидетельствами проявления термобарической неустойчивости второго типа в летний период являются (Grannin et al., 2000): 1) пересечение профилем температуры профиля $T_{мп}$; 2) существование областей с обратной температурной стратификацией при температурах выше $T_{мп}$. Таким образом, все имеющиеся зондирования, за исключением случаев апвеллинга были разбиты на два набора данных: имеющих, и не имеющих пересечение с профилем $T_{мп}$ (рис. 1а, б). Из графиков видно, что примерно с 30 и до 250 метров глубины температура воды довольно близка к профилю $T_{мп}$, и нередки случаи его пересечения (630 зондирований из 2095, или 30%), а, следовательно, и проявления термобарической неустойчивости. Апвеллинги, при которых холодные глубинные воды поднимаются и выходят на поверхность, рассмотрены отдельно, как крайний случай термобарической неустойчивости (рис. 1в). Условием апвеллинга считалось опускание температуры поверхности ($Tпов$) ниже 8ºС. Следует отметить, что за последние ~15 лет не было зарегистрировано ни одного случая апвеллинга в июле-августе с $Tпов$<4ºС, которые, ещё встречались в конце 1990-ых и начале 2000-ых годов (рис. 1в).

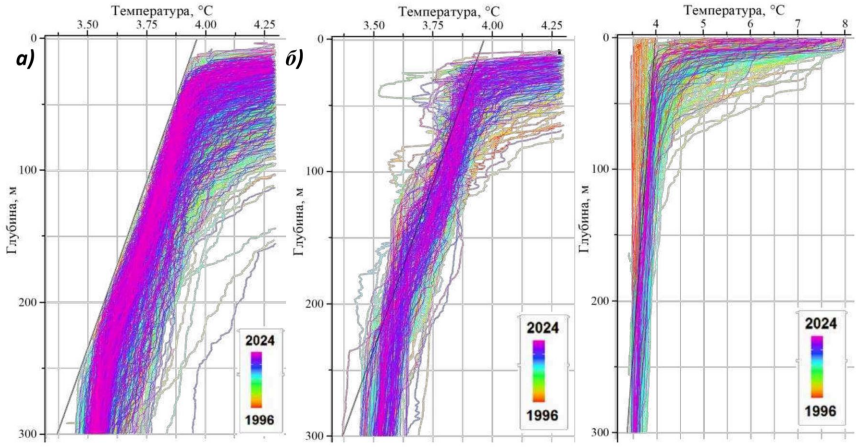


Рис. 1. Вертикальное распределение температуры воды по данным июля-августа на станциях без пересечения $T_{мп}$ (*а*) и с пересечением $T_{мп}$ (б), апвеллинги с $T_{пов}$<8ºС (в). Цветом кривых отражен год измерения. Черная прямая – профиль $T_{мп}$

Примем за условную интенсивность термобарической неустойчивости количество точек на профиле температуры, лежащих ниже профиля $T_{мп}$. Так как зондирования производились одним и тем же прибором, погружающимся с примерно

одинаковой скоростью, то интенсивность термобарической неустойчивости будет по сути эквивалента удвоенной мощности зарегистрированного слоя с неустойчивой стратификацией в метрах. В случае устойчивой стратификации условная интенсивность, соответственно, будет равна нулю. На рис. 2 приведены карты распределения рассчитанной интенсивности термобарической неустойчивости и апвеллингов для всех измерений, выполненных с 1996 по 2024 годы. Очевидно, что полученное распределение по акватории неравномерно, и зондирования группируются в районы повышенных и пониженных значений интенсивности. В частности, в Южном Байкале выделяются районы вдоль юго-восточного берега с наибольшей интенсивностью в районе Танхоя. В Среднем Байкале – район максимальных глубин и Академического хребта. В Северном Байкале – район разреза м. Елохин- п. Давша, а также северная оконечность Байкала вблизи пгт. Нижнеангарск и с. Байкальское. Несмотря на то, что апвеллинги регистрировались во всех районах озера, их интенсивность по акватории различна, и в общих чертах места их усилений, как правило, совпадают с таковыми для термобарической неустойчивости (рис. 2).

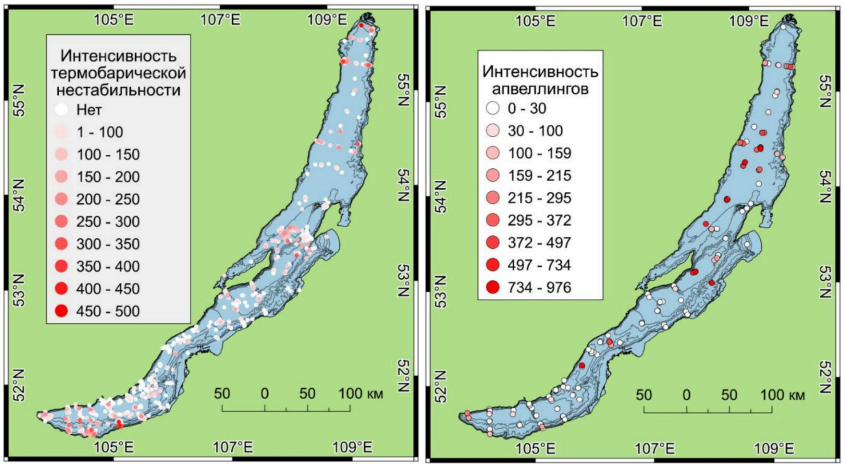


Рис. 2. Карты пространственного распределения интенсивности термобарической неустойчивости и апвеллингов для зондирований в июле-августе (1996-2024 гг.)

Так как подавляющая часть экспедиционных работ производится по устоявшейся сетке станций поперечных разрезов, то все зондирования были сгруппированы по координатам, тяготеющим к ближайшей станции и отстоящих от неё не более чем на 3 км. Для каждой такой группы зондирований была рассчитана вероятность регистрации термобарической неустойчивости, как отношение количества зарегистрированных случаев термобарической неустойчивости к общему количеству измерений на станции за 29-летний период. Полученная карта распределения вероятности регистрации термобарической неустойчивости приведена на рис. 3, на которой можно выделить следующие особенности. В Южном Байкале вероятность регистрации термобарической неустойчивости возрастает от северо-западного берега, к юго-восточному. В Среднем Байкале наблюдается обратная тенденция. В Северном Байкале вероятность распределена более равномерно на уровне 0.2-0.4 с наибольшими значениями 0.8-0.9 вблизи пгт. Нижнеангарск и с. Байкальское (рис. 3). На 11 станциях термобарическая

неустойчивость не была выявлена ни разу. Схожие паттерны пространственных распределений интенсивности апвеллингов и термобарической неустойчивости наводят на мысль об общей природе и механизмах их генерации. Известно, что одним из основных факторов влияющих на динамику вод является ветровая активность. В виду отсутствия измерения ветров над акваторией озера Байкал, в настоящем исследовании были использованы данные реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды в его последней реализации ERA5-Land (Muñoz-Sabater et. al, 2021). По данным реанализа были рассчитаны средние значения скорости и направлений ветров в июле-августе 1996-2024 годов над акваторией озера Байкал (Рис. 3). Анализ среднего ветрового поля за период исследования выявил как зоны интенсификации, так и ослабления скоростей ветра, распределение которых по акватории имеет много общего с полученными паттернами для термобарической неустойчивости и интенсивности апвеллингов (рис. 2,3), что подтверждает выдвинутое предположение о доминирующей роли ветров в формировании термобарической неустойчивости верхнего слоя гиполимниона.

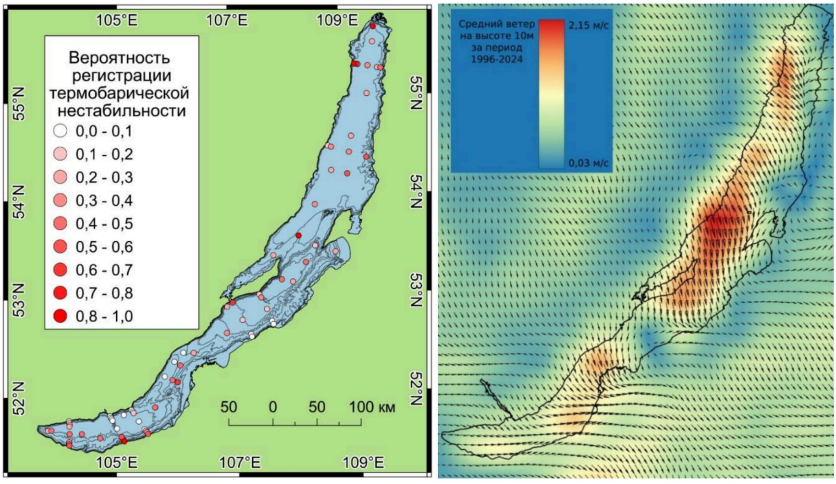


Рис. 3. Карты распределения вероятности регистрации термобарической неустойчивости, и средней скорости и направления ветров в июле-августе 1996-2024 гг.

Высокая вероятность регистрации термобарической неустойчивости в 7 км от Нижнеангарска у с. Байкальское, где не наблюдается повышение ветров, в свою очередь, может быть объяснена влиянием крупного слабоминерализованного притока – реки Верхняя Ангара, воды которой распространяются кругобайкальской циклонической циркуляцией вдоль западного берега, а у с. Байкальское дополнительно впадает р. Рель – приток с самой низкой минерализацией на Байкале.

Для оценки изменения среднего распределения летней температуры за последние 29 лет инструментальных наблюдений, исходные данные были разбиты на два 15-летних периода: 1996-2010 и 2010-2024 гг. Для каждого периода, отдельно по котловинам, были рассчитаны средние профили температуры с шагом 2 метра по глубине. В осреднении, чтобы исключить влияние динамически активных вод прибрежных районов использованы данные только с центральных станций поперечных разрезов. Чтобы

наглядно изучить произошедшие изменения были рассчитаны разницы температурных профилей ($dT=T_{2010\text{-}2024} - T_{1996\text{-}2010}$), приведенные на рис. 4. Видно, что наибольшие изменения коснулись эпилимниона в северной котловине, который стал теплее на 3ºС, в южной и средней котловинах прогрев составил в два раза меньше ~1,5ºС. При этом, обращает на себя внимание небольшое похолодание в слое 10-20 метров, зарегистрированное в Южном и Среднем Байкале, и обусловленное, по-видимому, усилением стратификации в металимнионе, и, как следствие ослаблением теплообмена между эпилимнионом и верхней частью гиполимниона. Глубже 250 метров тенденции в каждой котловине различны: в северной котловине зарегистрировано потепление на 0,01ºС, в средней – похолодание на 0,03ºС, в то время как южная осталась практически без изменений, охладившись менее чем на 0,01ºС (рис. 4). Выявленные особенности в изменениях среднего вертикального распределения температуры отражают разную интенсивность ветро-волнового перемешивания и вертикального турбулентного обмена вследствие неоднородной ветровой нагрузки на акватории котловин, и как следствие, их различную реакцию на происходящие климатические изменения. Исследование выполнено в рамках гос. задания ЛИН СО РАН (0279-2021-0004).

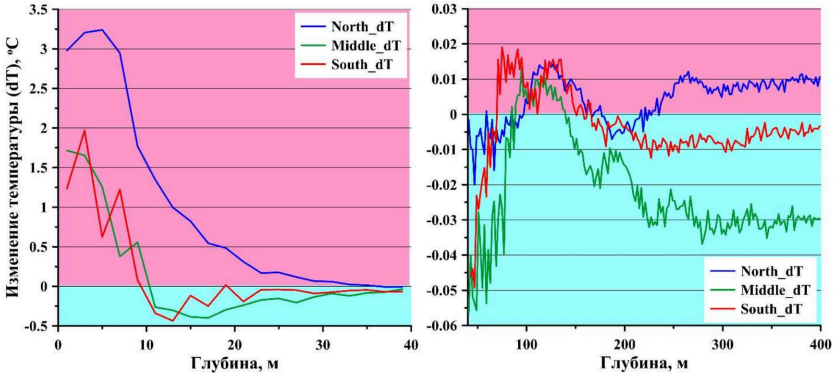


Рис. 4. Разницы средних температурных профилей в пелагиалях трех котловин Байкала, рассчитанные по двум периодам 1996-2010 и 2010-2024 гг.: северная (синяя линия), средняя (зеленая линия) и южная (красная линия)

Литература

Шимараев М.Н., Гранин Н.Г. К вопросу о стратификации и механизме конвекции в Байкале // ДАН СССР. 1991. Т. 321, №2. С. 381-385.

Carmack E.C., Weiss R.F. Convection in Lake Baikal: An Example of Thermobaric Instability // Deep Convection and Deep Water Formation in the Oceans. Elsevier Oceanography Series. 1991. V. 57. P. 215-228.

Granin N.G., Gnatovsky R.Yu., Kay A., Galkin L.M. Nonlinear stability near the temperature of maximum density and thermobaric instability in Lake Baikal during summer stratification // Lake Baikal, Elsevier Science B.V. 2000. P.214-228.

Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // Earth System Science Data. 2021. №13. P. 4349-4383.

Weiss R.F., Carmack E.C., Koropalov V.M. Deep-water renewal and biological production in Lake Baikal // Nature. 1991. Vol. 349. № 6311. P. 665-669.

CLIMATIC CHANGES AND THERMOBARIC INSTABILITY OF THE UPPER LAYER OF THE HYPOLIMNION OF LAKE BAIKAL DURING SUMMER STRATIFICATION

I.A. Aslamov, R.Yu. Gnatovsky, M.M. Makarov, I.N. Tyurnev, V.V. Blinov

The study of stability of stratification of the upper part of hypolimnion in the Lake Baikal during the period of summer stratification were carried out based on CTD sounding data from 1996 to 2024. Cases of thermobaric instability and upwelling identified and analyzed. Spatial distributions of the intensity of these processes over the lake area and their relation to wind conditions were studied. The climatic changes in the vertical temperature profiles in basins of Lake Baikal over the last three decades were analyzed.

АВТОНОМНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

И.А. Асламов, К.М. Кучер, М.М. Макаров
Лимнологический институт СО РАН

Приведен подробный обзор разработанного автономного измерителя, который представляет собой инновационное решение для комплексного мониторинга водоемов, позволяющее измерять вертикальное распределение температуры и освещенности, а также уровень воды и интенсивность волнения. В тексте рассматриваются архитектура устройства, технические решения и метрологические характеристики. Результаты четырёхмесячных натурных испытаний в Южном Байкале подтвердили заложенную в измеритель функциональность и характеристики. Разработанный измеритель будет полезен как для академических исследований, так и для практических применений в экологии и инженерных изысканиях.

Современные гидрофизические исследования водоемов требуют непрерывного мониторинга различных параметров, таких как температура, проникающая освещенность, уровень воды, динамика волнения. Температура – одна из основных характеристик, определяющих физические свойства воды. Она значительно влияет на её плотность, что, в свою очередь, определяет вертикальную устойчивость водной толщи, процессы перемешивания и насыщение кислородом. Кроме того, температура играет важную экологическую роль, так как от неё зависят многие физические, химические и биологические процессы. Освещенность, в свою очередь, оказывает прямое влияние на процессы фотосинтеза, лежащие в основе создания первичной продукции в водоемах. Изменение уровня подводной освещенности зависит не только от сезонных циклов и погодных условий, но главным образом определяется прозрачностью воды. Таким образом, прозрачность воды является одним из индикаторов её чистоты. Высокая прозрачность свидетельствует о низком содержании взвешенных частиц и отсутствии цветения воды, тогда как её снижение может указывать на ухудшение экологической обстановки, появление признаков эвтрофикации или загрязнения.

Изучение уровенного режима имеет важное значение для понимания гидрологических процессов в водоёме. Его регулярный продолжительный мониторинг позволяет выявлять долгосрочные тенденции в изменении водного баланса озер. Более высокочастотные данные позволят исследовать короткопериодные колебания, сейши и сгонно-нагонные явления (метеоцунами). Измерения с частотами выше 1 Гц, предоставляют возможность определять параметры волнения, которое, в свою очередь,

оказывает влияние на стратификацию, температуру и перемешивание водной толщи. Кроме того, как само волнение, так и его сочетание с изменениями уровня воды обуславливают эрозию береговой линии, вымывание биогенных элементов и осадочного материала, что может оказывать непосредственное влияние на экосистему водоёма.

Перечисленные параметры существенно влияют на биогеохимические процессы, происходящие в водоемах и экологическое равновесие. Организация их комплексного регулярного наблюдения должна являться неотъемлемой частью экологического мониторинга водоёмов, что позволит выявлять в них долгосрочные тенденции и корректировать стратегию природоохранных мероприятий в условиях наблюдающихся климатических изменений и возрастающего антропогенного воздействия.

Как правило, для организации гидрофизических наблюдений применяются автономные одно- или двухканальные логгеры (например, логгеры линейки RBRsolo и RBRduo производства RBR Ltd., или логгеры серии INFINITY производства JFE Advantech Co. Ltd.). Эти логгеры зарекомендовали себя как надежные и высокоточные приборы в различных областях исследований. Они обладают рядом преимуществ, таких как высокая точность измерений, компактность конструкции и удобство эксплуатации. Каждый логгер представляет собой автономное устройство, оснащенное собственным источником питания и внутренней памятью, что позволяет устанавливать его на необходимой глубине. Однако, несмотря на очевидные преимущества, система, основанная на использовании таких логгеров, имеет и существенные недостатки.

Встроенные в каждый логгер часы реального времени со временем начинают расходиться из-за несовершенства кварцевых резонаторов, что снижает точность определения временных интервалов между событиями, зарегистрированными на разных приборах, ограничивая, таким образом, их применение в исследовании высокочастотных процессов. Существенным недостатком систем, построенных на отдельных устройствах является высокая стоимость, ведь цена самого простого логгера температуры начинается от 200 тысяч рублей и может превышать 1 млн. рублей для более сложных приборов. Помимо первичных затрат на оборудование, необходимо также учитывать расходы на техническое обслуживание, калибровку и периодическую замену источников питания в каждом логгере, что дополнительно утяжеляет общий бюджет измерительной системы.

Представленный в настоящей работе автономный измеритель гидрофизических параметров лишен вышеперечисленных недостатков и позволяет производить синхронные измерения с распределенной системы датчиков частотой записи до 1 Гц. За счет низкого энергопотребления измеритель также подходит для длительной автономной работы в течение года.

Измеритель гидрофизических параметров представляет собой модульную конструкцию, состоящую из блока регистрации, и протяженной измерительной системы. В блок регистрации входит управляющий микроконтроллер, энергонезависимая память объемом 128 МБ, часы реального времени с термокомпенсированным кварцевым резонатором, преобразователи напряжения, драйвер интерфейса связи, а также высокоточный измеритель гидростатического давления.

Измерительная система состоит из геофизического кабеля ВП 2х0,2Э-У со встроенными по его длине датчиками температуры. Кабель подключается к блоку регистрации через герметичный разъём. Датчики изготовлены в виде индивидуальной Т-образной печатной платы с выносом чувствительного элемента от кабеля на расстояние 4 см, для минимизации его влияния на измеряемую температуру. Каждый датчик оснащен микроконтроллером, и драйвером интерфейса связи. Геофизический кабель представляет из себя витую пару в экране и термопластичной полиуретановой оболочке. Два из трёх контактов которого задействованы для подачи напряжения питания 12 В, а третий контакт используется для двунаправленной линии обмена данными – LIN (Local

Interconnect Network). Герметизация датчиков и их соединения с кабелем осуществляется путем заливки двухкомпонентным оптически прозрачным полиуретаном в специально спроектированной форме. Перед заливкой платы датчиков покрываются белым цветом. Выбор прозрачного полиуретана обусловлен тем, что каждый датчик может быть дополнен измерителем освещенности. В базовой комплектации измерительной системы применяется минимум 2 датчика освещения, для оценки показателя ослабления света.

Датчики температуры характеризуются низким энергопотреблением и позволяют измерять температуру с разрешением 0,002°C. Абсолютная точность измерения температуры в пределах 0,01°C. обеспечена калибровкой датчиков в жидкостном термостате ТЕРМОТЕСТ-100-40 (ТЕРМЭКС, Россия). Датчики освещения имеют высокую чувствительность (<1 мкВт/см^2), а программируемые коэффициенты усиления и время экспозиции обеспечивают широкий динамический диапазон 3.8×10^6:1. Кроме видимого диапазона, датчики измеряют интенсивность освещения в красном, синем и зелёном диапазонах длин волн, позволяя исследовать показатель ослабления в трех спектральных областях.

Встроенный в регистратор датчик гидростатического давления является основой для определения уровня воды и интенсивности волнения. Для вычисления уровня необходимо иметь данные об атмосферном давлении, например, с береговой метеостанции. Интенсивность волнения оценивается путём регистрации минимальных и максимальных значений гидростатического давления за период измерения. Разрешающая способность датчика давления – 1 Па, что эквивалентно 0,1 мм водного столба. Доступны датчики давления на следующие максимальные глубины погружения: 10, 50 и 300 метров (последний датчик более грубый, с разрешением 10 Па).

Измеритель питается от литийтионилхлоридных батарей типа ER34615M с напряжением 3.6 В, соединённых параллельно. В базовой комплектации используется 3 элемента питания, что обеспечивает до года работы измерителя при частоте записи 1 раз в минуту. Батарейные отсеки имеют модульную структуру и могут наращиваться для достижения необходимой ёмкости, с целью увеличения длительности работы или частоты измерений. Для питания измерительной системы в устройстве используется повышающий преобразователь напряжения 12В, включающийся на время измерений.

Измеритель имеет настраиваемую частоту записи измерений в диапазоне от 1 раза в секунду, до одного раза в час. При этом встроенные часы реального времени с термокомпенсированным кварцевым резонатором обеспечивают высокую стабильность хода в широком диапазоне температур окружающей среды.

Герметичный корпус измерителя представляет собой цилиндр диаметром 50 мм и длиной 350 мм (для версии на 3 элемента питания) плотно зажимаемый в сварную раму из нержавеющий стали (рис. 1.). Рама служит для размещения измерителя на дне водоема, путем крепления к якорной системе из бетонной плиты или другого груза. На одной из крышек корпуса измерителя располагается герметичный разъём и отверстие для передачи давления среды к чувствительному элементу. Подключаемая к разъёму измерительная система, фиксируется вдоль грузонесущего троса, идущего от корпуса к поверхности воды, натянутого блоком поплавков.

Разработанный измеритель был протестирован с июля по октябрь 2024 года в Южном Байкале, на склоне северо-западного побережья на глубине 34 м. Температурные датчики располагались на глубинах от 7 до 33 метров с шагом 2 метра. Два верхних датчика (7 и 9 м) были оборудованы измерителями освещенности. Запись гидрофизических параметров производилась каждые 10 секунд. На рис. 2 приведен пример зарегистрированных данных с 13 по 21 августа. В это время в районе постановки развивался прибрежный апвеллинг холодных вод гиполимниона. До апвеллинга наблюдалась стратификация водной толщи, с температурой около 15-16°C на глубине 7

м и в районе 5°C на 33 м. Процесс начался с усиления ветра северо-западного направления 14 августа, инициировавшего сгон поверхностных вод от берега, и сопровождавшегося понижением уровня озера в месте постановки (рис. 2). Во второй половине дня на фоне усиления ветра до 13 м/с, значительно возросла и интенсивность волнения, а температура воды начала постепенно понижаться на всех горизонтах, вследствие вынужденного подъема вод, компенсирующего отток вод эпилимниона. К 12 часам дня 15 августа, температура на всех горизонтах установилась около 4°C. Утром 16 августа ветер сменил направление на восточное и апвеллинг постепенно начал релаксировать. До исходных температур вода прогрелась только 19 августа.



Рис. 1. Внешний вид герметичного корпуса регистратора с системой крепления

Так как глубинные воды в Байкале обладают высокой чистотой, в отличие от поверхностных вод эпилимниона, в котором в августе наблюдается пик цветения фитопланктона, то процесс апвеллинга также был зарегистрирован и по данным освещенности. Так, рассчитанный показатель ослабления для 13 и 14 августа лежал в диапазоне 0.25 - 0.3 $м^{-1}$, а уже 15 августа он понизился в два раза до 0.15 $м^{-1}$, обозначив приход более прозрачной воды (рис. 2). Также хорошо себя показал датчик уровня, зарегистрировавший продольные сейшевые колебания амплитудой 3-6 см, при этом средний подъем уровня воды в озере за 8 дней составил около 8 см.

Таким образом, разработанный автономный измеритель гидрофизических параметров показал себя как перспективное решение для комплексного мониторинга водоемов. Для повышения функциональности измерителя в ближайшем будущем планируется:

1. интеграция дополнительных датчиков измерения: pH, электропроводности и содержания растворенного кислорода;
2. внедрение инклинометров и дополнительных датчиков давления на протяженных измерительных системах, для выявления и компенсации их наклона течениями;
3. реализация алгоритма расчета высоты и периода поверхностных волн.

Измеритель может использоваться для решения широкого спектра задач, от экологического мониторинга и инженерных изысканий до детальных исследований гидрофизических процессов в водоёмах. С использованием одного или нескольких экземпляров измерителя можно проводить детальные изучения поверхностных и внутренних инерционно-гравитационных волн, процессов конвекции и турбулентности, развития термических баров и апвеллингов. Внедрение подобных систем имеет большое значение и способствует как повышению эффективности мониторинга водных объектов, так и более глубокому пониманию процессов, протекающих в водной среде.

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные

исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

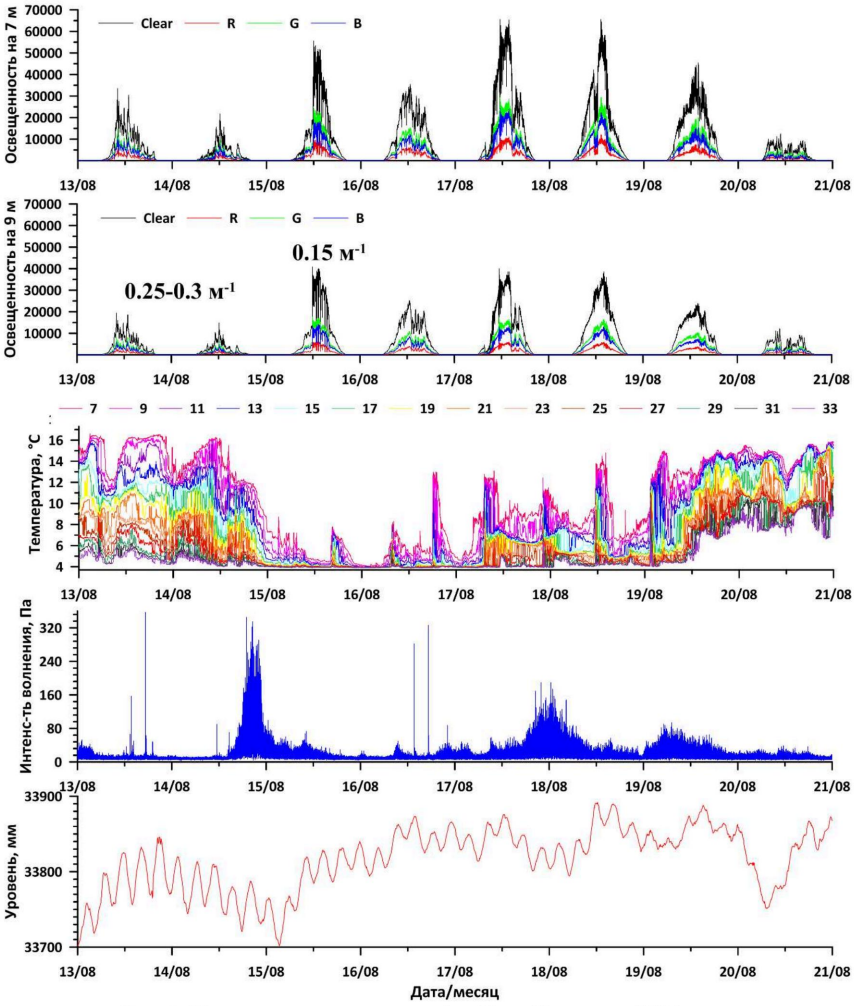


Рис. 2. Пример данных измерений с 13 по 21 августа 2024 года

AUTONOMOUS METER OF VERTICAL DISTRIBUTION OF HYDROPHYSICAL PARAMETERS

I.A. Aslamov, K.M. Kucher, M.M. Makarov

A detailed review of the developed autonomous meter, which is an innovative solution for complex monitoring of water bodies, allowing to measure the vertical distribution of temperature and illumination, as well as water level and wave intensity, is given. The text discusses the device architecture, technical solutions and metrological performance. The results of four-month natural tests in Southern Baikal confirmed the functionality and characteristics of the instrument. The developed meter will be useful both for academic research and for practical applications in ecology and engineering surveys.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВЕННОГО РЕЖИМА ОЗ. КУЭТСЪЯРВИ, ВХОДЯЩЕГО В ТРАНСГРАНИЧНУЮ ОЗЕРНО-РЕЧНУЮ СИСТЕМУ

А.А. Батмазова, Е.В. Гайдукова
Российский государственный гидрометеорологический университет

В работе исследуется трансграничная озерно-речная система реки Паз, в которой оз. Куэтсъярви связывается через протоку: оз. Инари (Финляндия) – Гренсеватн (Норвегия, Россия) – Хеюхенъярви – Воуватусъярви – Каттоламполо – Боссояврре – Скугватн – Сальмиярви – Куэтсъярви (Россия). Рассматривается возможность моделирования уровенного режима озера Куэтсъярви, являющегося частью указанной системы, в условиях дефицита исходной информации. Для исследования привлекаются данные из открытых источников Российской и Финской гидрометеорологических служб.

Озеро Куэтсъярви считается одним из самых загрязненных водоемов в Арктике: оно относится к категории малых озер (Нежиховский, 1988) и принимает в себя колоссальный объем вредных выбросов, который поступает через р. Колосйоки от медно-никелевого комбината.

Сток из оз. Куэтсъярви осуществляется через расположенную в западной части протоку в оз. Сальмиярви, которое входит в трансграничную озерно-речную систему оз. Инари (Инариярви) – р. Паз (Пасвик, Паттасйоки) (Зубова, Кашулин и др., 2019) и уже менее чем через 50 км отдает свои воды в Баренцево море.

Состояние экосистемы оз. Куэтсъярви на протяжении 30 лет исследуется учеными Кольского научного центра Российской академии наук. Однако в этом вопросе важна не только экологическая составляющая, которая является результатом антропогенной нагрузки, но и гидрологическая составляющая, а именно – уровенный режим озера, который является важным показателем водообмена территорий. Поэтому изучение и моделирование уровня озер необходимо для понимания текущего и перспективного состояния водной системы.

Перечисленные факты, а также возможность восстановления туристического потенциала, сделали актуальным вопрос о возможности моделирования водного режима объекта из этой системы – уровня воды озера Куэтсъярви.

Поскольку вся система расположена на территории трех государств (Россия, Норвегия, Финляндия), то в исследовании использовались данные гидрометеорологических служб России и Финляндии, а именно: суточные уровни воды оз. Куэтсъярви – пгт Никель ($H_{оз}$), р. Колосйоки (Россия) и р. Паттасйоки – п. Неллим (Финляндия) (Finnish…, 2025), метеорологические данные по метеостанциям (МС) пгт

Никель, с. Янискоски (Россия), п. Неллим (Финляндия) (Finnish…, 2025). Карта-схема гидрометеорологической изученности представлена на рисунке 1.

Моделирование уровенного режима оз. Куэтсъярви осуществлялось с использованием регрессионного анализа, который позволяет поэтапно исключать незначимые предикторы.

Изначально факторами, воздействующими на зависимую переменную уровень озера Куэтсъярви ($H_{оз}$), были следующие величины: уровень воды реки Колосйоки, впадающей в озеро ($H_{пр}$); уровень воды реки Паз, являющейся основой исследуемой системы ($H_{ф}$); атмосферное давление на уровне моря (P); относительная влажность воздуха (U); скорость ветра (Ff); облачность (N); температура точки росы (Td); высота снежного покрова (S); температура воздуха (T); атмосферные осадки (R); дефицит насыщения водяного пара (D). Для корректной работы, возможности сравнения, все перечисленные параметры стандартизировались.



Рис.1. Карта-схема гидрометеорологической изученности района исследования
● – метеостанция ▲ – озерный гидропост △ – речной гидропост

	Корреляции (Регрессия_Куэтсъярви)											
Переменная	Нпр_к	Ноз_ф	Pcp	Ucp	Ffcp	Ncp	Tdcp	SSS	Tcp	RRR	def	Ноз
Нпр_к	1,000000	0,209888	0,068050	-0,166389	0,058952	0,023600	0,431583	-0,472984	0,463884	0,115177	-0,108662	0,949091
Ноз_ф	0,209888	1,000000	0,003074	0,143246	-0,074187	0,090562	0,396262	-0,595398	0,343286	0,118987	0,080964	0,227542
Pcp	0,068050	0,003074	1,000000	0,217874	0,136349	0,165731	-0,016056	-0,093472	0,059031	-0,001229	0,047320	0,095744
Ucp	-0,166389	0,143246	0,217874	1,000000	0,052671	0,636010	-0,108280	0,185294	-0,259677	0,298447	0,221870	-0,136147
Ffcp	0,058952	-0,074187	0,136349	0,052671	1,000000	0,259352	0,167029	0,038715	0,215894	0,178870	0,028567	0,067073
Ncp	0,023600	0,090562	0,165731	0,636010	0,259352	1,000000	0,149562	0,029823	0,057931	0,295434	0,135302	0,025283
Tdcp	0,431583	0,396262	-0,016056	-0,108280	0,167029	0,149562	1,000000	-0,620774	0,950606	0,225933	-0,044478	0,384321
SSS	-0,472984	-0,595398	-0,093472	0,185294	0,038715	0,029823	-0,620774	1,000000	-0,641689	-0,090672	0,042101	-0,441022
Tcp	0,463884	0,343286	0,059031	-0,259677	0,215894	0,057931	0,950606	-0,641689	1,000000	0,160069	-0,109280	0,425996
RRR	0,115177	0,118987	-0,001229	0,298447	0,178870	0,295434	0,225933	-0,090672	0,160069	1,000000	0,077993	0,106122
def	-0,108662	0,080964	0,047320	0,221870	0,028567	0,135302	-0,044478	0,042101	-0,109280	0,077993	1,000000	-0,098846
Ноз	0,949091	0,227542	0,095744	-0,136147	0,067073	0,025283	0,384321	-0,441022	0,425996	0,106122	-0,098846	1,000000

Рис.2. Корреляционная матрица

Регрессионный анализ состоял из следующих этапов:

1. Построение корреляционной матрицы с целью выявления мультиколлинеарности, то есть предикторов с ложной корреляцией $R > 0,7$. На рисунке 2 видно, что мультиколлинеарность проявляется в связи температуры воздуха T и температуры точки росы Td.

2. Изучение относительной важности предикторов с коэффициентом $R > 0,7$. Для этого оценивается коэффициент регрессии β_i, полученный для стандартизированных данных. Его величина вычисляется для каждой независимой переменной и показывает силу и тип взаимосвязи этой независимой переменной с зависимой. Поэтому из пары предикторов, у которых обнаружена мультиколлинеарность, исключается тот, у которого β_i меньше без учета знака. В нашем случае $\beta_T = 0,168$; $\beta_{Td} = -0,187$. Следовательно, из анализа исключается *T*.

3. Оценка статистической значимости коэффициентов регрессии. Проверяется выполнение условия по уровню значимости: если *p-value* < 0,05, то можно считать, что коэффициент статистически значимо отличается от нуля. Предикторы, для которых это условие не выполняется, исключаются из анализа. В нашем случае, в первой итерации, исключается скорость ветра *Ff* с *p-value* = 0,073; атмосферные осадки *R* с *p-value* = 0,64; дефицит насыщения водяного пара *D* с *p-value* = 0,61. На рисунке 3 красными рамками выделены предикторы, исключенные из дальнейшего анализа согласно пунктам 2 и 3.

N=5479	Итоги регрессии для зависимой переменной: Ноз (Регрессия_Куэтсъярви) R= ,95203361 R2= ,90636800 Скоррект. R2= ,90617961 F(11,5467)=4811,0 p<0,0000 Станд. ошибка оценки: ,30630					
	БЕТА	Ст.Ош. БЕТА	B	Ст.Ош. B	t(5467)	p-знач.
Св.член			-0,000000	0,004138	-0,0000	0,999979
Нпр_к	0,961515	0,004893	0,961515	0,004893	196,5046	0,000000
Ноз_ф	0,059420	0,005577	0,059420	0,005577	10,6543	0,000000
Pcp	0,013223	0,004761	0,013223	0,004761	2,7773	0,005500
Ucp	0,037950	0,007020	0,037950	0,007020	5,4062	0,000000
Ffcp	0,008349	0,004654	0,008349	0,004654	1,7939	0,072884
Ncp	-0,013783	0,005839	-0,013783	0,005839	-2,3607	0,018274
Tdcp	-0,187236	0,016945	-0,187236	0,016945	-11,0498	0,000000
SSS	0,035243	0,006833	0,035243	0,006833	5,1574	0,000000
Tcp	0,168819	0,017958	0,168819	0,017958	9,4005	0,000000
RRR	-0,002120	0,004589	-0,002120	0,004589	-0,4621	0,644044
def	0,002207	0,004315	0,002207	0,004315	0,5114	0,609080

Рис. 3. Результаты регрессионного анализа

Перечисленные этапы повторяются до тех пор, пока в матрице не будет факторов с ложной корреляцией, а уровень значимости коэффициентов регрессии оставшихся предикторов будет удовлетворять условию *p-value* < 0,05.

Таким образом, в результате проведенного регрессионного анализа для моделирования остались следующие предикторы: уровень притока $H_{пр}$; уровень воды реки Паз $H_ф$; относительная влажность воздуха *U* (принципиальная важность которой в формировании уровенного режима водных объектов была описана в работе (Бабкин, Постников, 2002)). Эти предикторы вошли в регрессионные модели, полученные для периода параметризации 2008–2021 гг. и для поверочного периода – 2022 год. Уравнения включали предикторы со сдвижкой по времени (для получения заблаговременности при прогнозе) и без сдвижки. В качестве наилучшего периода заблаговременности (с наивысшим значением коэффициента детерминации модели R^2) был определен временной сдвиг (τ) равный 3 суткам. Регрессионные модели имеют вид:

1. Без заблаговременности

$$H_{оз} = 1,24\, H_{пр} + 0,01\, H_ф + 0,022U + 109,7 \quad (1)$$

2. заблаговременность τ = 3 суток

$$H_{оз} = 1,21\, H_{пр} - 0,013\, H_ф + 0,043U + 131,3 \quad (2)$$

Эффективность моделей оценивалась как для периода параметризации, так и для поверочного периода с помощью критериев S/σ_Δ (Георгиевский, Шаночкин, 2007), *NSE* (критерий Нэша–Сатклиффа), также оценивалась обеспеченность модели *P* (%). Результаты оценки приведены в таблице.

Таблица. Результаты оценки эффективности регрессионных уравнений для оз. Куэтсъярви

Период параметризации (2008–2021 гг.)					
Без заблаговременности, $R^2 = 0{,}90$			$\tau = 3$ суток, $R^2 = 0{,}82$		
S/σ_Δ	*P*	*NSE*	S/σ_Δ	*P*	*NSE*
2,01	60,5	0,90	1,12	70,9	0,82
Поверочный период (2022 г.)					
S/σ_Δ	*P*	*NSE*	S/σ_Δ	*P*	*NSE*
0,80	78,6	0,99	0,99	79,0	0,87

Анализ таблицы и рисунка 4 позволяет выявить следующее: коэффициенты детерминации R^2 показывают, что функция отклика построенной модели имеет хорошую связь с обуславливающими ее предикторами; значения критериев эффективности S/σ_Δ удовлетворяет критическому условию ($S/\sigma_\Delta \leq 0{,}80$ при $n \geq 25$) только в модели без заблаговременности для поверочного периода, однако графический анализ показывает, что смоделированные уровни хорошо повторяют ход фактических уровней. Разрешить проблему несоответствия аналитического и графического анализа помогает критерий Нэша–Сатклиффа, который изменяется в пределах от 0 до 1. Соответственно, чем ближе значение *NSE* к 1, тем лучше смоделированные значения описывают фактические (Сумачев, 2019), что и можно увидеть в таблице 1.

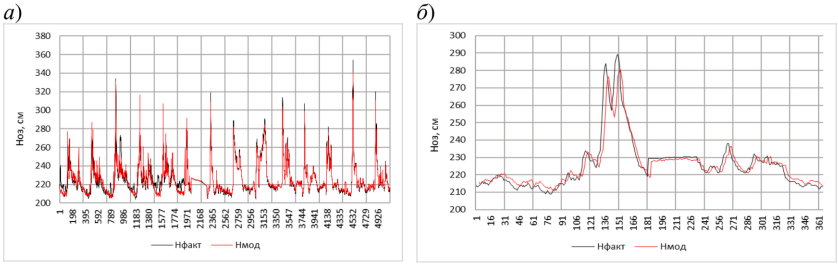


Рис. 4. График изменений фактических и смоделированных уровней воды оз. Куэтсъярви для периода параметризации без заблаговременности *а*) и для поверочного периода с $\tau = 3$ суток *б*)

Можно сделать вывод, что полученные регрессионные модели удовлетворят критическим условиям, применяемым к оценке эффективности методик. Следовательно, предикторы, выявленные в результате анализа (уровень притока $H_{пр}$; уровень воды реки Паз $H_ф$; относительная влажность воздуха *U*), можно считать значимыми с заблаговременностью $\tau = 3$ суток для моделирования уровенного режима оз. Куэтсъярви, являющегося частью трансграничной озерно-речной системы.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ № FSZU-2023-0002.

Литература

Бабкин В.И., Постников А.Н. Циклонические осадки и сток Оби и Енисея в маловодные и многоводные годы // Метеорология и гидрология. 2002. №12. С. 79–82.

Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007. 436 с.

Нежиховский Р.А. Наводнения на реках и озерах. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 183 с.

Сумачев А.Э. Оценка возможности прогнозирования максимального ледоходного уровня воды с использованием максимальной толщины льда на примере рек бассейна Северной Двины // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. № 54. Научно-теоретический журнал. СПб: РГГМУ, 2019. С. 48–57.

Finnish Environment Institute (SYKE) // Электронный ресурс. Режим доступа URL: http://wwwi3.ymparisto.fi/i3/paasivu/eng/etusivu/etusivu.htm (дата обращения 19.01.2025).

Finnish Meteorological Institute // Электронный ресурс. Режим доступа URL: https://en.ilmatieteenlaitos.fi/download-observations (дата обращения 19.01.2025).

MODELING THE WATER LEVEL REGIME OF LAKE KUETSJARVI, PART OF THE TRANSBOUNDARY LAKE-RIVER SYSTEM

A.A. Batmazova, E.V. Gaidukova

The paper studies the transboundary lake-river system of the Pasvik River, in which Lake Kuetsjärvi is connected through the channel: Lake Inari (Finland) – Grensevatn (Norway, Russia) – Heyhenjärvi – Vouvatusjärvi – Kattolampolo – Bossoyavrre – Skogvatn – Salmijärvi – Kuetsjärvi (Russia). The possibility of modeling the level regime of Lake Kuetsjärvi, which is part of the specified system, is considered under conditions of a deficit of initial information. The study uses data from open sources of the Russian and Finnish hydrometeorological services.

ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ МАЛОГО ОЗЕРА; ЭФФЕКТЫ ТЕПЛОВОЙ ИНЕРЦИИ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВОЛНЫ

С.Р. Богданов, Н.И. Пальшин, Т.В. Ефремова, Г.Э. Здоровеннова, Р.Э. Здоровеннов, Ю.С. Новикова

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

Представлены результаты анализа термического режима небольшого лесного озера в период открытой воды, когда превалирующими внешними факторами являются ночное выхолаживание и суточные колебания температуры воздуха. Отклик водной толщи на периодические внешние воздействия происходит с некоторым запаздыванием, определяемым тепловой инерцией эпилимниона. В первом приближении подобный отклик, приводящий к гистерезисным эффектам, можно рассматривать как результат прохождения температурной волны. Расчет параметров этой волны позволяет произвести оценку толщины термически активного слоя и коэффициента турбулентной диффузии даже с использованием данных с минимальным количеством температурных датчиков.

Параметры поверхностного слоя (ПС) водной толщи озер и их динамика во многом определяют характер химических и биологических процессов, протекающих в озере, а также особенности отклика озер на внешние воздействия. Однако даже определение этого слоя остается неоднозначным, что проявляется в терминологической неопределенности: эпилимнион, поверхностный пограничный слой, квазиоднородный слой, термически активный слой (thermally reactive layer). При этом использование аморфных определений, например, «relatively well-mixed surface layer» приводит к большим сложностям при сравнении и обобщении результатов исследований.

С содержательной точки зрения сложность понятия поверхностного слоя обусловлена, например, тем, что обычно эпилимнион считают относительно хорошо перемешанным, практически однородным по температуре, и в то же время именно этот слой физически определяется как наименее инертный и наиболее подверженный внешним воздействиям (Toffolon et al., 2022; Brainerd and Gregg,1995). В этой связи, как отмечено, например, в (Brainerd and Gregg,1995; Sutherland et al., 2014) следует различать перемешанный слой (mixed layer), во многом отражающий предшествующую историю перемешивания, и собственно перемешиваемый слой, в котором в данный момент происходят активные процессы турбулентного обмена.

Как следствие, при количественном описании возникает неопределенность даже при определении толщины поверхностного слоя. Здесь используются различные критерии (Brainerd and Gregg,1995; Gray et al., 2019), основанные на оценке скачков температуры и плотности или соответствующих градиентов, глубины термоклина, скорости диссипации энергии и масштаба Торпа (Sutherland et al., 2014). Результаты, полученные при использовании различных методов, существенно отличаются и весьма чувствительны к варьированию пороговых значений определяющих параметров.

Особое значение при изучении ПС имеют задачи, связанные с процессами аккумуляции и сохранения тепла. Особенности этих процессов, как показано в (Piccolroaz et al., 2013; Toffolon et al., 2022), определяются тепловой инерцией водной толщи, которая, в свою очередь, весьма чувствительна к термической структуре столба и, в частности к размерам и параметрам поверхностного слоя. При этом эффекты инерции проявляются, например, в характере отклика системы на сезонные изменения внешних условий. Так, при изучении взаимосвязи температур ПС и воздуха в годовом цикле обнаружены эффекты запаздывания и гистерезиса. Аналогичный эффект выявлен и при изучении взаимосвязи температуры ПС и его толщины.

В целом водная толща подвержена различным периодическим внешним воздействиям, для которых характерны не только годовые, но также синоптические и дневные циклы. В данной работе проанализирован отклик системы на внешнее воздействие, характеризуемое суточной периодичностью. Показано, что анализ инерционности этого отклика, в частности - оценка запаздывания, позволяет произвести количественный расчет параметров ПС.

В качестве основного объекта исследования было выбрано небольшое (порядка 50 × 140 м) озеро Чудесная ламба, расположенное в заповеднике «Кивач», в южной части Карелии. Залесенность берегов и расположение в глубокой котловине во многом подавляют ветровое воздействие, так что превалирующими внешними факторами являются ночное выхолаживание и суточные колебания температуры воздуха.

Основной массив данных, полученных в экспериментах на Чудесной ламбе, включал метеоданные и данные термокосы (длительные измерения в течение 5-6 месяцев с дискретностью 5 минут, 17 датчиков температуры, установленных с дискретностью 15 см при средней глубине озера ~ 3 м).

На качественном уровне присутствие активного поверхностного слоя хорошо иллюстрируется динамикой температуры на разных глубинах (рис. 1). В начале летнего

сезона толщина этого слоя не превышает одного метра, при этом в начале осени глубина термоклина превышала 2 м (рис. 2).

Суточная цикличность в эволюции ПС характеризуется тем, что в дневное время в результате объемного прогрева происходит ретратификация слоя, в ночное время – восстановление перемешанного слоя за счет поверхностного охлаждения. При этом отклик термической структуры толщи на периодические внешние воздействия оказывается неоднородным по глубине. Такой эффект связан с тепловой инерцией системы, с запаздыванием ее реакции на внешнее воздействие. При этом основная задача заключалась в оценке возможностей количественного расчета толщины ПС и коэффициента турбулентной диффузии K по значениям параметров, характеризующих тепловую инерцию.

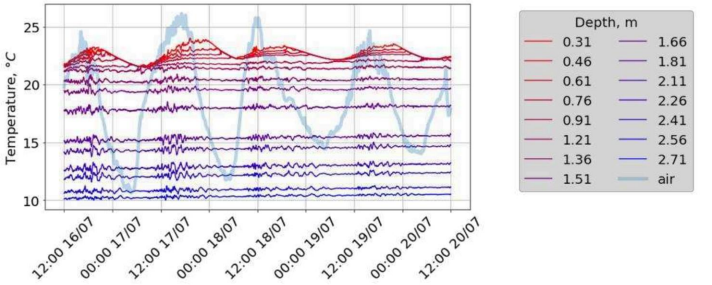


Рис. 1. Динамика температуры воды на разных глубинах, а также воздуха в течение 4-дневного интервала времени, с 16 июля 2024 г.

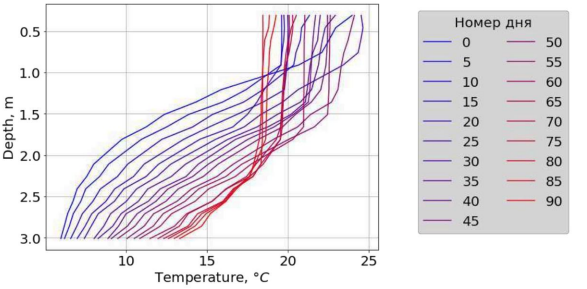


Рис. 2. Семейство профилей температуры с 6 июня по 4 сентября 2024 г, шаг по времени – 5 дней

В качестве базовой модели для такой оценки выбрана классическая «задача без начальных условий» (Тихонов и Самарский, 1977), в рамках которой рассматривается распространение тепла в некотором слое под воздействием периодического изменения температуры на его верхней границе. В простейшем случае синусоидального внешнего воздействия решением этой задачи служит так называемая температурная волна:

$$t(z,\tau) = A \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2K_z}}z\right) \cos\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2K_z}}z + \omega\tau\right) \quad (1)$$

Здесь A и ω – амплитуда и частота внешнего воздействия; ось z направлена вниз, z = 0 соответствует поверхности; водная толща для простоты считается весьма протяженной вдоль z в том смысле, что ее толщина намного превосходит характерный

масштаб $\delta = \sqrt{2K/\omega}$, который первом приближении можно отождествить с толщиной активного поверхностного слоя. Принципиальным является присутствие в основной формуле искомого коэффициента K; в рамках рассматриваемой модели именно эта величина, наряду с частотой ω, определяет отклик системы.

В рамках рассматриваемой модели отклик системы имеет три основных особенности:

- амплитуда температурных возмущений затухает с глубиной по экспоненциальному закону с характерным масштабом $\delta = \sqrt{2K/\omega}$,
- распространение волны вдоль z происходит со скоростью $v = \omega\delta$,
- с увеличением глубины происходит запаздывание колебаний; фаза колебаний на глубине z сдвинута по отношению к исходной (на поверхности) на величину z/δ.

Рассматриваемая модель весьма идеализирована: в реальности воздействие не является гармоническим, водная толща имеет конечную глубину, величина K не является постоянной по глубине, в невозмущенном состоянии толща стратифицирована, существенный вклад в динамику температуры вносит неоднородный по глубине периодический объемный прогрев толщи за счет коротковолнового излучения. Однако все три указанных особенности модели могут быть ключом к определению параметра δ и коэффициента K, при этом в первом приближении формулу (1) можно рассматривать как выражение для отклонения температуры от равновесного профиля.

Изучение особенностей термической структуры слоя и ее эволюции основывалось на анализе корреляций температурных изменений на разных глубинах. В качестве примера на рисунке 3 приведены диаграммы, характеризующие корреляцию температур на трех глубинах в пределах ПС (parity diagram) для 4- дневного интервала с 15 по 19 июля 2024 г. Такие диаграммы наглядно иллюстрируют запаздывание отклика системы на внешнее воздействие, например, нарушение синхронности изменения температур в дневном цикле (на этапе охлаждения), а также сдвиг момента достижения максимума температуры по мере увеличения глубины. При этом кривые на плоскости температур представлены последовательностью замкнутых контуров, представляющих петли гистерезиса. В случае идеализированной волны (1) такие петли представляют собой семейство эллипсов, угол наклона которых изменяется с глубиной.

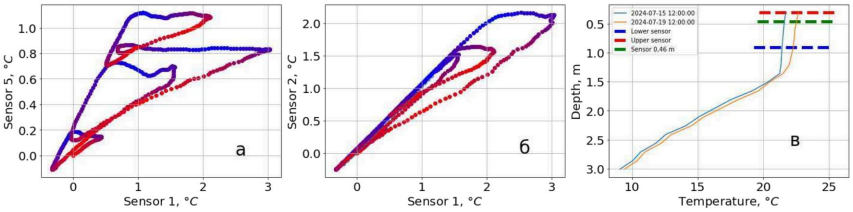


Рис. 3. Изменение температуры в 4 – суточном интервале на глубинах 0,31 м и 0,91 м (а), 0,31 м и 0,46 м (б) и профили температуры в начале и конце этого интервала (в). В цветовой гамме на панели (а) красному цвету соответствуют утренние и дневные часы (нагрев), синему цвету - периоды охлаждения за счет вечернего и ночного охлаждения

Расчет основных параметров температурной волны, иллюстрируемый рисунком 4, был осуществлен на основе оценок времени запаздывания Δt температурной волны на двух разных глубинах z_2 и z_1 и, соответственно, сдвига фаз $\Delta\varphi = \Delta t\ \omega$. При этом глубина затухания δ и коэффицент турбулентной диффузии рассчитывались по формулам: $\delta = (z_1 -$

z_2)/Δφ, $K = (z_1 - z_2)^2/(2\omega(\Delta t)^2)$. При этом, как показали расчеты, бóльшая точность подобных количественных оценок достигается при рассмотрении слоев с относительно небольшим (~ π/2) сдвигом фаз; при бóльших значениях Δφ погрешность резко возрастает из-за экспоненциального уменьшения амплитуды суточных колебаний с глубиной. Для увеличения точности оценок величины Δ*t* использовалась также прием «синоптического дня» (*a composite day* (Sutherland et al., 2014): для каждого момента времени производилось усреднение соответствующих величин, измеренных именно в это время в разные дни выбранного синоптического интервала (5-7 дней).

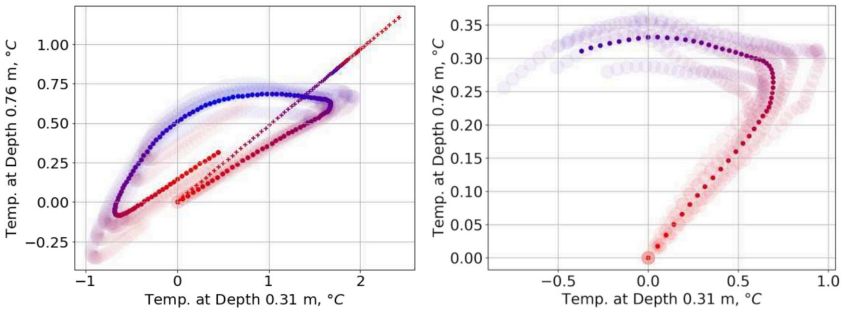


Рис. 4. Слева: суточный (с полудня) цикл прироста температуры на глубинах 0,31 м и 0,76 м. для «синоптического дня». Полупрозрачные линии представляют динамику температур для 6 дней, начиная с 20 июля. Шаг по времени – 10 мин. Маркеры типа «+» представляют вариации температуры, обусловленные лишь радиационным нагревом. Справа: 9-часовой (с 15:00) фрагмент суточной эволюции температур, включающий точки максимума для обоих глубин

Результаты расчета параметра δ, который в первом приближении может быть отождествлен с толщиной термически активного слоя, приведены на Рис. 5. Рассчитанные для летнего периода значения коэффициента турбулентной диффузии *K* варьировались в пределах (2-5) 10^{-5} м^2/с, что в сотни раз превышает молекулярное значение. Следует также отметить важное преимущество предложенного метода оценки толщины активного слоя и величины *K*, которое заключается в возможности использования лишь небольшого (минимальное количество - 2) числа датчиков.

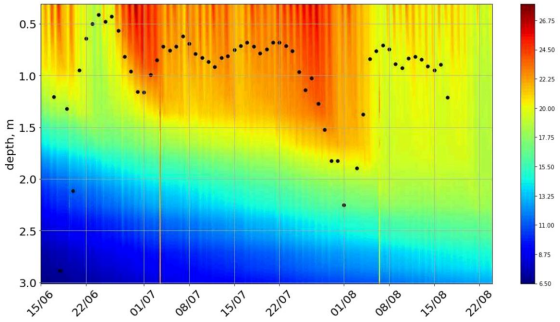


Рис 5. Динамика температурного профиля и глубины активного слоя

Работа выполнена в рамках проекта «Российская система климатического мониторинга» (ВИП ГЗ) при финансовой поддержке Министерства экономического развития РФ.

Литература

Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. 735 с.

Brainerd K.E., Gregg M.C. Surface Mixed and Mixing Layer Depths // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1995. 42. P. 1521-1543.

Gray E, Mackay EB, Elliott JA, Folkard AM, Jones ID. Wide-spread inconsistency in estimation of lake mixed depth impacts interpretation of limnological processes // Water Res. 2020. 168. 115136.

Piccolroaz S., Toffolon M., Majone B. A simple lumped model to convert air temperature into surface water temperature in lakes // Hydrology and Earth System Sciences. 2013. 17(8), 3323–3338.

Sutherland G., Reverdin G., Marié L., Ward B. Mixed and mixing layer depths in the ocean surface boundary layer under conditions of diurnal stratification // Geophysical Research Letters. 2014. 41 (23). P. 8469-8476.

Toffolon M., Yousefi A., Piccolroaz S. Estimation of the thermally reactive layer in lakes based on surface water temperature // Water Resources Research. 2022. 58. e2021WR031755.

THERMAL REGIME OF A SMALL LAKE; THERMAL INERTIA EFFECTS AND TEMPERATURE WAVES

S.R. Bogdanov, T.V. Efremova, N.I. Palshin, G.E. Zdorovennova, R.E. Zdorovennov

The results of an analysis of the thermal regime of a small forest lake during the period of open water, when the prevailing external factors are night cooling and daily fluctuations in air temperature, are presented. The response of the water column to periodic external forcing occurs with some delay, determined by the thermal inertia of the epilimnion. To a first approximation, such a response, leading to hysteresis effects, can be considered as a result of the passage of a temperature wave. Calculation of the parameters of this wave makes it possible to estimate the thickness of the thermally active layer and the coefficient of turbulent diffusion using even a minimum number of temperature sensors.

СОВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВОДНОГО БАЛАНСА ОЗЕРА СМОЛИНО

А.И. Второва[1], Н.В. Мякишева[2]

[1]Отдел водных ресурсов по Челябинской области Нижне-Обского бассейнового водного управления

[2] Российский государственный гидрометеорологический университет

В работе выполнен вероятностный анализ внутригодовой и многолетней изменчивости уровня озера Смолино, залегания подземного стока, характеристики многолетней изменчивости увлажненности. Применены методы теории случайных процессов. Результаты анализа обобщены в терминах вероятностной модели. Учтены изменения климата.

Озеро Смолино расположено на южной окраине г. Челябинска. С 1954 г. цикличность колебания уровня воды в озере наблюдается от 0.5 м до 3.0 м. Увеличение объема воды в чаше озера приводит к повышению уровня залегания грунтовых вод. Подтопление и затопление урбанизированной территории г. Челябинска является следствием негативного воздействия вод, как антропогенной составляющей, так и климатической.

Озеро Смолино до 1930 г. имело естественный гидрологический режим и находилось в стадии усыхания. Отметка уровня воды составляла 214.6 м БС (Андреева, 1973). За последние годы уровень воды в озере значительно повысился (почти на 3 м выше среднего многолетнего). Историческая линия антропогенной составляющей составлена в табличной форме, но в данной статье не приводится ввиду ее громоздкости.

Учитывая, что данный водоем бессточный, расположен в урбанизированной территории, резкие изменения составляющих его водного баланса характерны для зарегулированных водоемов, но противоречивы для бессточного водоема.

Рассматривая антропогенную составляющую, как основную причину дисбаланса водного объекта возникают дополнительные трудности в составлении природной составляющей.

К антропогенным факторам повышения уровня воды в озере, как одну из основных составляющих водного баланса, можно отнести сброс сточных вод с предприятий г. Челябинска. Прекращение сброса сточных вод и принудительная переброска стока из озера в реку Чумляк давали незначительную стабилизацию уровня. Отметка стабилизации уровня воды в озере 217.0 м БС. Также основной из причин эксперты считали создание в конце 60-х годов прошлого столетия Шершневского водохранилища на р. Миасс, но на сегодняшний день доказательная база влияния водохранилища на водный баланс Смолино не подтвердилась.

Уровенный режим озера является интегральным показателем увлажненности и изменений климата на урбанизированной территории. В свою очередь климатические факторы - температура воздуха и атмосферные осадки воздействуют на динамику колебаний уровня озера (Мякишева, 2009).

Для характеристики многолетней изменчивости увлажненности были рассчитаны временные ряды индексов Де-Мартона α^M в период с 1960 по 2024 гг. с использованием данных по метеостанции Челябинск (Филатов и др., 2014). Рассчитанный ряд индексов Де-Мартона α^M приведен на рисунке 1.

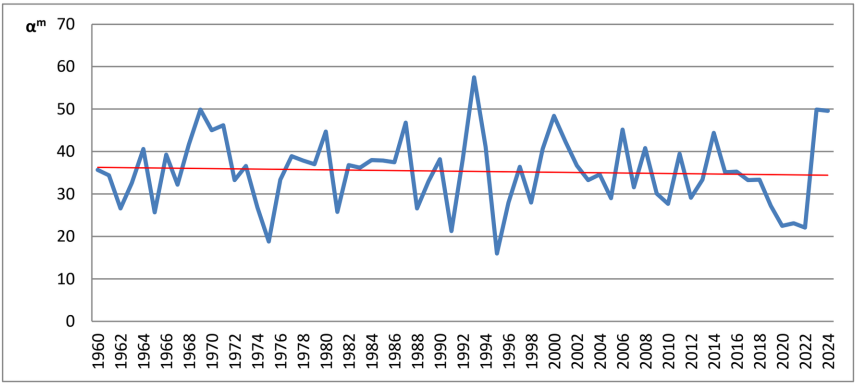


Рис. 1. Индекс Де-Мартона МС Челябинск

На графике наблюдается незначительный отрицательный тренд, что свидетельствует о незначительном уменьшении увлажненности территории. Для изучения структуры временного ряда уровней воды озера Смолино использовались данные за период инструментальных наблюдений с 1960 по 2022 гг. (62 года).

На рисунке 2 приведен график колебаний уровня озера Смолино за весь период инструментальных наблюдений. График не имеет четко выраженных пиков, которые соответствовали бы различным периодам колебаний. Установленные циклы, как правило дают возможность провести фильтрацию рядов и выделить значимые гармонические составляющие. Для этих целей существуют различные аппроксимирующие функции (кубические сплайны, преобразование Фурье и т.п.). В данной работе для выделения гармоник и фиксаций квазипериодических колебаний использован фильтр Баттерворта (Мякишева, Бирюкова, 2018). Минимум уровней пришелся на середину 70-х годов. Максимальный уровень наблюдался в 1994 г. Многолетние колебания не просматриваются. Положительный линейный тренд за рассматриваемый период годовой уровень повысился более чем на 220 см.

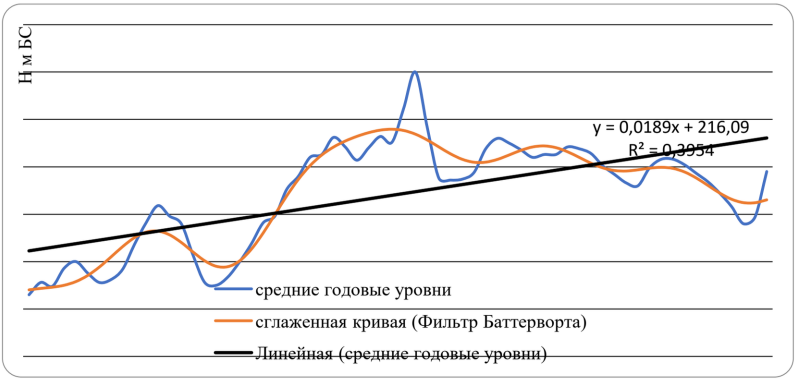


Рис. 2. Хронологический график хода уровней воды озера Смолино

Основными факторами формирования естественного режима подземных вод являются условия, характер и сроки питания водоносных горизонтов. Для территории Челябинской области характерен тип сезонного, преимущественно, весенне-осеннего питания подземных вод, в условиях отсутствия мерзлоты, но наличия устойчивого зимнего промерзания верхней части зоны аэрации.

Основным объектом получения информации о состоянии подземных вод является наблюдательный пункт (скважина, родник, гидрометрический пост, метеопункт). Совокупность наблюдательных пунктов, организуемых на типовых участках, характеризующихся однородными геолого-гидрогеологическими условиями, и одно- или многофакторным техногенным воздействием, охватывающим природные или природно-техногенные системы, представляют специализированные наблюдательные объекты (СНО). Контроль состояния подземных вод на природных водных объектах (естественные гидрогеологические условия) проводится на Смолинском СНО опорной государственной наблюдательной сети Росгеологии.

Смолинский расположен на западном берегу оз. Смолино на юго-восточной окраине г. Челябинска, характеризует естественный режим подземных вод водоносных зон трещиноватости карбонатных отложений палеозоя Большеуральской ГСО.

Наблюдения ведутся по 3 скважинам с 1972 г. В данной работе приведен анализ ряда по средним годовым уровням на скважине 37. На рисунке 3 приведен график колебаний уровня подземного стока в скважине 37, расположенной на водосборной площади озера Смолино за весь период инструментальных наблюдений с 1972 по 2024 гг.



Рис. 3. Хронологический график хода уровней воды в СКВ. 37 Смолинского наблюдательного пункта подземных вод

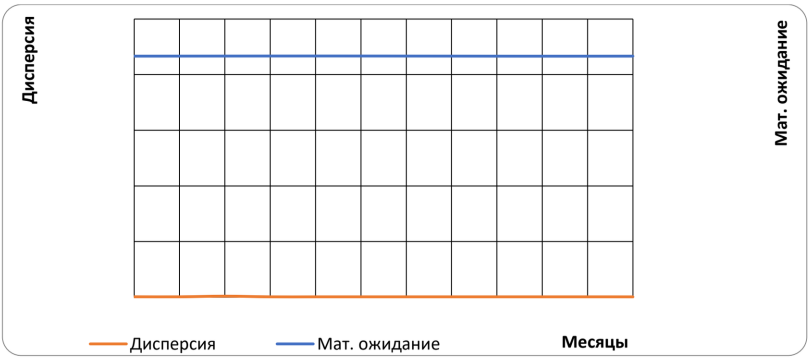
На графике видно, минимум уровней пришелся на середину 70-х годов и зафиксирован в 2022 г. Максимальный уровень наблюдался также, как и уровень в озере, в 1994 г. Многолетние колебания минимальных уровней зафиксированы с промежутком 48 лет. Линейный тренд за рассматриваемый период подземного стока остался неизменен. Увеличение урбанизированной территории на водосборной площади озера увеличило долю непроницаемых поверхностей, что привело к росту коэффициента поверхностного стока и беспрепятственного попадания осадков в водоем. В тоже время происходит снижение доли осадков, фильтрующихся в подземные горизонты. Также в результате застройки изменилась граница водосборной площади поверхностного и подземного стока озера. Прокладка сетей ливневой канализации, подземных городских коммуникаций, как правило, увязываются с рельефом поверхности земли и с поверхностным водосбором. Сами коммуникации зачастую служат дренажной системой, которая перехватывает грунтовые воды. Таким образом, в северной части водосбора озера созданы условия для притока дополнительного количества воды за счет развития подземных коммуникаций, поскольку часть подземного стока водосбора реки Миасс переводится в бассейн озера Смолино.

Для анализа ритмики годовой цикличности уровня воды в озере Смолино использовался метод теории периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП). Эти методы изложены в работе (Филатов и др., 2014). Основными вероятностными оценками ПКСП являются математическое ожидание m(t), дисперсия D(t), матрица корреляционных зависимостей внутригодовой изменчивости K(t, x). Они хорошо отображают особенности ритмики годовой цикличности гидрометеорологических процессов.

Математическое ожидание ПКСП характеризует регулярную компоненту внутригодовых изменений процесса и позволяет оценить средний многолетний

повторяющийся образ внутригодового колебания; дисперсия - отклонения процесса от средней многолетней нормы.

На рисунке 4 представлен график оценок математического ожидания и дисперсии внутригодовых колебаний уровня воды озера за весь период инструментальных наблюдений.



Р

Рис. 4. График оценок математического ожидания и дисперсии средних месячных уровней воды озера Смолино

На графиках кривая среднего многолетнего внутригодового хода уровня озера характеризуется сглаженным ходом. Она имеет четко выраженный сезонный характер. Максимум наблюдался в мае, минимум – в октябре. За период наблюдения на кривой дисперсии наблюдается один ярко выраженный максимум - в марте.

Многолетние изменения индекса де Мартона αМ отражают незначительное уменьшение увлажненности территории. Временной ход уровня воды в озере можно рассматривать как индикатор урбанизированной территории водосборной площади бассейна озера Смолино.

На озере Смолино выявлен значимый положительный линейный тренд. Выявленный линейный тренд является антропогенной составляющей.

Внутригодовые колебания характеризуется сглаженным ходом, максимум наблюдается в мае, минимум – в октябре.

На озере Смолино выявлен значимый положительный линейный тренд. За рассматриваемый период годовой уровень повысился более чем на 330 см. Выявленный линейный тренд, является тенденцией изменения уровня в связи с изменением подстилающей поверхности на его водосборной площади. Полученные результаты позволяют в дальнейшем рассматривать озера Смолино, функционирующее преимущественно в антропогенном режиме, в качестве озера-аналога при исследовании неизученных озер, расположенных на урбанизированных территориях, что внесет определенный вклад в освоении городской среды.

В дальнейшем предполагается установить связь между уровнем воды в озере и подземным стоком.

Литература

Андреева М.А. Озера Среднего и Южного Урала. Челябинск: Южно-Уральское кн. изд-во, 1973. 270 с.

Мякишева Н.В. Многокритериальная классификация озер. СПб: Гидрометоиздат,

2009. 153 с.

Мякишева Н.В., Бирюкова В.А. Разномасштабная изменчивость уровня воды в озерах России» // Естественные и технические науки. 2018. №12. С. 181-187.

Филатов Н.Н., Назарова Л.Е., Георгиев Л.П., Ефремова Т.В., Пальшин Н.И. Руховец Л.А. Влияние изменений климата на экосистемы озер севера европейской территории России // Ученые записки РГГМУ. 2014. №34. С. 48–55.

MODERN FEATURES OF WATER BALANCE LAKE SMOLINO

A.I. Vtorova, N.V. Myakisheva

A probabilistic analysis of the intra-annual and long-term variability of the Smolino lake level, the occurrence of underground runoff, and the characteristics of long-term variability of moisture content is performed. Methods of the theory of random processes are applied. The results of the analysis are generalized in terms of a probabilistic model. Climate changes are taken into account.

ОСОБЕННОСТИ ГОДОВОГО ХОДА ТЕМПЕРАТУР ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ СПЛАВИННЫХ КАРСТОВО-СУФФЗИОННЫХ БОЛОТ

Д.В. Зацаринная
Тульское музейное объединение
Тульский государственный университет
Национальный парк «Тульские засеки»

В работе описаны изменения температуры торфяной залежи карстово-суффозионного болота (Национальный парк «Тульские засеки»), расположенного на северо-востоке Среднерусской возвышенности в лесостепной природной зоне. Изменения температуры поверхностного слоя торфяной залежи коррелируют с температурой воздуха. С увеличением глубины сезонные колебания становятся менее заметными, сокращается амплитуда годовых колебаний температур. Для залежи характерно запаздывание наступления основных максимумов и минимумов, которое растет с увеличением глубины. Значения температуры поверхностного слоя залежи не опускались ниже 0°С. Придонные торфяные отложения существуют автономно и не зависят от погодных изменений, их температура равна +4 °С.

Температурный режим торфяных отложений является одним из ключевых факторов, оказывающим влияние на такие процессы, как рост и продуктивность растительности, интенсивность разложения органического вещества, эмиссия парниковых газов (Дюкарев и др., 2009). Косвенно особенности температурного режима отражают тип питания болот. В связи с этим изучение данной характеристики имеет важное значение для понимания экологии болотных экосистем.

Подобные исследования были организованы нами впервые на одном из болот комплекса у пос. Озёрный, расположенного на северо-востоке Среднерусской возвышенности, ныне входящего в охраняемую территорию Национального парка «Тульские засеки» (рис. 1А).

Данное болото расположено на вершине водораздела в котловине карстово-суффозионного происхождения, не имеющей поверхностного стока. Площадь болота

составляет 1.5 га, а максимальная глубина котловины – 8 м. Торфяная залежь сплавинная, мощностью 1.2 м, сложена низинными травяным, травяно-сфагновым торфами. Растительный покров основной части болота представлен сообществами acc. Betula pubescens – Menyanthes trifoliata – Sphagnum riparium, субасс. Betula pubescens – Menyanthes trifoliata – S. squarrosum, прилагговая часть занята ценозами acc. Calla palustris (Волкова, 2018; Зацаринная, 2015). Уровень болотных вод в течение вегетационного сезона меняется слабо и в среднем равен 5 см. Средние значения pH за период наблюдений варьировали от 4.7 до 5.1, общей минерализации – от 50 до 75 мг/л. (Зацаринная и др., 2012).

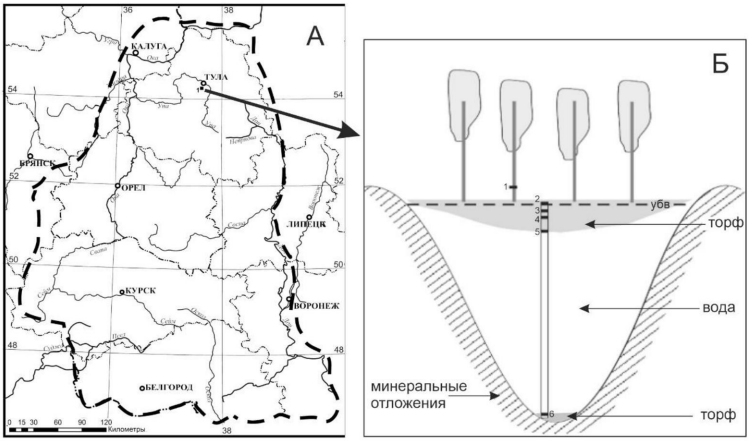


Рис. 1. А. Расположение объекта исследования в пределах Среднерусской возвышенности; Б. Схема расположения термодатчиков на болоте (обозначены номерами 1-6)

Наблюдения проводились с 6 мая 2007 по 2 апреля 2008 года. Для этого было использовано 6 автоматических датчиков, имеющих диапазон измерений +50 – -5°C и фиксирующих температуру 6 раз в сутки: в 2.00, 6.00, 10.00, 14.00, 18.00, 22.00 часов. Четыре из них были установлены в сплавину: по одному на глубинах 2, 30, 50 и 100 см, и 1 датчик – в придонную часть (глубина 8 м) котловины, где откладываются незначительные по мощности торфяные отложения, оторвавшиеся от сплавины. Для этого датчики закреплялись внутри пластиковой трубы диаметром 2 см и длиной 8 м, которая была установлена в центральной части болота. Контрольный датчик закрепляли на березе для фиксации температуры воздуха (рис. 1Б). Полученные данные позволили рассчитать среднесуточные и среднедекадные температуры воздуха и торфяной залежи на исследуемых глубинах. Динамика среднесуточных температур представлена на рисунке 2.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что торфяная залежь за весь период наблюдений фактически не промерзала: минимальные значения поверхностного горизонта (2 см) равны -0.1 °C, что можно включить в ошибку приборов. Причиной этому могут быть несколько факторов: первый из них – погодные условия. Снежный покров на данной территории установился уже к середине ноября 2007 года, к январю его высота составила 18 см (собственные наблюдения). Значительные заморозки (ниже -10°C) были непродолжительны и зафиксированы только 2 декабря 2007, 1-10

января, 16, 17 февраля 2008. Ниже -18°С среднесуточная температура не опускалась. Таким образом, зимние месяцы были довольно теплыми. Другим фактором может быть подпитка грунтовыми водами, температура которых варьирует от +7 до +10 °С.

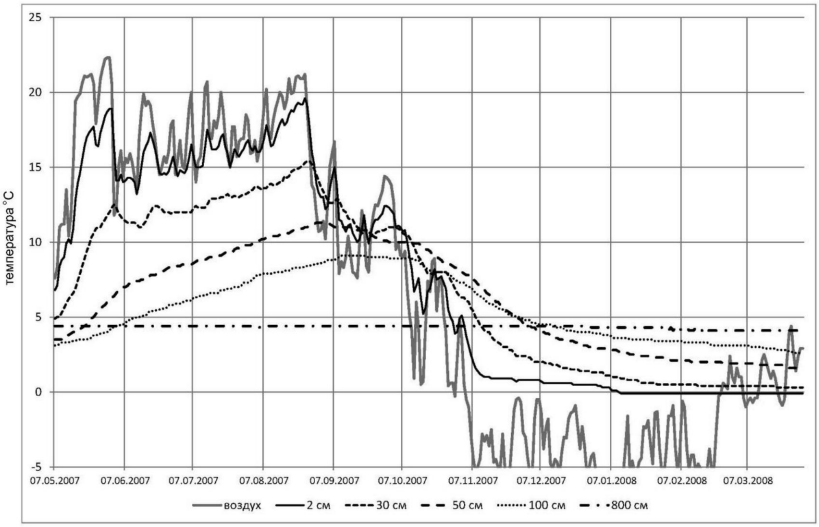


Рис. 2. Динамика изменения среднесуточных температур торфяной залежи карстово-суффозионного болота

Если сравнить ход температур поверхностного слоя торфяной залежи с температурой воздуха на болоте, то можно проследить четкую зависимость (рис. 2). Основные температурные максимумы выражены как в воздушной среде, так и в торфе. Наиболее теплыми оказались 3 декада мая и 2 декада августа. В холодное время года кривые температур в воздухе и торфе имеют некоторые различия. Так, с 04.11.2007 по 24.02.2008 температура воздуха не поднималась выше 0°С, в то время торфяная залежь так и не достигла отрицательных температур. Минимальные значения, соответствующие -0.1 °С, были зафиксированы с 12.01.2008 и сохранялись до 31.03.2008 (рис. 2). Средняя температура торфяной залежи за весь период наблюдений (далее будем использовать термин среднегодовая) на глубине 2 см равна +7.5°С, а воздуха – +7.3 °С. Кроме того, годовые амплитуды температур в торфе значительно меньше, чем в воздушной среде: 19,5°С и 30,8°С соответственно. Причем из-за свойств термодатчиков последнее значение несколько занижено. Другой особенностью поверхностного слоя торфяной залежи является незначительное запаздывание (в среднем на 1-2 дня, максимум на 5 дней) наступления основных экстремальных значений температур в сравнении с воздушной средой.

Изменение температуры торфяной залежи на глубине 30 см имеет свои особенности. Сезонные колебания температур менее выражены. Если в поверхностном слое насчитывается порядка 14 пиков повышения температур, то на глубине 30 см их количество снижается вдвое. Максимальные значения характерны для третьей декады августа, минимальные +0.3 °С приходятся на март. Среднегодовая температура снижается до +6,8°С. Уменьшаются и значения годовых амплитуд температур до 15.1°С.

Кроме того, более отчетливо по сравнению с поверхностным слоем выражено запаздывание основных экстремальных показателей. Анализ температур показал, что разница в наступлении наиболее крупных потеплений и похолоданий составляет 1 декаду.

Температура торфяной залежи на глубине 50 см характеризуется достаточно равномерным ходом, не имеет ярко выраженных пиков экстремальных значений. С момента начала наблюдений происходит рост температур – в мае и июне более интенсивный, а затем замедляющийся. Максимальных отметок температура достигает к первой декаде сентября, что на 2 декады позже, чем в поверхностном слое торфа. С середины сентября начинается постепенное снижение температур. Минимальных отметок температура достигает к третьей декаде марта. Отрицательные температуры не зафиксированы. Среднегодовая температура равна 6,2°С. Значения годовых амплитуд температур снижаются до 9.8°С.

Изменения температуры торфяной залежи на глубине 100 см еще более незначительны. Максимальные отметки зафиксированы во второй декаде сентября, что на 3 декады позже, чем в поверхностном слое торфа. Причем последующее снижение температур было очень медленным – к началу октября среднедекадные температуры упали всего лишь на 0,2°С. Минимальных отметок (+2.7°С) температура достигает к третьей декаде марта. Среднегодовая температура составила +5.5 °С, а годовая амплитуда – 6.6°С.

Годовой ход температур торфяных отложений в придонной части котловины (глубина 8 м) имеет вид прямой с незначительными отклонениями, которые укладываются в пределы погрешности датчиков. Таким образом, температура в течение всего года постоянна и равна +4°С, что соответствует температуре воды наибольшей плотности. Поскольку это значение не изменяется, можно сделать вывод, что сезонного вертикального перемешивания воды, характерного для водоемов умеренных широт, не происходит. Кроме этого, данная особенность свидетельствует об отсутствии подпитки грунтовыми водами в придонной части котловины.

Подводя итог, можно сделать следующие выводы: температура поверхностного слоя торфяной залежи тесно связана с температурой воздуха. Однако торфяная залежь не промерзает в течение всего периода наблюдений. Годовой ход залежи сглажен, но в целом повторяет ход воздушной среды. С увеличением глубины сезонные колебания температуры становятся менее заметными, сокращается амплитуда годовых колебаний температур. Запаздывание наступления основных максимумов и минимумов растет с увеличением глубины. Придонные слои карстово-суффозионного болота существуют автономно и не зависят от погодных изменений.

Литература

Волкова Е.М. Болота Среднерусской возвышенности: генезис, структурно-функциональные особенности и природоохранное значение: Автореф. дис. … докт. биол. наук. 2018. СПб. 46 с.

Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А., Дучков А.Д., Казанцев С.А. Экспериментальное исследование температурного режима торфяной залежи Бакчарского болота // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, №6. С. 745–754.

Зацаринная Д.В. Экологические особенности и растительность карстовых болот зоны широколиственных лесов (на примере Тульской области). Дис. ... канд. биол. наук. М., 2015. 173 с.

Зацаринная Д.В., Волкова Е.М., Сирин А.А. Растительность и факторы среды карстовых болот зоны широколиственных лесов: методические подходы // Бот. журнал. 2012. Т. 97, №4. С. 524-537.

FEATURES OF THE ANNUAL TEMPERATURE COURSE OF PEAT DEPOSITS OF FLOATING KARST-SUFFUSION MIRES

D.V. Zatsarinnaya

The paper describes the temperature changes in the peat deposit of the karst-suffusion mire (Tula Zaseki National Park), located in the north-east of the Central Russian Upland in the forest-steppe natural zone. Changes in the temperature of the surface layer of the peat deposit correlate with the air temperature. As the depth increases, seasonal fluctuations become less noticeable, and the amplitude of annual temperature fluctuations decreases. The deposit is characterized by a delay in the onset of major highs and lows, which increases with increasing depth. The minimum values of the surface layer of the deposit did not fall below 0 ° C. Bottom peat deposits exist independently and do not depend on weather changes, their temperature is +4 ° C.

VARIABILITY OF THE THERMAL AND ICE REGIMES IN THE PETROZAVODSK BAY OF LAKE ONEGA BASED ON MEASUREMENT DATA AT AN AUTONOMOUS STATION

G.E. Zdorovennova, R.E. Zdorovennov, Iu.S. Novikova, N.I. Palshin, T.V. Efremova, S.I. Smirnov, S.R. Bogdanov

Northern water problems Institute Karelian Research Center of RAS

Based on long-term measurements of water temperature at an autonomous station in the Petrozavodsk Bay of Lake Onega in 2015-2024, the onset and duration of the ice period, spring and autumn overturn, and summer stratification were determined. In recent years, deviations from long-term values have been detected: an abnormally short ice period in 2019-2020, a spring thermal bar 10-15 days earlier, summer stratification a month longer in 2023 and 2024. High bottom water temperatures (5-10ºC above normal) in the summer of 2024 could have created a threat to the benthic community adapted to colder conditions.

Global climate change is most pronounced in northern regions. As a result of these changes, the surface water temperature in lakes increases, stratification increases, and the ice period shortens (O'Reilly et al., 2015). Such changes pose a danger to lake ecosystems, which determines the relevance of studying changes in the thermal and ice regimes of lakes against the background of climate variability.

Lake Onega is a large deep lake with a very complex thermal and hydrodynamic regimes. Petrozavodsk Bay (PB) located in the northwestern part of Lake Onega. The length of the bay is about 14 km, the width is about 5 km. The depths increase from the top to the exit of the bay, reaching 30 m along the central axis. The main tributary of the PB is the Shuya River; the small rivers Lososinka and Neglinka and several streams also flow into the bay. Regional variability of the climate of southern Karelia, which is expressed in an increase in air temperature in all seasons (Nazarova 2021), has caused changes in the ice and thermal regimes of Lake Onega over the past several decades.

In order to identify the response of the thermal and ice regimes of the PB to the variability of the regional climate of southern Karelia, water temperature measurements were carried out at an autonomous station (a chain with temperature sensors RBR attached to a cable stretched between an anchor and a buoy) in the central deep-water part (a depth of a station is 19-20 m) of the PB since October 2019. The number of temperature sensors varied from 5 to 16. The depth of upper sensor was 3.5-4.5 m. The time interval was one minute.

The purpose of this work was to study the thermal and ice regimes of the PB in current climatic conditions, to clarify the timing of the main hydrological phenomena in the bay based on year-round water temperature measurements at an autonomous station in 2019-2024. The analysis also used data from measurements taken in 2015-2017 as part of the "Life Under Ice" project (Wüest et al., 2019).

Weather conditions of the study area. The analysis of weather conditions in the study area was carried out using data of the Petrozavodsk weather station (WS) (Weather …, 2025). Data analysis showed that in 2015-2024 the trend of warming of the regional climate of southern Karelia continued in all seasons of the year. The most pronounced warming was in the cold half of the year: the maximum positive deviations of air temperature reached +4.0+9.4°C from November to March (Table 1). In the warm half of the year, the deviations were generally less significant than in the cold half, but also reached +2.5+6.5°C for different months from April to October. During the abnormally warm winter of 2019–2020, the average monthly air temperature in November–March varied from –2.7 to –0.1°C. The weather in April-May was warm in 2016, 2018, and 2023 and cold in 2017, 2020, and 2022. The summer in 2015, 2017, 2019, 2020 and 2023 was cold, while in 2021, 2022 and 2024 it was noticeably warmer. The autumns of 2015, 2018, 2010 and 2024 were warm, and cold in 2016 and 2022. September 2023 and 2024 were abnormally warm (exceeding the baseline by 5.2 and 6.5°C, respectively). Weather conditions in the years of research differed significantly, which caused pronounced interannual differences in ice phenology, as well as in the dates and duration of the main hydrological phenomena in PB.

Table 1. Deviations of average monthly air temperature from the 1961-1990 baseline for the Petrozavodsk WS. The maximum deviation values are highlighted in bold

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2015	4.3	7.1	**5.1**	0.7	2.0	0.7	-1.8	1.5	3.0	0.2	2.6	5.9
2016	-3.5	**7.5**	3.2	2.0	**4.3**	0.7	2.4	1.3	1.2	-0.5	-1.8	3.2
2017	4.1	2.3	3.4	-1.3	-3.4	-1.8	-0.6	1.9	1.0	-0.1	2.3	5.7
2018	6.0	-1.3	-3.8	1.6	4.1	0.0	2.5	2.9	2.6	1.5	2.8	1.2
2019	2.5	5.9	2.7	**2.5**	0.7	3.0	-2.6	-0.6	0.8	-0.5	1.3	**6.4**
2020	**9.4**	7.1	4.3	0.0	-1.1	2.6	0.1	0.6	2.5	**2.6**	**4.0**	3.8
2021	2.3	-4.6	0.8	1.8	1.1	**5.7**	**3.9**	1.7	-1.1	**2.6**	1.9	-2.3
2022	3.5	5.5	2.1	0.2	-1.1	1.8	2.7	**4.3**	-0.6	0.2	0.6	2.2
2023	6.4	3.9	1.7	1.8	2.2	0.3	-0.6	2.7	5.2	-1.2	-1.0	-0.9
2024	-1.0	1.4	3.9	0.8	0.9	3.5	2.4	2.7	**6.5**	2.3		

Autumn cooling and pre-winter. The water mass of PB was in a state of homothermy during autumn cooling. The transition of water temperature through 4°C towards a decrease occurred in mid- to late November (Table 2). The entire subsequent period before ice-on, the water mass of PB cooled in a state of homothermy under the influence of wind mixing. The longest pre-winter period lasted 83 days from November 11, 2019 to January 31, 2020; in the winter seasons of 2020-2023 this period lasted 20, 15, 26, and 19 days, respectively. The duration of the autumn overturn and pre-winter is very important, since during these periods the water column and bottom layers are saturated with oxygen.

By the time of ice formed, the temperature throughout the water column had dropped to very low values. Immediately before ice formed, the water temperature at the upper (3.5-4.5 m) and lower observation depths (18-19 m) was 0.02 and 0.05°C on January 31, 2020, 0.01 and 0.08°C on January 12, 2021, 0.05°C and 0.11°C on December 7, 2021, 0.01 and 0.02°C on December 16, 2022. The water temperature was noticeably higher (at the upper and lower observation depths 0.45 and 0.51°C) when ice formed on December 1, 2023.

Table 2. Dates of ice-on and ice-off, periods with T_{water}>4°C and T_{water}>10°C, and periods with a temperature difference in the water column of more than 1°C. n/d – no data

Year	Ice-on – Ice-off	T_{water}>4°C	T_{water}>10°C	dT>1°C
2016	n/d – 25.04.2016	7.05.2016 – n/d	n/d	15.05.2016- n/d
2019	n/d – n/d	n/d – 9.11.2019	n/d	n/d
2020	31.01.2020 – 22.03.2020	5-7.05 – 27-30.11	27.05 – 16.10	23.05 – 4.09
2021	12.01.2021 – 20.04.2021	11.05 – 22.11	17.05 – 6.10	12.05 – 26.08
2022	7.12 – 20.12.2021 31.12.2021 – 3.05.2022	13-19.05 – 20.11	2.06 – 30.09	27.05 – 31.08
2023	16.12 – 27.12.2022 8.01 – 29.04.2023	11.05 – 4-13.11	23.05 – 7.10	11.05 – 6.10
2024	1.12.2023 – 28.04.2024	17.05 – n/d	30.05-7.10	17.05 –7.10

Ice period. According to average long-term data, ice forms in PB on December 18 and exists until May 9 (Largest…, 2015). The earliest date of ice-on is November 18, 1993, the latest is January 23, 2004. The earliest date of ice-off is April 19, 2007, the latest is May 28, 1956. Significant interannual variability in the ice regime of Petrozavodsk Bay was revealed (Table 2). The ice-off in spring 2016 occurred on April 25 due to warm weather in March and April 2016, which is close to the earliest ice-off date. During the abnormally warm winter of 2019-2020, continuous ice cover did not establish in the open reach of Lake Onega for the first time in a long period of observations, only bays were covered with ice in January-March 2020. Thus, the ice period lasted for two months, which is significantly less than the long-term average (4.5 months). Due to the heat exchange with the atmosphere, the water temperature was very low: 0.01-0.4°C. It is important that on small lakes of Karelia, during this warm winter season of 2019-2020, there was no sharp shortening of ice cover relative to the average long-term values, but a decrease in the thickness of lake ice was noted (Zdorovennova et al., 2022).

In the winter 2020-2021, ice formed on January 12, 2021, ice breakup occurred on April 20, 2021, that is, the ice period lasted 3.5 months, which is significantly less than the long-term average. Late ice formation was due to warm autumn and early winter periods, and early ice-off was due to warm spring. The temperature of the bottom water layer in the first 2-3 weeks after ice-on increased to 0.5-0.6°C due to heat exchange with bottom sediments.

In the winter 2021-2022, the duration of ice was close to the long-term average - almost five months (from December 7, 2021 to May 3, 2022), which was due to the cold weather conditions of autumn and spring. After the early formation of ice, an increase during two weeks in bottom water temperature to 2.48°C was observed. Then, in mid-December 2021, ice fields moved across the PB, and in the area of the autonomous station there was no ice from December 20 to 30, 2021. Due to active heat exchange with the atmosphere, the water temperature dropped to 0.01°C in the upper layer and to 0.3°C in the bottom layer. After the ice formed on December 31, 2021, there were no sharp changes in temperature in either the upper or bottom layers of water mass until mid-March 2022.

In the winter 2022-2023, ice formed on December 16, 2022, but due to the movement of ice fields across the area of PB, there was no ice in the station area from December 27, 2022 to January 8, 2023. After the ice formed, a rapid increase in the temperature of the bottom layer to 2.27°C and the upper layer to 0.26°C was observed for 10 days. However, from December 27, 2022 to January 8, 2023, the temperature throughout the water column dropped significantly to values close to 0°C. The bay waters became free of ice on April 29, 2023, that is, the ice lasted 127 days, which is less than the long-term average.

In the winter 2023-2024, ice-on was on December 1, 2023, ice-off was on April 28, 2024, the duration of ice was 158 days, which is longer than the long-term average, due to the early formation of ice against the cold weather conditions in the autumn and winter months.

Spring under-ice convective mixing began on March 15, 2016, March 24, 2021, March 20, 2022, March 14, 2023, and February 27, 2024. This phenomenon was not observed in the spring of 2020. In mid-March in 2015 and 2017 the convection was already well developed, which did not make it possible to establish the start date of this phenomenon; however, it can be assumed that in these years convection began as early as late February or early March, since by mid-March convective mixing reached a depth of 15-20 m (Bouffard et al., 2019). Such an early onset of under-ice convection could have been facilitated by warm weather conditions in January-March in 2015 and 2017, which were characterized by air temperatures exceeding the norm by 2-7°C (Table 2). Spring under-ice convection in 2016, 2021, 2022, 2023 and 2024 lasted 40, 27, 43, 46 and 60 days. By the ice-off, the water column was completely mixed, the water temperature reached 1.0-1.8°C.

Spring overturn. After ice-off, the water column remains completely mixed for some time. The water temperature of the upper layer gradually increases and, due to convective mixing, the heat is redistributed throughout the water column. The transition of the water temperature through 4°C towards an increase was observed in the first and second decades of May (Table 2). The period from ice-off to reaching a temperature of 4°C in 2016, 2021-2024 was 10-20 days, in 2020 it was noticeably longer - 45 days. In recent years, against the background of warming of the regional climate, an earlier passage of the thermal bar across the bay water area (early to mid-May) is typical compared to the average long-term dates (late May). After the water temperature reaches 4°C, stratification can be established almost immediately in warm windless weather. This situation was observed in the spring of 2016, 2021, 2023 and 2024, when stratification was established within 1-7 days after the water temperature crossed 4°C in the upward direction. However, with strong winds and cool weather, the water column can remain in a mixed state at a temperature of 4-6°C for up to 14-17 days, which was observed in the spring of 2020 and 2022.

Summer stratification. The stratification onset dates were in the second half of May. The temperature of the upper water layer (depth 3.5-4.5 m) gradually increased in June-July to 15-20°C due to radiative heating. The temperature of the bottom layer gradually increased during the summer months and reached 6-9°C at the end of August. In the summer months of all observation years, episodes of a sharp increase in water temperature were periodically observed in the bottom layers, followed by a return to the previous level. For example, from June 30 to July 3, 2021, there was an increase in temperature from 5.5 to 16°C, then up to July 5, the temperature dropped to 6.24°C. It is possible that such a pattern of change in the water temperature in the bottom layer could be associated with the sinking of warm water from the surface layer due to the convergence of currents. In the summer of 2024, episodes of increasing bottom water temperature were noticeably longer than in previous years. In total, the bottom water temperature was above 10°C for 53 days. Such atypically frequent increases in the bottom layer temperature can have a negative impact on the living conditions of the cold-loving benthic community. Thermal stratification existed until the end of August-beginning of September, that is, more than 3-3.5 months in 2020-2022 and until the first ten days of October, that is, more than 4.5 in 2023 and 2024. After the destruction of the seasonal thermocline, a significant increase in the bottom layer temperature by 6-11°C occurred over several days.

Autumn mixing. During the autumn cooling stage, the lake was in a state of homothermy. The period from the destruction of stratification to ice-on was 130 days in the autumn-winter months of 2020-2021, and 103, 98, and 71 days in autumn 2021, 2022, and 2023.

The transition of the surface water temperature through 10°C upward was observed in the years of measurements from May 17 to June 1, downward – from the end of September to the early October. Thus, the period with the temperature of the upper water layer above 10°C (the so-called "biological summer") lasted more than 140 days in 2020 and was noticeably shorter – 121 days – in 2022, which was associated with the cold temperature conditions in

May and September that year. In 2021, from the beginning of June to the beginning of October, that is, more than 120 days. In 2023 and 2024, the biological summer ended on October 7 and lasted 137 and 130 days respectively.

Conclusions. Based on measurements at an autonomous station in the central part of the Petrozavodsk Bay of Lake Onega in 2015-2017 and 2019-2024, the dates and duration of the main hydrological phenomena were established. Shifts in the timing of the main hydrological phenomena in the bay were detected relative to the long-term average values against the background of regional climate warming. A sharp reduction in the ice period to 2-3.5 months (with an average of 4.5 months) was recorded due to the later ice-on and earlier ice-off in years with warm autumn, winter and spring seasons. Increasing the duration of summer stratification to 3.5-4.5 months can negatively affect the oxygen conditions of the hypolimnion. The period of spring mixing in open water conditions lasted from 3-4 weeks to two months (spring 2020). A significant increase in the duration of spring mixing plays an important role in the functioning of the lake ecosystem and can affect the improvement of oxygen conditions during the open water period and the transfer of nutrients along the water column, creating favorable conditions for the development of aquatic organisms. The revealed changes in the duration of spring and autumn overturn and summer stratification are of great importance for the seasonal development of phytoplankton. Changes in the seasonal cycles of phytoplankton may lead to changes in the food supply of the deep-water benthos of Lake Onega, in which the main role is played by spring diatom phytoplankton.

This study was carried out within the framework of the State task of the Northern water problems Institute, Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences.

References

The largest lakes-reservoirs of the North-West of the European territory of Russia: the current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impacts. Petrozavodsk KarRC RAS, 2015. 375 p. (In Russian)

Nazarova L.E. Climatic conditions in Karelia // Modern studies of northern water bodies. Petrozavodsk: KarRCenter RAS, 2021. P. 7-16. (In Russian)

Weather schedule. Website. Rp5.ru URL: https://rp5.ru/. Date of access 15.01.2023.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОГО И ЛЕДОВОГО РЕЖИМОВ В ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА АВТОНОМНОЙ СТАНЦИИ

Г.Э. Здоровеннова, Р.Э. Здоровеннов, Ю.С. Новикова, Н.И. Пальшин, Т.В. Ефремова, С.И. Смирнов, С.Р. Богданов

На основе многолетних измерений температуры воды на автономной станции в Петрозаводской губе Онежского озера в 2015-2024 гг. определены даты наступление и продолжительность ледового периода, весеннего и осеннего перемешивания, летней стратификации. В последние годы выявлены отклонения от многолетних значений: аномально короткий ледостав в 2019-2020 гг., прохождение весеннего термобара на 10-15 суток раньше, продолжительность летней стратификации на месяц дольше в 2023 и 2024 гг. Высокие температуры придонной воды (на 5-10°С выше типичных значений) летом 2024 г. могли создать угрозу для адаптированного к более холодным условиям бентосного сообщества.

ЭЛЕКТРОННЫЙ АТЛАС МАЛЫХ ВИХРЕЙ И ПОЛОЖЕНИЙ ТЕРМОБАРА В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ

А.В. Зимин, О.А. Атаджанова, А.А. Коник
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

В работе представлены сведения о специализированном электронном атласе Ладожского озера, составленном на основе анализа данных спутникового дистанционного зондирования за период с 2016 по 2022 годы. Атлас включает два основных раздела: в первом представлены данные и карты о пространственном распределении вихревых структур и их характеристиках, полученных по радиолокационным изображениям Sentinel-1 A/B, во втором – сведения о положении термобара, полученные по данным о температуре поверхности воды (MODIS Aqua, MODIS Terra, Suomi NPP VIIRS). Атлас представляет собой инструмент для изучения особенностей субмезомаштабной динамики озера.

Ладожское озеро является основным источником водоснабжения Санкт-Петербурга, одного из крупнейших городов России. Понимание динамики процессов в нем на всех пространственно-временных масштабах важно для прогнозирования качества воды и разработки стратегий управления водными ресурсами (Филатов, 2019). Стоит отметить, что использование современных данных спутникового дистанционного зондирования (радиолокационные изображения и температура поверхности) позволило получать сведения о присутствии на акватории крупных озер явлений с характерными масштабами от сотен метров до единиц километров (McKinney et al., 2012). К ним относятся, например, малые вихри и фронтальные разделы (термобар), которые играют важную роль не только в вертикальном обмене из-за значительных вертикальных скоростей, но и в горизонтальном перемешивании, а также транспорте взвешенных веществ. Процессы и явления в указанном (субмезомасштабном) интервале изменчивости в силу несовершенства теоретического описания и трудностей экспериментальных наблюдений ранее оказались недостаточно изученными, особенно в великих озерах России, таких как Ладожское и Онежское (Zimin. et al., 2023).

В этой связи создание атласа малых (субмезомасштабных) структур и положений термобара Ладожского озера представляет собой актуальную научную задачу, обусловленную необходимостью систематизации и анализа данных о пространственно-временной изменчивости вихревых процессов в одном из крупнейших пресноводных водоемов Европы. Субмезомасштабные вихри, имеющие характерные размеры от сотен метров до нескольких километров, играют значительную роль в динамике водных масс, влияя на горизонтальное и вертикальное перемешивание, распределение температуры и характеристик биогенных элементов (Hutter et al., 2011). Эти процессы имеют ключевое значение для функционирования экосистемы водоема, включая биологическую продуктивность и перенос загрязняющих веществ (Lévy M. et al., 2012).

Электронный атлас позволит систематизировать и декомпозировать данные о распределении характеристик этих структур, что необходимо для понимания механизмов формирования и эволюции вихрей (Зимин и др., 2024). Эти данные необходимы для валидации и совершенствования новых гидродинамических моделей высокого разрешения, что важно для будущего прогнозирования изменений в экосистеме Ладожского озера под воздействием климатических изменений и антропогенной нагрузки (Исаев и др., 2024).

Целью создания электронного атласа малых вихрей и положений термобара в Ладожском является систематизация данных и создание инструмента для анализ

спутниковой информации, форма и содержание которой обеспечивают ее использование для получения количественных оценок многолетней и сезонной изменчивости характеристик субмезомасштабных явлений на изучаемой акватории.

Для регистрации поверхностных проявлений субмезомасштабных вихревых структур на акватории Ладожского озера использовались спутниковые данные радиолокаторов с синтезированной апертурой со спутников Sentinel-1 A/B. Всего с января по декабрь 2016 – 2022 гг. было проанализировано 3552 радиолокационных изображения (РЛИ) в С-диапазоне и IW режиме съемки. Максимальное покрытие отмечается в полосе в центральной части бассейна с количеством от 1500 до 1700 изображений. Меньше всего покрыта область восточной части озера, на весь период которого приходится не более 800 изображений. В среднем за год на акваторию озера приходилось 507 снимков. Наименее обеспеченными отмечаются 2016 и 2022 гг., когда число изображений составило около 300 за каждый год. С 2017 по 2021 на каждый год пришлось почти в два раза больше изображений. В месяц в среднем количество спутниковых изображений составило 296 шт. Наименее обеспеченным месяцем является июнь – всего 264 РЛИ, в то время как максимум РЛИ приходится на декабрь – 340 шт.

По методике, изложенной в (Kozlov et al, 2022), на РЛИ визуально определялись поверхностные проявления вихревых структур в виде закрученных в спирали или дуги темных или светлых полос, вписывающихся в элипс. Определялся тип вихря (если спираль закручивается по «часовой стрелке», то вихрь считался антициклоническим, если «против», то циклоническим), положение центра, и размеры главных осей элипса.

Для построения карт многолетнего положения весеннего термобара для атласа Ладожского озера были привлечены 2507 полей поверхностной температуры за апрель-июнь 2016-2022 г., полученных по данным спутников MODIS Aqua, MODIS Terra, Suomi NPP VIIRS уровня обработки L2 (включает время измерения, географическую привязку и обработку исходного сигнала с учетом атмосферной коррекции). Из всех доступных данных, промаркированных 5 квартилями качества (SST_qual): 0 (отличное), 1 (хорошее), 2 (среднее), 3 (плохое), 4 (необработанное), для построения карт поверхностной температуры использовались только данные первых трех квартилей — 0, 1 и 2. Кроме того, были использованы только спутниковые поля, покрывающие не менее чем 20% площади озера. По этим данным строились карты температуры, с которых снимались с заданным шагом координаты изотермы 4 °C соответствующей термобару.

Созданный атлас представляет собой научно-структурированный электронный каталог, включающий два основных раздела, посвященных исследованию субмезомасштабных вихревых структур и термобара за период с 2016 по 2022 годы с четырьмя подразделами в каждом. Они объединяют детальные картографические материалы, табличные данные и описания.

Первый раздел посвящен проявлениям субмезомасштабных вихрей и начинается с описания исходных данных. В первом подразделе первого раздела представлена описательная информация об архиве радиолокационных изображений, полученных в период с января по декабрь 2016–2022 годов. Указаны атрибутивные характеристики изображений, включая параметры сенсоров, режимы съемки, пространственное разрешение и ширину полосы обзора. Приведены количественные данные о числе изображений, распределенных по годам и месяцам, в табличном формате, а также представлена карта пространственного покрытия акватории озера радиолокационными данными за весь исследуемый период.

Во втором подразделе, посвященном характеристикам субмезомасштабных вихрей представлены карты пространственного распределения их параметров. Он включает карты центров вихрей с классификацией по типам (циклонические и антициклонические) и осредненных значений диаметров вихрей, интерполированных на

регулярную сетку за весь период наблюдений. Карты сопровождаются детальным описанием их особенностей. Также в разделе приведена сводная таблица, содержащая характеристики каждого зарегистрированного вихря: дата обнаружения, географические координаты центра, диаметр и тип вихря.

Третий подраздел содержит данные анализа характеристик вихрей по годам. Он включает семь отдельных частей, каждая из которых соответствует одному году (2016–2022). В каждой части представлены карты пространственного распределения вихрей, включая локализацию их центров с указанием типа и осредненные значения диаметров за соответствующий год (все месяцы). Карты сопровождаются описанием, а также таблицами с характеристиками вихрей (дата, координаты, диаметр, тип) за указанный год.

Четвертый подраздел посвящен анализу характеристик вихрей по месяцам (с осреднением по годам). Данный подраздел состоит из двенадцати частей, каждая из которых соответствует одному месяцу (январь–декабрь). В каждой из частей представлены карты пространственного распределения вихрей, включая положения центров с указанием типа вращения и осредненные значения диаметров за соответствующий месяц (все годы). Карты сопровождаются описанием, а также таблицами с характеристиками вихрей (дата, координаты, диаметр, тип) за указанный месяц.

Второй раздел атласа посвящен исследованию термобара. Он начинается с подраздела описания исходных данных, включающего информацию о спутниковых изображениях, использованных для анализа термобара в период с апреля по июнь 2016–2022 годов. Указаны характеристики изображений: сенсор, режим съемки, разрешение и ширина полосы обзора. Приведены количественные данные о числе изображений, распределенных по годам и месяцам, а также оценка их качества в табличном формате.

Во втором подразделе второго раздела, посвященном положению термобара по дням, представлены карты локализации термобара за те дни, когда его удалось идентифицировать по данным уровня L2.

В третьем подразделе, посвященном положениям термобара по месяцам, приведены карты для каждого месяца (апрель–июнь), на которые нанесены среднемесячные положения термобара за каждый год (2016–2022).

Завершает второй раздел подраздел анализ положения термобара по годам, где представлены карты за 2016–2022 годы, на которые нанесены среднемесячные положения термобара за каждый месяц (апрель–июнь).

На основе анализа данных атласа показано, что субмезомасштабные вихри являются распространенным явлением на всей акватории озера в период развития прямой термической стратификации и присутствия приповерхностного пикноклина. Чаще всего регистрировались циклонические структуры размерами до 3 км, что не превышает оценок среднего радиуса деформации Россби для Ладожского озера. Значительной межгодовой изменчивости в их характеристиках не прослеживалось, они были близки к средним многолетним. Выявлено наличие выраженной внутригодовой изменчивости характеристик субмезомасштабных структур, как в частоте и местах встречаемости, так и, в меньшей степени, в их размерах. Установлено, что наиболее часто вихри наблюдались в районах с глубинами 50-100 метров, вблизи областей фронтальных зон (термобара).

Атлас будет размещен до конца 2025 года в открытом доступе на сайте Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (https://spb.ocean.ru/).

В заключении стоит отметить, что созданный атлас субмезомасштабных структур Ладожского озера представляет собой важный инструмент для изучения особенностей

динамики озера. Он позволит не только систематизировать имеющиеся данные, но и является основой для дальнейших исследований, направленных на понимание влияния климатических изменений и антропогенной нагрузки на крупные пресноводные водоемы. Кроме того, атлас будет полезен для разработки стратегий устойчивого управления водными ресурсами с целью сохранения экосистемы Ладожского озера для будущих поколений.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-17-20010) и за счет гранта Санкт-Петербургского научного фонда (проект № 23-17-20010).

Литература

Исаев А.В., Рябченко В.А., Коник А.А. Воспроизведение современного климатического состояния экосистемы Ладожского озера // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 2. С. 50–65.

Филатов Н.Н. Состояние и перспективы исследований гидрофизических процессов и экосистем внутренних водоемов (обзор) // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, №1. С. 3–14.

Hutter K., Wang Y., Chubarenko I. Physics of Lakes. V. 2: Lakes as Oscillators. Springer, 2011.

Kozlov I.E., Atadzhanova O.A. Eddies in the Marginal Ice Zone of Fram Strait and Svalbard from Spaceborne SAR Observations in Winter // Remote Sensing. 2022. V. 14, №134.

Lévy M., Ferrari R., Franks P.J., Martin A.P., Rivière P. Bringing physics to life at the submesoscale //Geophysical Research Letters. 2012. V. 39, №. 14.

McKinney P., Holt B., Matsumoto K. Small eddies observed in Lake Superior using SAR and sea surface temperature data // Journal of Great Lakes Research. 2012. V. 38, №4. P. 786-797.

Zimin A.V., Blagodatskikh E.A., Atadzhanova O.A. Small Eddies Observed in Ladoga and Onega Lakes Using SAR Data // Complex Investigation of the World Ocean (CIWO-2023). Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer: Cham, 2023. P. 191–197.

ELECTRONIC ATLAS OF SMALL EDDIES AND THERMOBAR IN LAKE LADOGA

A.V. Zimin, O.A. Atadzhanova, A.A. Konik

This study presents information on a specialized electronic atlas of Lake Ladoga, compiled based on the analysis of satellite remote sensing data for the period from 2016 to 2022. The atlas comprises two main sections: the first presents data and maps on the spatial distribution of eddy structures and their characteristics, derived from Sentinel-1 A/B radar images, while the second provides information on the position of the thermobar, obtained from sea surface temperature data (MODIS Aqua, MODIS Terra, Suomi NPP VIIRS). The atlas serves as a tool for studying the characteristics of submesoscale dynamics of the lake.

ИЗМЕРЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО, ЛЕДОВОГО И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМОВ ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

А.Т. Зиновьев, А.В. Дьяченко, К.Б. Кошелев
Институт водных и экологических проблем СО РАН

В работе проанализированы результаты измерений и моделирования термического, ледового и гидродинамического режимов Телецкого озера в условиях климатических изменений за 2010-2024 гг. Показано, что при наличии заметной изменчивости регионального климата за указанные годы изменение в структуре температурного поля Телецкого озера не наблюдается.

С 2010 по 2024 гг. в рамках экологического мониторинга и в целях исследования закономерностей пространственно-временной динамики абиотических и биотических компонентов экосистемы Телецкого озера в периоды весеннего и летнего нагревания и осеннего охлаждения, экспериментального изучения явлений и процессов, влияющих на распределение и круговорот вещества и энергии в водной толще с учетом температурно-плотностных аномалий глубокого пресного водоема проводились экспедиционные исследования Телецкого озера с использованием глубоководных профилографов SBE 19plus V2 и SBE 25plus (SBE 19plus…, 2009; SBE 25plus…, 2017). Всего проведено 37 экспедиций. По результатам измерений реализована база данных в СУБД PostgreSQL с поддержкой модуля PostGIS.

Для анализа результатов за многолетний период выбрана наиболее глубоководная станция измерений p031 (глубина 323 м от среднемноголетнего уровня поверхности Телецкого озера) как характеризующую максимальную толщу глубин озера, а также достаточно удаленную от зон распространения фронтов весенних термобаров с резкими градиентами температуры воды, движущихся с южной и северной частей озера, а также залива Камга, в период весеннего прогревания озера. В районе станции p031 происходит «схлопывание» движущихся с разных оконечностей озера фронтов весеннего термобара. Местоположение станции показано на рисунке 1.

Основой данного анализа послужила общепринятое деление вертикальной термической структуры димиктического глубоководного водоема (Хендерсон-Селлерс, 1987) на эпилимнион, металимнион и гиполимнион.

Различные процессы, обуславливающие изменчивость поля температуры в озерах, развиваются в характерных для них пространственных и временных масштабах, варьирующих в широких пределах. В работе (Бояринов, Петров, 1991) со ссылкой на (Rao, 1977) предлагается схема пространственных и временных масштабов основных гидрологических процессов в глубоких озерах. Вариации в поле температуры воды наряду с климатическими факторами в значительной степени обусловлены термогидродинамическими процессами. Детальное описание пространственно-временных масштабов гидродинамических процессов приведено в монографии (Филатов, 1983).

В данной работе рассматривается имеющая наибольшую продолжительность во временном масштабе сезонная температурная стратификация вод озера. Между тем, натурные данные всегда отражают также проявление определенных процессов меньшего пространственно-временного масштаба, что затрудняет их анализ.

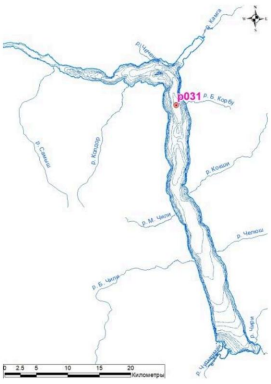


Рис. 1. Местоположение станции p031

На основе измеренных значений температуры и солености воды за 2010-2024 годы в данной точке прохождения зонда выполнен расчет температуры максимальной плотности для данной глубины с использованием уравнением состояния TEOS-10 (Feistel, 2012).

Чтобы охарактеризовать полученные данные в контексте годового термического цикла водоема использована предложенная С.Г. Лепневой для Телецкого озера схема гидрологических сезонов (Селегей, Селегей, 1978): весеннее нагревание; летнее нагревание; осеннее охлаждение; зимний минимум.

Для описания годового термического цикла представляют также интерес измеренные значения придонных температур озера. В работе (Селегей, 1980) указывается, что на Телецком озере отсутствует слой с постоянной в течение всего года температурой. Минимальные придонные температуры наблюдаются в феврале-марте, максимальные – в конце октября – начале ноября. Наши данные в целом подтверждают эту тенденцию (Зиновьев и др., 2010; Зиновьев и др., 2021; Koshelev et al., 2021).

Полученные данные разделены на несколько групп (рис. 2).

Июнь. Период весеннего нагревания. По всей водной толще наблюдается гомотермия. Превалирует конвективное перемешивание с равномерным прогревом по всей вертикальной толще водоема. Но температура воды в большей части измерений еще ниже температуры максимальной плотности. В более поздних июньских измерениях температура максимальной плотности достигается только у дна. Плотность воды по всей вертикали соответствует максимальной плотности воды для данных физических условий. Активно развивающийся в данное время на мелководных участках озера термобар, по данным наших измерений, исследуемой точки p031 в июне еще не достигает.

В данную группу также вынесены измерения от 3 июля 2019 г.

Июль, *Август*. *Период летнего нагревания*. Формирование прямой температурной стратификации. Ветровое перемешивание вследствие плотностных градиентов ослаблено и проникновение в ниже лежащие слои тепла с поверхности происходит чрезвычайно медленно. Температура приповерхностного слоя быстро увеличивается, достигая максимальных годовых значений (в отдельные годы 18-19 °С). Верхний перемешанный слой (эпилимнион) в данный период еще или практически отсутствует, или имеет небольшую толщину в единицы метров. Заглубление металимниона – 10-20 м. Придонные температуры озера выше температуры максимальной плотности и соответствуют примерно 3.5 °С. Распределение по вертикали плотности воды – устойчивое, с формированием пикноклина – границы раздела слоев воды с разной плотностью. Чем сильнее нагревается вода в разгар лета, тем больше плотностная устойчивость стратифицированных водных масс, так как с ростом температуры значительнее увеличивается вертикальный градиент плотности воды.

В данную группу также вынесены измерения от 27 июня 2020 г.

Сентябрь, *Октябрь*. *Период осеннего охлаждения*. С началом периода осеннего охлаждения с падением температуры поверхности воды возрастает роль конвективных токов. Кроме того, вследствие ветрового турбулентного перемешивания возникает сложная картина заглубления слоя температурного скачка (металимниона). Толщина

перемешанного слоя (эпилимниона) может достигать 10-20 м. Металимнион в большинстве случаев в сентябре заглублен до 40 м, в октябре – до 70 м и ниже. Придонные температуры увеличиваются до 3.6-3.7 ºС. Плотностная устойчивость стратифицированных водных масс в течение периода осеннего охлаждения неуклонно снижается. В результате чего, в этот период в большей степени начинает проявляться влияние термогидродинамических процессов меньшего пространственно-временного масштаба. В отдельные экспедиционные выезды наблюдалась значительная вариативность пространственной картины термической и плотностной стратификации.

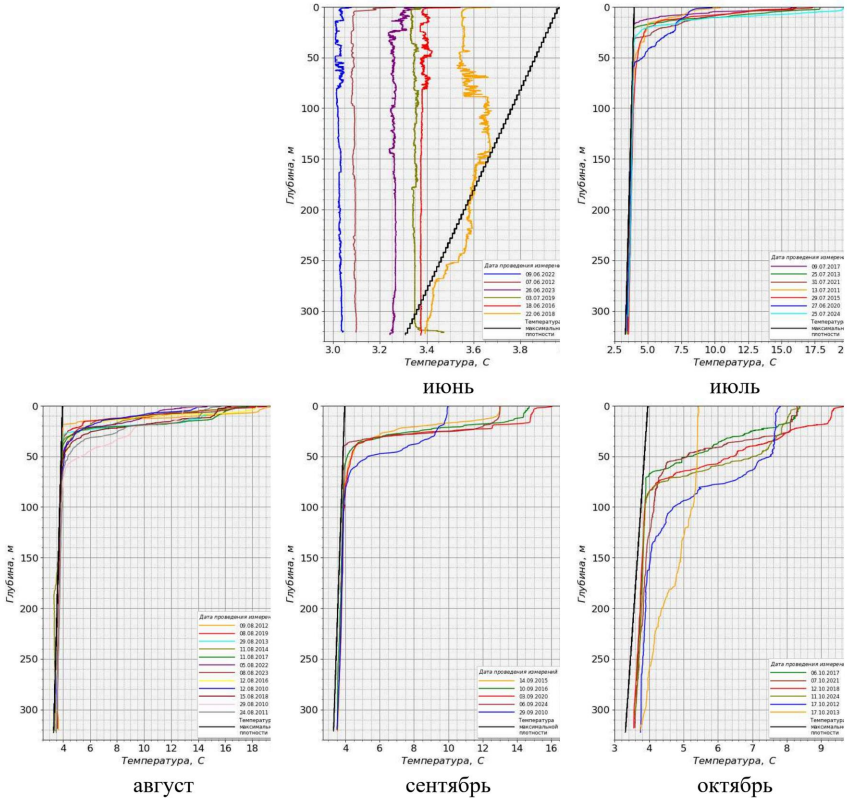


Рис. 2. Вертикальные профили температуры по измерениям за 2010-2024 гг. на станции р031

Таким образом, результаты многолетних измерений и моделирования термогидродинамических процессов Телецкого озера демонстрируют крайне сложную картину при непостоянстве метеорологических характеристик. В целом, при наличии заметной изменчивости регионального климата изменение в структуре температурного поля Телецкого озера не наблюдается.

Литература

Бояринов П.М., Петров М.П. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука, 1991. 176 с.

Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Марусин К.В. Температурный режим Телецкого озера: моделирование и эксперимент // Мир науки, культуры, образования. 2010. №62. С. 285-289.

Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Дьяченко А.В., Марусин К.В. Численное моделирование и натурные исследования термобара в Телецком озере // Метеорология и гидрология. 2021. №5. С. 86-94.

Селегей В.В., Селегей Т.С. Телецкое озеро. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 143 с.

Селегей Т. С. Режим придонной температуры воды на Телецком озере // Вопросы гидрологии Сибири. 1980. №43. С. 56–63.

Филатов Н. Н. Динамика озер. Л: Гидрометеоиздат, 1983. 166 с.

Хендерсон-Селлерс Б. Инженерная лимнология. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 334 с.

Feistel, R.: TEOS-10: A New International Oceanographic Standard for Seawater, Ice, Fluid Water, and Humid Air // Int. J. Thermophys. 2012. V. 33. P. 1335–1351.

Koshelev K., Zinoviev A., De Goede E., De Graaff R. Modelling of Thermal Stratification and Ice Dynamics with Application to Lake Teletskoye, Altai Republic, Russia // Water Resources. 2021. Vol. 48, No. 3. P. 368-377.

Rao D.B. Great lakes environmental research laboratory // U.S. Dep. Commer. Nat. Ocean. And Atmos. Admin. Nat. Mar. Fish. Serv. Spec. Sci. Rept.-Fisch. 1977. 23 p.

SBE 19plus V2 Seacat Profiler. Conductivity, Temperature, and Pressure Recorder with RS-232 Interface. User's Manual // Sea-Bird Scientific, 2009. 119 p.

SBE 25plus Sealogger CTD. Conductivity, Temperature, and Pressure Recorder with RS-232 Interface. Product Manual // Sea-Bird Scientific, 2017. 122 p.

MEASUREMENTS AND MODELING OF THERMAL, ICE AND HYDRODYNAMIC REGIMES OF LAKE TELETSKOE UNDER CLIMATE CHANGE

A.T. Zinoviev, A.V. Dyachenko, K.B. Koshelev

The paper analyzes the results of measurements and modeling of thermal, ice and hydrodynamic regimes of Lake Teletskoye under climate change for 2010-2024. It is shown that despite the significant variability of the regional climate over the specified years, no change in the structure of the temperature field of Lake Teletskoye is observed.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ АСПЕКТОВ ТУРБУЛЕНТНОЙ ПОДЛЁДНОЙ КОНВЕКЦИИ В ОЗЁРАХ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ С ОБЪЁМНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА

Д.Ю. Кучиев[1], А.А. Смирновский[1], С.И. Смирнов[2]

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

[2]Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

В работе на примере модельной задачи о свободной конвекции в полости с равномерно распределённым объёмным источником тепловыделения и охлаждаемыми стенками тестируется применимость некоторых RANS моделей турбулентности для предсказания

осреднённых характеристик течения: температуры и тепловых потоков. Показано, что наилучшее согласие с данными DNS наблюдается при использовании модели рейнольдсовых напряжений. Представляемая модельная задача является начальным приближением процессов турбулентного перемешивания, возникающего в период радиационно-генерируемой конвекции в озёрах, покрытых льдом.

Подледная конвекция в бореальных озёрах в конце зимы – начале весны является важным явлением, она возникает вследствие проникновения солнечной радиации под лёд и её неравномерного поглощения толщей воды. Неравномерность прогрева в сочетании с инверсной зависимостью плотности воды от температуры вблизи 0ºС приводит к возникновению и развитию радиационно-генерируемой конвекции (РГК), сопровождающейся крупномасштабным турбулентным движением, что оказывает заметное влияние на температурный режим озера и его экосистему (Mironov et al., 2000; Bouffard et al., 2019; Смирновский и др., 2023).

В процессе РГК выделяют градиентный подледный слой, конвективный перемешанный слой (КПС), область вовлечения и нижележащий слой устойчивой стратификации. Постепенный рост температуры КПС и увеличение его глубины являются важными индикаторами динамики конвекции.

Исследования РГК в естественных условиях сопряжены с трудностями, связанными с необходимостью высокоточного пространственно-временного мониторинга температуры, скоростей течений и потоков солнечной радиации. Из-за указанных сложностей полевых исследований РГК также активно изучается методами численного моделирования. В частности, на основе вихреразрешающих LES подходов (Large Eddy Simulation), была детально исследована динамика КПС и влияние различных параметров на его характеристики (Mironov et al., 2001; Смирновский и др., 2023; Смирнов и др., 2025). Использование довольно ресурсозатратных методов LES приводит к необходимости проведения вычислений на мощных суперкомпьютерах, причём для получения численных данных с хорошей точностью требуется от нескольких недель до нескольких месяцев компьютерного счёта. Поэтому применение существенно менее ресурсоёмких подходов, например, таких как RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), является привлекательным и позволит проводить численное моделирование РГК в более крупных по размеру расчётных областях на больших временных интервалах.

Использование RANS подходов при моделировании конвекции рэлей-бенаровского типа (к которой также относится и РГК) требует их тщательного тестирования. В частности, в работе (Kenjereš et al., 1999) показано, что использование специальной модели Transient RANS позволяет получить в целом хорошее согласие численных и экспериментальных данных для классической конвекции Рэлея-Бенара между двумя горизонтальными разнонагретыми пластинами. В работе (Смирнов, Смирнов, 2022) проведено моделирование рэлей-бенаровской конвекции жидкого металла в подогреваемой снизу цилиндрической ёмкости как при помощи прямого численного моделирования (DNS), так и с использованием нескольких RANS моделей.

В настоящем исследовании представлены результаты численного моделирования РГК с использованием RANS подхода на примере модельной задачи о свободной конвекции в полости с равномерно распределённым объёмным источником тепловыделения и охлаждаемыми стенками (Goluskin et al., 2016). Такая постановка, с одной стороны, приближена к задачам РГК в озёрах, покрытых льдом, а с другой, является относительно простой и вследствие этого подходящей для тестирования возможностей RANS подхода к предсказанию локальных и интегральных характеристик турбулентной конвекции.

Постановка задачи. Численное моделирование проводилось в прямоугольной области размерами $L \times L \times H$, где L = 1.5 м, H = 1 м. В качестве математической модели используются уравнения динамики несжимаемой жидкости с учётом плавучести в приближении Буссинеска, в котором полагаются постоянными кинематическая вязкость ν, коэффициент температуропроводности a и коэффициент термического расширения β. Используется безразмерная постановка, в которой пространственные координаты обезразмериваются на величину высоты области H, время на величину H^2/a, а температура на величину $H^2q/(\rho C_p a)$, где q – величина объёмного тепловыделения на единицу объёма (Вт/м^3).

Рис. 1 схематично иллюстрирует расчётную область и постановку задачи. На нижней и верхней поверхностях задаётся избыточная по отношению к некоторому уровню температура $T = 0$ и условие прилипания, на боковых границах задаётся условие периодичности (как для скорости, так и для температуры).

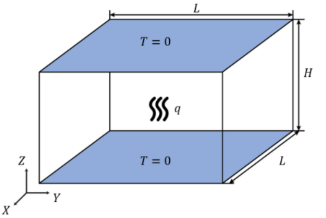


Рис. 1. Общий вид расчетной области

Решаемая система уравнений в безразмерной форме относительно вектора скорости u, давления p и избыточной температуры T представлена ниже (1).

$$\nabla \cdot u = 0$$
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\nabla p + Pr\,\nabla^2 u + PrRaT z \qquad (1)$$
$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T = \nabla^2 T + 1$$

Во всех расчетах в данной задаче принималось число Прандтля $Pr = \nu/a = 1$. Число Рэлея в данном исследовании определялось в соответствии с работой (Goluskin, van der Poel, 2016) как $Ra = g\beta H^5 q/(\rho C_p a^2 \nu)$. В расчетах использовались следующие значения числа Рэлея: $Ra = 10^6$; 10^8; 10^{10}. Указанные значения числа Рэлея соответствуют турбулентному режиму течения. В расчётах использовались модели турбулентности типа RANS, а именно: модель рейнольдсовых напряжений LRR (Launder, 1975), модель k-ω SST, модель Спаларта-Аллмараса.

Вычислительные аспекты. Для проведения численных расчетов использовалось программное обеспечение с открытым исходным кодом OpenFOAM v11. В данной работе использовалась структурированная сетка с прямоугольными ячейками со сгущениями к холодным стенкам. Размеры сетки составляли 50 × 50 × 100 узлов, со сгущением к нижней и верхней стенкам.

Для повышения устойчивости задачи и обеспечения сходимости, в базовый решатель *fluid*, использующийся для моделирования такого рода задач, были внесены изменения для уравнения энергии и приведения его к виду (1).

Для определения времени установления в центре расчетной области была установлена точка мониторинга температуры, по которой при появлении хаотических пульсаций можно говорить о развитом режиме конвекционного течения.

Анализ результатов. Поле температуры, демонстрирующее структуру течения для числа Рэлея Ra = 10^{10}, изображено на рисунке 2. Наблюдается хаотичность течения в расчетной области и образование крупномасштабных циркуляционных структур (вихрей). Отметим, что картина течения близка к наблюдаемой в других работах (Goluskin et al, 2016; Smirnov et al, 2021).

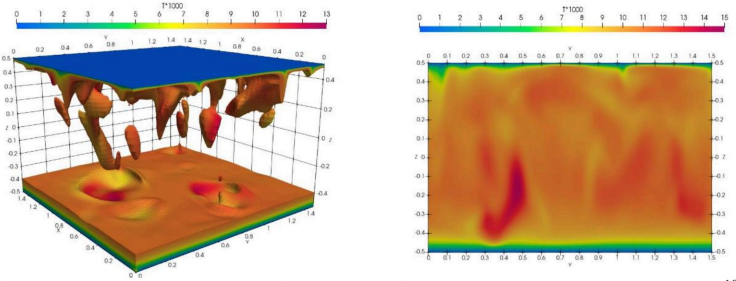


Рис. 2. Иллюстрации распределения безразмерной температуры в слое при Ra = 10^{10}: слева – трехмерная картина течения (изоповерхности средней температуры, окрашенные по значениям мгновенной температуры), справа – распределение мгновенной температуры в вертикальном сечении

Для режима течения с числом Рэлея Ra = 10^6 характерно образование квазистационарных вихревых структур, которые практически не меняют свою конфигурацию в течение времени, т. е. турбулентность ещё недостаточно развитая.

На рисунке 3 представлены вертикальные профили осреднённой во времени и горизонтальным плоскостям температуры для трех значений числа Рэлея, полученные при использовании разных моделей турбулентности; также символами приведены данные из работы (Goluskin et al., 2016). Для значения Ra = 10^6 все модели дают примерно похожие результаты. Это связано с тем, что модели турбулентности практически не генерируют турбулентную вязкость, т. е. по сути реализуется Implicit LES. При Ra = 10^8 модель LRR даёт заметно более низкий уровень температуры в ядре, что говорит о завышении теплового потока в стенку, связанного с генерацией слишком больших значений турбулентной вязкости. При использовании модели SST уровень температуры в ядре оказывается заметно выше, чем в DNS из работы (Goluskin et al, 2016). Модель Спаларта-Аллмараса (SA) не генерирует турбулентную вязкость; результаты, полученные с её помощью, совпадают с Implicit LES, который, как видно, даёт наилучшее совпадение с эталонными данными DNS на рассматриваемой расчётной сетке.

При дальнейшем увеличении числа Рэлея до значения Ra = 10^{10}, где турбулентность более развита, получается хорошее согласие результатов, полученных при помощи модели LRR, и данных эталонного DNS. Модель турбулентности k-ω SST заметно завышает уровень средней температуры в ядре.

Для количественного сравнения в таблице представлены значения безразмерного потока тепла на нижней стенке для разных моделей турбулентности $F_b = Sq_b/Q_v$, где q_b – осредненный по времени и площади тепловой поток на нижней стенке, Q_v – тепло, выделяемое во всем объеме, S – площадь поверхности.

Наблюдается хорошее согласие модели рейнольдсовых напряжений LRR с результатами вычислений, приведенными в статье. В то же время присутствует заметное отличие между моделью SST и эталонным расчетом, что может указывать на меньшую пригодность данной модели для моделирования подобного класса задач.

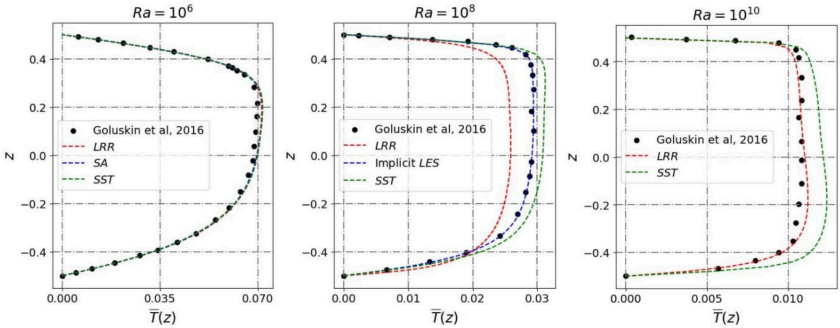


Рис. 3. Зависимость температуры, осредненной по горизонтальным плоскостям и времени, от вертикальной координаты для разных Ra

Таблица. Сравнение безразмерных тепловых потоков через нижнюю стенку $F_b = Sq_b/Q_v$; δF_b – отклонение от эталонного значения

$Ra = 10^{10}$	LRR	SST	Goluskin, van der Poel, 2016
F_b	0.229	0.284	0.230
δF_b, %	−0.4	+23.5	

В данной работе проведено численное моделирование турбулентной конвекции в полости с объёмным тепловыделением, что является некоторым начальным приближением РГК в озёрах, покрытых льдом. При высоких значениях Ra наблюдается развитая турбулентность, которая приводит к интенсивному перемешиванию и уменьшению температуры в ядре. При меньших значениях Ra формируются устойчивые вихревые структуры, которые сохраняют свою конфигурацию во времени.

Сравнение результатов моделирования с литературными данными показало, что некоторые RANS модели турбулентности дают удовлетворительное соответствие с эталонными численным данным DNS. В частности, модель рейнольдсовых напряжений LRR оказалась менее точной в случае относительно малого значения числа Рэлея, однако для высоких значений числа Рэлея её предсказания были достаточно достоверными.

Таким образом, проведённое исследование подтверждает возможность использования модели рейнольдсовых напряжений для изучения процессов подлёдной конвекции, а также подчёркивает необходимость дальнейших исследований, направленных на уточнение моделей турбулентности и верификацию результатов на основе сравнения с данными полевых наблюдений.

Литература

Смирнов С.И., Смирнов Е.М. Опыт применения полуэмпирических дифференциальных моделей турбулентности для расчета конвекции жидкого металла в подогреваемом снизу цилиндре // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2022. Т. 15. №3. С. 43–60.

Смирновский А.А., Смирнов С.И., Богданов С.Р., Пальшин Н.И., Здоровеннов Р.Э., Здоровеннова Г.Э. Численное моделирование турбулентного перемешивания в мелководном озере для периодов подледной конвекции // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. №5. С. 622-632.

Smirnov S., Smirnovsky A., Bogdanov S. The Emergence and Identification of Large-Scale Coherent Structures in Free Convective Flows of the Rayleigh-Bénard Type // Fluids. 2021. 6. 431.

Bouffard D., Wüest A. Convection in lakes // Annual Review of Fluid Mechanics. 2019. V. 51. №1. P. 189–215.

Goluskin D., van der Poel E.P. Penetrative internally heated convection in two and three dimensions // Journal of Fluid Mechanics. 2016. V. 791. R6.

Kenjereš S., Hanjalić K. Transient analysis of Rayleigh–Bénard convection with a RANS model // International Journal of Heat and Fluid Flow. 1999. V. 20, Iss. 3. P. 329-340.

Launder B.E., Reece G.J., Rodi W. Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure // Journal of fluid mechanics. 1975. 68(03). P. 537-566.

Mironov D.V., Terzhevik A.Yu. Spring convection in ice-covered freshwater lakes // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2000. V. 36. №5. P. 627–634.

Mironov D.V., Danilov S.D., Olbers D.J. Large-eddy simulation of radiatively-driven convection in ice covered lakes // Proceedings of the Sixth Workshop on Physical Processes in Natural Waters. Girona, 2001. P. 71–75.

NUMERICAL STUDY OF SOME ASPECTS OF TURBULENT UNDER-ICE CONVECTION IN LAKES BASED ON A MODEL PROBLEM WITH A VOLUMETRIC HEAT SOURCE

D.Yu. Kuchiev, A.A. Smirnovsky, S.I. Smirnov

This study examines the applicability of certain RANS turbulence models in numerical simulations of Rayleigh-Bénard convection problems by analyzing a model problem of free convection in a cavity with a uniformly distributed volumetric heat source and cooled walls. The primary focus is on predicting the averaged flow characteristics, including temperature and heat fluxes. The proposed model problem serves as an initial approximation of turbulent mixing processes occurring during radiation-driven convection in ice-covered lakes.

УРОВЕННЫЙ РЕЖИМ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Н.В. Мякишева, Е.В. Головань, Д.А. Орлов

Российский государственный гидрометеорологический университет

Выполнен вероятностный анализ внутригодовой и многолетней изменчивости уровней Ладожского озера. Применены методы теории случайных процессов. Результаты анализа обобщены в терминах вероятностной модели. Учтены изменения климата.

Ладожское озеро – уникальный пресноводный водоём в Европе, крупнейшее озеро Карелии и Ленинградской области и третье озеро России по площади водного зеркала (Науменко, 1995). Его уровенный режим является интегральным показателем увлажненности и изменений климата на обширной территории. Низкое стояние уровня Ладожского озера, наблюдающееся с 1996 г. по 2022 гг. (Гелета, Мякишева, 1992), привело к усложнению условий судоходства, рыболовства, рекреации, а также стало одной из причин ухудшения качества воды и увеличения биомассы сине-зеленых водорослей в Невско-Ладожской системе.

Главной причиной колебаний уровня воды Ладожского озер является изменение климата. В качестве одного из индикаторов изменения климата в атлантико-европейском секторе северного полушария является динамика воздушных масс, которая создаёт своеобразный режим тепла и влаги (Гелета, Мякишева, 1992; Выручалкина и др., 2016;

Малинин, 2014; Нестеров, 2013; Смирнов, 1998). Учитывая большие размеры всей Ладожской озерной системы (ЛОС), включающей озеро и его водосбор, этот режим неодинаков в ее разных частях. Поэтому уровень озера можно рассматривать как интегральный показатель колебаний климата на изучаемой территории. Также надо отметить, что на формирование уровенного режима оказывают влияние особенности подстилающей поверхности и строение самой озерной системы, определяющей ее отклик на климатические сигналы (Догановский, 2006).

В формировании климата Европейской территории России большую роль играет Северо-Атлантическое колебание (САК) (Выручалкина и др., 2016; Малинин, 2014; Нестеров, 2013; Смирнов, 1998).

Для характеристики многолетней изменчивости увлажненности были рассчитаны временные ряды индексов Де-Мартона α^M в период с 1960 по 2022 г. с использованием данных по метеостанциям на перечисленных бассейнах. Рассчитанные ряды индексов Де-Мартона α^M приведены на рисунке 1

На полученных графиках наблюдаются отрицательные тренды, что свидетельствует об уменьшении увлажненности территорий озёрных бассейнов ЛОС. Что в свою очередь может быть связано со сменой циркуляционных эпох, которая достаточно хорошо просматривается через изменение индекса Северо-Атлантического колебания (Мякишева Н.В., 2009).

Особенности многолетних колебаний уровня озера

Для изучения структуры временного ряда уровней воды Ладожского озера использовались данные о средних годовых значениях уровнях воды за период инструментальных наблюдений с 1881 по 2022 гг. (142 года). В программе Statistica 6.0 был проведен спектральный анализ ряда средних годовых уровней Ладожского озера. В результате были установлено наличие хорошо выраженных около 30-летних (при уровне значимости 5%) и 6-летних колебаний (при уровне значимости 10%) уровня воды в озере.

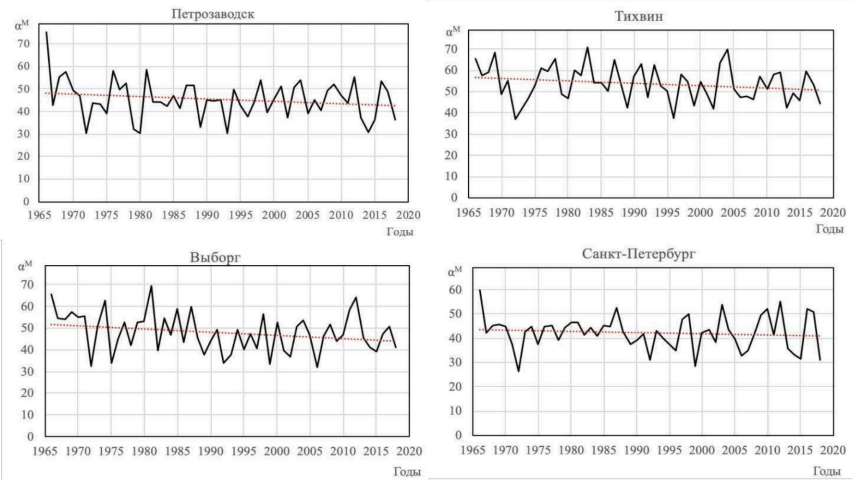


Рис. 1. Хронологические графики индексов Де-Мартона

На рисунке 2 показаны четко выраженные пики, которые соответствуют различным периодам колебаний.

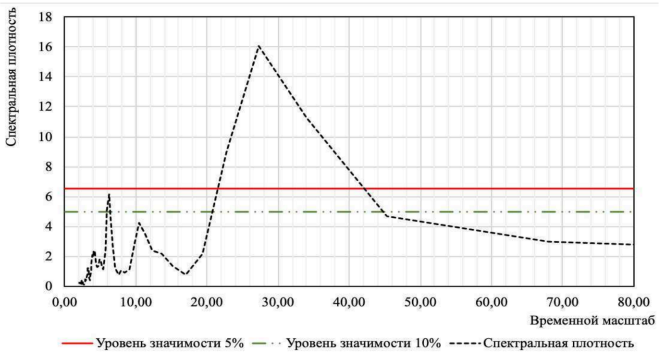


Рис. 2. График распределения спектральной плотности уровенных колебаний Ладожского озера

Следует отметить, что в левой части спектрограммы ниже уровня значимости намечается «всплеск», указывающий на присутствие в ряде уровней ветвей спада и подъема 11-летнего цикла – колебаний, возможно, связанных с циклами изменения солнечной активности.

Установленные циклы дают возможность провести фильтрацию рядов и выделить значимые гармонические составляющие. В данной работе для выделения гармоник и фиксаций квазипериодических колебаний использован фильтр Баттерворта.

На рисунке 3 приведен график колебаний уровня Ладожского озера за весь период инструментальных наблюдений.



Рис. 3. Хронологический график хода уровней воды Ладожского озера

Как видно из графика, минимум уровней пришелся на 40-е и 70-е годы. Максимальный уровень наблюдался в 1924 году. На рисунке представлены около 30-летние колебания, и отрицательный линейный тренд. За рассматриваемый период годовой уровень понизился более чем на 30 см.

Особенности внутригодовых колебаний уровня озера

Для анализа ритмики годовой цикличности уровня воды в Ладожском озере использовался метод теории периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП) (Филатов и др., 2014). Наличие ритмики годовой цикличности достаточно четко проявляется на фоне долгопериодных (низкочастотных) колебаний Ладожского озера (рис. 4).

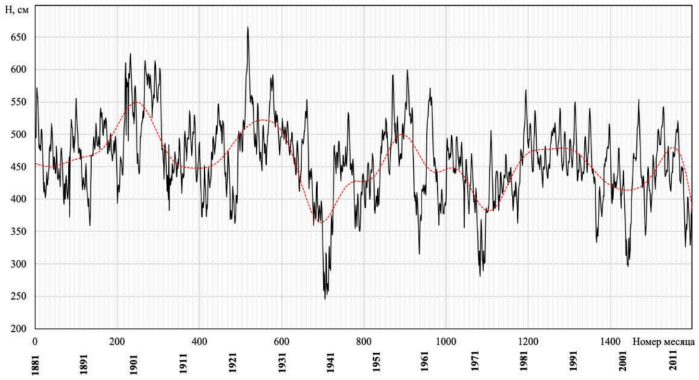


Рис. 4. Ход средних месячных значений уровня Ладожского озера
за период 1881 – 2022 гг. и результаты низкочастотной фильтрации Баттерворта (а)

При этом внутригодовые колебания уровня значительно преобразованы. Фазы водного режима растянуты и распластаны: озеро служит своеобразным фильтром, трансформирующим энергию внутригодовых колебаний в энергию долгопериодной изменчивости (Мякишева, 2009). Регулирование речного притока в Ладожское озеро также искажает внутригодовой ход уровня, что необходимо учитывать при расчете вероятностных характеристик (*m(t), D(t)*). Особенно наглядно эти нарушения прослеживаются на реализациях средних месячных величин *H(t)* (рис. 5 а, б).

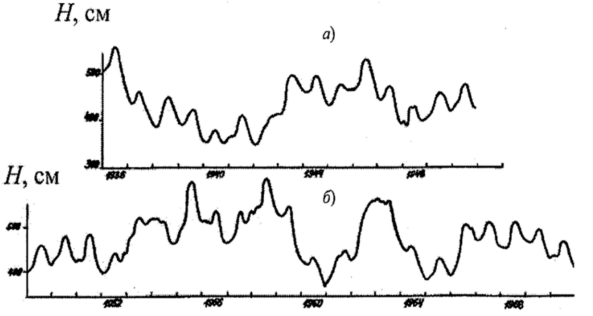


Рис. 5. Внутригодовые колебания Ладожского озера

На реализации средних месячных значений уровня Ладожского озера *H(t)* внутригодовой ход имеет плавный сглаженный вид: повышение уровня происходит в весенне-летний период и понижение – в осенне-зимний.

Перед тем как произвести расчеты была выполнена высокочастотная фильтрация Баттерворта с частотой среза w = 1 рад/год для того, чтобы выделить, собственно, внутригодовые колебания.

На рисунке 6 представлен график оценок математического ожидания и дисперсии внутригодовых колебаний уровня воды Ладожского озера за весь период инструментальных наблюдений до введения в эксплуатацию Верхне-Свирской ГЭС в 1953 году и после.

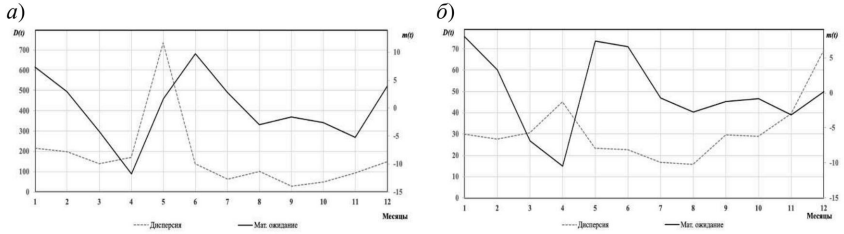


Рис. 6. График оценок математического ожидания и дисперсии средних месячных уровней воды Ладожского озера а) за период 1881-1952 гг.; б) за период 1953-2022 гг.

На графиках кривая среднего многолетнего внутригодового хода уровня Ладожского озера характеризуется сглаженным ходом. Она имеет четко выраженный сезонный характер. До 50-х годов максимум наблюдался в июне, минимум – в апреле. После введения в эксплуатацию Верхне-Свирской ГЭС максимальный уровень наблюдается в мае.

За период 1881-1952 гг. на кривой дисперсии наблюдается один ярко выраженные максимум - в мае. После 50-х годов значение дисперсии резко уменьшилось, что хорошо видно на рисунке 6*б)*. При этом на графике кривой дисперсии наблюдаются два ярко выраженных максимума – в апреле и в декабре.

Для оценки внутригодовой изменчивости уровней воды в Ладожском озере были построены корреляционные зависимости *K(t,T)* за период инструментальных наблюдений после введения в эксплуатацию Верхне-Свирской ГЭС (рис. 7).

Анализ оценок *K(t,T)* показывает, что при временном сдвиге i = 1, *Ki(1)* для всех месяцев года близки к 1,0. Для всех месяцев связи как "вперед", так и "назад" при сдвиге 2-4 мес. затухают, но продолжают флуктуировать в дальнейшем. При сдвиге i = 2-4 мес., *Ki(1)* находятся в области отрицательных значений и остаются значимыми для весенних и летних месяцев. Корреляционные связи внутри года для колебаний уровня симметричны и однотипны для всех месяцев.

На Ладожском озере выявлен значимый отрицательный линейный тренд. За рассматриваемый период годовой уровень понизился более чем на 30 см. Выявленный линейный тренд, возможно, является частью низкочастотной волны колебания, и экстраполяция его в будущее неправомерна (Догановский, 2006). Тем не менее на уровне экспертных оценок можно предсказывать тенденции изменений уровня. Внутригодовые колебания характеризуется сглаженным ходом, максимум наблюдается в мае, минимум – в апреле. Корреляционные связи внутри года для колебаний уровня симметричны и однотипны для всех месяцев.

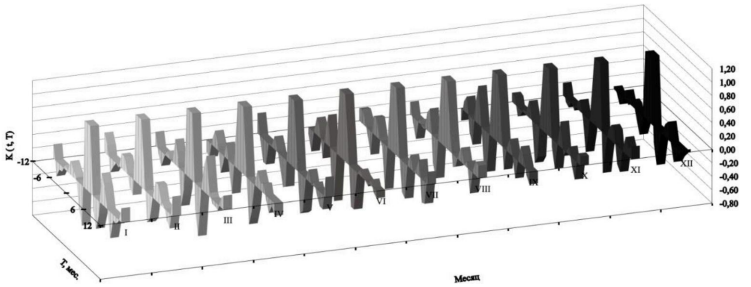


Рис. 7. График оценки корреляционной зависимости внутригодовой изменчивости хода уровней воды Ладожского озера

Литература

Выручалкина Т.Ю., Филатов Н.Н., Дианский Н.А., Гусев А.В. О прогнозе многолетних изменений уровня воды крупных озер // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. №9. С. 3-16.

Гелета И.Ф., Мякишева Н.В. Оценка возможности прогнозирования Ладожского озера на отдаленную перспективу // География и современность. 1992. №6. С. 79-94.

Догановский А.М. Многолетние колебания уровня Ладожского озера // Современные проблемы гидрометеорологии. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2006. С. 175–183.

Лемешко Н.А., Сперанская Н.А. Особенности увлажнения Европейской территории России в условиях изменяющегося климата // Современные проблемы гидрометеорологии. СПб.: Астерион, 2006. С. 38–54.

Малинин В.Н., Гордеева С.М. Северо-Атлантическое колебание и увлажнение европейской территории России // Общество. Среда. Развитие. 2014. №2. С. 191-198.

Мякишева Н.В. Многокритериальная классификация озер. СПб: Гидрометеоиздат, 2009. 153 с.

Мякишева Н.В., Бирюкова В.А. Разномасштабная изменчивость уровня воды в озерах России // Естественные и технические науки. 2018. №12. С. 181-187.

Науменко М.А. Новое определение морфометрических характеристик Ладожского озера // Доклады Академии наук. 1995. Т. 345, №4. С. 514-517.

Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание; атмосфера и океан. М.: Триада, 2013, 144 с.

Рожков В.А., Трапезников Ю.А. Вероятностные модели океанологических процессов. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 270 с.

Смирнов Н.П., Воробьев В.Н., Качанов С.Д. Североатлантическое колебание и климат. СПб.: Изд-во РГГМУ, 1998. 122 с.

Филатов Н.Н., Руховец Л.А., Назарова Л.Е., Георгиев Л.П., Ефремова Т.В., Пальшин Н.И.Влияние изменений климата на экосистемы озер севера европейской территории России. //. Ученые записки РГГМУ. 2014. №34. С.48–55.

LEVEL REGIME OF LAKE LADOGA IN MODERN CONDITIONS

N.V. Myakisheva, E.V. Golovan, D.A. Orlov

A probabilistic analysis of the intra-annual and long-term variability of the levels of Lake Ladoga has been carried out. The methods of the theory of random processes are applied. The analysis results are summarized in terms of a probabilistic model. Climate changes are taken into account.

ОСОБЕННОСТИ ГОДОВОГО ХОДА ПРИДОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В РАЗЛИЧНЫХ РАЙОНАХ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

М.А. Науменко, В.В. Гузиватый
Институт озероведения РАН – Санкт-Петербургский ФИЦ РАН

Изменения придонной температуры в течение года характеризует поступление тепла в лимнические зоны Ладожского озера с разными глубинами дна в период с начала весеннего перемешивания до окончания осеннего перемешивания. Анализ этих изменений проведен на основе измерений, собранных в специализированной базе за многолетний период.

В глубоком димиктическом озере два раза в год возникающее полное вертикальное перемешивание, связанное с температурой максимальной плотности пресной воды, составляющей 3.98°C, является одним из важных процессов передачи тепла от поверхности до дна и “вентилирования” придонных горизонтов. Годовой диапазон придонных температур очень небольшой, но процессы, определяющие температуры у дна, различаются для водоемов с различными глубинами и зависят от зимнего ледового режима озера. Вопрос о климатических воздействиях на придонный слой воды в глубоком озере остается открытым. Зимнее охлаждение может быть вызвано вертикальной конвекцией и плотностными течениями, возникающие в результате дифференциального охлаждения, а также сейшевыми колебаниями (Kirillin et al., 2018). Вертикальное конвективное охлаждение часто считается доминирующим процессом для придонного горизонта. Однако долговременные измерения на Женевском озере показывают, что горизонтальная конвекция (боковая адвекция) может быть важным процессом охлаждения придонных горизонтов и этот процесс должен рассматриваться как трехмерный процесс (Lemmin, 2020). Более того, вовремя более холодных зим, боковая адвекция вносит значительный вклад в охлаждение и насыщение кислородом глубоких слоях (Jansen et al., 2021; Yang et al., 2017).

В настоящее время выделяют по крайней мере два режима вертикального распределения температуры подо льдом: первый — водная толща преимущественно стратифицирована без существенного проникновения теплового потока под лед и второй, который начинается с таяния снега на льду и увеличения радиационного потока тепла через лед, водная толща активно перемешивается (Kirillin et al., 2012, 2018; Hughes et al., 2024). В основном в настоящее время знания об отклике гиполимниона Ладожского озера на эти процессы все еще скудны из-за отсутствия долгосрочных измерений с высоким пространственно-временным разрешением. Существует мало сведений о режиме придонной температуры в Ладожском озере. (Ладожское …, 2015; Дучков, Казанцев 1984; Тихомиров, 1966).

Анализ публикаций о долговременных круглогодичных измерениях придонной температуры в димиктических озерах (Salonen et al., 2014; Titze, Austin, 2014) свидетельствует о резком отличии сезонного хода придонной температуры от сезонного хода температуры поверхности воды.

Если среднегодовая амплитуда температуры поверхности Ладожского озера

составляет около 17 °С, то придонная температура в самой глубоководной части озера в течение года изменяется от 2.5 до 5.5 °С. В умеренных широтах в крупных димиктических озерах связь между придонными горизонтами и атмосферой наиболее сильна дважды в год при свободной конвекции во время весеннего и осеннего полного перемешивания. Именно по этой причине, время наступления полного перемешивания значительно зависит от межгодовой изменчивости атмосферного воздействия на глубоководную температуру и практически является индикатором климатических вариаций.

В докладе рассматривается изменение придонной температуры воды в Ладожском озере в зависимости от распределения глубин h в шести лимнических зонах в период с начала весеннего перемешивания до окончания осеннего перемешивания. Использованы данные за период с 1897 г. по настоящее время.

На рисунке 1 приведен временной ход температуры на поверхности и придонном горизонте для трех из шести указанных зон, а также дисперсии температуры воды для десятидневного периода со сдвигом в 5 суток не зависимо от года наблюдений.

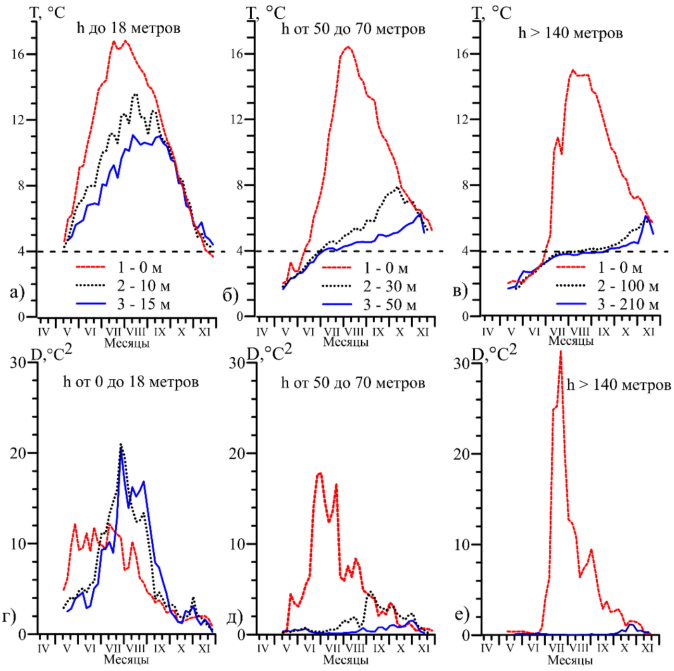


Рис. 1. Ход температуры воды T (а, б, в) и дисперсии температуры D (г, д, е) на поверхности (1), промежуточном горизонте (2), у дна (3) для трех лимнических зон с глубинами до 18 м, 50-70 м и более 140 м в период открытой воды.

Такое представление температурной изменчивости позволило определить характерные даты возникновения и диссипации вертикальной стратификации для периода открытой воды в Ладожском озере, которые могут служить реперами (нормами)

для обнаружения отклонений от среднеклиматического хода.

Продолжительность периода развитой стратификации (с температурами выше 4°С) значительно изменяется от мелководного района до глубоководного: первого района составляет 195 суток, а самого глубоководного не более 168 суток. Отметим, что период нагревания и охлаждения поверхности воды ни для одного района не являются равными друг другу. Период нагревания поверхности составляет лишь 30-40% от общей продолжительности стратификации. Продолжительность нагревания придонного слоя изменяется от 70 до 90% от общего периода стратификации, но в этот период придонная температура растет только в районах, глубины дна к которых не превышают 70 м (рис. 1 б). Для более глубоких районов придонная температура может оставаться постоянной (4°С) вплоть до того момента, когда конвекция в осенний период выровняет температуру на вертикали от поверхности до дна и придонная температура достигнет своего годового максимума.

Степень изменчивости температуры характеризует её дисперсия за десятидневный период (рис.1 г, д, е), красная (поверхность) и синяя (у дна) кривые. Сезонный ход дисперсий температуры поверхности и придонного горизонта кардинально отличаются друг от друга.

Для всех шести зон Ладожского озера дисперсии температуры поверхности достигают своих максимальных величин в период нагревания до того, как температура поверхности достигнет своего максимума. Наибольшие экстремумы дисперсий имеют место в самом глубоководном районе, но временной диапазон их существования короче по сравнению с мелководными районами.

Для прибрежного мелководного района с глубинами до 18 м дисперсии придонной температуры подобны изменениям дисперсий температуры поверхности. Характерное отличие наблюдается, начиная с переходного района с глубинами до 50 м. В начальный период нагревания со второй половины мая до конца августа придонная температура увеличивается на один градус с 4 до 5°С, за этот период дисперсия минимальна, что указывает на практически неизменяющуюся от года к году температуру у дна. В сентябре дисперсия увеличивается, что свидетельствует о возможных климатических вариациях температуры в этот месяц. Затем вплоть до окончания осенней изотермии дисперсия уменьшается.

Общая закономерность сезонного изменения придонной температуры и ее дисперсии в самой глубоководной части Ладожского озера заключается в том, что придонная температура достигает своего максимума в последние даты периода охлаждения поверхности озера, когда свободная конвекция доставляет тепло с поверхности в придонные горизонты. Далее осеннее охлаждения происходит в изотермическом состоянии водной толщи с температурой в диапазоне 5.3-5.5 °С. Продолжительность осенней изотермии полностью определяется продолжительностью охлаждения температуры придонного горизонта до 4°С.

Зимний подледный режим придонных температур требует особого рассмотрения.

Литература

Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас. СПб: Нестор-История, 2015. 200 с.

Дучков А.Д., Казанцев С.А. Результаты изучения теплового потока через дно озер / Теоретические и экспериментальные исследования по геотермике морей и океанов. Л.: Наука, 1984. С. 104-113.

Тихомиров А.И. Температурный режим и запасы тепла Ладожского озера / Тепловой режим Ладожского озера. Л.: Изд-во Ленинградского у-та, 1966. С. 144-217.

Kirillin G., Aslamov I., Leppäranta M., Lindgren E. Turbulent mixing and heat fluxes

under lake ice: The role of seiche oscillations // Hydrology and Earth System Sciences. 2018. №22. P. 6493-504.

Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., Bernhardt J., Engelhardt C., Granin N., Golosov S., et al. Physics of seasonally ice-covered lakes: Major drivers and temporal/spatial scales // Aquatic Ecology. 2012. №74. P. 659–682.

Lemmin U. Insights into the dynamics of the deep hypolimnion of Lake Geneva as revealed by long-term temperature, oxygen, and current measurements // Limnol Oceanogr. 2020. №65. P. 2092-2107.

Salonen K., Pulkkanen M., Salmi P., Ross W.G. Interannual variability of circulation under spring ice in a boreal lake // Limnol. Oceanogr. 2014. V. 59. Iss. 6. P. 2121-2132.

Titze D., Austin J. Winter thermal structure of Lake Superior // Limnology and Oceanography. 2014. V. 59. Issue. 4. P. 1336-1348.

Yang B., Young J., Brown L., Wells M. High-frequency observations of temperature and dissolved oxygen reveal under-ice convection in a large lake // Geophysical Research Letters. 2017. V. *44.* Iss. 12. P. 12218-12226.

FEATURES OF THE ANNUAL COURSE OF BOTTOM TEMPERATURE IN DIFFERENT AREAS OF LAKE LADOGA

M.A. Naumenko, V.V. Guzivaty

Changes in the near-bottom temperature during the year characterize the heat input to the limnic zones of Lake Ladoga with different bottom depths during the period from the beginning of spring mixing to the end of autumn mixing. The analysis of these changes is based on measurements collected in a specialized database over a multi-year period.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА: РЕЗУЛЬТАТЫ И ПРОБЛЕМЫ

М.А. Науменко

Институт озероведения РАН – Санкт-Петербургский ФИЦ РАН

Общее потепление озер наблюдается по всему миру, что приводит к интенсификации и удлинению периода летней стратификации и сокращению ледяного покрова. В конечном счете вариации климата отражаются в разном уровне биологической продуктивности крупных озёр. Температура оказывает принципиально важное влияние на структуру и функционирование экосистем озера. Существует сложность оценки реакции озера на разномасштабные климатические вариации, связанные с внутригодовыми и межгодовыми термическими изменениями. Представляется важным объективное обнаружение и анализ как постепенных, так и резких изменений термических параметров озера таких как ледовые условия, периодов полного весеннего и осеннего перемешивания, продолжительности устойчивой вертикальной стратификации, времени наступления годовых максимумов температуры на различных горизонтах от поверхности до дна в различных лимнических районах Ладожского озера. Состояние изученности термического режима крупнейшего димиктического европейского озера – Ладожского и его реакцию на климатические изменения обсуждаются в докладе на основе публикаций XX1 века.

Термический режим крупного димиктического озера определяется сезонным

ходом поступления тепла к поверхности и распространением тепла в глубь озера. Для количественной оценки климатических вариаций в Ладожском озере необходимо знание фоновых среднеклиматических параметров термического состояния, сравнение с которыми позволит оценить степень внешнего воздействия (Филатов и др., 2013). К первой четверти двадцать первого века среднеклиматический термический режим Ладожского озера (площадь акватории 17765 кв. км, объем водной массы при среднем навигационном уровне 5.1 м БС 848 куб. км) достаточно хорошо известен. На основе базы данных с 1897 года по 2024 г. и цифровой морфометрической модели озера определена средняя годовая температура водной массы Ладожского озера (Науменко, Гузиватый, 2010), сезонный ход температуры воды от поверхности до дна для различных районов озера и теплозапасы, которые подтвердили оценки этих параметров, сделанные А.И. Тихомировым (1982). Было показано наличие трендов температуры поверхности воды в глубоководной части озера (Naumenko et al.,2006).

Димиктизм озерной толщи проявляется в том, что озеро дважды в год перемешивается от поверхности до дна за счет аномалии плотности пресной воды при температуре 3,98°С на поверхности. Следствием аномалии плотности воды является ежегодное возникновение весенней (осенней) термических фронтальных зон (термобара) в Ладожском озере. Проанализировано среднеклиматическое распределение температуры поверхности воды, особенности распределения ее в весенний (со второй половины апреля до начала июля) период существования термического фронта и его продвижения от мелководных районов озера в глубоководную часть (Науменко и др., 2002, Науменко, 2021). В этот период горизонтальные градиенты температуры поверхности воды могут превышать градиенты температуры воздуха в два раза (Науменко и др., 2012). Показано более раннее исчезновение фронтальной зоны по сравнению со средними многолетними датами в Ладожском озере.

Обычно между двумя основными событиями перемешивания (весна, осень) Ладожское озеро устойчиво стратифицировано в течение нескольких месяцев. Оценены аномалии и экстремальные отклонения реальных пространственных распределений от типичных(фоновых) для масштабов синоптической изменчивости. В синоптических масштабах температура поверхностного слоя демонстрирует быстрый квазисинхронный отклик на атмосферное воздействие, который обычно ослабевает с глубиной, если не возникают интенсивные вертикальные движения(апвеллинг). Типичное распределение температуры поверхности воды Ладожского озера в период открытой воды практически занимает не более 20% площади озера. Наиболее аномальным распределением температуры поверхности характеризуется прибрежный мелководный район. Степень аномальности изменяется от месяца к месяцу. Самый аномальный месяц периода открытой воды – июль (Науменко, Тимофеева, 2009).

Климатические соотношений температуры воздуха и поверхности воды для различных лимнических районов в период открытой воды, в том числе гистерезис между температурами воздуха и температурой водной массы озера, а также отличия изменений температуры воды при изменении температуры воздуха на 1°С в период нагревания и охлаждения (Науменко, Гузиватый, 2022), обсуждаются в докладе.

Значительный годовой отклик термического состояния озера на интенсивное в течение года атмосферное воздействие проявляется в температуре воды эпилимниона и металимниона. Ниже термоклина, однако, толща воды может не реагировать на форсинг на поверхности озера, что приводит к значительному затуханию годового отклика в гиполимнионе. Наличие стратификации препятствует вертикальному перемешиванию и переносу кислорода и биогенов между слоями.

Статистический анализ вертикальных профилей температуры, измеренной за длительный период времени с 1897 по 2017 гг. в центральной части Ладожского озера,

позволил впервые разработать эмпирические количественные соотношения между параметрами стратификации с высокими коэффициентами детерминации. Исходя из различия физических особенностей процессов нагревания и охлаждения поверхности озера, для каждого из периодов найдены регрессионные зависимости, которые описывают сезонный ход термических параметров Ладожского озера на различных глубинах. Оценены скорости изменения температуры воды и параметров слоя скачка в период открытой воды (Науменко, Гузиватый, 2022). Впервые выявлен гистерезис параметров слоя скачка. На основеполученных соотношений были установлены зависимости между температурой поверхности озера и параметрами слоя скачка, что имеет важное значение для определения характеристик вертикальной стратификации в период открытой воды в Ладожском озере дистанционными методами (Науменко, Гузиватый, 2024).

В умеренных широтах в крупных димиктических озерах связь между придонными горизонтами и атмосферой наиболее сильна дважды в год при свободной конвекции во время весеннего и осеннего полного перемешивания. Именно по этой причине, время наступления полного перемешивания значительно зависит от межгодовой изменчивости атмосферного воздействия на глубоководную температуру и практически является индикатором климатических вариаций. Для периода открытой воды с мая по ноябрь на основе совместного анализа климатического сезонного хода температуры поверхности воды и температуры придонного горизонта с декадным осреднением были определены характерные даты возникновения и диссипации вертикальной стратификации в Ладожском озере, которые могут служить реперами (нормами) для обнаружения отклонений от среднеклиматического хода.

Продолжительность периода развитой стратификации (с температурами выше 4°С) значительно изменяется от мелководного района до глубоководного: для первого района составляет 195 суток, а самого глубоководного не более 168 суток. Период нагревания и охлаждения поверхности воды ни для одного района не являются равными друг другу. Период нагревания поверхности составляет лишь 30-40% от общей продолжительности стратификации.

В научной литературе по Ладожскому озеру практически нет анализа как изменяется годовая максимальная температура воды с глубиной. Часто экстремальное событие, такое как температурный максимум, оказывает наибольшее влияние на экосистему озера, чем изменения средних условий. Обычно годовой максимум температуры на поверхности воды приходится на середину лета. В это время в результате начинающегося охлаждения поверхности озера, инициирующего конвективное перемешивание, формируется верхний квазиоднородный поверхностный слой (эпилимнион). Его заглубление – это проникновение тепла в нижележащие слои водной толщи. Это значит, что максимумы температуры с поверхности смещаются на бóльшую глубину, а их значения уменьшаются. В каждую дату на определенной вертикали проникновение тепла на нижележащие горизонты можно проследить по заглублению годовых максимумов температуры воды от поверхностного слоя до дна. Фактически изменение глубины годовых максимумов температуры характеризует вертикальные вариации верхнего квазиоднородного слоя. Осенью, когда тепло достигает дна, возникает вертикальная изотермия, и температура у дна становится самой высокой за год в димиктическом озере. Следуя этой концепции, была создана эмпирическая модель изменения даты возникновения и величины максимальной годовой температуры воды с глубиной в глубоководной части Ладожского озера, аналогичная модели этого процесса в озере Байкал (Науменко и др., 2024).

Ледовые процессы в Ладожском озере играют значительную роль не только в термогидродинамической картине озера, но и в его экологическом состоянии. На основе

авиа- и космических съёмок ледовой ситуации озера с 1943 года по настоящее время обнаружено, что средняя продолжительность ледовых явлений составляет 171±3 суток со второй половины ноября по первую декаду мая. Период, когда озеро полностью покрыто льдом (если он наступает), составляет около двух месяцев, хотя его продолжительность может варьировать от нескольких дней до 120 суток. Начиная с зимы 2013-14 г.г. полный ледостав на всей акватории Ладожского озера наблюдался только зимой 2017-2018 г.г. Таким образом, за последние десять лет каждую зиму были открытые участки воды в глубоководной части озера.

Временные характеристики начала, продолжительности и окончания ежегодного существования весенней фронтальной зоны в Ладожском озере зависят от ледового покрова , более раннего наблюдаемого устойчивого перехода температур воздуха через 0 °С и уменьшением средней скорости ветра в весенний период.

Результаты, полученные на основе анализа больших массивов натурных данных и космических съёмок, свидетельствуют о прогрессе в изучении термики Ладожского озера. Требуется более детальные целенаправленные долговременные измерения лимнических параметров с использованием буйковых станций для подтверждения полученных выводов и верификации и совершенствования математических моделей.

Литература

Науменко М.А., Каретников С.Г. Сезонная эволюция пространственного распределения температуры поверхности воды Ладожского озера в связи с его морфометрией // Доклады Академии наук. 2002. Т. 386. № 2. С. 250-253.

Науменко, М. А., Тимофеева Л. А. Аномалии полей температуры поверхности воды Ладожского озера синоптических масштабов // Метеорология и гидрология. 2009. №12. С. 77-85.

Науменко М.А., Гузиватый В.В., Каретников С.Г. Изменчивость горизонтальных градиентов температуры поверхности воды и воздуха в весенней фронтальной зоне Ладожского озера // Океанология. 2012. Т. 52, № 6. С. 798.

Науменко М.А. Особенности климатических соотношений температуры поверхности воды и приводного слоя воздуха в период весеннего прогрева Ладожского озера // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14. №2. С. 78-88.

Науменко М.А., Гузиватый В.В. Методические подходы и результаты анализа климатического сезонного хода параметров устойчивой стратификации димиктического озера (на примере центральной части Ладожского озера) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. №1. С. 52-62.

Науменко М.А. Реакция димиктических озер на климатические изменения // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. М.: Российская академия наук, 2021. С. 194-198.

Науменко М.А., Гузиватый В.В. Климатические соотношения между температурой воздуха и температурами воды различных лимнических районов Ладожского озера // География и природные ресурсы. 2022. Т. 43. №1. С. 83-92.

Науменко М.А., Гузиватый В.В. Связаны ли параметры устойчивой лотностной стратификации с температурой поверхности Ладожского озера? // Гидрометеорология и экология. 2024. №75. С. 328—344.

Тихомиров А.И. Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.

Livingstone D.M. Temporal structure in the deep-water temperature of four Swiss lakes: A short-term climatic change indicator? // Verh. Internat. Verein. Limnol. 1993. №25. P. 75-81.

Naumenko M.A., Guzivaty V.V., Karetnikov S.G. Climatic trends of the water surface

temperature in Lake Ladoga during ice-free periods // Dokl. Earth Sc. 2006. 409. P. 750–753.
Prats J., Danis P.-A. An epilimnion and hypolimnion temperature model based on air temperature and lake characteristics // Knowl. Manag. Aquat. Ecosyst. 2019. №8. 420 p.

CURRENT STATE OF THERMAL REGIME RESEARCH OF LAKE LADOGA: RESULTS AND PROBLEMS

M.A. Naumenko

General warming of lakes is observed all over the world, which leads to intensification and lengthening of the period of summer stratification and reduction of ice cover. Ultimately, climate variations are reflected in different levels of biological productivity of large lakes. Temperature has a fundamentally important influence on the structure and functioning of lake ecosystems. here is a difficulty in assessing lake response to multi-scale climatic variations associated with intra- and inter-annual thermal changes. It is important to objectively detect and analyze both gradual and abrupt changes in the thermal parameters of the lake, such as ice conditions, periods of complete spring and autumn mixing, duration of stable vertical stratification, time of onset of annual temperature maxima at different horizons from surface to bottom in different limnic areas of Lake Ladoga. The state of study of the thermal regime of the dimictic largest European lake - Lake Ladoga and its response to climatic changes are discussed in the report on the basis of XX1st century publications.

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ, УСТОЙЧИВОСТИ ВОДНОЙ ТОЛЩИ И КОЭФФИЦИЕНТА ГАЗОПЕРЕНОСА В НЕБОЛЬШОМ ЛЕСНОМ ОЗЕРЕ КАРЕЛИИ ПО ДАННЫМ 2024 ГОДА

Ю.С. Новикова, Г.Э. Здоровеннова, С.И. Смирнов, С.Р. Богданов, Р.Э. Здоровеннов
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Представлены результаты оценки энергетических параметров и параметров устойчивости водной толщи для озера Чудесная Ламба (Карелия, заповедник «Кивач») за период апрель – октябрь 2024 г. Измерения температуры и фотосинтетической активной солнечной радиации позволили определить характер изменения данных параметров по глубине и в сезонном аспекте, выявить основные этапы термического цикла, период устойчивости водной толщи, изменение глубины поверхностного перемешанного слоя и теплосодержания водного столба. Оценка вышеперечисленных характеристик позволяет выявить механизм перемешивания и переноса газов через водную поверхность, а также оценить коэффициент газопереноса.

Изучение процессов перемешивания в озерах остается актуальной и важной задачей с точки зрения понимания функционирования водоема и его отклика на внешние природные и антропогенные факторы. От характера перемешивания водной толщи зависит формирование термического режима водоема, развитие планктонного и бактериального сообществ, перераспределение примесей и газов, а также накопление и эмиссия парниковых газов. Для определения последних – важно понимать механизмы тепломассопереноса через водную поверхность.

Наблюдения на оз. Чудесная Ламба (Карелия, заповедник «Кивач») проводились впервые (Лукина и др., 2024). Автономная станция была установлена в центральной

части озера на глубине 3,5 м с апреля по октябрь 2024 г. Автономная станция была представлена косой с термодатчиками TR-1060, RBR-Solo T фирмы RBR Ltd (точность ±0,002 °C), размещенными со сдвигом по глубине – 0,15 м и дискретностью измерений – 1 минута, а также ФАР-косой, оснащенной пятью датчиками фотосинтетической активной радиации (Alec Electronics) на глубинах 0,25, 0,75, 1,25, 1,75, 2,25 м. По этим данным были оценены такие параметры как поток плавучести, теплосодержание водного столба, глубина перемешанного слоя (Богданов и др., 2023) и параметры устойчивости водной толщи (использовалась программа Lake Analyzer (Read et al., 2011)). На берегу озера с начала июня до октября 2024 г. была установлена метеостанция.

На рисунке 1 показано распределение температуры по глубине за период с 11 апреля по 6 июня 2024 г., где отчетливо можно выделить периоды термического цикла озера: окончание ледостава (11 апреля - 8 мая), весеннее перемешивание (8 - 12 мая), начало летней стратификации (8 мая - 6 июня). Период летней стратификации длился с 8 мая по 2 октября. Таким образом, оз. Чудесная ламба имеет димиктический режим перемешивания с двумя периодами полного перемешивания водной толщи – весной после схода льда и осенью.

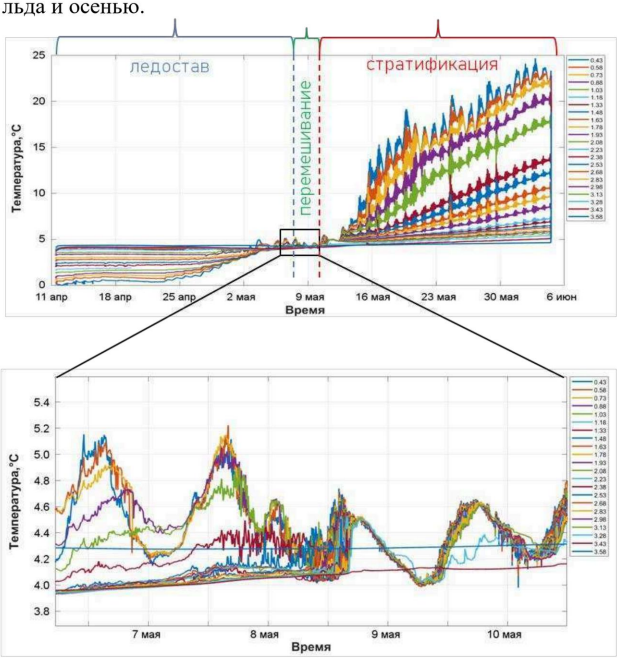


Рис. 1. Температура воды на разных горизонтах водной толщи оз. Чудесная Ламба в период с 11 апреля по 6 июня 2024 г.

Достаточно быстрое установление стратификации весной и медленная скорость заглубления сезонного термоклина летом-осенью говорят о несущественной роли ветра в перемешивании водоема. Это также подтверждается анализом метеоданных: средняя скорость ветра в июне-июле не превышала 4 м/с, при среднем значении 0,63 м/с. Основным механизмом перемешивания для данного озера в период открытой воды является радиационный, обусловленный поверхностным выхолаживанием (Богданов и др., 2023).

Для этапа весенне-летнего нагревания были примечательны ночные периоды, когда происходило формирование поверхностного перемешанного слоя (ППС), тогда как днем стратификация восстанавливалась. Глубина ППС постепенно увеличивалась и достигла 1,25 м к концу мая, 1,75 м к концу июня, 2,6 м к концу августа достигла 2,6 м, к концу сентября – 3,0 м (рис. 2, а). Устойчивость водного столба постепенно увеличивалась на протяжении мая-июня. Параметры устойчивости водного столба в период с 8 мая по 3 июля: устойчивость Шмидта *St* 20-30 Дж/м^2, частота плавучести 0,005-0,025 с$^{-2}$, озерное число 20-145, число Веддерберна 1-29. Максимальная устойчивость водной толщи была достигнута в период с конца июня по конец июля (*St* 35 Дж/м^2) (рис. 2, б). В августе-сентябре устойчивость водной толщи постепенно уменьшалась (*St* 10-18 Дж/м^2), а в третьей декаде сентября резко уменьшилась до близких к нулю значений *St*. Частота плавучести достигала в июне-июле 0,02-0,03 с$^{-2}$, в августе составляла 0,01-0,02 с$^{-2}$, в конце сентября уменьшилась до 0,005 с$^{-2}$ (рис. 2, в).

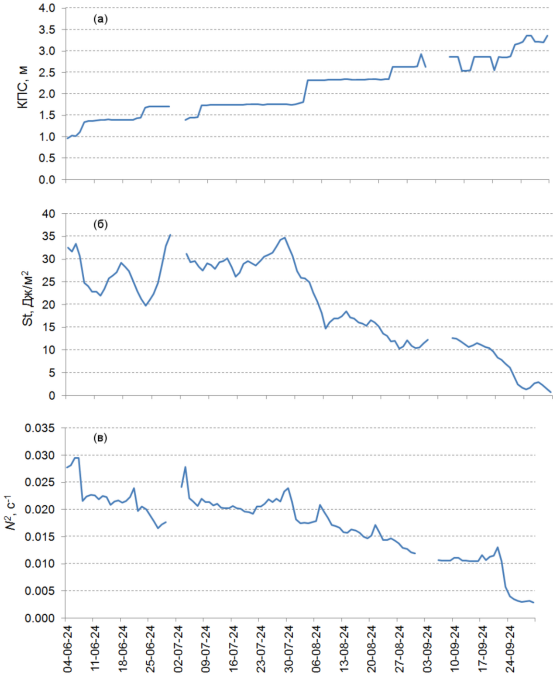


Рис. 2. Сезонное изменение глубины ППС (а), устойчивости Шмидта (б) и частоты плавучести (в) в июне-сентябре 2024 г., оцененное с помощью программы Lake Analyzer

Оценка диффузионного потока G газов на поверхности вода-воздух основана на интегральной версия законе Фика (Raymond, Cole, 2001):

$$G = k\,(C_w - C_{eq}),$$

где C_w – концентрация газа в поверхностном слое воды, C_{eq} – концентрация, соответствующая равновесию с атмосферой (рассчитывается по концентрации газа в атмосфере с использованием константы Генри), k – коэффициент переноса газа (gas

transfer coefficient), м/с. Величина k определяется параметрами турбулентности в поверхностном слое, и при ее расчете необходимо учитывать специфику механизмов генерации турбулентности.

Для ситуаций, когда основной вклад в перемешивание вносит свободная конвекция, оценку k можно провести по формуле (Soloviev, Schluessel, 1994):

$$k = A\Lambda_0^{-1} Sc^{-1/2} (B\,\nu / Rf_{cr})^{1/4}$$

Параметры A и Λ_0 определяются базовыми параметрами модели (средним временем обновления поверхности и соответствующей дисперсией). При проведении количественных расчетов для основных констант были приняты значения Λ_0 =13,3 и Rf_{cr} =1,5×10^{-4}. $B = \beta g q_0$ – поверхностный поток плавучести (м^2/с^3), ν – коэффициент кинематической вязкости воды (м^2/с), Rf_{cr} – критическое значение поверхностного потокового числа Ричардсона.

При оценках величины k обычно используется «нормированное» значение k_{600}, приведенное к «стандартному» состоянию с температурой 20°C (когда молекулярное число Шмидта Sc для углекислого газа составляет 600). При этом используются известные эмпирические аппроксимации для параметра Sc для каждого из парниковых газов. Например, для метана и углекислого газа соответствующие формулы имеют вид:

$$Sc_{CH4} = 1898 - 110{,}1T + 2{,}834T^2 - 0{,}02791T^3,$$

$$Sc_{CO2} = 1911 - 113{,}7T + 2{,}967T^2 - 0{,}02943T^3,$$

где − T температура, ºC.

Поток плавучести B на поверхности (Вт/кг или м^2/с^3) определяется плотностью W (Вт/м^2) потока тепла при охлаждении: $B = \frac{\alpha\, g\, W}{\rho c_p}$. Оценка величины B осуществлялась на основе составления теплового баланса и расчета скорости изменения теплосодержания столба воды: $W = (Q(t + \Delta t) - Q(t))/\Delta t$, где Δt = 60 с – дискретность измерений температурных датчиков.

Оценки теплосодержания столба воды и теплового потока на поверхности для летнего и осеннего периодов показаны на рисунке 3.

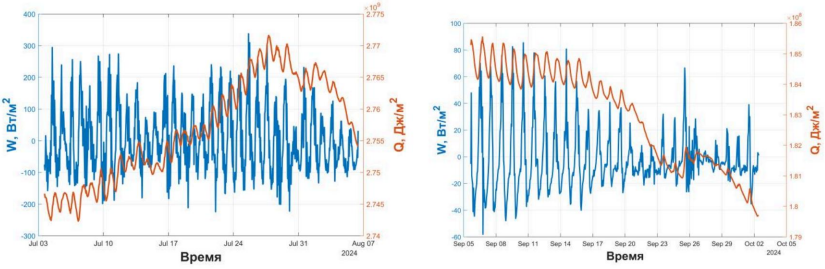


Рис. 3. Теплосодержание столба воды в центре озера (красная линия) и тепловой поток на поверхности (синяя линия) в летний (слева) и осенний (справа) периоды 2024 г.

Наибольшие значения величины k соответствуют периодам охлаждения, которые в основном совпадают с ночными часами. При этом характерные значения k для летних месяцев составляли порядка 3 см/ч, для осени – 1-2 см/ч и уменьшались по мере заглубления ППС. Значения величины k представлены на рис. 4, соответственно, для осеннего периода, когда происходило быстрое заглубление ППС.

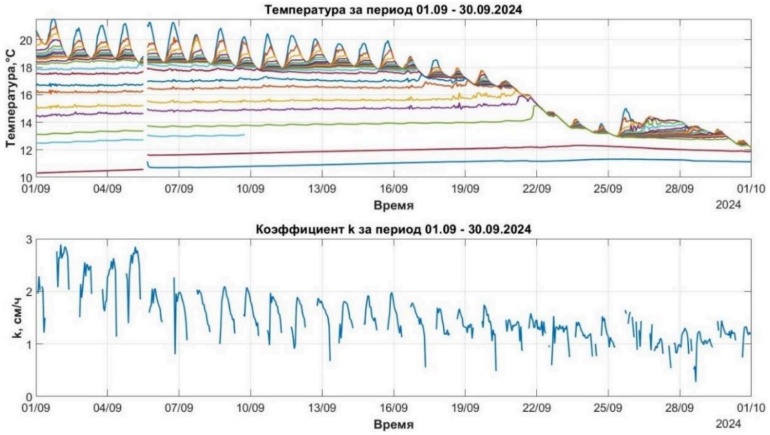


Рис. 4. Динамика температуры воды на разных глубинах (верхняя панель) и рассчитанные значения коэффициента переноса (нижняя панель). Сентябрь 2024 г.

Существенное, более чем в два раза монотонное уменьшение значений *k* было зафиксировано с первой декады сентября, когда толщина перемешанного слоя достигала значений, превышающих 2,5 м до конца месяца (рис. 4). Полное перемешивание водной толщи озера было зафиксировано 2 октября.

Полученные новые данные о продолжительности этапов термического цикла и преобладающем механизме перемешивания небольшого лесного озера. Димиктический режим перемешивания озера создает предпосылки для развития анаэробных условий в придонных слоях озера и для накопления парниковых газов под сезонным термоклином. Интенсификация перемешивания при радиационном выхолаживании в ночные часы может способствовать росту эмиссии парниковых газов. Полученные оценки коэффициента газопереноса на этапах нагревания и осеннего охлаждения могут быть использованы при изучении сезонной динамики потоков парниковых газов с поверхности этого небольшого лесного озера.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН ВИП ГЗ «Ритм углерода» (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

Литература

Raymond P.A., Cole J.J. Gas exchange in rivers and estuaries: Choosing a gas transfer velocity // Estuaries. 2001. V. 24. P. 312–317.

Read J.S., Hamilton D.P., Jones I.D., et al. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data // Environ. Model. Software. 2011. V. 26. P. 1325-1336.

Soloviev A.V., Schluessel P. Parameterization of the temperature difference across the cool skin of the ocean and the air-ocean gas transfer on the basis of modeling surface renewal // J. Phys. Oceanogr. 1994. V. 24. P. 1339–1346.

SEASONAL DYNAMICS OF ENERGY PARAMETERS, WATER COLUMN STABILITY AND GAS TRANSFER COEFFICIENT IN KARELIAN SMALL FOREST LAKE IN 2024

Yu. Novikova, G. Zdorovennova, S. Smirnov, S. Bogdanov, R. Zdorovennov

The article presents assessment of energy parameters and water stability parameters for Lake Chudesnaya Lamba (Karelia, Nature Reserve "Kivach") in April – October 2024. Measurements of temperature and photosynthetic active solar radiation made it possible to determine the nature of changes these parameters in depth and in the seasonal aspect, to identify the main stages of the thermal cycle, the period of stability of the water column, changes in the depth of the surface mixed layer and the heat content of the water column. The assessment characteristics makes it possible to identify the mechanism of mixing and gases transfer through the water surface, as well as to estimate the gas transfer coefficient.

РАСЧЕТ СУТОЧНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ ПЕРИГЛЯЦИАЛЬНЫХ ОЗЕР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Г.В. Пряхина[1], Е.С. Зелепукина[2]
[1]Санкт-Петербургский государственный университет
[2]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

В работе представлены результаты моделирования суточных уровней воды перигляциального озера, полученные при различных сочетаниях источников исходной информации. В качестве основных источников исходных данных использовались сеть государственных метеостанций, реанализ, полевые и опубликованные данные. Выбор объекта моделирования обусловлен наличием гляциологических, метеорологических, актинометрических и гидрологических данных, измеренных непосредственно на территории водосбора. Сравнение рассчитанных и наблюдённых уровней воды показало возможность применения любых источников информации, при этом наилучшая сходимость выявлена при расчетах по полевым данным. Для неизученных высокогорных бассейнов выявлена оптимальная комбинация источников информации для моделирования суточных уровней воды: метеоданные (без осадков) – по сетевой метеостанции, осадки – по реанализу, актинометрические характеристики – по литературным данным.

В условиях недостаточности либо полного отсутствия исходной гидрометеорологической информации в удаленных и труднодоступных высокогорных районах получить прогнозные оценки изменения гидрологических характеристик при различных климатических и антропогенных воздействиях позволяет использование физико-математических моделей (Терешина и др., 2024). Точность модельных расчетов во многом определяется качеством и детальностью входной гидрометеорологической информации, а также корректностью определения параметров и характеристик модели.

Несмотря на большое количество моделей, с помощью которых в мире успешно рассчитывают сток с водосборов горных рек, имеющих в бассейне оледенение, в нашей стране отсутствуют модели расчета суточных уровней высокогорных озер. В этой связи ранее коллективом авторов (Пряхина и др., 2024) была разработана методика расчета уровня воды MoLeFo (Model of Level Formation). В связи с тем, что не все открытые

источники (сеть государственных метеостанций, реанализ, спутниковые снимки, справочная и научная литература, полевые работы) содержат полный набор необходимых данных (метеорологические, актинометрические данные и др.), на практике обычно используют различные комбинации источников информации.

Целью настоящей работы является анализ суточных уровней воды высокогорного озера для периода абляции, рассчитанных при различных комбинациях источников исходной информации. В качестве объекта исследования выбрано сточное моренно-подпрудное озеро с условным названием «Таможенное» в связи с наличием данных фактических измерений, полученных в ходе комплексных экспедиций СПбГУ на леднике Некрасова (Южно-Чуйский хребет, Алтай). Детальная характеристика водосборного бассейна приведена в (Пряхина и др., 2024).

Для расчета уровня воды использовались исходные данные, объединенные в шесть различных комбинаций. Индекс комбинации представляет собой последовательное указание на источник данных: источник метеоданных (кроме осадков) – источник данных об осадках – источник актинометрических данных.

Метеорологические данные, кроме осадков (температура воздуха, скорость ветра, общая и нижняя облачность, влажность воздуха и др.), были получены по сетевой государственной метеостанции Кара-Тюрек (2600 м), а также по двум полевым метеостанциям, расположенным у озера (2770 м) и на языке ледника (2995 м). Данные по осадкам были получены по метеостанции Кара-Тюрек, по двум полевым метеостанциям и модели реанализа IMERG. Актинометрические данные использовались по двум источникам: данные полевых наблюдений, а также расчеты, описанные в научной литературе (Сивков, 1968).

Оценка результатов моделирования суточных уровней воды с использованием различных комбинаций источников исходных данных проводилась путем визуального сравнения графиков рассчитанных и наблюденных уровней воды (особенно на совпадение времени наступления максимальных и минимальных значений), а также анализа статистических параметров.

Периоды расчета суточных уровней воды (12.07– 29.07.2022 и 12.07– 03.08. 2023) обусловлены наличием проверочной информации –измеренными уровнями воды.

На территории водосборного бассейна были выделены несколько типов поверхностей с различными характеристиками стокообразования: собственно ледники, снежники, погребенные льды и внеледниковая часть водосбора (современная морена).

Алгоритм расчета среднесуточных уровней воды разработан на основе уравнения водного баланса озера, которое для i-тых суток в общем виде выглядит:

$$W_{\text{пр},i} - W_{\text{от},i} = \Delta W_{\text{оз},i} \quad (1),$$

где $W_{\text{пр},i}$ – объем суточного поступления воды в озеро, м^3; $W_{\text{от},i}$ – объем суточного оттока воды из озера, м^3; $\Delta W_{\text{оз},i}$ – изменение объема озера за сутки, м^3.

Выразив изменения объема озера за сутки ($\Delta W_{\text{оз},i}$) через площадь озера ($A_{\text{оз},i}$), определяемую для каждых расчетных суток по батиграфической кривой, а суточные изменение уровня воды ($W_{\text{от},i}$) через зависимость расхода воды от уровня озера (Журавлев, 2011), получим:

$$H_i = \frac{A_{\text{оз},i} \cdot H_{i-1} - 86400b + W_{\text{пр},i}}{A_{\text{оз},i} + 86400a} \quad (2),$$

где H_i , H_{i-1} – уровень воды за расчетные и предыдущие сутки, м; $A_{\text{оз},i}$ – площадь зеркала озера, м^2; a и b – эмпирические коэффициенты линейной функции истечения, определяемые для каждого конкретного объекта.

Объем поступления воды в озеро ($W_{\text{пр}\,i}$) определялся как сумма притока от таяния ледникового льда, погребенного льда и таяния снега на водосборе, притока воды с внеледниковой части водосбора и разности между объемами выпадающих на

акваторию осадков и испарения. Все расчеты проводились для 100-метровых высотных интервалов, выделенных по цифровой модели рельефа SRTM.

Интегральный приток воды от таяния ледникового льда/погребенного льда/снега определялся путем умножения площади ледникового льда/погребенного льда/снега в каждом высотном интервале на сумму слоев осадков, таяния ледникового льда/погребенного льда/снега и испарения с поверхности ледникового льда/погребенного льда/снега.

Суточные слои таяния и испарения ледникового льда/ погребенного льда/ снега определялись с использованием уравнений П.П. Кузьмина (Кузьмин, 1961; Резепкин, 2012) с дополнениями (Зырянова и др., 2023), испарения с лишенной растительности внеледниковой поверхности водосбора – по (Константинов, 1968), испарения воды с поверхности озера – по формуле ГГИ (Албул, 2012).

В течение расчетного периода для всех высотных интервалов принимались постоянными температура поверхности льда и поверхности снега (0°С), слой осадков, значение альбедо снега (0,40), региональный вертикальный градиент скорости ветра (0,5 м/с на 100 м), локальный (0,53°С/100 м) либо региональный градиенты температуры воздуха 0,58°С/100 м. Значения альбедо поверхности льда рассчитывалось по материалам полевых измерений либо использовалось постоянное значение (0,35). Площадь ледникового льда принималась постоянной для конкретного высотного интервала. Изменение влагозапасов в снеге учитывалось за счет уменьшения площади снега в каждые расчетные сутки до момента полного стаивания либо окончания расчетного периода.

Выполненные расчёты показали, что все рассмотренные комбинации источников данных дают удовлетворительные результаты и для оценочных расчётов суточных уровней перигляциальных озер могут использоваться любые доступные данные. Средние относительные ошибки при всех вариантах расчёта не превышали 3%, максимальная ошибка расчета не превышала по модулю 12 см.

Сравнение результатов расчета при условии различия исходной информации только источником метеоданных (комбинации С-Р-Л, П-Р-Л) показало, что графики расчетных уровней воды практически не отличаются друг от друга (рис.).

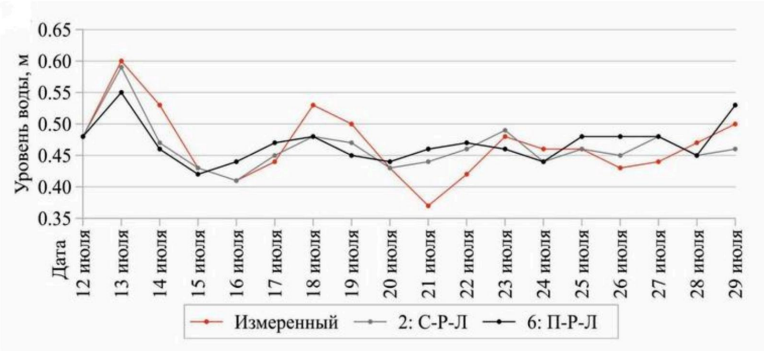


Рис. Измеренные и рассчитанные уровни воды при комбинациях, отличающихся источниками метеоданных (варианты 2022 г.). Пояснения к индексам комбинаций даны в тексте

При комбинациях, различающихся источниками данных по осадкам, форма графиков уровней, рассчитанных с использованием данных реанализа, ближе к наблюдённым. В связи с тем, что модели глобального реанализа погоды подразумевают интерполяцию данных нескольких станций с учетом орографических особенностей территории, осадки, полученные по реанализу, лучше коррелируют с измеренными в полевых условиях, чем с измеренными на сетевой метеостанции.

При использования полевых актинометрических измерений графики смоделированного хода уровня по форме более близки к графикам наблюденного хода. Отсутствие на многих стационарных метеостанциях актинометрических наблюдений, сложности их организации на полевых метеостанциях в высокогорье чаще одного раза в сутки определяют допустимость использования среднемноголетних значений солнечной радиации для данного региона при расчетах уровней воды.

Таким образом, наиболее оптимально динамику хода уровней воды описывает комбинация источников данных, полностью измеренных в поле. Однако получение полного набора исходных данных в полевых условиях часто представляет собой крайне сложную задачу ввиду труднодоступности горных территорий. В случае отсутствия непосредственных наблюдений на водосборе наиболее оптимальной комбинаций является С – Р – Л (метеоданные по сетевой станции, осадки по реанализу, актинометрические характеристики по литературным данным).

Увеличение в последние десятилетия для территории Алтая числа недавно возникших в результате деградации ледников перигляциальных водоёмов, увеличивает потенциальный риск прорыва расположенных ниже озер, находящихся на квазистабильной стадии развития и требует пристального изучения.

Литература

Албул И.П. Применение формулы ГГИ для расчета испарения с водной поверхности при различном составе исходной информации // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2012. №3. С.125-136.

Журавлев, С.А. Моделирование гидрографа стока рек с озерным регулированием: на примере бассейна р. Невы: Дисс. … канд. геогр. наук. СПб, 2011.

Зырянова Д.С., Пряхина Г.В., Распутина В.А., Кузнецова М.Р. Расчет таяния ледника в условиях недостатка данных // Успехи современного естествознания. 2023. №12. С.210-217.

Константинов А.Р. Испарение в природе. Л.: Гидрометеоиздат,1968.

Кузьмин П.П. Процессы таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1961.

Пряхина Г.В., Распутина В.А., Зелепукина Е.С., Банцев Д.В., Крыжановская А.Э. Особенности гидрологического режима приледниковых моренных озёр Алтая // Лёд и снег. 2024. №64 (2). С. 202-212.

Пряхина Г.В., Распутина В.А., Зелепукина Е.С., Зырянова Д.С., Банцев Д.В., Сыромятина М.В. Оценка элементов водного баланса озера нивально-гляциальной зоны Алтая // Криосфера Земли. 2024. Т. XXVIII, №6. С. 20–30.

Резепкин А.А. Тепловые потоки на ледяной и замороженной частях ледника Джанкуат (Приэльбрусье) // Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2023. №5. С. 43-48.

Сивков С.И. Методы расчета характеристик солнечной радиации. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1968.

Терешина М.А., Ерина О.Н., Соколов Д.И. Оценка чувствительности одномерной модели озера к входным данным // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2024. №79 (3). С. 64-77.

CALCULATION OF DAILY WATER LEVELS OF PERIGLACIAL LAKES USING VARIOUS SOURCES OF INPUT INFORMATION

G.V. Pryakhina, E.S. Zelepukina

The paper presents the results of modeling daily water levels of a periglacial lake obtained with different combinations of sources of input information. The network of state meteorological stations, reanalysis, field and published data were used as the main sources of input data. The choice of the modeling object was due to the availability of glaciological, meteorological, actinometric and hydrological data measured directly in the catchment area. Comparison of the calculated and observed water levels showed the possibility of using any sources of information, with the best convergence revealed in calculations based on field data. For unexplored high-mountain basins, the optimal combination of information sources for modeling daily water levels was identified: meteorological data (excluding precipitation) - from the network meteorological station, precipitation - from reanalysis, actinometric characteristics - from literary data.

ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОЗЕР МОСКВЫ И МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

М.А. Терешина, О.Н. Ерина, Д.И. Соколов
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

На основе анализа архивных данных Косинской биологической станции и биологической станции на оз. Глубоком, а также результатов современных натурных наблюдений, показаны темпы современных изменений в термическом режиме естественных малых водоемов Московского региона. Показано, что за последнее столетие максимальная за год средневзвешенная температура воды в озерах увеличилась более, чем на 2 °С. Одни из наиболее существенных изменений происходят в весенний и осенний периоды. По результатам математического моделирования среднегодовая температура поверхности воды за период с 1980-х гг. по настоящее время увеличивается в среднем на 0,22–0,26 °С/10 лет.

Озера и водохранилища являются важнейшими элементами водохозяйственных систем, выполняя функции объектов водоснабжения, добычи биологических ресурсов и рекреации. Кроме того, водоемы являются сложными экосистемами, участвующими в формировании и поддержании биоразнообразия не только водной среды, но и окружающих территорий. Функционирование озерных систем очень тесно связано с состоянием климатической системы. Уже в настоящее время в водоемах суши заметны такие проявления изменений климата, как увеличение температуры воды, снижение продолжительности ледостава, изменение режима перемешивания, ухудшение кислородных условий, увеличение числа биологических инвазий (Woolway et al., 2020). При этом влияние изменений климата на российские озера исследовано достаточно слабо ввиду отсутствия достаточно детальных рядов наблюдений. В то же время исследования изменений в термическом режиме озер и водохранилищ необходимы для принятия эффективных решений в сфере сохранения и использования водных ресурсов.

В данной работе проанализированы данные наблюдений двух биологических станций, на которых в первой половине XX века велись наиболее подробные и систематические исследования режима озер в России: Косинской биологической станции (восточная окраина современной территории г. Москвы) и биологической

станции на оз. Глубоком (Рузский район Московской области). Основные результаты исследований термического режима озера Глубокого за 1910-1945 гг. изложены С.И. Кузнецовым (1934) и Б.Б. Богословским (1951). Данные наблюдений за термическим режимом Косинских озер (оз. Белое, Черное и Святое) за 1923-1929 гг. изложены Л.Л. Россолимо (1930). В настоящее время наблюдения за некоторыми характеристиками термического режима оз. Глубокого продолжаются сотрудниками гидробиологической станции. В последние годы авторы настоящей работы возобновили систематическое наблюдение за термическим режимом этих озер: с 2018 года ежемесячные наблюдения ведутся на оз. Глубоком, с 2021 г. - на Косинских озерах. Ручные наблюдения дополняются также данными логгеров, устанавливаемых на буйковых станциях в точках максимальных глубин каждого из озер в безледный период.

Для восстановления термического режима озер Белого и Святого использовалась одномерная лимнологическая модель GLM (Bruce et al., 2018). Модель была откалибрована и верифицирована по данным наблюдений за 2021–2023 гг. (1526 и 1039 точек наблюдений на оз. Белом и Святом, соответственно), среднеквадратическая ошибка расчета температуры воды для двух озер составила 1,45 и 1,19 °С. В качестве источника метеорологических данных использовался глобальный реанализ погоды ERA5.

Для трех изученных озер по сопоставлению температурных профилей за первую половину XX века и за последние годы отмечается увеличение температуры воды эпилимниона в летний период, более раннее разрушение ледяного покрова и установление прямой температурной стратификации весной, более позднее наступление периода охлаждения и осенней гомотермии (рис.). Так, в оз. Белом в 1923–1929 гг. и в оз. Глубоком в 1948–1949 гг. весенняя циркуляция начиналась во второй половине апреля–начале мая, а в 2018–2023 гг. – в основном еще до середины апреля. Максимальная измеренная температура воды в поверхностном слое оз. Белого в летний период 1923–1929 гг. составляла в различные годы 20,5–23,6 °С, в современный период она достигала 24,6–26,5 °С. Наступление периода осенней гомотермии в оз. Белом в 1923-1929 гг. происходило обычно во второй половине сентября, в 2021–2023 гг. – в октябре. Некоторые из изменений имеют разный характер в исследованных озерах: так, в оз. Белом в современный период отмечается заметно более низкая (примерно на 3–9 °С) температура воды в гиполимнионе летом, чем отмечалось в первой половине XX века, хотя в оз. Глубоком температура воды в гиполимнионе осталась почти неизменной. При этом в оз. Глубоком в современный период увеличилась температура воды в период ледостава: в 1932–1933 гг. она в большей части водной толщи составляла всего 1–2,5 °С, в 2018–2023 гг. – обычно 3–4 °С.

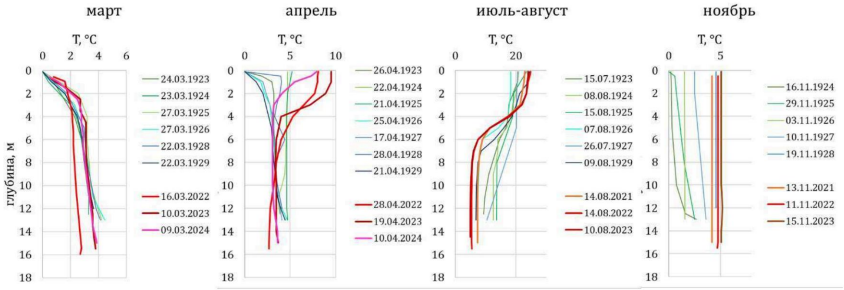


Рис. Сравнение температурного распределения в оз. Белом в марте, апреле, июле–августе и ноябре 1923–1929 (Россолимо, 1930) и 2021–2024 гг.

По сопоставлению с данными за середину XX в., в оз. Глубоком заметно увеличение устойчивости водной толщи: в 1946 г. ее максимальное значение за летний период составило 520 Дж/м², а в 2018–2023 гг. – 572–740 Дж/м². Максимальный теплозапас озера также увеличился: в 1910–1946 гг. его значения составляли 260–325 ТДж, а за шесть лет непрерывной работы буйковой станции в летний период они изменялись в пределах 308–365 ТДж. Это соответствует увеличению максимальной средневзвешенной температуры воды в озере от 11,5–14,3 °С до 13,6–16,1 °С.

Согласно результатам моделирования, продолжительность летней стратификации в димиктическом оз. Белом в 1983–2023 гг. изменялась в пределах 143–198 суток. В полимиктическом оз. Святом максимальная продолжительность непрерывных периодов стратификации (периодов, когда разница между температурой поверхностного и придонного слоя воды превышала 1 °С) составляла от 16 до 132 суток, а суммарная продолжительность таких периодов в течение года составляла 66–143 суток. При этом изменения в продолжительности периодов летней стратификации за многолетний период статистически незначимы (на уровне $p<0,05$). Максимальная температура воды оз. Белого составляла 22,8–31,9 °С, оз. Святого – 24,3–33,6 °С. Средняя температура поверхности воды за период летней стратификации составляла 15,6–19,9 °С и 18,0–26,1 °С, соответственно. Для среднегодовой температуры поверхности воды обоих озер отмечается значимый положительный многолетний тренд: для оз. Белого он составляет 0,26 °С/10 лет, для оз. Святого – 0,22 °С/10 лет. Для оз. Святого отмечается также значимое увеличение средней за летний период температуры придонного слоя воды – в среднем на 0,65 °С/10 лет. Также для обоих озер отмечается сокращение периода ледостава в среднем на 4,4–5,0 суток/10 лет.

Показано, что современные изменения климата в Московском регионе отражаются в значимых изменениях ледового, температурного режима и режима перемешивания озер. К конкретным проявлениям этих изменений, отмечаемым по натурным данным, относятся сдвиг дат наступления гомотермии и стратификации, увеличение максимальной температуры воды и устойчивости водной толщи в летний период. В отличие от натурных данных, результаты математического моделирования позволяют получить количественные оценки трендов в наиболее значимых характеристиках термического режима – средней температуры поверхностного и придонного слоя воды, продолжительности стратификации и ледостава.

Литература

Богословский Б.Б. О термическом режиме озера Глубокого в безледный период // Вопросы географии. 1951. С. 96–117.

Кузнецов С.И. Сравнительное изучение азотного, фосфорного и кислородного режима Глубокого и Белого озера // Труды лимнологической станции в Косине. 1934. Т. 17. С. 49–67.

Россолимо Л.Л. Термика Косинских озер // Труды Косинской биологической станции. 1930. №10. С. 3–42.

Woolway R.I., Kraemer B.M., Lenters J.D., Merchant C.J., O'Reilly C.M., Sharma S. Global lake responses to climate change // Nature Reviews Earth & Environment. 2020. ol. 1(8). P. 388-473.

THERMAL REGIME OF SMALL LAKES IN MOSCOW REGION UNDER MODERN CLIMATE CHANGE

M.A. Tereshina, O.N. Erina, D.I. Sokolov

Based on the analysis of archive data from the biological stations on Kosino and Glubokoe lakes, as well as the results of modern field observations, the rates of modern changes in the thermal regime of natural small lakes of the Moscow region are shown. It is shown that for the last century the maximum annual volumetrically weighted average temperature of water in lakes has increased by more than 2 °C. Some of the most significant changes occur in spring and fall periods. According to the results of mathematical modeling, the average annual water surface temperature for the period from the 1980s to the present increases on average by 0,22-0,26 °C/10 years.

ИЗМЕНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ НА ВОДОСБОРЕ БЕЛОГО МОРЯ: РАСЧЕТ ПО МОДЕЛЯМ CMIP6

А.В. Толстиков[1], И.В. Серых[2]
[1]Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
[2]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Для анализа изменений количества осадков в регионе западной части российской Арктики (55°—70° с. ш. и 25°—65° в. д.) произошедших за период инструментальных наблюдений использованы данные метеостанций и результаты реанализов ERA5, PREC и MERRA-2. Будущие изменения количества осадков до конца XXI века рассмотрены по результатам экспериментов SSP ансамбля из 32 моделей CMIP6, который показывает дальнейшее увеличение количества осадков в регионе Белого моря. К концу XXI века на севере исследуемого региона ожидается более существенное увеличение количества осадков, чем на его юге. В ближайшие 30 лет по данным ансамбля моделей CMIP6 среднесуточное количество осадков в регионе Белого моря увеличится на +0,07±0,05 мм/сутки в малой зависимости от сценария SSP.

Внутригодовое распределение количества осадков на водосборе Белого моря распределено неравномерно. Больше всего осадков выпадает в теплый период года, минимальное количество наблюдается в конце зимы – весной. Число дней с осадками в среднем составляет 190–210 дней, в некоторых районах это значение достигает 220 дней (Назарова, 2017). Несмотря на то, что по объему осадков зимой выпадает относительно мало, именно в холодный период года – с октября по февраль – отмечается наибольшее число дней с осадками (до 20–25 дней за месяц). За последнее десятилетие XX в. и начало XXI в. годовое число дней с осадками было либо в пределах, либо немного ниже климатической нормы (Назарова, 2017).

В последние годы по данным метеостанций водобора Белого моря количество твердых осадков за год значительно сократилось. Также отмечается рост доли смешанных осадков, что согласуется с увеличением повторяемости оттепелей в течение зимы. Выпадение твердых осадков регулируется переходом температуры через 0°C, поэтому даже небольшое повышение средней годовой температуры приводит к существенному уменьшению доли твердых осадков в общей массе.

В данной работе в качестве объекта исследования рассматривается регион Белого моря. Ранее нами уже исследовался этот регион за 1980–2021 гг. (Серых, Толстиков, 2022). Целью этой работы является анализ хода осадков на водосборе Белого моря за более продолжительный период и оценка их изменений, которые могут произойти до конца XXI века.

В работе использовались данные по среднемесячному количеству осадков за период 1961–2020 гг. с метеостанций, находящихся на водосборе Белого моря: Кемь-

порт, Онега, Кандалакша, Гридино, Архангельск, Каневка, Мезень, Канин Нос, Краснощелье, Святой Нос. Из всего массива данных по каждой станции сравнивались два 30-летних периода 1961–1990 и 1991–2020 гг. Далее анализировались среднемесячные данные общего количества осадков региона Белого моря (55°—70° с.ш. и 25°—65° в.д.).

Интересно, как проявляются долгопериодные (междесятилетние) изменения, поэтому анализировалось общее количество осадков за сутки осредненное за месяц. Для построения прогнозов использовались данные реанализа ECMWF ERA5 с пространственным разрешением 0,25° за 1940–2023 гг. (Hersbach H. et al, 2020), реанализа спутниковых измерений NASA MERRA-2 на сетке 0,5° ш.×0,625° д. за 1980–2023 гг. (Gelaro R. et al, 17), и реанализа NOAA's PRECipitation REConstruction (PREC) на сетке 2,5° за период 1948–2023 гг. (Chen, M. et al, 2002).

Для оценки изменений количества осадков в будущем и до конца XXI века использованы результаты модельных экспериментов SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 (Shared Socio-economic Pathways — SSPs) (O'Neill B.C. et al, 2016; Riahi K. et al, 2017) шестого этапа Проекта сравнения совместных климатических моделей (Coupled Model Intercomparison Project — CMIP6) (Eyring V. et al, 2016). Чтобы проверить насколько адекватно модели CMIP6 воспроизводят произошедшие изменения количества осадков исследуемого региона, применялись результаты эксперимента Historical, которые затем сравнивались с результатами, полученными по метеостанциям и реанализам.

Использовался ансамблевый подход (IPCC, 2023), заключающийся в осреднении результатов 32 моделей CMIP6 и оценке межмодельного разброса (стандартного отклонения). Каждая из моделей CMIP6 содержит ошибки из-за своей сложности, но эти ошибки не коррелированы с ошибками других моделей. Для того чтобы вклад моделей CMIP6 в ансамбль был одинаков, от каждой из 32 моделей взят только один ее расчет. Для получения средних полей количества осадков по 32 моделям CMIP6 результаты каждой модели предварительно линейно интерполировались на единую сетку 1×1°. В качестве нормы, относительно которой вычислялись средний сезонный ход и аномалии осадков, выбрано среднее за 30-летний период 1981–2010 годы. Произошедшие и будущие изменения осадков оценивались на основе разности между 30-летними периодами. Изменения также оценивались с помощью линейных трендов методом наименьших квадратов, но этот метод показал неустойчивость из-за чувствительности к краевым значениям, на которые большое влияние оказывает высокая короткопериодная (межгодовая) изменчивость данных осадков.

Результаты эксперимента Historical завершаются в 2014 году, а экспериментов SSP начинаются в 2015 году. Если период осреднения захватывал этот переход, то в итоговое среднее значение входили результаты эксперимента Historical по 2014 г., а начиная с 2015 г. — результаты экспериментов SSP. Ранее мы уже применяли эту методику для анализа изменений температуры обширного региона западной части Российской Арктики, она более подробно описана в (Серых, Толстиков, 2024).

Анализ данных метеостанций показал, что за период 1991–2020 гг. количество осадков, выпавших в районе побережья Белого моря, было больше, чем в предшествующий период 1961–1990 гг. Климатические нормы годовых сумм осадков увеличились в среднем на 40–90 мм.

Внутри года максимум в количестве осадков приходится на июль–август. Для станции Канин Нос и Святой Нос также выражен пик в августе, но максимальное количество осадков здесь приходится на октябрь. Минимум на всех станциях растянут на несколько месяцев и отмечается в конце зимы – начале весны, для станции Канин Нос – это конец весны. При сравнении двух периодов (1961–1990 и 1991–2020 гг.) хорошо

заметно, что наибольший рост количества осадков в последние годы выражен весной – начале лета и также отчетливо проявляется зимой для всех станций исследуемого региона, за исключением станций Канин Нос и Святой Нос. Наибольшие изменения в количестве осадков произошли в пунктах Мезень, Архангельск и Святой Нос.

Полученные результаты свидетельствуют, что ансамбль 32 моделей CMIP6 в целом отражает произошедшее увеличение осадков в регионе Белого моря, и его можно использовать для проекции изменений осадков в будущем.

Важно, что проекции климата отличаются от прогнозов погоды тем, что для прогноза большое значение имеют начальные условия, а в климатических проекциях важны внешние воздействия, заложенные в модельном эксперименте. Такими внешними воздействиями для экспериментов SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 являются изменения значений радиационного воздействия от концентрации парниковых газов в атмосфере, которые к концу XXI века составят, соответственно, 2,6, 4,5, 7,0 и 8,5 Вт/м^2, что указанно в их названиях.

Ансамбль 32 моделей CMIP6 демонстрирует неоднородное по пространству увеличение количества осадков в регионе Белого моря к концу XXI века – с более высокими значениями повышения на севере, чем на юге (рис. 1). Причем наибольшее увеличение количества осадков будет происходить на северо-западе и северо-востоке исследуемого региона. Так, по сценарию SSP5-8.5 увеличение среднего количества осадков за сутки между 1994–2023 и 2070–2099 гг. на северо-западе и северо-востоке исследуемого региона составит приблизительно +0,3 мм/сутки, и +0,2 мм/сутки – на юге (рис. 1d). Для сценария SSP1-2.6 этот контраст между севером и югом существенно меньше (рис. 1a).

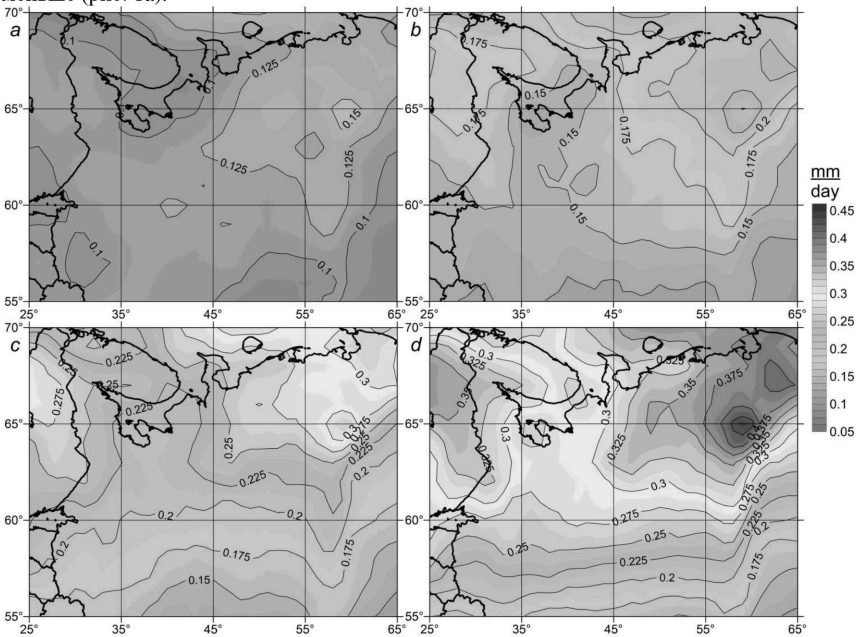


Рис. 1. Поля изменений среднего количества осадков за сутки по 32 моделям CMIP6 между 1994–2023 и 2070–2099 гг. по результатам сценариев Historical и SSP1-2.6 (a), SSP2-4.5 (b), SSP3-7.0 (c), SSP5-8.5 (d)

В ближайшие 30 лет среднесуточное количество осадков в регионе Белого моря увеличится на +0,07±0,05 мм/сутки в малой зависимости от эксперимента SSP. Так, повышение среднесуточного количества осадков между 1994–2023 и 2024–2053 гг. составит +0,08±0,06, +0,07±0,04, +0,07±0,05, +0,08±0,05 мм/сутки по результатам экспериментов SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5, соответственно. Это связано с тем, что в первые десятилетия концентрация парниковых газов в атмосфере имеет малые различия между экспериментами SSP. Но к концу XXI века эти различия становятся существенными. Следует отметить, что согласно сценарию SSP5-8.5 все рассмотренные модели CMIP6 показывают увеличение среднего количества осадков региона Белого моря с минимальным значением +0,09 мм/сутки для модели NorESM2-MM до максимального значения +0,62 мм/сутки для модели CanESM5.

Результаты реанализов ECMWF ERA5, NOAA PREC и NASA MERRA-2 показали хорошую согласованность друг с другом в изменениях общего количества осадков региона Белого моря (55°–70° с.ш. и 25°–65° в.д.). Везде проявляется повышение количества осадков, начиная приблизительно с 1980-х, при высокой межгодовой изменчивости, мешающей сделать точную оценку этого междесятилетнего увеличения.

Результаты эксперимента Historical ансамбля 32 моделей CMIP6 подтверждают начавшееся в середине 1980-х увеличение общего количества осадков исследуемого региона. По данным моделей CMIP6 в ближайшие 30 лет среднесуточное количество осадков в регионе Белого моря увеличится на +0,07±0,05 мм/сутки в малой зависимости от эксперимента SSP.

Ансамбль 32 моделей CMIP6 демонстрирует неоднородное по пространству увеличение количества осадков в регионе Белого моря к концу XXI века – с более высокими значениями роста на севере, чем на юге. Наибольшее увеличение количества осадков будет происходить на северо-западе и северо-востоке исследуемого региона.

По сценарию SSP5-8.5 увеличение среднего количества осадков за сутки между 1994–2023 гг. и 2070–2099 гг. на северо-западе и северо-востоке исследуемого региона составит приблизительно +0,3 мм/сутки, и +0,2 мм/сутки – на юге. Для сценария SSP1-2.6 этот контраст между севером и югом существенно меньше.

Литература

Назарова Л.Е. Современные климатические условия водосбора Белого моря // Известия РГО. 2017. Т. 149. Вып. 5. С. 16-24.

Серых И.В., Толстиков А.В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980-2021 гг. Ч. 1: Температура воздуха, осадки, ветер // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. №3. С. 258-277.

Серых И.В., Толстиков А.В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980-2021 гг. Ч. 2: Температура почвы, снег, влажность // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. №4. С. 352-369.

Серых И.В., Толстиков А.В. Климатические изменения температуры воздуха западной части российской Арктики в 1940-2099 гг. по данным ERA5 и моделям CMIP6 // Арктика: экология и экономика. 2024. Т. 14. №3. С. 334–349.

Chen M., Xie P., Janowiak J. E., Arkin P.A. Global Land Precipitation: A 50-yr Monthly Analysis Based on Gauge Observations // J. of Hydrometeorology. 2002. 3. P. 249–266.

IPCC, 2023: Sections // Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland. P. 35-115.

CHANGES IN THE AMOUNT OF PRECIPITATION IN THE WHITE SEA WATERSHED: CALCULATION USING CMIP6 MODELS

A.V. Tolstikov, I. V.Serykh

To analyze changes in the amount of precipitation in the region of the western part of the Russian Arctic (55°–70° N and 25°–65° E) that occurred during the period of instrumental observations, data from weather stations and the results of reanalyses ERA5, PREC and MERRA-2 were used. Future changes in precipitation until the end of the 21st century are considered based on the results of the SSP ensemble of 32 CMIP6 models, which shows a further increase in precipitation in the White Sea region. By the end of the 21st century, a more significant increase in precipitation is expected in the north of the study region than in its south. In the next 30 years, according to the ensemble of CMIP6 models, the average daily precipitation in the White Sea region will increase by +0.07±0.05 mm/day, with little dependence on the SSP scenario.

ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЯ ВОДНОЙ ТОЛЩИ В ПРИСКЛОНОВОЙ ОБЛАСТИ ЮЖНОГО БАЙКАЛА В 2000-2024 ГОДЫ

Е.С. Троицкая[1], Н.М. Буднев[2], М.Н. Шимараев[1]
[1]Лимнологический институт Сибирского отделения РАН
[2]Иркутский государственный университет

В работе рассмотрено изменение теплосодержания водной толщи в присклоновой области Южного Байкала под влиянием климата в последние 25 лет. Уточнена сезонная изменчивость теплосодержания в разных слоях воды. Выявлено, что в слое 45-100 м величина теплосодержания не имеет значимых трендов в отдельные месяцы, за исключением мая (+7,2 (МДж/м^2)/год) и июля (–2,0 (МДж/м^2)/год). Глубже 100 м отмечены значимые тренды величин теплозапаса в слое 100-300 м на –3,4-5,5 (МДж/м^2)/год в июле-сентябре и ноябре, 300-1100 м на –7,8-11,6 (МДж/м^2)/год во все месяцы и –1,4-2,3 (МДж/м^2)/год во все месяцы, кроме января, в придонной области.

В последние годы все больше внимания уделяют влиянию изменений климата не только на температуру поверхности водоемов, но и их водной толщи, в т.ч. теплосодержания в озерах (Weinberg, Vetter, 2014; Vanderkelen et al., 2020; Filatov et al., 2019). В XX веке изучению теплосодержания и теплооборота в водной толще Байкала посвящен ряд работ (например, Шостакович, 1917; Шимараев, 1990), в которых были показаны временная и пространственная изменчивость этих параметров. Выявлено (Шимараев, 1990), что рост величин минимального теплозапаса в верхнем 300-метровом слое воды в Южном Байкале связан со смягчением погодных условий в осенне-зимний период и сдвигом срока начала ледостава на более поздние даты.

Целью нашей работы является изучение внутри- и межгодовых изменений теплозапаса водной толщи в присклоновой области Южного Байкала под влиянием климата в первой четверти XXI века.

Для расчета теплосодержания Q использованы данные о температуре воды 2000-2024 гг. с буйковой станции Ледовый лагерь (БС ЛЛ), расположенной в районе постановки глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD (м. Ивановский, Южный Байкал, рис. 1).

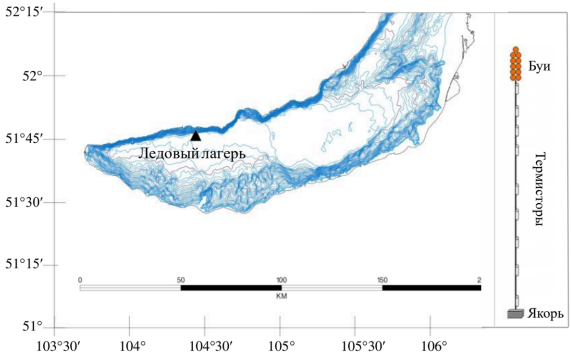


Рис 1. Карта изобат в южной котловине Байкала (Батиметрическая…), расположение буйковой станции Ледовый лагерь (черный треугольник) у м. Ивановский (слева) и схема буйковой станции (справа)

БС ЛЛ установлена в 1999 г. в 3,5 км от берега у подножия подводного склона (глубина 1367 м). Для регистрации в разные годы использовались от 5 до 19 термисторов серии TR (RBR-Company, Canada; точность ±0,002°C) и VEMCO (точность ±0,05ºC), размещенных на глубинах от 11-43 м до дна. Дискретность измерений в отдельные годы и на разных горизонтах варьировала от 15 с до 15 мин.

Величины Q рассчитывались с учетом особенностей температурного режима и динамических процессов для слоев 45-100, 100-300, 300-1100 м, 1100 м – дно, 45 м – дно. Сначала вычислялись среднесуточные температуры, затем средневзвешенные температуры слоя. После этого определялись величины Q каждого слоя для отдельных месяцев, оценивались тренды, коэффициенты корреляции r и их достоверность p.

Наиболее выраженным внутригодовым ходом Q характеризуется верхний слой 45-100 м (рис. 2а). Максимум $Q_{45\text{-}100}$ приходится на октябрь, минимум – в феврале. Наибольшие различия между максимальными и минимальными значениями $Q_{45\text{-}100}$ наблюдаются в сентябре-октябре (982,5 и 949,7 МДж/м^2, соответственно).

В нижней части деятельного слоя максимум $Q_{100\text{-}300}$ (рис. 2б) сдвигается на ноябрь, а минимум – на январь. Наибольшие вариации величин $Q_{100\text{-}300}$ наблюдаются в октябре-ноябре (506,0 и 417,1 МДж/м^2, соответственно) и январе (421,2 МДж/м^2).

В глубинной части внутригодовое изменение средней величины $Q_{300\text{-}1100}$ незначительно (рис. 2в). Тем не менее, выделяются небольшой максимум в зимние месяцы (декабрь-январь) и минимум в середине лета (июль). Наибольшая изменчивость величин $Q_{300\text{-}1100}$, как и для слоя 100-300 м, характерна для октября-ноября (485,0 и 528.4 МДж/м^2, соответственно).

В придонном слое средняя величина $Q_{1100\text{ м - дно}}$ слабо повышается в течение года (рис. 2г). Небольшое уменьшение можно отметить в декабре-январе. Наибольшие вариации величин $Q_{300\text{-}1100\text{ м}}$ характерны для января (139,1 МДж/м^2), что объясняется интрузиями холодных поверхностных вод (Weiss et al., 1991; Шимараев, Гранин, 1991; Tsimitri et al., 2015), и зависит от сроков начала ледостава.

Внутригодовое распределение $Q_{45\text{ м - дно}}$ (Рис. 2д) согласуется с таковым для слоя 45-100 м. Максимальные вариации величин $Q_{45\text{ м – дно}}$ отмечаются в сентябре-октябре (1132,0 и 1297,8 МДж/м^2, соответственно).

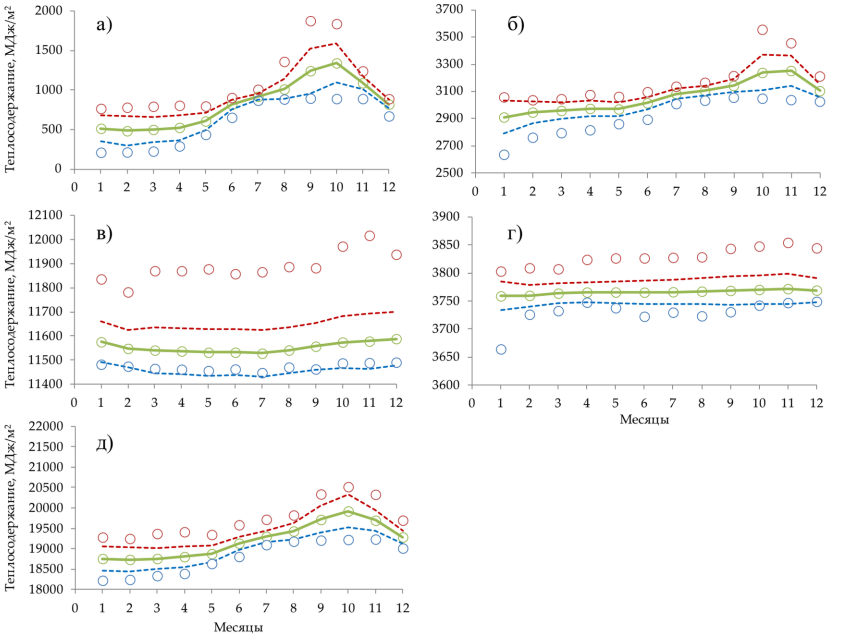


Рис. 2. Внутригодовое изменение рассчитанных за 2000-2024 гг. средних (зеленая кривая с кружками), максимальных (красные кружки) и минимальных (синие кружки) величин теплосодержания в слое 45-100 м (а), 100-300 м (б), 300-1100 м (в), 1100 м – дно (г) и 45 м – дно (д). Красная и синяя кривые – пределы СКО

Наибольшей межгодовой изменчивостью теплосодержания (Рис. 2) отличается самый верхний слой (45-100 м). СКО для всех месяцев варьирует в пределах 4÷38% от средней за 2000-2024 гг. величины $Q_{мес}$. Наибольшие изменения теплосодержания (СКО 30-38%) отмечаются в январе-апреле. Глубже, многолетние изменения величины теплосодержания на порядок меньше. В слое 100-300 м величина СКО колеблется от 1 до 4%, с наибольшими величинами (3-4%) вариаций в октябре-ноябре и январе-феврале. В более глубоких слоях СКО не превышает 1%, для всей водной толщи – 2%. Межгодовая изменчивость всей водной толщи в разные месяцы мала (СКО ≤ 2%).

В исследуемый период в верхнем слое (45-100 м) выявлены значимые разнонаправленные тренды величины Q в мае (+7,2 (МДж/м^2)/год, r = 0,46, p = 0,02) и июле (–2,0 (МДж/м^2)/год, r = 0,35, p = 0,09). В нижней части деятельного слоя водной толщи Байкала (100-300 м) значимые отрицательные тренды Q выявлены для июля-сентября и ноября (–3,4-5,5 (МДж/м^2)/год, r = 0,34-0,72, p = 0,09-0,001). Для глубинной зоны во все месяцы отмечаются значимые отрицательные тренды $Q_{мес}$ (–7,8-11,6 (МДж/м^2)/год, r = 0,59-0,71, p = 0,003-0,001). В придонном слое (1100 м – дно) значимые отрицательные тренды $Q_{мес}$ (–1,4-2,3 (МДж/м^2)/год, r = 0,51-0,63, p = 0,01-0,001) выявлены для всех месяцев, кроме января. Для всей водной толщи значимые отрицательные тренды наблюдаются для $Q_{мес}$ в июле-декабре (–12,1-27,6 (МДж/м^2)/год, r = 0,48-0,78, p = 0,02-0,001).

Таким образом, выявленные тренды теплосодержания свидетельствуют о перераспределении тепла в водной толще. В слое 45-100 м, в последние 25 лет в присклоновой области Южного Байкала значимые тренды выявлены только для двух месяцев (май, июль). Известно (Шимараев и др., 2009), что положительные тренды средневзвешенной температуры воды (0,36-0,31°С/10 лет) в слое 0-100 м наблюдались в июне-июле в Южном Байкале в 1972-1992 гг. Позже (Шимараев и др., 2019) было показано, что в 1994-2016 гг. многолетние изменения температуры поверхности воды в мае-октябре у западного берега Южного Байкала не имели никаких значимых трендов. Как следствие, это должно было привести и к снижению трендов верхнего 100-метрового слоя воды. Определенную роль в снижении трендов температур поверхности воды и верхнего 100-метрового слоя могли оказать пожары, которые происходят на территории Восточной Сибири и непосредственно на водосборе Байкала. Их дым препятствует поступлению солнечного тепла в воду Байкала. Сильные лесные пожары на территории Восточной Сибири отмечались в 2015-2016, 2018-2020 гг. (Маринайте и др., 2016; Маринайте и др., 2018; Маринайте и др., 2019; Khodzher et al., 2020; Golobokova et al., 2020; Popovicheva et al., 2021).

Значимые отрицательные тренды теплосодержания глубже 100 м связаны, с одной стороны, с тем, что в период прогрева происходит усиление стратификации в верхней части водной толщи, повышаются вертикальные градиенты температуры и плотности, которые препятствует поступлению тепла в более глубокие слои. Это может происходить так же за счет снижения ветровой активности, которая наблюдалась в последние годы в мае-октябре (Potemkina et al., 2018). Нельзя исключать и адвективный перенос тепла в водной толще из одного района в другой.

Кроме того, значимые отрицательные тренды теплосодержания глубже 300 м поздней осенью и зимой могут быть связаны со сдвигом сроков начала ледостава в Южном Байкале на более поздние даты. Рост температуры воздуха и поверхности воды, а также сезонное повышение скоростей ветра в ноябре-январе способствуют увеличению потерь тепла за счет испарения с поверхности воды. Это приводит к большим теплопотерям из деятельного слоя (0-300 м) и формированию дефицита тепла глубже 300 м, который сохраняется до июля, когда наблюдается минимум теплосодержания в слое 300-1100 м.

Интрузии холодных поверхностных вод в придонную область могли бы оказывать влияние на теплосодержание слоя 1100 м – дно, однако это подтверждено только для 2007 года, когда наблюдались одни из самых мощных интрузий в исследуемом районе(Tsimitri et al., 2015). Скорее всего, глубинные интрузии оказывают влияние на теплосодержание меньшего по мощности слоя воды.

Авторы благодарят за совместные экспедиционные работы и сбор материалов наблюдений коллег из EAWAG (Швейцария), за техническую поддержку членов коллаборации «Байкал», а также полезные замечания и обсуждение результатов работы коллег из лаборатории гидрологии и гидрофизики ЛИН СО РАН.

Исследование выполнено в рамках гос. темы ЛИН СО РАН 0345-2019-0008.

Литература

Батиметрическая контурная карта озера Байкал. Доступ онлайн: http://www.lin.irk.ru/intas/maps.htm (дата обращения: 29 января 2025).

Шимараев М.Н. Тепловой режим глубоких озер (на примере оз. Байкал). Труды V Всесоюзного Гидрологического съезда. Т. 8. Озера и водохранилища. Л., 1990. С. 294–307.

Шимараев М.Н., Гранин Н.Г. К вопросу о стратификации и механизме конвекции в Байкале // Доклады Академии наук. 1991. Т. 321. №2. С. 381–385.

Шимараев М.Н., Троицкая Е.С., Гнатовский Р.Ю. Современные изменения климата и температура глубинных вод озера Байкал // Доклады Академии наук. 2009. Т. 420. №5. С. 685–689.

Шимараев М.Н., Сизова Л.Н., Троицкая Е.С., Куимова Л.Н., Якимова Н.И. Ледово-термический режим озера Байкал в условиях современного потепления (1950—2017 гг.) // Метеорология и гидрология. 2019. №10. С. 67–76.

Шостакович В.Б. Озеро Байкал // Природа. 1917. №7–8. С. 803–832.

Filatov N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., Palshin N. Climate change impacts on the watersheds of Lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data // Inland Waters. 2019. V. 9. №2. P. 130–141.

Golobokova L.P., Khodzher T.V., Khuriganova O.I., Marinayte I.I., Onishchuk N.A., Rusanova P., Potemkin V.L. Variability of Chemical Properties of the Atmospheric Aerosol above Lake Baikal during Large Wildfires in Siberia // Atmosphere. 2020. V. 11. №11. 1230.

Khodzher T.V., Golobokova L.P., Obolkin V.A. Chemical composition of aerosol and gas impurities in the Baikal region during wildfires in the summer of 2018-2019 // Proc. SPIE / 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. Moscow, 2020. 11560.

Marinaite I.I., Molozhnikova E.V., Khodzher T.V. PAHs transfer and intake to the water area of Lake Baikal during the summer forest fires in 2016 // Proc. SPIE / 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Tomsk, 2018. 10833.

Marinaite I.I., Potyomkin V.L., Khodzher T.V. Distribution characteristics of PAHs and solid particles over the water area of lake Baikal during wildfires in summer 2018 // Proc. SPIE / 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Novosibirsk, 2019. 11208.

Marinaite I.I., Potyomkin V.L., Khodzher T.V. Evaluation of atmospheric pollution with PAHS and PM10 above the water area of Lake Baikal during wildfires in Summer 2019 // Proc. SPIE 11560 / 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. Moscow, 2020. 11560.

Popovicheva O., Molozhnikova E., Nasonov S., Potemkin V., Penner I., Klemasheva M., Marinaite I., Golobokova L., Vratolis S., Eleftheriadis K., Khodzher T. Industrial and wildfire aerosol pollution over world heritage Lake Baikal // Journal of Environmental Sciences. 2021. V. 1. P. 49–64.

Potemkina T.G., Potemkin V.L., Kotsar O.V., Fedotov A.P. Climate factors as a possible trigger of modern ecological changes in shallow zone of Lake Baikal (Russia) // International Journal of Environmental Studies. 2018. V. 75. №1. P. 86–98.

Tsimitri C., Rockel B., Wüest A., Budnev N.M., Sturm M., Schmid M. Drivers of deep-water renewal events observed over 13 years in the South Basin of Lake Baikal // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2015. V. 120. P. 1508–1526.

Vanderkelen I., van Lipzig N.P.M., Lawrence D.M., Droppers B., Golub M., Gosling S.N., Janssen A.B.G., Marcé R., Müller Schmied H., Perroud M., Pierson D., Pokhrel Y., Satoh Y., Schewe J., Seneviratne S. I., Stepanenko V.M., Tan Z., Woolway R.I., Thiery W. Global heat uptake by inland waters // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47. e2020GL087867.

Weinberg S., Vetter M. Lake heat content and stability variation due to climate change: coupled regional climate model (REMO)-lake model (DYRESM) analysis // Journal of Limnology. 2014. V. 73. №1. P. 93–105.

Weiss R.F., Carmack E.C., Koropalov V.M. Deep-water renewal and biological production in Lake Baikal // Nature. 1991. №349. P. 665–669.

CHANGES IN THE HEAT CONTENT OF THE WATER COLUMN IN THE SLOPE AREA OF SOUTHERN BAIKAL IN 2000-2024

E.S. Troitskaya, N.M. Budnev, M.N. Shimaraev

The heat content changes of the water column in the slope area of Southern Baikal under the influence of climate in the last 25 years are considered. It is clarified seasonal variability of heat content in different water layers. It was revealed that in the upper layer (45-100 m) the heat content value has no significant trends in separate months, except May (+7.2 (MJ/m^2)/year) and July (–2.0 (MJ/m^2)/year). Significant trends in the heat content values in the layer were noted deeper than 100 m: 100-300 m by –3.4-5.5 (MJ/m^2)/year in July-September and November, 300-1100 m by –7.8-11.6 (MJ/m^2)/year in all months and –1.4-2.3 (MJ/m^2)/year in all months, except January in the bottom area.

PHYSICAL CONDITIONS AFFECTING UNDER-ICE CHLOROPHYLL-A VARIATIONS IN A SHALLOW ARID-REGION LAKE

Wenfeng Huang [1,2,3], Zhijun Li [4], Wen Zhao [1,2,3]

[1]School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an, China

[2]Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of the Ministry of Education, Chang'an University, China

[3]Key Laboratory of Eco-hydrology and Water Security in Arid and Semi-arid Regions of Ministry of Water Resources, Chang'an University, China

[4] State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China

Full understanding of the impacts of lake ice processes and physics on lake habitats and ecosystems is crucial to assess the responses of lake ecosystems to retreating lake ice cover with climate warming. To this end, snow and ice conditions, local meteorology, sunlight transfer, and under-ice water temperature, dissolved oxygen (DO) and chlorophyll-a (chl-a) content were monitored in a shallow temperate arid-region lake during two winters. A random forest model was set up to delineate key physical variables that affect the under-ice chl-a dynamics. Occurences of snow cover and ice thickness remarkably modify the under-ice solar radiation, water temperature, occurences of vetical mixing, and DO. For the bulk under-ice chl-a dynamics, random forest results indicated that six physical varibles (i.e., ice thickness, snow thickness, water temperature, DO, penetrated radiation and bouyancy-frequency) contribute almost equivalently to the chl-a variation, but the dorminant contributors varied at different depths. Snow covers can alter the relative contributions of six variables through complicated cascade regimes.

Lake ice retreat, such as shortening ice duration and thinning ice cover, has been reported widely in the Northern Hemisphere (Sharma et al., 2019) and is believed to lead to changes in habitats and ecosystems in northern lakes (Griffiths et al. 2017; Hampton et al., 2024). Recent research indicated that lake ice composition or quality changes due to climate warming, namely the white ice shows an increasing trend in boreal lakes (Culpepper et al., 2024; Vikström et al., 2025). Therefore, it is urgent to assess the impacts of changes in lake ice on lake environment and ecosystems. This needs full understanding on how the processes and natures of lake ice covers alter or change the under-ice physical, chemical and biological conditions and processes.

Phytoplankton communities that contain chlorophylls are primary producers for lake food webs and ecosystems. The amount of chlorophyll-a (chl-a) largely determines primary productions and dissolved oxygen (DO) level, which is crucial for under-ice water quality and biochemical processes. Here, in a shallow lake of temperate and arid region, snow and ice conditions, light, water and sediment temperature, salinity, DO, and chlorophyl-a profiles were observed in two winters. The influencing factors of chl-a regime were analyzed and discussed.

Lake Ulansuhai (40°36'−40°03'N, 108°41'−108°57' E) is situated in Urad Qianqi, Inner Mongolia, China (Fig. 1a), the south border of the Mongolian Plateau, with a surface area of 300 km^2 and an average water depth of 1.5 m. The annual air temperature ranges from 5.6 to 7.4 ℃, with precipitation of 150−400 mm and an insolation duration of 3,000 to 3,200 hours. The lake is annually ice-covered for 5 months, from November to March of the following year, with a maximum ice thickness of 40−60 cm, which occurs in early March. Winter precipitation is very small with occasional snowfalls, which lead to only short-term thin patchy snow covers (1-5 cm thick).

In winters of 2017-2019, high-frequency sensors were deployed for 1-2 months when the ice cover is safe for man working. Fig. 1 shows the field instrumental setup (Huang et al., 2021), where ultrosonic sonars were employed to measure the evolution of ice thickness with a precision of 2 mm. The photosynthesis active radiation (PAR) was measured using TriOS spectral radiometers, with a precision of 0.04–0.06 mW m^{-2} nm^{-1}. The incident and reflected radiometers were positioned 0.5-1 m above the ice surface, while under-ice penetrated radiometers was distributed at depths of 65 cm, 90 cm, and 120 cm below the ice surface in winter 2018 and at depths of 80 cm and 120 cm in winter 2019. A thermistor chain with a space intercal of 5–10 cm and an accuracy of 0.05°C recorded the "air-ice-water-sediment" temperature. MiniDOT sensors were used to observe the DO concentrations at depths of 50 cm, 70 cm, 90 cm, 110 cm, and 130 cm in 2018 and 70 cm, 80 cm, 90 cm, 100 cm, 110 cm, 120 cm and 130 cm in 2019. Chlorophyll-a (Chl.a) sensors (DCH500-S, HGsensor, China) aligned with DO sensor depths in 2018, and were set at 65 cm, 75 cm, 85 cm, 95 cm, and 105 cm depths with the accuracy of 1 ppb. Snow thickness is measured manually daily.

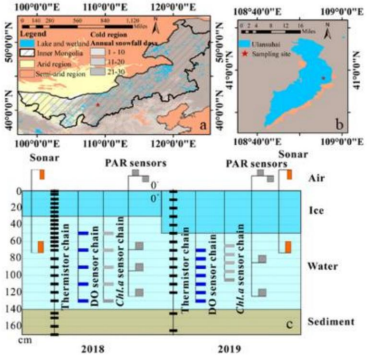


Fig. 1. (a) Location of Lake Ulansuhai; (b) Observation site; (c) Layout of the observational apparatus

In order to discriminate the key physical variables that affect under-ice chl-a content, a random forest model was set up. The R package randomForest was used to analyze the contributions (%IncMSE) of the six features “penetrated_radiation” “ice_thickness”, “snow_thickness”, “water_temperature”, “dissolved_oxygen”, and “buoyancy_frequency” to the target “chl-a”. All data from 10:00 to 16:00 was selected and denoised as the database. The

model's training and fitting performance was evaluated using the root mean squared error (RMSE), with a suitable training when $|RMSE_{test}–RMSE_{train}|<1$. The Pearson correlation coefficients are also calculated, all of which passed the t-test with statistically significant differences ($p<0.05$).

Physical conditions and under-ice chl-a dynamics

The observational durations covered the periods of ice growth and initial melting during mid-winter (Fig. 2). The maximum ice thickness was 39.5 cm (Feb. 14) and 54.3 cm (Feb. 9) in winter of 2018 and 2019, respectively. Under-ice light field was predominately controlled by the snow condition. Before Feb. 8 in winter 2018, snow layer (although ⩽3 cm) limited the euphotic zone to shallower than 95 cm depth (Fig. 2c) with radiation at 90 cm depth less than 5 W m^{-2}. After Feb. 8 when snow melted, the light can penetrate to the bottom sediment with radiation at 90 cm reaching 15 W m^{-2}.

Through the ice growth period, the under-ice chl-a concentration showed a decreasing trend, with more chl-a on the top and less chl-a near the bottom. During the initial melt period, chl-a roughly kept constant but the diurnal variation increased. With snow cover lasting before Feb. 8 in 2018, chl-a concentrations at all depths depleted with decrement of 8.6, 3.8, 2.5 μg L^{-1} at 50, 70, 90 cm depth. However, chl-a content in the lower water layer (110 and 130 cm depth) increased significantly due to local mixing event until Jan. 28, and then decreased rapidly after the mixing stop. When snow melted from Feb. 8, chl-a depletion rates at all depths decreased due to increasing radiative penetration. In winter 2019, chl-a concentration and water temperature were much lower than winter 2018 and the vertical variation was much smaller, ranging between 3–10 μg L^{-1} (Fig. 1d).

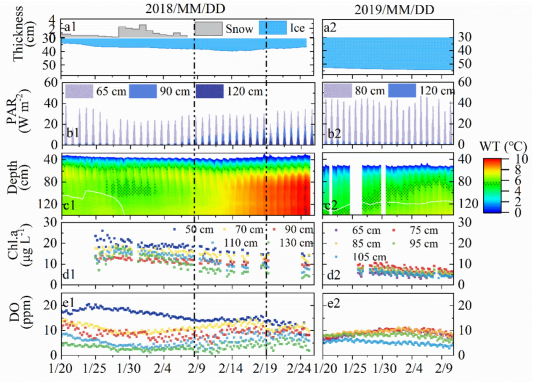


Fig. 2. (a)Snow and ice condition; (b)Under-ice penetrated radiation; (c) Under-ice water temperature and euphotic layer; (d) Chl-a and (e) DO.

Key physical factors influencing under-ice chl-a content

Random forest results indicated that six physical variables considered can account for > 80% of the under-ice chl-a variation. Six variables contributed roughly equally the chl-a variation (Fig. 3).

In winter 2018, three most important contributors to the top water layer chl-a are the ice thickness (19.8%), DO (14.8%) and buoyancy frequency (16%), while the ice thickness, water temperature, DO for the middle layer (70-90 cm), and the DO, penetrated radiation and buoyancy frequency for the bottom layer (110-130 cm). The contribution of buoyancy frequency was larger at 70 cm than 90 cm depth because the local vertical mixing occurred at

70 cm. Within the bottom water layer, the buoyancy frequency contributed most, indicative of the dominant impact of bottom mixing on the chl-a redistribution (Fig. 4).

In winter of 2019, three most important contributors to the top layer chl-a (65 cm) are the ice thickness (equal to water temperature), DO and penetrated radiation, while the DO, buoyancy frequency and water temperature for the middle layer (75-85 cm), and the DO, water_temperature and penetrated_radiation for the bottom layer (95-105 cm). The contribution of penetrated radiation was lager at the top layer than the bottom layer, indicating that a decreasing penetrated radiation has a decreasing contribution.

Although the random forest indicated the least contribution of snow thickness, snow covers on the ice control the light transport and penetrated radiation, which alters the water temperature and stratification/mixing that affect the metabolism and redistribution of chl-a. Namely, the snow events and covers have cascade influences on under-ice chl-a regime. For instance, before Feb. 8 in 2018, the snow cover remarkably and persistently decreased the penetrative solar radiation, and thus, the middle water layer got colder and triggered the occurrence of local vertical mixing above the sediment surface (Fig. 4a), causing a remarkable increment in bottom chl-a (110 and 130 cm) due to the resultant resuspension despite the decreased radiation. Compared with bare ice condition, snow covers promote the contributions of water temperature, DO, penetrated radiation and buoyancy frequency (Fig. 5).

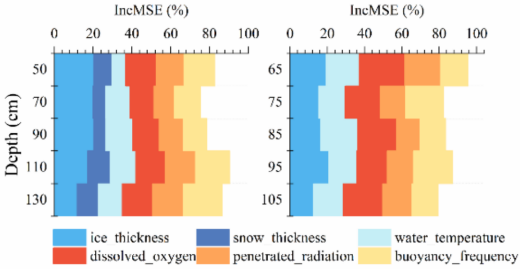


Fig. 3. Contributions of features to chl-a in winter 2018 (a) and 2019 (b)

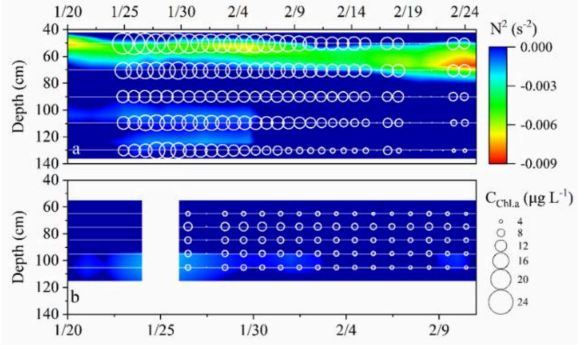


Fig. 4. Buoyancy frequency and chl-a concentration profile in winter 2018 (a) and 2019 (b)

In shallow temperate lake in arid regions of China, local meteorology, snow and ice processes and thickness, solar radiation transport, and under-ice water temperature, DO, and chl-a profiles were observed during two winters. Buoyancy frequency were calculated using profiles of water temperature and sampled salinity to determine the occurences of local verticle

mixing events. A random forest model was set up and validated to delineate the contributions of six physic variables to the chl-a variations. As a result, six physical varibles (i.e., ice thickness, snow thickness, water temperature, DO, penetrated radiation and bouyancy-frequency) contribute almost equally to the chl-a variation, but the dorminant contributors varied at different depths. Snow and ice covers can alter the relative contributions of six variables through complicated cascade regimes, especially the occurences of local vertical mixing.

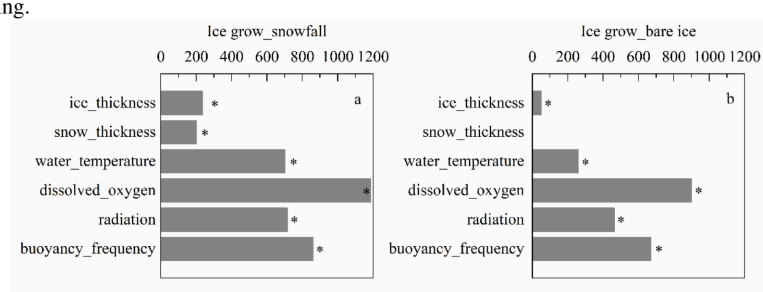


Fig. 5. Contributions of features to chl-a in winter 2018 with (a) and without (b) snow cover

The present results highlight both direct and indirect (cascading) alternations of snow and ice processes to the under-ice habitats and ecosystems, which needs more efforts from multiple desciplines in the future.

References

Culpepper J., Jakobsson E., Weyhenmeyer G., Hampton S.E., Obertegger U., Shchapov K., Woolway R.L., Sharma S. Lake ice quality in a warming world // Nature Reviews Earth&Environment. 2024. 5(10).

Griffiths K., Michelutti N., Sugar M., Marianne Douglas M.S.V., Smol J.P. Ice-cover is the principal driver of ecological change in High Arctic lakes and ponds // PLoS ONE. 2017. 12(3). e0172989.

Huang W., Zhang Z., Li Z., Leppäranta M., Arvola L., Song S., Huotari J., Lin Z. Under-ice dissolved oxygen and metabolism dynamics in a shallow lake: The critical role of ice and snow // Water Resources Research. 2021. 57. e2020WR027990.

Sharma S., Blagrave K., Magnuson J., O'Reilly C.M., Oliver S., Batt R.D., Magee R.M., Straile D., Weyhenmeyer G.A., Winslow L., Woolway R.I. Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in warming world // Nature Climate Change. 2019. 9. P. 227-231.

Vikström K., Weyhenmeyer G., Jakobsson E., Peternell M. Rapid lake ice structure changes across Swedish lakes puts public ice safety at risk // Ambio. 2025. 54. P.122-134.

ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПОДЛЕДНЫЕ ВАРИАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА А В МЕЛКОВОМ ОЗЕРЕ ЗАСУШИВШЕГО РЕГИОНА

Вэньфэн Хуан, Чжицзюнь Ли, Вэнь Чжао

Понимание воздействия озерного льда на экосистемы озер имеет решающее значение для оценки реакции озерных экосистем на потепление климата. С этой целью в течение двух зим в мелководном озере умеренного засушливого региона отслеживались снежные и ледовые условия, местная метеорология, перенос солнечного света и температура воды под льдом, содержание растворенного кислорода (DO) и хлорофилла-a (chl-a). Для определения ключевых физических переменных, влияющих на динамику chl-a подо

льдом, была создана модель случайного леса. Наличие снега и толщина льда существенно изменяют солнечную радиацию подо льдом, температуру воды, случаи вертикального перемешивания и РК. Показано, что ключевые физические переменные (толщина льда, толщина снега, температура воды, DO, проникающая радиация и частота плавучести) вносят почти эквивалентный вклад в изменение chl-a, но доминирующие факторы различаются на разных глубинах. Снежный покров может изменять относительный вклад шести переменных посредством сложных каскадных режимов.

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ В СРЕДНЕМ ТЕЧЕНИИ ВОЛГИ И ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Е.М. Шумакова, М.Д. Трубецкова
Институт водных проблем РАН

Анализируются температурные и геофизические аномалии, наблюдаемые в бассейне Волги; связь расположения участков повышенной скорости роста зимних температур воздуха с локализацией крупных разломов и районов современной геодинамической активности на территории Русской платформы; рассмотрены теоретические закономерности формирования тепловых аномалий в сейсмически активных районах при участии радона; применимость данных закономерностей в разломных зонах с меньшей геодинамической активностью; изучена практическая применимость данной закономерности

Взаимосвязь атмосферных и геодинамических процессов проявляется в виде формирования несдвигаемых линейных облачных аномалий (ЛОА) или грозовых облаков над разломами, более века используемых для поиска рудных месторождений в горах, а сейчас рассматриваемых в качестве перспективных предвестников землетрясений (Боков, 2010, Морозова, 1980). На Средней Волге влияние системы глубинных меридиональных разломов, идущих от Камы до Азова, также выходит за пределы земной коры.

Еще в 2006 г. Н.Е. Тишкин предположил, что более интенсивный рост средней температуры воздуха в районе Жигулевской ГЭС (Тольятти) в 1952-2006 гг. по сравнению с Самарской областью в целом (3 °С против 2 °С по области) связан с влиянием разлома (Шумакова и др., 2017). Основные закономерности «глобального потепления» присутствовали — направленное изменение зимних температур воздуха после 1979-1980 гг., увеличении разброса характеристик летних температур, изменении режима выпадения осадков в сторону редких сильных ливней без изменения суммарного количества осадков. Интересно, что над Жигулевским разломом также отмечались ЛОА (в 2004-2005 гг. после землетрясения 2000 г.).

В 2015 г. при изучении зимнего минимального стока рек бассейна Волги в условиях изменения климата отмечены локальные тепловые аномалии в районе Жигулевской ГЭС – Самары, а также Казани и Коломны. Использовались данные 88 метеостанций бассейна Волги и смежных территорий за 1960-2010 гг. из архива ВНИИГМИ МЦД (www.meteo.ru) (Болгов и др., 2014).

Несмотря на то, что площадь бассейна Волги не особенно велика, для отдельных участков выявлены существенные с точки зрения климатологии различия в темпах роста температуры воздуха. По расчётам коэффициенты линейного тренда k зимних

температур воздуха в °С/10 лет период после 1980 г. характеризуется направленным ростом зимних температур воздуха. На фоне общего повышения выделяются локальные территориальные максимумы k, свидетельствующие о повышенной скорости изменения температуры воздуха. Абсолютный прирост температуры воздуха показывает те же аномалии (Болгов и др., 2014). Наиболее интенсивный рост зимней температуры наблюдается в районе Казани и Коломны (k равен соответственно 0,71 °С/10 лет и 0,74 °С/10 лет), также выделяется район Саратова—Самары, где на фоне общего снижения прироста температур к юго-востоку бассейна k несколько выше по сравнению с прилегающими участками. В абсолютном выражении рост средних зимних температур воздуха составил 1.8 °С в районе Казани и Коломны, 1.7 °С в районе Самары-Саратова. Существую и другие участки температурных аномалий на границе бассейна Волги.

Средняя Волга довольно хорошо обеспечена геологической информацией в связи с нефтедобычей. Кроме того, крупные города Поволжья, столкнувшись с различными геологическими проблемами, в основном провели картирование своих территорий и нанесли основные, а иногда и мельчайшие, тектонические разрывные нарушения и/или их проекцию на дневную поверхность.

Детальное изучение геологии проведено для трех участков. Установлена корреляция расположения трех участков повышенной скорости роста зимних температур воздуха в бассейне Волга с локализацией разломов и участков современной геодинамической активности; это район Самара - Саратов и район Казани, расположенные в Среднем течении Волги, район Коломны - у слияния притоков Волги – р. Москва и р. Ока (рис.).

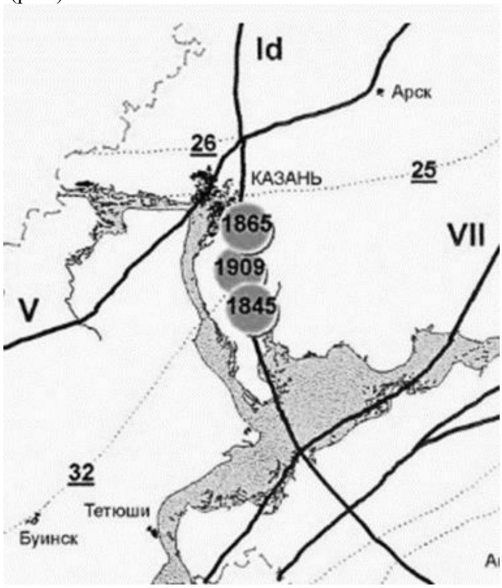


Рис. 1. Фрагменты схем расположения разломов земной коры в районе Казани (Мирзоев и др., 2006):
Id, V, VII- разломы мантийного заложения, 19, 25, 26, 32 – региональные разломы, - землетрясения XIX-XX века.

В районе Казани попарно пересекаются три разлома мантийного заложения, одни из них южным крылом пересекает Самарскую область. Всего же выделено 20 разрывных нарушений различного ранга, считающихся активными, вызывающих в том числе развитие карстовых процессов (Мирзоев и др., 2006).

Самарскую область пересекают четыре современно активных разлома мантийного заложения, имеются многочисленные разломы более низких рангов, аномалий выделения радона, наблюдаются современные (слабые) сейсмические события и др. (Яковлев и др., 2014).

Коломна расположена у слияния рек Москва и Ока, что уже говорит о наличии тектонически ослабленных структур. Геодинамическая активность этой территории максимальна в Московской области, здесь пересекаются три разлома второго ранга, наблюдаются различные признаки современной активности в виде дегазации из недр Земли и др.

В итоге наблюдается совпадение локализации современно активных в геодинамическом отношении территорий Восточно-Европейской платформы в пределах бассейна Волги и территорий, где климатические изменения происходят более интенсивно для трех выявленных тепловых аномалий (Шумакова, 2019).

Наиболее сильно современная геодинамика проявляется в районе Казани. В меньшей степени деформации осуществляются в Ульяновской, Самарской, Оренбургской, Саратовской областях (Огаджанов, 2002).

Тепловые аномалии, сопровождающие сильные землетрясения, уже анализировались по данным наземных наблюдений. В работе (Милькис, 1986) утверждалось, что средняя температура сезона (или месяца), когда случилось землетрясение, была выше, чем среднее многолетнее значение для данного региона.

На примере землетрясения в Мексике в 2003 г. показано, что перед землетрясением наблюдаются мощные тепловые эффекты, приводящие к изменению температуры и влажности на больших территориях (Pulinets et al., 2006).

Установлен механизм роста температур воздуха в зоне разломов – выделение тепла происходит непосредственно в атмосфере в виде скрытой теплоты испарения при конденсации в результате ионизации атмосферных газов радоном, выделяемым из земной коры (Martinelli et al., 2014). Разница температур воздуха над разломом и вне разломной зоны оценивается в 2-5 градусов Цельсия.

В процессе перемешивания атмосферы происходит увеличение пространственного масштаба аномалии, тепловое пятно может охватывать территории в сотни тысяч квадратных километров.

В Поволжье по аналогии с районами высокой сейсмической активности проявляются тепловые процессы в атмосфере в связи с геодинамикой.

Это влияние взаимное. Многочисленные исследования показывают, что планетарные процессы обусловливают сезонность слабых и средних землетрясений; для сильных землетрясений показана связь сезонной изменчивости с региональными атмосферными процессами (Боков, 2010).

Особенность в том, что в случае Поволжья речь идет о более длительном росте температур. Отсутствие объяснения в климатологии причин для приблизительно 50% составляющей глобального потепления и наличие у «радоновой» модели корректно установленного механизма роста температуры в приземном слое воздуха делает эту гипотезу пригодной.

Если использовать применительно к Средней Волге концепцию зоны подготовки землетрясения, то здесь уже наблюдаются ЛОА, выделение радона, рост числа местных сейсмических событий (Яковлев и др., 2014), долгосрочная тепловая аномалия.

Локализация тепловых аномалий зависит от выбора периода осреднения, при добавлении данных за последние годы картина немного изменяется. В районе Казани тепловые неоднородности менее устойчивые. Общедоступные данные дают достаточно редкую сетку. В связи с этим нельзя однозначно утверждать, насколько стабильна данная закономерность. Также может проявляться цикличность активности разломов во времени, что приведет к уменьшению или росту трендов изменения температуры воздуха.

Выявлено территориальное совпадение трех участков более быстрого роста зимних температур воздуха в бассейне Волги после 1979-1980 г. с районами современной геодинамической активности на ЕТР, в бассейне р. Волга.

Появляется возможность использовать устойчиво регистрируемый параметр – температуру приземного слоя воздуха – как индикатор роста напряжений в геологической среде.

Геодинамика может рассматриваться как дополнительный фактор, опосредовано определяющий гидрологические характеристики.

Работа выполнена в составе фундаментальных исследований ИВП РАН по теме №FMWZ-2025-0002 "Исследования процессов формирования качества поверхностных и подземных вод, природных и антропогенных механизмов изменения экологического состояния водных объектов, разработка методов и технологий управления водными ресурсами и качеством вод".

Литература

Боков В.Н. О связи атмосферной циркуляции и сейсмичности в диапазоне сезонной изменчивости // Ученые записки РГГМУ. 2010. №14. С. 89–100.

Болгов М.В., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения климатических характеристик и вероятностная оценка изменений минимального стока в бассейне р. Волги // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление. 2014. №3. С. 83–99.

Милькис Б.Р. Метеорологические предвестники сильных землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. №3. С. 36–47.

Мирзоев К.М., Степанов В.П., Гатиятуллин Н.С., Тарасов Е.А., Гатиятуллин Р.Н., Кашуркин П.И., Кожевников В.А. Глубинный карст и современные движения земной поверхности в Татарстане // Георесурсы. 2006. №1. С. 44–47.

Морозова Л.И. Проявление Главного Уральского разлома в поле облачности на космических снимках // Исследование Земли из космоса. 1980. №3. С. 101–103.

Огаджанов В.А. О проявлении сейсмичности в Поволжском регионе после сильных землетрясений в бассейне Каспийского моря // Физика Земли. 2002. №4. С.48–54.

Шумакова Е.М., Трубецкова М.Д., Разумовский Л.В. Геодинамика района жигулевской ГЭС и ее проявление в геофизических процессах приплотинной зоны // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов / Тр.VI М. н.-пр. конф. М., 2017. С. 184-189.

Шумакова Е.М. Геодинамика как одна из причин роста зимних температур воздуха в бассейне Волги // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2019. №55. С. 59–73.

Яковлев В.Н., Шумакова Е.М., Трегуб Н.В. Сейсмическая активность и геодинамика Самарской области // ИСНЦ РАН. 2014. Т. 16. №1. С. 27–34.

Martinelli G., Solecki A.T.,Trzeciakiewicz D.E., Piekarz M., Grudzinska K.K. Laboratory experiments on radon 222 exposure effects on local environmental temperature:

implications for satellite TIR measure'ments / Abstr. EGU General Assembly. Vienna, 2014. Id. 3175–2014.

Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Pokhmelnykh L.A. The physical nature of the thermal anomalies observed before strong earthquakes // Physics and Chemistry of the Earth. 2006. 31. P. 143–153.

GEODYNAMIC FACTORS IN THE MIDDLE COURSE OF THE VOLGA AND THEIR ROLE IN THE FORMATION OF CLIMATIC AND HYDROLOGICAL FACTORS

E. M. Shumakova, M.D. Trubetskova

The paper analyzes temperature and geophysical anomalies observed in the Volga basin, the correlation of places of increased growth rate of winter air temperatures with places of deep faults, areas of modern geodynamic activity on the territory of the Russian platform; theoretical regularities of thermal anomalies formation in seismically active areas with participation of radon are considered; applicability of these laws in fault zones with lower geodynamic activity; the practical applicability of this regularity was studied.

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЗЕР. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДЫ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

ЛАТЕРАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ ВОДОСБОРНОЙ ТЕРРИТОРИИИ И ОЗЕРНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ В УСЛОВИЯХ АДАПТИВНО-ЛАНДШАФТНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

А.Б. Александрова, Д.В. Иванов, И.И. Зиганшин, В.С. Валиев, Р.Р. Хасанов, В.В. Маланин, А.А. Марасов, О.М. Солодникова
Институт проблем экологии и недропользования АН РТ

Установлено, что в условиях адаптивно-ландшафтного земледелия в системе «почва-донные отложения» формируется асцендиальная структура латерального распределения металлов. Содержание элементов в пределах геохимической катены возрастает от автономного ландшафта к подчиненному. Отмечается интенсивный вынос Mn во всех элементарных ландшафтах катены. Концентрации элементов в почвах и донных отложениях не превышают верхних пределов регионального фона, за исключением Cd (в 1,6 раз) и Co (1,3 раза).

Латеральная миграция представляет собой процессы перемещения веществ по земной поверхности от автономного элементарного ландшафта к подчиненному. Различный характер связей между элементарными ландшафтами, входящими в геохимическое сопряжение, отражается на перераспределении химических элементов в почвах, что, в конечном итоге, влияет на качество поверхностных вод. В настоящее время имеется множество работ, посвященных изучению почвенно-геохимических катен, тогда как исследования почв в совокупности с аквальными ландшафтами геохимических катен единичны. В этом аспекте интересным является процесс латеральной дифференциации химических элементов, в частности, металлов, в системе «почва – донные отложения» в условиях адаптивно-ландшафтного земледелия. Учитывая, что металлы поступают в организмы из окружающей среды, изучение характера накопления химических элементов в геохимических сопряжениях является актуальной задачей. Кроме того, исследование элементного состава почв и донных отложений озер позволяют получить наглядную картину распределения и миграции элементов в целях последующей реализации задач мониторинга окружающей среды.

Известно, что системы земледелия, дифференцированные на уровне зональных природно-сельскохозяйственных провинций и адаптированные под определенные ландшафты, являются высоко эффективными с точки зрения защиты почв от эрозии и противоэрозионной организации территории, что оказывает влияние на состояние естественных и искусственных водных объектов.

Государственный природный заказник регионального значения ландшафтного профиля «Чулпан» расположенн в Высокогорском районе Республики Татарстан (РТ). Одним из важных этапов комплексных противоэрозионных мероприятий на территории заказника было создание искусственного водоема в 1970-х гг. Озеро располагается в задернованной балке у с. Большие Ковали. Площадь акватории 9 га, максимальная глубина 6 м. По периметру водоохраной зоны озера высажены лесозащитные полосы, осуществлен посев многолетних трав, проводится мелкоконтурная вспашка почв с учетом особенностей рельефа. Постепенное задернение поверхности почв и удержание

снега лесополосами способствовали прекращению эрозии. Скорость осадконакопления в озере оценивается величиной 6 мм/год, что соответствует средним региональным значениям (Иванов, Зиганшин, 2011).

Исследование проводилось катенарным методом на протяженном (100 м) склоне восточной экспозиции, уклоном 5-10 градусов в границах водоохраной зоны озера. На склоновом участке почвенные разрезы закладывались на элювиальном (Э – вершина склона), трансэлювиальном (ТЭ – средняя часть склона), трансэлювиально-аккумулятивном (ТЭА – нижняя часть склона), субаквальном (СА – прибрежная часть озера) элементарных ландшафтах. Образцы почв отбирались из генетических горизонтов почвенных разрезов и гумусового горизонта прикопок, заложенных в каждом элементарном ландшафте. В аквальном (А) ландшафте отбор поверхностных (0-10 см) проб донных отложений выполнялся в литорали и профундали озера дночерпателем ДЧ-0.025.

В пробах почв и донных отложений определяли гранулометрический состав, pH водной вытяжки, содержание органического вещества, кислоторастворимых (вытяжка 5н HNO_3) форм металлов (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn, Cr, Mn, Fe). Концентрацию элементов в растворе определяли атомно-абсорбционным методом на приборе PerkinElmer AAnalyst 400.

Оценка распределения химических элементов в ряду сопряженных элементарных ландшафтов проводилась сравнением значений коэффициента латеральной дифференциации (L-анализ), который определялся отношением среднего содержания кислоторастворимых форм химического элемента в гумусовом горизонте почв и донных отложениях в изучаемом подчиненном ландшафте к его содержанию в автономном ландшафте. При анализе коэффициентов латеральной дифференциации принималось, что $L>1,7$ характеризует высокое накопление элемента, $L=1,1–1,6$ – накопление средней силы, $L=0,6–1,0$ – незначительный вынос элементов, $L<0,5$ – интенсивный вынос. Для выявления степени контрастности латеральной дифференциации коэффициенты миграции (L) химических элементов в почвах и донных отложениях были распределены по рядам: контрастные ($L<0,5$ и $>1,8$); слабоконтрастные (L от 0,5 до 0,8 и от 1,2 до 1,8); неконтрастные (L от 0,8 до 1,1) (Авессаломова, 2007). Статистическая зависимость между физико-химическими свойствами и содержанием химических элементов устанавливалась по коэффициенту ранговой корреляции Спирмена.

Почвенный покров геохимической катены представлен старопахотными агросерыми лесными почвами, развивающимся в условиях элювиального, трансэлювиального и трансэлювиально-аккумулятивного элементарных ландшафтов под разнотравными луговыми ценозами, а также, агросерыми лесными почвами со следами оглеения в нижней части профиля, формирующихся в прибрежной части озера. Почвы характеризуются хорошей оструктуренностью и высоким содержанием гумуса. Гранулометрический состав варьирует от среднесуглинистого в элювиальном и транзитном ландшафтах до тяжелосуглинистого с преобладанием мелкопесчаной и крупнопылеватой фракций в трансэлювиально-аккумулятивном и субаквальном ландшафтах. По величине кислотности исследованные представители почв относятся к категории слабокислых.

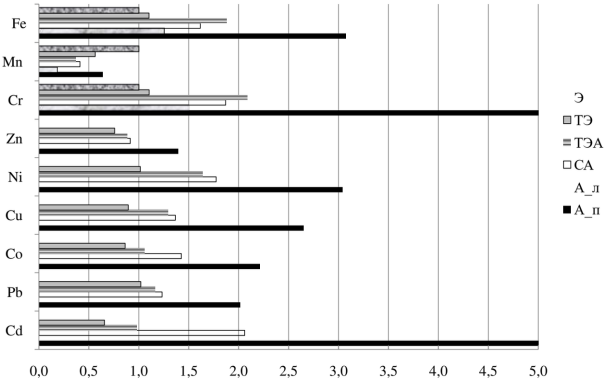
Содержание Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn и Cr в почвах геохимической катены в условиях адаптивно-ландшафтного земледелия демонстрирует уменьшение их концентрации в транзитной части и увеличение в супераквальной зоне. Известно, что одним из путей миграции элементов является не только поверхностный сток, но и почвенный раствор, в котором химические элементы присутствуют в форме свободных ионов и продуктов их взаимодействия с водой, молекулами и ионами других химических элементов в почвах. К ним относятся металлы в составе первичных минералов материнских пород и

вторичных минералов силикатной (глинистые минералы) и несиликатной (оксиды и гидроксиды металлов, соли) природы (Мотузова, 1999). Такая динамика соответствует типичной геохимической организации таежных ландшафтов Восточно-Европейской равнины. Сравнение концентраций кислоторастворимых форм металлов с региональными нормативами фонового содержания (Региональные …, 2015) показало отсутствие превышений, что указывает на отсутствие значительного антропогенного воздействия на почвы.

Гранулометрический состав донных отложений варьирует в зависимости от рельефа дна водоема. В мелководной зоне преобладают илистые пески, в профундали – глинистые илы. Содержание органического вещества в отложениях литорали и профундали колеблется от 4 до 9%.

Концентрации большинства металлов в отложениях литорали не превышают верхнего предела регионального фона, за исключением Cd (в 1,6 раза) и Co (в 1,3 раза). Это может быть связано как с естественными процессами миграции элементов, так и с антропогенными факторами, такими как сельскохозяйственная или рекреационная деятельность.

Анализ распределения элементов в подчиненных и автономных ландшафтах геохимической катены позволяет углубить понимание процессов накопления и миграции тяжелых металлов. Латеральное распределение элементов характеризуется высокой контрастностью в различных элементарных ландшафтах (рис.). В частности, наблюдается плавное увеличение концентраций Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Cr и Fe по направлению от элювиального ландшафта к глубоководной части аквального ландшафта. В трансэлювиально-аккумулятивном ландшафте интенсивно накапливаются Ni, Cr и Fe (L=1,7–2,1), тогда как Pb, Co и Cu аккумулируются в меньшей степени (L=1,1–1,3). Также отмечается слабый вынос Cd и Zn (L=0,9–1,0) и интенсивный вынос Mn (L=0,4).



Элементарные ландшафты: Э – элювиальный, ТЭ – трансэлювиальный, ТЭА – трансэлювиально-аккумулятивный, СА – субаквальный, А_л – аквальный (литораль), А_п – аквальный (профундаль)

Рис. Коэффициенты латеральной миграции элементов в элементарных ландшафтах геохимической катены

В супераквальном ландшафте наблюдается высокая степень накопления Cd, Zn и Cr (L=1,7–2,1), умеренная аккумуляция Pb, Co и Fe (L=1,2–1,6) и интенсивный вынос Mn (L=0,4). В литоральной части аквального ландшафта происходит интенсивное

накопление Cd и Zn (L=1,7–3,3), тогда как Pb, Co и Fe аккумулируются менее интенсивно (L=1,2–1,3). В профундали озера отмечено интенсивное накопление Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Cr и Fe (L=2,0–5,0), тогда как Zn аккумулируется менее интенсивно (L=1,4), а Mn выносится в незначительных количествах (L=0,6) (рис.).

По значениям коэффициентов миграции (L) была оценена степень контрастности латеральной дифференциации химических элементов в почвах и донных отложениях. Контрастное распределение (L<0,5 и L>1,8) характерно для супераквального ландшафта по содержанию Cd и Cr. В трансэлювиально-аккумулятивном и супераквальном ландшафтах накопление элементов может быть связано с механическим осаждением почвенного мелкозема, что особенно выражено в период весеннего паводка.

Кроме того, на накопление элементов влияют физико-химические свойства почв и донных отложений. Влияние гранулометрического состава проявляется в высоких значениях коэффициентов корреляции ($p<0,05$) Cr (r=0,83) и Fe (r=0,83) с содержанием фракций < 0,01 мм. Отмечается сильная связь ($p<0,05$) накопления Pb (r=0,83), Co (r=0,89), Cu (r=0,94), Cr (r=0,94), Fe (r=0,94) с содержанием илистых частиц, а также Mn (r=0,89) с фракцией средней пыли.

Особое внимание следует уделить поведению Mn и Zn. Марганец интенсивно выносится из всех элементарных ландшафтов, что связано с его биогенной природой. Кроме того, на поведение Mn оказывает влияние и литологический состав почв и отложений. Так, увеличение доли песков в литорали озера усиливает миграцию Mn, что подтверждается высоким отрицательным коэффициентом корреляции его содержания (r=–0,83) с содержанием соответствующей фракции в отложениях. В отличие от литорали, в профундали озера накопление органического вещества в 2 раза выше, чем в литоральной зоне, что приводит к снижению интенсивности выноса Mn (L=0,6–1,0).

Аккумуляция Zn наблюдается в отложениях мелководной части озера, что можно связать с его фиксацией воздушно-водной растительностью, которая покрывает значительную часть прибрежной зоны водоема.

Таким образом, латеральное распределение элементов в геохимической катене заказника «Чулпан» можно охарактеризовать как «восходящую» или «асцендиальную» структуру для всех изученных элементов, за исключением Mn. Особенности распределения элементов отражают геохимический облик системы «почва-донные отложения», формирующейся в условиях адаптивно-ландшафтного земледелия.

Литература

Авессаломова И.А. Биогеохимия ландшафтов. М.: Географический факультет МГУ, 2007. 161 с.

Иванов Д.В., Зиганшин И.И., Осмелкин Е.В. Оценка скорости осадконакопления в озерах Казани и Приказанья // Георесурсы. 2011. №2. С. 46-48.

Мотузова Г.В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. М.: Эдиториал УСС, 1999. 168 с.

Региональные нормативы «Фоновое содержание тяжелых металлов в почвах Республики Татарстан». Утв. Приказом Министерства экологии и природных ресурсов РТ от 30.12.2015 г. №1134-к.

Региональные нормативы «Фоновое содержание тяжелых металлов в донных отложениях поверхностных водных объектов Республики Татарстан». Утв. Приказом Министерства экологии и природных ресурсов РТ от 27.03.2019 г. №316-п.

Чертко Н.К., Карпиченко А.А., Жумарь П.В., Сергиеня Т.А. Геохимическая структура как основа оценки ландшафтного разнообразия // География и природные ресурсы. 2006. №3. С. 137–141.

LATERAL DISTRIBUTION OF CHEMICAL ELEMENTS IN SOILS OF WATER CATCHMENT TERRITORY AND LAKE SEDIMENTS IN CONDITIONS OF ADAPTIVE LANDSCAPE FARMING

A.B. Aleksandrova, D.V. Ivanov, I.I. Ziganshin, V.S. Valiev, R.R. Khasanov, V.V. Malanin, A.A. Marasov, O.M. Solodnikova

It has been established that in the conditions of agro-gray soils of adaptive landscape agriculture, an ascendial structure of the lateral distribution of Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn, Cr, Mn, and Fe is formed in the soil-bottom sediment system. The content of chemical elements within the geochemical catena increases from an autonomous landscape to a subordinate one. Intensive removal of Mp is noted in all elementary landscapes of the catena. The concentrations of elements in soils and sediments do not exceed the upper limits of the regional background, with the exception of Cd (1.6 times) and Co (1.3 times).

ХАРАКТЕР РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

В.М. Анохин[1,2,3], Д.С. Дудакова[1]
[1]Институт озероведения РАН,
[2]Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена
[3]Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина

В 2019-24 гг. силами ИНОЗ РАН СПб ФИЦ РАН проводилось изучение донных отложений Ладожского озера, включавшее донный пробоотбор, подводную фотовидеосъемку, эхолотные промеры по субрегулярной сети станций. В результате получены новые данные о распространении донных осадков. Проведен гранулометрический анализ проб донных отложений. Составлена схема распространения донных отложений Ладожского озера с использованием цифровых моделей рельефа дна. Выявлен ряд особенностей распространения приповерхностных осадков.

Несмотря на довольно многочисленные и долговременные исследования дна Ладожского озера, в настоящее время его донные отложения изучены недостаточно. В разное время силами ряда организаций проводились исследования литологии дна Ладоги. В числе наиболее значимых обобщающих публикаций по данной тематике можно упомянуть работы (Амантов, Амантова, 2014; Геоэкология…, 1995; Госдарственная…, 2015; История озер…, 1990; Калесник, 1968; Ладога, 2013; Ладожское …, 2002; Ладожское …, 2015; Семенович, 1966) и др. Авторы также имеют публикации, относящиеся к данной теме (Анохин, Дудакова, 2020; Анохин и др., 2019; Дудакова и др., 2019; Дудакова, Юдин, 2022). С течением времени появляются новые и совершенствуются традиционные методы изучения осадочных образований, что дает возможность получения новой информации по распространению тех, или иных типов донных отложений.

В течение 2019-24 гг. специалистами ИНОЗ РАН СПБ ФИЦ РАН были проведены исследования донных отложений Ладожского озера с использованием донного пробоотбора по сети станций, приведенной на рисунке 1. Применялась также донная фотовидеосъемка с помощью аппаратов серии «Limnoscout» (Дудаква и др., 2019). Примеры донных фотографий приведены на рисунке 2.

Все станции и точки пробоотбора сопровождались эхолотным промером с помощью эхолота Hamminbird Solix 10 с функциями локатора бокового обзора, а также GPS-навигатора. Существенная часть проб подверглась гранулометрическому анализу ситовым и пипеточным методами.

Полученные данные сопоставлялись с наиболее подробными из существующих батиметрических основ, составленных на основании цифровых моделей рельефа М.А. Науменко (Naumenko, 2020) и С.Н. Юдина, Д.С. Дудаковой (Дудакова, Юдин, 2022).

При построении границ распространения разных типов донных отложений учитывались формы рельефа, дальность от вероятных районов сноса, уклоны склонов и воздействие связанных с ними склоновых процессов и пр.

Также учитывались построения предшественников – в основном схемы донных отложений Н.И. Семеновича (Семенович, 1966), карты донных осадков из комплектов ГГК-1000 (Государственная…, 2015).

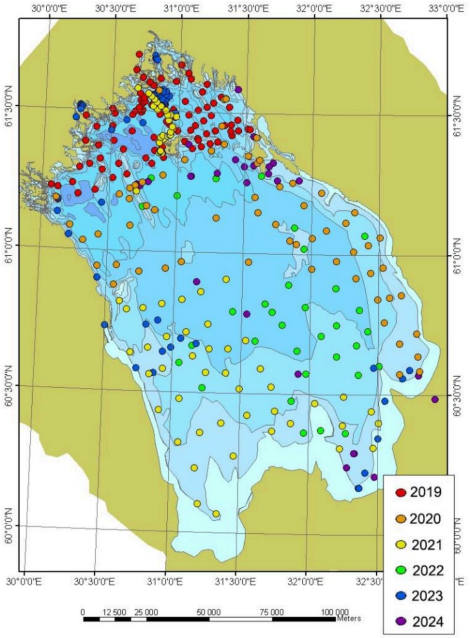


Рис. 1. Схема расположения точек донного пробоотбора

Результаты изучения донных осадков сведены в схему распространения донных отложений Ладожского озера (рис. 3).

Существенную роль в построении данной схемы сыграли результаты гранулометрического анализа, в соответствии с которыми первоначально проведенные литологические границы были серьезно скорректированы.

Основную площадь занимает обширное поле современных озерных пелитовых алевритов, распространяющееся на весь диапазон глубин от самых глубоких впадин до прибрежных зон фиардов.

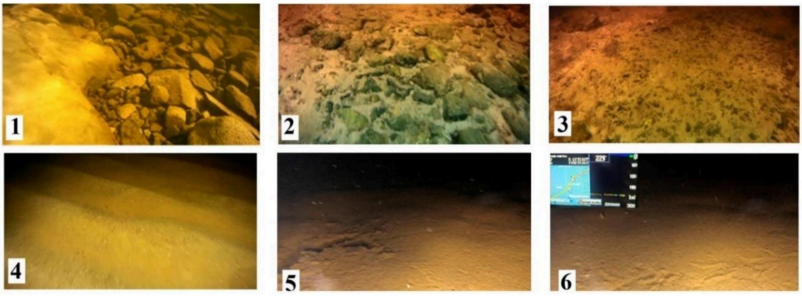


Рис. 2. Примеры фотографий дна Ладожского озера, сделанные с помощью подводного аппарата «Limnoscout» на подводном склоне в северной части Ладожского озера:
1 – коренные и глыбовые образования, глубина 2-4 м; 2 – галечно-щебневые отложения, глубина 4-5 м; 3 – щебнисто-песчаные отложения, глубина 5-7 м, 4 – песчаные отложения, глубина 7-10 м; 5 – алевритовые отложения, глубина 30 и более м; алевритовые отложения, зафиксированные на максимальной для Ладожского озера глубине 230 м

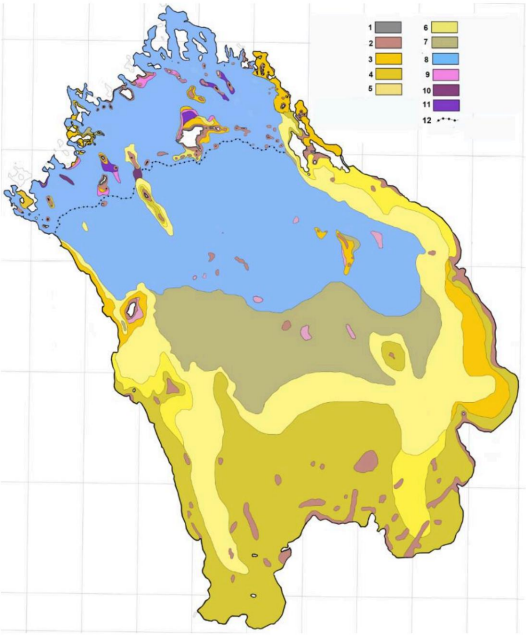


Рис. 3. Схема распространения донных отложений Ладожского озера:
1 – коренные породы и их крупные обломки, 2 – валунно-глыбовые, галечно-щебнистые отложения, 3 – пески разнозернистые, 4 – пески крупно-грубозернистые, 5 – пески средне-мелкозернистые, 6 – алевропески, 7 – песчаные, песчанистые алевриты, 8 – пелитовые алевриты, 9 - алевритовые пелиты, 10 – глины, 11 – глины ленточноподобные, ленточные, 12 – предполагаемая граница разграничения современных пелитовых алевритов (южнее) и алевритовых пелитов (севернее)

Донные отложения других типов распространяются в основном ближе к берегам озера и его островов. Алевритовые пелиты (обычно светло-серого цвета), занимая в разрезе предположительно более глубокое положение, чем вышеописанные пелитовые алевриты, выходят на поверхность дна на бортах котловин. По ряду признаков эти пелиты могут быть отнесены к переходному слою между ленточными глинами и современными алевритами.

В результате проведенных исследований подтверждены, а в ряде случаев впервые выявлены такие особенности строения верхней части донных отложений Ладоги, как:

- распространение песчаных, песчанистых алевритов в южной части озера значительно далее на север, чем это считалось ранее;
- предполагаемое выделение в обширном поле современных пелитовых алевритов современных же алевритовых пелитов;
- заполнение современными пелито-алевритовыми отложениями мелководных зон во фиардах северного побережья озера без существенного накопления прибрежных осадков;
- довольно широкое распространение пелитовых осадков и подстилающих их ленточноподобных и ленточных глин на бортах котловин;
- обнаружение песчаных отложений на локальных положительных формах в центральной зоне озера, что подтверждает их гляциальный генезис;
- распространение валунно-глыбовых отложений (в частности, у северо-восточных берегов озера) на значительные глубину и расстояние от береговой линии, что объясняется ледниковым переносом;
- уступ на северном подводном склоне Валаамского архипелага, по-видимому, сложен в основном ленточными глинами, а его подножие – светло-серыми пелитами с участками песков, которые здесь нарушают последовательность смены отложений по разрезу, что может быть объяснено склоновыми процессами.

Донный пробоотбор по предложенной методике предполагается продолжить для уточнения и дополнения картины распространения донных осадков Ладожского озера.

Публикация подготовлена при поддержке Гостемы ИНОЗ РАН № 0154-2019-0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов» № госрегистрации АААА-А19-119031890106-5.

Литература

Амантов А.В., Амантова М.Г. Развитие котловины Ладожского озера с позиций ледниковой теории // Региональная геология и металлогения. 2014. №59. С. 5-14.

Анохин В.М., Дудакова Д.С. Предварительные результаты изучения поверхностных донных отложений в северной части Ладожского озера в 2019 году // География: развитие науки и образования. СПб., 2020. С. 80-85.

Анохин В.М., Дудакова Д.С., Дудаков М.О., Рыбакин В.Н. Результаты геолого-геоморфологических исследований дна и берегов Ладожского озера в 2015 – 2019 гг. // Материалы Международной конференции (Школы) морской геологии. М., ИОРАН, 2019.

Государственная геологическая карта РФ м-ба 1:1 000 000 листы P-35,36. Литологическая карта поверхности дна акваторий. Третье поколение. Балтийская серия. МПР РФ Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2015.

Дудакова Д.С., Анохин В.М., Дудаков С.М. Использование необитаемого подводного аппарата для исследования бентофауны сублиторали и абиссали Ладожского

озера // Морские исследования и образование / Материалы конференции MARESEDU 2019. М.: ИОРАН, 2019.

Дудакова Д.С., Юдин С.Н. Цифровая модель подводных ландшафтов Ладожского озера как источник интегрированной информации о состоянии дна // Геоморфология 2022. Т. 53, №2. С.13-26

Иванов В.Л., Гуревич В.И. Геоэкология Ладожского озера. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1995. 209 с.

Калесник С.В. Ладожское Озеро. Гидрометеоиздат. Л., 1968.

Ладога / Ред. В.А. Румянцев, С.А. Кондратьев. СПб.: Нестор-История, 2013. 468 с.

Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / В.А. Румянцев, А.И. Сорокин, Н.А. Нестеров. СПб.: Нестор-История, 2015. 199 с.

Ладожское озеро. Атлас / В.А. Румянцев, А.И. Сорокин. СПб.: ИНОЗ РАН, 2002. 128 с.

Семенович Н.И. Донные отложения Ладожского озера. М.–Л.: Наука, 1966. 124 с.

Naumenko M.A. Lake Ladoga digital bathymetric models: development approaches and insight for limnological investigations // Limnological Review. 2020. 20 (2). P. 65-80.

THE NATURE OF THE DISTRIBUTION OF BOTTOM SEDIMENTS OF LAKE LADOGA

V.M. Anokhin, D.S. Dudakova

As a result of studying the bottom sediments of Lake Ladoga, which included bottom sampling, underwater photo and video recording, and echo sounding measurements at a subregular network of stations, new data on the distribution of bottom sediments was obtained. A diagram of the distribution of bottom sediments of Lake Ladoga has been compiled using digital bottom relief models. A number of features of the distribution of near-surface sediments have been identified.

МАТЕРИАЛЫ К ЭКОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОЗЕР СРЕДНЕГО ПРИОБЬЯ В ГРАНИЦАХ ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

К.С. Антясова, Е.А. Шорникова
Сургутский государственный университет

В работе представлены результаты исследования экологического состояния антропогенно нарушенных озер, расположенных в границах лицензионных участков нефтедобычи. Проанализированы пробы воды из озер Вачлор и Сэгутлор по 18 гидрохимическим показателям. Исследовалась структура микробного сообщества по численности бактерий трех эколого-трофических групп. Отмечены несоответствия $ПДК_{вр}$ по 8 показателям. Преобладает сапрофитная микробиота, свидетельствующая о повышенном содержании органического вещества в водных объектах. Присутствие группы фенолусваивающих бактерий указывает на фенольное загрязнение водоемов.

Вследствие интенсивного развития нефтегазодобывающего комплекса в Ханты-Мансийском автономном округе произошла значительная трансформация ландшафтов при обустройстве объектов промысловой инфраструктуры. Увеличение антропогенной

нагрузки на водные экосистемы обусловлено попаданием токсичных компонентов, что в конечном счете приводит к деградации водных биоценозов. Озера наиболее подвержены техногенному воздействию в виду замедленного водообмена, в связи с этим растет необходимость проведения мониторинга и оценки их экологического состояния (Шорникова, Гадельшина, 2019).

Объектами исследования были выбраны озера Вачлор и Сэгутлор, расположенные в окрестностях поселка городского типа Ульт-Ягун в Сургутском районе. Данные водоемы обладают рекреационным потенциалом и перспективами для развития туристической отрасли, так как на их дне залегают сапропелевые отложения, обладающие целебными свойствами. Озера находятся в зоне влияния лицензионных участков нефтегазовых месторождений, которые нарушают естественные процессы в экосистемах, в том числе водных, и приводят к их деградации (Шор и др., 2005).

На озере Вачлор отбор проб выполнялся в сентябре 2023-2024 гг. Отбор образцов производился в соответствии с ГОСТ 59024-2020 в шести точках в западной и юго-восточной частях озера (рис. 1). На озере Сэгутлор отбор проб выполнен в сентябре 2024 года в шести точках в северной и юго-восточной частях озера (рис. 2).



Рис. 1. Схема расположения точек отбора проб на оз. Вачлор



Рис. 2. Схема расположения точек отбора проб на оз. Сэгутлор

Химический анализ проб проводился по 18 показателям. Для микробиологической индикации загрязнения воды определялся количественный состав трех групп эколого-трофических групп микроорганизмов: сапрофитные гетеротрофные бактерии (СГБ), фенолусваивающие (ФУБ) бактерии, углеводородокисляющие (УВОБ) бактерии.

В таблицах 1, 2 представлены усредненные гидрохимические и микробиологические показатели качества вод.

Исследуемые водоемы относятся к категории ультрапресных, что является характерной особенностью озер округа в виду малого количества растворенных в воде солей натрия, калия, кальция, магния, хлора, гидрокарбонатов и других компонентов. По значению водородного показателя воды характеризуются слабокислыми значениями – усредненный показатель pH варьируется от 6,45 до 6,86.

В озерах Вачлор и Сэгутлор наблюдается дефицит растворенного кислорода – средний процент насыщения вод кислородом варьируется от 73% до 79%, при этом показатели $БПК_5$ и перманганатной окисляемости в среднем превышают $ПДК_{вр}$ в 1,7 и 1,6 раз соответственно. Полученные данные сигнализируют о загрязнении водоемов органическим веществом и нарушении процессов его биохимического окисления, что является закономерным при поступлении аллохтонных загрязняющих веществ техногенного характера.

Таблица 1. Усредненные гидрохимические показатели качества воды озер Вачлор и Сэгутлор

Показатель	ПДК$_{рх}$	Оз. Вачлор		Оз. Сэгутлор
		2023 год	2024 год	2024 год
pH, ед.	6,5-8,5	6,45	6,78	6,86
O_2, % насыщения	-	**74,7**	**79,8**	**73,0**
БПК$_5$, мг/дм^3	2,1	**4,09±0,33**	**3,95±0,28**	**3,15±0,22**
ПО, мг/дм^3	15	14,67±7,33	**29,62±14,82**	**29,6±14,8**
НП, мг/дм^3	0,05	0,027±0,015	0,026±0,015	0,038±0,04
Фенол, мг/дм^3	0,08	**0,273±0,046**	**0,028+0,005**	**0,0063±0,0007**
NH_4^+, мг/дм^3	0,5	0,164±0,008	0,135±0,007	0,21±0,01
NO_2^-, мг/дм^3	0,08	0,028±0,007	0,041±0,009	0,024±0,006
NO_3^-, мг/дм^3	40	4,99±8,76	4,81±1,20	6,61±1,65
PO_4^{2-}, мг/дм^3	0,25	**0,796±0,501**	**0,656±0,018**	**0,152±0,152**
Cl^-, мг/дм^3	300	10,4±1,1	10,7±1,6	11,8±1,8
Железо, мг/дм^3	0,1	**0,78**	**0,31**	**0,56**
Никель, мг/дм^3	0,01	0,0002	0,0028	0,0012
Марганец, мг/дм^3	0,01	**0,026**	**0,038**	**0,035**
Свинец, мг/дм^3	0,006	0	0,001	0,002
Цинк, мг/дм^3	0,01	**0,05**	**0,076**	**0,184**
Хром, мг/дм^3	0,02/0,07	**0,0076**	0,0005	0,0004
Кадмий, мг/дм^3	0,005	0,0002	0,0003	0,0004

Примечание: жирным шрифтом выделены значения показателей, не соответствующие нормативам

Таблица 2. Средняя численность бактерий различных эколого-трофических групп

Эколого-трофическая группа микроорганизмов	оз. Вачлор		оз. Сэгутлор
	2023 год	2024 год	2024 год
СГБ, тыс.кл./мл	284,75	291,475	386,267
ФУБ, тыс.кл./мл	6,75	5	3,21
УВОБ, тыс.кл./мл	0,33	0	0,62

В озерах наблюдается фенольное загрязнение – усредненные значения варьируются от 0,0063 до 0,273 мг/дм^3. В структуре микробного сообщества обнаружена группа фенолусваивающих бактерий, что также указывает на поступление аллохтонных фенольных соединений. Фенолы образуются в процессе метаболизма водных организмов, при биохимическом распаде и трансформации органических веществ, также фенолы являются одним из наиболее распространенных загрязнителей, поступающих в поверхностные воды от объектов нефтегазовой промышленности (Орлов, 2002). Предположительно, основная часть фенольных соединений поступает в водоемы с поверхностным стоком с территорий нефтедобывающих площадок.

Выявлено превышение ПДК$_{вр}$ фосфат-ионов от 0,6 до 3 раз. Чрезмерная концентрация фосфатов обусловлена стоками от населенных пунктов. Исходя из этого, предполагается, что в озера Вачлор и Сэгутлор поступает часть сточных вод,

образующихся в поселке Ульт-Ягун. Кроме того, фосфат-ионы входят в состав буровых растворов, которые используются на объектах нефтегазодобычи, расположенных в пределах площадей водосбора исследуемых озер.

В анализируемых пробах обнаружено повсеместное превышение $ПДК_{вр}$ тяжелых металлов – железа, марганца, цинка, что обуславливается геохимическими особенностями ландшафтов таежной зоны Западной Сибири. Из-за высокой миграционной способности в условиях кислой реакции почв и распространенной восстановительной обстановки, они вымываются и поступают в грунтовые воды, а затем – в поверхностные (Шорникова, 2008).

В структуре микробного сообщества в водоемах преобладает группа сапрофитных гетеротрофных бактерий, доля которых составила от 94% до 99%. Данная эколого-трофическая группа микроорганизмов осуществляет процессы деструкции легкоокисляемых органических соединений и является индикатором загрязнения водных объектов органическим веществом.

Таким образом, озера Вачлор и Сэгутлор подвергаются техногенному воздействию, о чем свидетельствуют показатели химического состава и структура микробного сообщества. В настоящее время исследование продолжается ввиду необходимости принятия мер по сохранности водных экосистем рыбохозяйственных озер с рекреационным потенциалом.

Литература

ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб.

Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Лозановская И.Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М.: Высшая школа, 2002.– 334 с.

Шор Е.Л., Зубайдуллин А.А., Овечкин Ф.Ю., Вершинин Ю.А., Лопатин К.И. Опыт оценки состояния озер, подвергшихся нефтяному загрязнению // Биологические ресурсы и природопользование / Сборник научных трудов. Вып. 8. Сургут: Дефис, 2005. С. 188-190

Шорникова Е.А. Диагностика состояния экосистем водотоков по гидрохимическим и микробиологическим показателям на примере широтного отрезка Средней Оби: Автореф. дисс. … канд. биол. наук. Хабаровск, 2008. 23 с.

Шорникова Е.А., Гадельшина С.Р. Эколого-гидрохимическая характеристика рыбохозяйственных озер Среднего Приобья // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Казань, 2019. Ч.1. С. 209-213.

DATA ON THE ECOLOGICAL AND HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF LAKES FOR FISHERY IN THE MIDDLE OB AREA WITHIN THE BOUNDARIES OF THE KHANTY-MANSI AUTONOMOUS OKRUG

K.S. Antyasova, E.A. Shornikova

The study presents the results of an assessment of the ecological condition of disturbed lakes located within oil deposit areas. Water samples from lakes Vachlor and Sugutlor were analyzed based on 18 hydrochemical parameters. The microbial community structure was examined in terms of the abundance of bacteria from three ecological-trophic groups. Inconsistencies in the standards of maximum permissible concentrations for 8 indicators were noted. The dominant microbial population consists of saprophytic microbiota, indicating an elevated content of organic matter in the water bodies. The presence of phenol-degrading bacteria suggests phenolic contamination of the lakes.

ПРОЦЕССЫ НАКОПЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР КАРЕЛИИ В УСЛОВИЯХ ОРГАНИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Н.А. Белкина
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Исследовано изменение естественного хода процесса накопления углерода в донных отложениях в условиях органического загрязнения разной природы (целлюлозно-бумажная промышленность, форелевые хозяйства, нефтяное загрязнение, создание водохранилищ, мелиорация) в озерах Карелии. Продемонстрированы примеры течения процессов разложения органического вещества в условиях окислительного и восстановительного диагенеза в донных отложениях при поступлении на дно осадочного вещества с повышенным содержанием органики разного генезиса.

Процессы накопления углерода в донных отложениях зависят от скорости осадконакопления и вещественного состава взвесей, поступающих на дно. В первую очередь, от количественного и качественного состава органического вещества, играющего роль восстановителя на стадии раннедиагенетических преобразований осадка, и неорганических форм азота, марганца, железа и серы, способных выступать в этих процессах в качестве окислителя. В воде озер Карелии, большую часть года имеющих контакт с атмосферой, присутствует кислород в количествах достаточных для поддержания окислительной обстановки в водной толще. Изменение содержания кислорода в придонных водах, связанное с развитием зимней и летней термической стратификацией, определяет особенности накопления углерода в донных отложениях и характер течения процессов разложения органического вещества в осадках, и как следствие, влияние донных отложений на состав придонных вод. Поверхностный слой донных отложений (~20 см) является сложной биогеохимической барьерной зоной, где с глубиной залегания осадка окислительные условия меняются на восстановительные (Белкина, 2011, 2014[1]). Измерение Eh в донных отложениях озер Карелии выявило, что при переходе от окисленного к восстановленному слою донных отложений его изменение может достигать 700 мВ (Белкина, 2019). Редокс- состояние верхнего слоя донных осадков изменяется в течение года и определяется морфологией озерной котловины, гидрологическим, термогидродинамическим, гидробиологическим, гидрохимическим режимом озера. Количественный и качественный состав осадочного вещества, зависящий от размеров и ландшафта водосборной территории, также закономерно контролируется климатом (Belkina et al., 2023; Kulik et al., 2023). Хозяйственная деятельность на водосборах и присутствие населенных пунктов на берегах являются постоянными рисками органического загрязнения водоемов.

Цель исследования - изучить изменение естественного хода процесса накопления углерода в донных отложениях в условиях органического загрязнения разной природы (целлюлозно-бумажная промышленность, форелевые хозяйства, транспорт, создание водохранилищ, мелиорация) на примере озер Карелии.

Изучение изменений процесса накопления углерода в донных отложениях проводилось на основе сравнительного анализа данных о литологических особенностях и химическом составе осадков, залегающих на дне водоемов, в районах подверженных органическому загрязнению и фоновых условиях. Описание процессов трансформации органического вещества в донных отложениях представлено по комплексу показателей вещественного состава придонной воды (газовый, минеральный состав, биогенные элементы, Fe, Mn и органическое вещество) и донных отложений: физические (плотность, влажность, пористость), физико-химические (pH, Eh), биологические

(потребление кислорода илом) и химические ($C_{орг}$, $C_{мин}$, ХПК, пигменты, гуминовые и фульвовые кислоты, биогенные элементы, Fe, Mn) характеристики осадка. Анализ химического состава воды и донных отложений выполнялся в соответствии с методами, принятыми в мировой практике. Донные отложения отбирались пробоотборниками (Алексона и Limnos), позволяющими сохранить границу вода-дно ненарушенной.

Озеро в процессе своей эволюции постепенно накапливает в донных отложениях осадочное вещество. Скорость осадконакопления и вещественный состав осадков меняется с изменением климата и ландшафта водосбора (в том числе в результате хозяйственной деятельности). На территории восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита (где расположена Республика Карелия), на современной стадии развития лимногенеза, в основном преобладают озера со смешанным типом седиментогенеза (по макрососставу: железо-кремне-гумусовый, железо-гумусо-кремниевый, или гумусо-железо-кремниевый), хотя встречаются и монотипные осадки (органические, кремниевые или озерные руды) (Belkina, 2024). Мощность накопленных донных отложений за весь период существования водоемов с момента их образования (7-15 тыс. л.н.) и как следствие скорость накопления углерода значительно варьируют. Например, в малом лесном оз. Чудесная ламба (средняя глубина 4,5 м), где в условиях гумидного климата формируются органические осадки с содержанием $C_{орг}$~ 50% скорость накопления углерода – низкая (около 1 кг на 1 кв. м за 100 лет) (Лукина и др., 2024). Толщина слоя донных отложений, обогащенных углеродом и накопленных здесь за последние 7-9 тысяч лет, не превышает 2 м. В тоже время, в малом оз. Касьяновское (озеро имеет близкие морфометрические параметры котловины, состав воды и содержание $C_{орг}$ в донных отложениях, что и Чудесная ламба) мощность голоценовых отложений достигает 10 м. Среднее значение мощности органических илов в малых озерах бассейна Онежского озера, где в настоящее время наблюдается минеральный тип накопления (формируются железо-гумусо-кремниевые осадки, где содержание $C_{орг}$ ~от 5 до 15%, гумусо-железо-кремниевые и кремниевые осадки, где $C_{орг}$ <5%) составляет ~4 м. Для донных отложений центральных районов Онежского озера мощность голоценовых отложений редко превышает 1 м (Палеолимнология …, 2022).

Основными источниками органического и биогенного загрязнения водоемов Республики Карелии являются целлюлозно-бумажная и деревообрабатывающая промышленность, хозяйственно-бытовые сточные воды, транспорт и сельское хозяйство. Наиболее опасным по степени влияния на водную экосистему (в силу высокого водопотребления) является сброс непосредственно в водоем сточных вод целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК). На территории республики в городах Кондопога и Сегежа действуют ЦБК с разными технологиями (бисульфитная и сульфатная варка целлюлозы, соответственно), причем в обоих случаях сброс хозяйственно-бытовых сточных вод города также осуществляется через очистные сооружения ЦБК. Например, влияние Кондопожского ЦБК, действующего с 1929 г., в настоящее время прослеживается по всей акватории Кондопожской губы Онежского озера. В вершинной ее части на площади около 5 кв. км залегают техногенные осадки с высокими концентрациями $C_{орг}$ (до 57 %), N (до 1 %), S (до 1 %), P (до 0,7 %). Мощность техногенных накоплений в глубину достигает 5 м. Объем загрязненных осадков этой зоны составляет ~ 4 000 000 м^3, где масса сухого вещества ~ 600 000 т (Белкина, 2005). Процессы разложения органического вещества в техногенных донных отложениях происходят в восстановительных условиях, продуктами деструкции являются токсические соединения (фенолы, метан и другие растворимые органические соединения, сероводород, аммиак). Высвобождение фосфатов в процессе деструкции приводит к росту внутренней фосфорной нагрузки (Белкина, 2006, 2015, 2017). Необходимо отметить, что хроническое загрязнение залива отходами ЦБК и бытовыми

сточными водами привело к развитию процессов антропогенного эвтрофирования в Кондопожской губе и более высокому трофическому ее статусу по сравнению с другими районами Онежского озера. (Белкина, 2005).

По сравнению с естественным геохимическим фоном высокие скорости седиментации и накопление органического вещества наблюдается в донных отложениях, залегающих на дне акваторий, используемых форелевыми хозяйствами. На примере 4 рыбоводных хозяйств было показано, что донные отложения в понижениях рельефа дна малых заливов Ладожского озера постепенно накапливают отходы форелеводства и при длительной эксплуатации акваторий начинают играть заметную роль в усилении процессов эвтрофирования за счет увеличения внутренней биогенной нагрузки и потребления кислорода на разложение органического вещества (Белкина, Ефременко, 2022). Если глубина залегания осадков небольшая, при определенной гидродинамической обстановке существует риск загрязнения вод взвешенным веществом, и как следствие – возникновение дефицита кислорода по всей водной толще.

Изучение загрязнения донных отложений токсическими органическими веществами, например нефтяными углеводородами тяжелых фракций, выявило, что процесс их ассимиляции также зависит от редокс- обстановки в поверхностном слое осадка. В Онежском озере (где скорости осадконакопления невелики) кислород, присутствующий в поверхностном слое донных отложений, способствует развитию нефтеокисляющих и фенолрезистентных бактерий, что проявилось при наблюдении последствий аварии 2001 г. в Петрозаводской губе. Снижение концентраций нефтяных углеводородов в загрязненных осадках происходило постепенно в течение 5 лет (Белкина, 2006[1], 2008). Исследование загрязненных нефтепродуктами донных отложений малых водоемов Беломорско-Балтийского канала показало, что тяжелые фракции нефтяных углеводородов накапливаются и захораниваются в восстановительных условиях, превращая донные отложения в опасный потенциальный источник вторичного загрязнения токсичными углеводородами при дноуглубительных работах (Белкина, Панюшкина, 2013).

Создание водохранилищ приводит к органическому загрязнению водоема и перестройке всех компонентов его экосистемы, поскольку в период заполнения водой до нового уровня, который занимает, не так много времени, в водоем поступает большое количество органического материала наземного происхождения. На примере Выгозерского водохранилища (Белкина и др. 2014[2], 2015, 2018, 2024) было показано, что органическое вещество затопленных наземных ландшафтов значительно повлияло на процессы формирования донных отложений и усилило гетерогенность водоема, обусловленную сложной морфологией котловины и неравномерным распределением речного стока и антропогенной нагрузки. Было выявлено, что в разных районах водохранилища процессы разложения органики и накопления углерода в донных отложениях различны. В северной части водоема в осадках, загрязненных отходами ЦБК, доминирует сульфатредукция, в центральном районе (дно оз. Выгозеро) наблюдается глеевая обстановка, где в качестве окислителя в диагенезе выступает железо, а в южной части водоема заметны процессы метанообразования.

Масштабные мелиоративные работы, проведенные в Карелии в 70-е годы прошлого века, также повлияли на процесс накопления углерода в донных отложениях. На примере Лососинского водохранилища было показано, что вследствие увеличения поступления в водоем растворимых гумусовых соединений изменился качественный состав органического вещества, накапливающегося в донных отложениях (Belkina et.al., 2024).

Таким образом, вследствие органического загрязнения водоема в донных отложениях развиваются активные деструкционные процессы, которые проявляются в

изменении химического состава придонных вод (снижение pH, Eh и концентрации O_2, повышение содержания CO_2, H_2S, CH_4) и донных отложений (изменение визуальных, органолептических, физических, физико-химических характеристик, рост показателей органического вещества (ППП$_{550}$, ГК, ФК, растительные пигменты, $C_{орг}$, P, N, S)). Нарушается естественный ход химических показателей по вертикали осадка. Увеличивается интенсивность потоков растворенных продуктов разложения органического вещества из донных отложений обратно в воду.

Выполнено в рамках проекта "Российская система климатического мониторинга" (ВИП ГЗ) при финансовой поддержке Министерства экономического развития РФ.

Литература

Белкина Н.А. Внутренняя фосфорная нагрузка в Онежском озере // Крупнейшие озера–водохранилища Северо–Запада Европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 95–103.

Белкина Н.А. Загрязнение нефтепродуктами донных отложений Петрозаводской губы Онежского озера // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. №2. С.181–187.

Белкина Н.А. Изменение окислительно–восстановительного состояния озерных донных отложений под влиянием антропогенных факторов (на примере Ладожского и Онежского озер) // Общество. Среда. Развитие. 2014. №3. С. 152–158.

Белкина Н.А. Количественный и качественный состав органического вещества и его трансформация в поверхностном слое донных отложений Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. №10. С. 64–72.

Белкина Н.А. Особенности процесса трансформации органического вещества в донных отложениях озер Карелии и его влияние на химический состав придонных вод // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2019. Т. 5(15). №4. С. 262–275.

Белкина Н.А. Ретроспективная оценка донных отложений Кондопожской губы Онежского озера // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. №6. С. 689–699.

Белкина Н.А. Ретроспективная оценка состояния донных отложений Выгозерского водохранилища // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. №3. С. 258–268.

Белкина Н.А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Сб. Водные проблемы Севера и пути их решения // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. №4. С.35–42.

Белкина Н.А., Гатальская Е.В., Здоровеннова Г.Э., Потахин М.С., Здоровеннов Р.Э., Морозова И.В. Современные седиментационные процессы в Выгозерском водохранилище // Геополитика и экогеодинамика регионов. Т. 20. Вып. 1. 2024. С. 139-156.

Белкина Н.А., Ефременко Н.А. Оценка влияния форелевых хозяйств на качество вод внутренних водоемов на примере Северного Приладожья // LXXV Герценовские чтения. География: развитие науки и образования (к 225-летию Герценовского университета) / Сборник научных статей Т. II. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2022. С. 20-23.

Белкина Н.А., Ефременко Н.А., Кулик Н.В. Особенности миграции, трансформации и накопления железа в Выгозерском водохранилище // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. №5. С. 505–513.

Белкина Н.А., Панюшкина О.В. Нефтяные углеводороды в водоемах Беломорско–Балтийского канала // Вода, химия и экология. 2013. №11. С. 16–20.

Белкина Н.А., Рыжаков А.В., Тимакова Т.М. Распределение и трансформация нефтяных углеводородов в донных отложениях Онежского озера // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. №4. С.472–481.

Белкина Н.А., Сандман О., Игнатьева Н.В. Распределение форм фосфора в донных отложениях как показатель эвтрофирования экосистемы большого водоема (на примере Ладожского и Онежского озер) // Экологическая химия. 2006. №15(3). С. 174 – 185.

Лукина Ю.Н., Белкина Н.А., Калинкина Н.М., Богданов С.Р., Зобков М.Б., Здоровеннов Р.Э., Потахин М.С., Здоровеннова Г.Э., Толстиков А.В., Пальшин Н.И., Бородулина Г.С., Богданова М.С., Мясникова Н.А., Смирнов С.И., Новикова Ю.С., Гатальская Е.В., Морозова И.В., Зобкова М.В., Сластина Ю.Л., Макарова Е.М., Сярки М.Т., Коновалов Д.С., Теканова Е.В. Разработка системы мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в водных экосистемах Европейского Севера России // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 97-114.

Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. 460 с.

Belkina N.A., Kulik N.V., Efremenko N.A., Potakhin M.S., Kukharev V.I., Ryabinkin A.V., Zdorovennov R.E., Georgiev A.P., Strakhovenko V.D., Gatalskaya E.V., Kravchenko I.Yu., Ludikova A.V., Subetto D.A. Contemporary Sedimentation in Lake Onego: Geochemical Features of Water, Suspended Matter, and Accumulation Rate // Water. 2023. 15. 1014.

Belkina N.A. Surface sediments of Karelian lakes: their formation peculiarities and chemical composition // Limnology and Freshwater Biology. 2024. 3. P. 111-129.

Kulik N., Efremenko N., Strakhovenko V., Belkina N., Borodulina G., Gatalskaya E., Malov V., Tokarev I. Geochemical Features of River Runoff and Their Effect on the State of the Aquatic Environment of Lake Onego // Water 2023. 15. 964.

CARBON ACCUMULATION PROCESSES IN BOTTOM SEDIMENTS OF KARELIAN LAKES UNDER CONDITIONS OF ORGANIC POLLUTION

N.A. Belkina

The changes in the natural course of carbon accumulation in bottom sediments under conditions of organic pollution of various natures (pulp and paper industry, trout farming, oil pollution, creation of reservoirs, land reclamation) are studied using the lakes of Karelia. Examples of the development of organic matter decomposition processes under conditions of oxidative and reductive diagenesis in bottom sediments are shown when sedimentary matter with an increased content of organics of various geneses enters the bottom.

ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ РЕКИ СЫРДАРЬЯ И ВОЗМОЖНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ИХ В КАЙРАККУМСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Н.Н. Бозорова[1], А.О. Муминов[2], И.Ш. Норматов[2], М. Ашуров[2]
[1]Худжандский научный центр Национальной Академии наук Таджикистана
[2]Таджикский национальный университет

Представлены результаты мониторинга миграции тяжелых металлов (Cd, Zn, As, Pb, Cu, Cr) вдоль русла реки Сырдарья на территории Таджикистана. В распределении металлов вдоль русла реки наблюдается определенная закономерность, вероятно связанная с

образованием растворимых комплексных соединений с органическими лигандами и адсорбцией на взвешенных частицах и донных отложениях

Кайраккумское водохранилище расположено в среднем течении реки Сырдарья, в 20 км от г. Худжанда Республики Таджикистан. Плотина Кайраккум построена перед выходом реки на равнинную территорию. Площадь водосбора реки Сырдарьи до плотины 136 тыс. км^2. Водохранилище предназначено для сезонного регулирования стока реки с целью удовлетворения нужд ирригации, а также для выработки электроэнергии. Средний многолетний расход реки в створе плотины составляет520м3/сек. Сток 50% обеспеченности составит 15875 млн. м^3. В период паводков с апреля по август проходит до 60% годового стока (Алибаев, 2020).



Рис. 1. Вид на Кайраккумское водохранилище из космоса (www.hydrotechsafety.kz)

Поступление техногенных веществ в данное время является постоянно действующим фактором, приводящим к изменению биологических сообществ и преобразующим природные экосистемы в целом. В водных средах тяжелые металлы, могут находиться в трех основных формах: взвешенной, коллоидной и растворенной, соотношение между которыми в основном определяется не только кислотно-щелочными и окислительно-восстановительными условиями, но и содержанием органических веществ (Варшал др., 1979; Роева и др., 1996). При попадании в водный объект ионные формы металлов могут переходить в коллоидную форму за счет физико-химических взаимодействий, и в таком виде они могут переноситься на расстояния до сотен километров (Кашутина и др., 2022). Выявление закономерностей миграции металлов и их влияния на микробиологическое сообщество в природных водах существенно влияет на достоверность прогнозов изменения состояния этих экосистем при возможном возрастании антропогенной нагрузки.

На территории Кыргызстана в бассейне реки Сырдарья размещено 30 различных хвосторанилищ действующих и закрытых горнорудных предприятий, при этом общее количество хвостовых материалов составляет 130 049 млн. м^3. В этом перечне имеются 15 хранилищ бывших урановых рудников в Майлуу-Суу и Мин-Куше, которые остались в наследство от военно-промышленного комплекса СССР.

Наиболее значительным фактором загрязнения поверхностных вод в Кыргызстане считаются отвалы и хвостохранилища, размещенные непосредственно в руслах и поймах трансграничных рек, в том числе селе - и паводкоопасных. Ряд таких объектов в Майлуу-Суу и Мин-Куше являются источниками систематического

радиоактивного и токсичного загрязнения гидрографической сети в бассейне Сырдарьи вследствие просачивания хвостовых вод через ограждающие дамбы. Это происходит из-за несовершенной газо- и гидроизоляции, постепенной деградации защитных сооружений, дренажных и водоотводящих систем, аварийных ситуаций в прошлом и несанкционированных массовых раскопок вблизи хвосторанилищ местными жителями.

Настоящая работа посвящена мониторингу миграции тяжелых металлов по руслу реки Сырдарья на территории Таджикистана и оценки их накопления в Кайраккумское водохранилище. Отбор проб воды осуществлялись в пяти точках по руслу реки, начиная с участка пересечения рекой границы Кыргызстана и Таджикистана в гидропосту “Акджар” (точка 1) на рисунке 2. Для анализа тяжелых металлов был использован Атомно-абсорбционный спектрометр “A Analyst 800”.

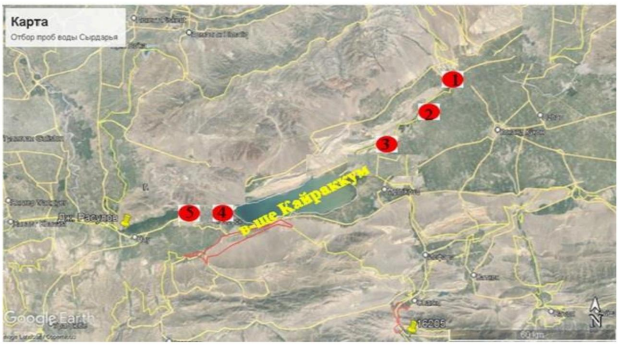


Рис.2. Схема точек отбора проб воды из реки Сырдарья

На рисунке 3 представлена динамика концентраций Cd, Zn, As, Pb, Cu и Cr вдоль русла реки Сырдарья. Изменение концентрации элементов приведены в виде разницы их значений в точке отбора и среднего по стволу реки. В динамике изменения концентрации кадмия и цинка вдоль русла реки Сырдарья наблюдается определенная закономерность.

В природных водах тяжелые металлы (ТМ) могут находиться в различных состояниях (в растворе, на взвесях, в форме коллоидов), что определяет их разную способность к миграции и доступность для водных организмов. Помимо фазового состояния, немаловажное значение имеет распределение ТМ по химическим формам. Основными химическими формами ТМ в растворе являются комплексы с неорганическими лигандами, аква-ионы и формы, связанные с растворенными органическими веществами (РОВ). Влияние уровня концентрации ТМ на распределение его форм в растворе реальной природной воды связано с ограниченной емкостью связывающих центров РОВ (Смоляков, Жигула, 2001).

Согласно (Смоляков, Жигула, 2001) величина pH является определяющим фактором в нахождение химической формы тяжелых металлов в водной среде и их способности к сорбции и сольватации. Как утверждается авторами, для Zn и Cd в диапазоне pH от 6 до 9 формы, связанные с растворимыми органическими веществами, являются основными. Увеличение доли аква-ионов и снижение доли незаряженных комплексов тяжелых металлов заметно снижает сорбцию металлов на взвеси.

В таблице обобщены результаты химических анализов проб воды реки Сырдарья.

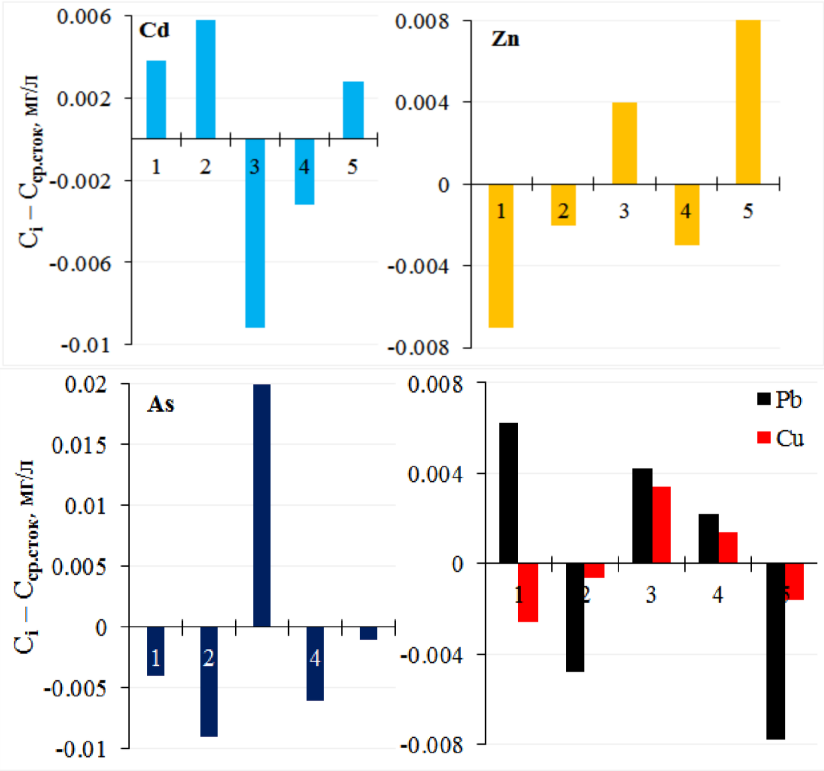


Рис. 3. Динамика изменения концентрации вдоль русла реки Сырдарья и значений концентраций Cd, Zn, As, Pb, Cu и Cr в соответствующих точках отбора проб воды

Таблица. Результаты анализа проб воды

Показатели	Ед. изм	1	2	3	4	5
pH		7.71	7.28	7.33	7.81	7.39
Растворенный O_2	мг/л	5.38	4.06	6.58	6.27	6.57
Ca^{2+}	мг/л	68.2	76.0	72.1	56.4	52.3
Mg^{2+}	мг/л	33.6	38.4	38.4	26.4	28.8
HCO_3^-	мг/л	164.7	207.4	176.9	134.2	137.9
Cl-	мг/л	39.7	22.6	34.0	19.8	19.7
SO_4^{2-}	мг/л	340	386	386	370	266
NO_3^-	мг/л	4.37	3.11	3.12	0.42	0.97

Литература

Алибаев К.У. Безопасность намывных плотин на реке Сырдарья. Часть 2. Кайраккумское водохранилище (литературный обзор). Алматы: ПК “Институт Казгипроводхоз”, 2020. 41с.

Варшал Г.М., Кощеева И.Я., Сироткина И.С., Велюханова Т.К., Инцкирвели Л.Н., Замонина Н.С. Изучение органических веществ поверхностных вод и их взаимодействия с ионами металлов // Геохимия. 1979. №4. С. 598–607.

Кашутина Е.А., Ясинский С.В., Веницианов Е.В., Гришанцева Е.С., Сидорова М.В. Оценка переноса загрязнений в водной среде в разных фазах // Проблемы региональной экологии. 2022. №5. С. 88–92.

Роева Н.Н., Ровинский Ф.Я., Кононов Э.Я. Специфические особенности поведения тяжелых металлов в различных природных средах // Журнал аналитической химии. 1996. Т. 51, №4. С. 384–397.

Смоляков Б.С., Жигула М.В. Экологические последствия трансформации химических форм металлов-поллютантов в реальном водоеме // Химия в интересах устойчивого развития. 2001. №9. С. 283–291.

DYNAMICS OF HEAVY METALS CONCENTRATION ALONG THE SYRDARYA RIVER AND POSSIBILITIES OF THEIR ACCUMULATION IN THE KAIRAKKUM RESERVOIR

N.N. Bozorova, A.O. Muminov, M. Ashurov

The results of monitoring the migration of heavy metals (Cd, Zn, As, Pb, Cu, and Cr) along the Syr Darya river bed in Tajikistan are presented. The distribution of metals along the riverbed does not show certain regularity, probably related to the formation of soluble complex compounds with organic ligands and adsorption on suspended particles and bottom sediments

ПОСТУПЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОДЗЕМНЫМ СТОКОМ В ОНЕЖСКОЕ ОЗЕРО

Г.С. Бородулина, Г.А. Изотов

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

В статье отражены результаты изучения органического вещества и биогенных элементов в подземных водах Карелии и дана оценка их прямого поступления с подземных стоком в Онежское озеро. Показано, что подземные воды региона отличаются низкими концентрациями органического вещества и биогенных элементов и их невысокой долей в балансе Онежского озера. Хозяйственно-бытовое загрязнение приводит к накоплению нитратов в грунтовых водах Прямой приток подземных вод с урбанизированных территорий водосбора увеличивает поступление всех компонентов и особенно нитратную нагрузку на водоем.

В настоящее время миграция и механизмы трансформации растворенного органического вещества (DOM) в подземных водах пока недостаточно изучены и не позволяют точно оценить источники и объемы стока для глобальных бюджетов углерода. Тем не менее, результаты исследований (Aiken, 1989; Osterholz et al., 2022; McDonough et al., 2022) подтверждают, что подземные воды могут быть важным источником лабильного DOM при поступлении в поверхностные воды, что подчеркивает

важность его включения в глобальные оценки углеродного бюджета. Так глобальные медианные и средние концентрации растворенного органического углерода (DOC) в подземных водах составляют 1.2 мгС/л и 3.8 мгС/л соответственно, что позволяет оценить количество DOC, ежегодно поступающего в океаны с подземным стоком в результате добычи и извлечения подземных вод, величиной около $(2.9–9.1)\cdot10^6$ т и $(1.2–3.7)\cdot10^6$ т соответственно (McDonough et al., 2022). В подземных водах отсутствуют фотоокислительные процессы и часто преобладают бескислородные условия, что приводит к медленной биодеградации DOM. В работе (McDonough et al, 2022) выдвинута гипотеза, что условия замедленного водообмена благоприятствуют накоплению и потенциальному сохранению органического вещества (ОВ) в течении продолжительного времени.

Целью работы является обобщение результатов исследования подземных вод региона по содержанию органического вещества и биогенных элементов.

Подземные воды Карелии характеризуются в целом невысокой минерализацией, но отличаются разнообразным химическим составом. ОВ всегда присутствует в водах и играет важную роль в формировании их химического состава, при этом до недавнего времени ему уделялось незаслуженно мало внимания. Малоизученной в гидрогеохимии Карелии остается тема о содержании ОВ в подземных водах. В ранних работах, посвященных геохимической характеристике подземных вод Карелии, имеются достаточно скудные данные об ОВ и основных биогенных элементах (азот, фосфор) (Гидрогеология…, 1971; Старцев, 1985). В работе (Ресурсы ..., 1987) показано, что агрессивные свойства воды относительно первичных алюмосиликатов увеличиваются за счет высокого содержания органических кислот, в результате разрушение пород протекает значительно эффективнее. За счет ОВ происходит и восполнение запасов CO_2. Косвенно это подтверждается уменьшением перманганатной окисляемости в водах нижней гидрогеохимической зоны.

Косвенные сведения о содержании ОВ в подземных водах до последнего времени основывались на данных по цветности воды и перманганатной окисляемости (ПО). Как правило, подземные воды бесцветны, в 50% случаев показатель оказывается менее 5 град, лишь 10 % проб превышают нормативные для питьевых вод 20 град. Подземная вода с повышенной цветностью обнаруживается исключительно в гидротехнических сооружениях - в отдельных колодцах и скважинах. В колодцах это связано с недостаточной изоляцией сооружения от поверхностного стока, в скважинах - с техническим состоянием металлических обсадных труб (застойные скважины) или несовершенством метода отбора проб воды с высоким содержанием железа, когда аэрация воды приводит к образованию гидроксида железа.

Единственным показателем содержания ОВ, который присутствует в большинстве анализов подземной воды (фондовые и аналитические данные лаборатории с 70-х годов прошлого столетия), является величина ПО. В среднем величина ПО в более чем 3000 анализах подземных вод Карелии составила 3,6 мгО/л, и лишь в 10 % проб величина превышает 10 мгО/л (рис. 1). Максимальная величина - 50-140 мгО/л отмечена в застойных скважинах или колодцах, имеющих поверхностный подток.

Исследования последних десятилетий значительно расширили знания о распределении, концентрациях и формах биогенных элементов в подземной гидросфере региона (Водные…, 2006; Бородулина, Левичев, 2019). Установлено, что антропогенное влияние на состав подземных вод проявляется главным образом в нитратном загрязнении (Лозовик, Бородулина, 2009). Что касается фосфора, следует отметить одинаковые медианные величины $P_{общ}$ 17 мкг/л для подземных и поверхностных вод, но в отличие от последних, в которых преобладающей формой является органо-

железосвязанный фосфор, в подземных водах ведущая роль принадлежит минеральным формам. На их долю приходится в среднем 77% от фосфора общего.

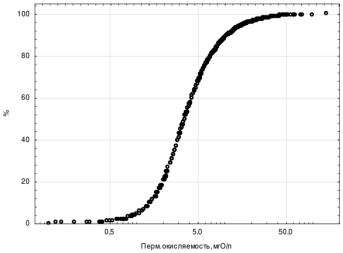


Рис. 1. Кумулятивная кривая распределения ПО в подземных водах (n=3220).

Хозяйственно-бытовое загрязнение сказывается на распределении форм азота и приводит к накоплению нитратов в подземных водах Как известно, единственным геохимическим фактором, влияющим на изменение концентраций различных соединений азота в подземных водах, является их окислительно-восстановительный потенциал (Крайнов и др., 2012; Лозовик, Бородулина, 2009). Околонейтральные кислородные воды являются благоприятными для неограниченного роста нитратов, поэтому при Eh более +200 мВ концентрации нитратов на территории поселений региона иногда достигают запредельных (более 45 мг/л, максимальная 327 мг/л) концентраций. Такая геохимическая обстановка характерна для подземных вод, формирующихся в верхней гидрогеохимической зоне в четвертичных отложениях и трещиноватых кристаллических породах выше местного базиса дренирования. Воды этой зоны используются для питьевого (в основном децентрализованного) водоснабжения в Карелии и особенно широко в Финляндии (Водные ..., 2006).

В последние годы впервые начаты количественные определения органического углерода и общего азота в подземных водах региона. Пробы анализировались в день отбора методом каталитического окисления. В работе применялся анализатор общего углерода и азота Shimadzu TOC-LCSN, входящий в ЦКП КарНЦ РАН.

Региональная средняя концентрация $C_{орг}$ составляет 2.8 мгС/л, глобальная средняя 3.8 мгС/л, по Финляндии 4 мгС/л. Следует подчеркнуть, что оценки содержания углерода в подземных водах Карелии – предварительные, получены на основе небольшой выборки (121) в отличие от глобальной оценки, полученной для 9404 образца из 32 стран на 6 континентах (McDonough et al., 2022). Средняя и медианная концентрации $N_{общ}$ в подземных водах Карелии составляют 2.3 и 0.84 мгN/л соответственно. Обращает на себя внимание большой размах концентраций $N_{общ}$: 0.05 – 9.3 мгN/л. Максимальные величины 7.3-9.3 мгN/л, практически полностью обусловленные высокими концентрациями аммонийного азота, зафиксированы в воде некоторых скважин Онежской структуры. Следует отметить, что средние и медианные концентрации $C_{орг}$ и $N_{общ}$ в подземных водах незначительно отличаются от содержаний их в атмосферных осадках: $C_{орг}$ 1.2-1.6 мгС/л, $N_{общ}$ 0.2-0.6 мгN/л.

Для оценки подземного стока в водоемы используются методы, основанные на анализе условий формирования стока в пределах водосборной и, прежде всего, прибрежной части суши, сток с которой направлен непосредственно в озеро, минуя речную сеть (Зекцер, 2012; Бородулина, 2011). Подземный сток, направленный в реки, притекающие в озеро, количественно уже учтен в объеме среднемноголетнего речного стока. По отношению к площади водосбора Онежского озера суммарная площадь

участков, с которых подземный приток поступает непосредственно в озеро, составляет 2,3%. Величина невелика, но необходимо учитывать, что именно в этой части водосборной площади озера располагаются основные очаги концентрированного загрязнения не только поверхностных, но и подземных вод, – города и поселки, крупные промузлы, карьеры и другие хозяйственные объекты.

Для количественной оценки подземного стока в Онежское озеро использовался гидродинамический метод. На картах в пределах основных гидрогеологических районов выделен ряд расчетных участков со сходными гидрогеологическими условиями (рис. 2). В основу районирования положено деление побережья озера на гидрогеологический массив окраины щита и артезианские бассейны северо-западной окраины Русской платформы. Следует отметить, что для оценки глобального выноса в океаны применялся тот же метод (Zektser et al, 2007; McDonough et al., 2022).

Расходы потоков подземных вод, направленных непосредственно в Онежское озеро, минуя речную сеть, рассчитаны в объеме 140,3 млн. м^3/год (Бородулина, 2011) Таким образом, доля подземных вод в водном балансе Онежского озера составляет около 1 % от общего речного притока.

Для расчета выноса углерода, азота и фосфора прямым подземным стоком в Онежское озеро приняты их средние концентрации для стока с территорий природного состояния и селитебных (загрязненных) (табл.).

Подземные воды региона отличаются низкими концентрациями органического вещества и биогенных элементов и невысокой их долей в сравнении с речным стоком (Сабылина, 2016): от 0,1% для $C_{орг}$ и 1.2-1.7% для фосфора и азота. Прямой приток подземных вод с урбанизированных территорий водосбора увеличивает поступление минеральных форм азота и фосфора и особенно нитратную нагрузку на водоем.

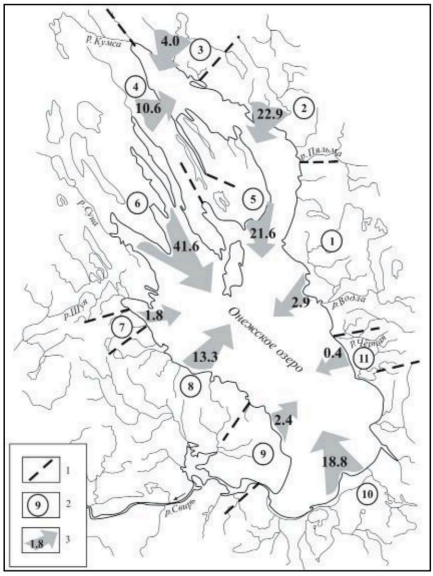


Рис. 2. Объемы подземного стока с расчетных участков побережья Онежского озера: 1 – границы расчетных участков; 2 – номера участков; 3 –объемы стока, млн. м^3/год

Недавние исследования впервые выявили высокие концентрации аммонийного азота (до 16.5 мг/л) и углерода органического (до 35 мгС/л) в напорных щелочных бессульфатных подземных водах содового типа Онежской структуры. Комбинация геохимических признаков в подземных водах с учетом структурных особенностей исследуемых районов указывают на возможный источник углеводородного заражения геологического разреза (Chazhengina et. al., 2023). Необходимы исследования других проявлений содовых и хлоридно-натриевых подземных вод с определением в них органической составляющей.

Таблица. Вынос $C_{орг}$ и $N_{общ}$ с прямым подземным стоком в Онежское озеро

Расчетная территория	Водный сток, млн м^3/год	$C_{орг}$		$N_{общ}$		Р общ	
		Среднее, мгС/л	Вынос, т/год	Среднее, мгN/л	Вынос, т/год	Среднее, мгР/л	Вынос, т/год
Загрязненная	3.2	3.28	10.5	3	93	0.3	1
Природная	137.1	1.64	225	0.6	85	0.05	7
Подземный сток	140.3		235.5		178		8
Речной сток	16800		300000		10173		657

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН ВИП ГЗ «Ритм углерода» (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

Литература

Бородулина Г.С. Роль подземного стока в формировании химического состава воды озер бассейна Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. №4. С. 108–115.

Бородулина Г.С., Левичев М.А. Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии // Горный журнал. 2019. №3. С. 71–75.

Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 263 с.

Гидрогеология СССР. Сводный том. Вып. 3. М.: Недра, 1977. 216 с.

Зекцер И.С. Подземный сток и ресурсы пресных подземных вод. М.: Научный мир, 2012. 374 с.

Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. М.: ЦентрЛитНефтеГазНедра, 2012. 672 с.

Лозовик П.А., Бородулина Г.С. Соединения азота в поверхностных и подземных водах // Водные ресурсы, 2009. Т.36, №6. С.694-704

Лозовик П.А., Бородулина Г.С., Карпечко Ю.В., Кондратьев С.А., Литвиненко А.В., Литвинова И.А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений // Труды Карельского научного центра. серия Лимнология. 2016. №5. С. 35-52.

Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии / Под ред В.С. Самариной. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1987. 151 с.

Сабылина А.В. Поступление в Онежское озеро органического углерода, общего фосфора и общего азота с речным стоком и вынос с водами р. Свири в 1965–2008 годах // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. №9. С. 68–77.

Старцев Н.С. Об органическом веществе в подземных водах Карелии // Органическое вещество и биогенные элементы в водах Карелии. Петрозаводск, 1985. С.93-104.

Aiken G.R. Organic matter in groundwater. United States Geological Survey, Open File Report 1989. https://water.usgs.gov/ogw/pubs/ofr0289/ga_organic.htm.

Chazhengina S.Y., Stepanova A.V., Ustinova V.V., Svetov S.A. Amorphous carbonaceous material in Paleoproterozoic pillow lavas (Onega Basin, NW Russia): Origin, source and migration // LITHOS. 2023. 460-461. 107373.

Zektser I. S., Everett L.G., Dzhamalov R.G. Submarine Groundwater. CRC Press, 2007.

McDonough L.K., Andersen M.S., Behnke M.I., Rutlidge H., Oudone Ph., Meredith K., O'Carroll D.M., Santos I.R., Marjo Ch.E, Spencer R.G.M., McKenna A.M., Baker A. A new conceptual framework for the transformation of groundwater dissolved organic matter // Nature communications. 2022. 13. 2153.

Osterholz H., Turner St., Alakangas L.J., Tullborg E-L, Dittmar Th., Kalinowski B.E., Dopson M. Terrigenous dissolved organic matter persists in the energy-limited deep groundwaters of the Fennoscandian Shield // Nature communications. 2022. 17. 13(1). 4837.

ENTRY OF ORGANIC MATTER AND BIOGENIC ELEMENTS WITH GROUNDWATER RUNOFF INTO LAKE ONEGA

G.S. Borodulina, G.A. Izotov

The article presents the results of the study of organic matter and biogenic elements in groundwater in Karelia and provides an estimate of their direct entry with groundwater runoff into Lake Onega. It is shown that groundwater in the region is characterized by low concentrations of organic matter and biogenic elements and their low share in the balance of Lake Onega. Domestic pollution leads to the accumulation of nitrates in groundwater. Direct inflow of groundwater from urbanized areas of the catchment area increases the entry of all components and especially the nitrate load on the lake.

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОЗЕРНЫХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА РЕСПУБЛИКИ ТЫВА

А.А. Бызаакай[1], А.О. Ховалыг[1], Т.В. Раудина[2], О.С. Покровский[3], С.Н. Кирпотин[2]

[1]Тувинский государственный университет

[2]Томский государственный университет

[3] Лаборатория геонаук окружающей среды Тулузы (GET)

В данном исследовании представлен пространственно-временной анализ географически различных озерных систем (пресные и соленые), в течение четырех гидрологических сезонов. Геохимическая характеристика каждой системы включала количественную оценку растворенного органического углерода (РОУ), растворенного неорганического углерода (РНУ) и ключевых макроэлементов (Na, Mg, P, K, Ca).

Поверхностные воды являются ключевыми компонентами глобального углеродного цикла, особенно с точки зрения выяснения сложного взаимодействия факторов, которые управляют динамикой растворенного углерода. Озера, как сложные микросистемы, представляют собой важные объекты для изучения транспортировки, трансформации и поглощения углерода. Понимание этой динамики имеет первостепенное значение для улучшения оценки воздействия изменения климата и для создания устойчивых климатических решений.

Объектами исследования выступили географически разнообразные озерные системы, представляющие собой разные по происхождению лимнологические системы: 1. два термокарстовых озера приуроченных к Алашскому плато, 2. соленое озеро Чедер недалеко от г. Кызыла, 3. проточное пресное озеро Чагытай в низовьях Восточной Танну-Ола, 5. бессточное озеро Торе-Холь в Убсунурской котловине. Пространственная неоднородность этих участков, продиктованная их геологическим контекстом и географическим распределением, вносит свой вклад в общее разнообразие набора получаемой информации.

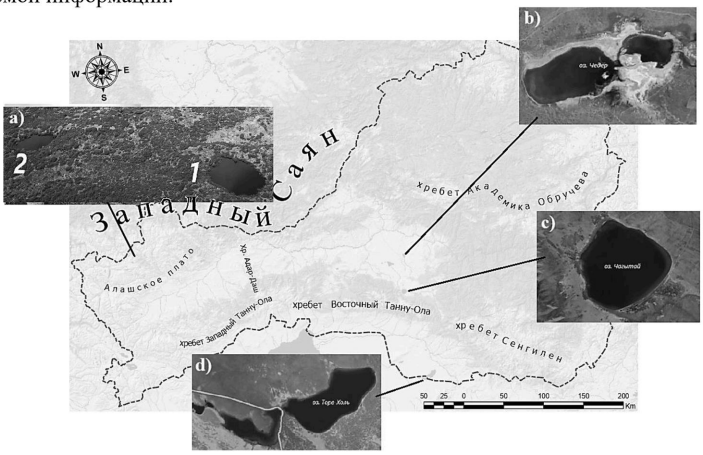


Рис. Месторасположение объектов исследования:
a) термокарстовые озера; b) оз. Чедер; c) оз. Чагытай; d) оз. Торе-Холь

Исследование включало комплексные полевые работы, проведенные в течение четырех различных гидрологических сезонов, с отбором проб для последующей обработки в лабораторных условиях и полевыми измерениями физико-химических показателей: температура, pH, электропроводность, растворенные газы (O_2 и CO_2). Для количественного определения РОУ и РНУ использовался лабораторный анализатор серии TOC-LCSN от Shimadzu, кроме того, для определения макроэлементов (Na, Mg, P, K, Ca), анализы выполнялись с использованием системы масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) в лаборатории GET в Тулузе.

Анализ водородного показателя выявил слабощелочную реакцию исследуемых вод, по степени электропроводности, наиболее пресные – термокарстовое озеро 1, термокарстовое 2, оз. Чагытай, оз. Торе-Холь, с наиболее высокими показателями в оз. Чедер.

Термокарстовые озера по размерам из изучаемых объектов характеризуются самыми малыми размерами – 0,3 и 0,1 км^2. Установлено, что в термокарстовых озерах растворенный органический углерод превалирует над неорганическим, что выражается в более опресненных солями водах, где ключевую роль в этом явлении играет многолетняя мерзлота (Таблица 1). По мере того, как многолетняя мерзлота тает, она высвобождает органический углерод, который мобилизуется в толщу воды, тем самым увеличивая концентрацию РОУ по сравнению с неорганическими формами углерода. Сезонный анализ показал минимум концентраций растворенного органического углерода в обоих термокарстовых озерах весной, где возможным фактором выступает

таяние ледового покрова (Tiwari, 2018), максимумы приходятся на разные сезоны: осень в термокарстовом озере 1, лето в термокарстовом озере 2. Влияние вечной мерзлоты не только повышает доступность растворенных органических соединений, но и вносит значительный вклад в геохимические характеристики – макрокомпоненты в данных озерах отмечаются в сравнительно малых количествах. По средним значениям по содержанию элементов в термокарстовых озерах преобладают Ca и K. Сезонные концентрации кальция (Ca) и калия (K) по отношению к натрию (Na) и магнию (Mg) различаются между термокарстовыми озерами. В озере 1 идет снижение концентраций осенью, тогда как в термокарстовом озере 2 наблюдается обратный тенденция. Наиболее низкие концентрации Na и Mg приходятся на весну, высокие на летний период, особенно сильное повышение натрия приходятся на термокарстовое озеро 2 (7,9 мг/л).

Таблица 1. Концентрации изучаемых показателей (среднее ± станд. откл.), мг/л

Тип	Термокарст.1	Термокарст. 2	Чедер	Чагытай	Торе-Холь
РОУ	9.24±0.76	6.75±1.058	-	4.28±0.53	10.11±3.39
РНУ	5.53±1.42	4.52±1.93	-	45.58±7.63	109.63±7.06
Na	0.4±0.15	3.4±3.94	22917±2790.7	36±20.54	79±11.5
Mg	0.75±0.104	0.88±0.52	2086±650.8	16±1.93	92.8±7.33
Ca	4.4±0.67	1.9±0.72	81.8±20.6	36.7±3.19	11.6±0.21
K	1.8±0.98	2.1±0.81	239.7±69.8	2.1±0.22	30.8±3.53
P	0.019±0.004	0.024±0.003	0.101±0.03	0.008±0.0044	0.009±0.0033

Озеро Чедер располагается недалеко от г. Кызыла в впадине и относится к рассолам. Анализ растворенного углерода не проводилось в оз. Чедер из-за больших показателей солености. В плане макроэлементов из-за гиперсолености их концентрации намного превышают остальные изучаемые объекты, где наиболее высокие концентрации приходятся на натрий, магний и калий. Осенью наблюдаются максимальные концентрации Na. Остальные анализируемые макроэлементы (Mg, K, Ca, P) демонстрируют пиковые концентрации зимой. Зимнее повышение концентраций могут быть связаны с рядом факторов, первый, ледяной покров препятствует физическому перемешиванию, второй, влияние бескислородных условий на химические реакции (Cavaliere, 2021). Наблюдаемое в зимний период повышение концентраций фосфора и практически нулевое содержание O_2 (0.69 мг/л) в водах озера согласуется с утверждением, фосфор в донных отложениях при бескислородных условиях становится более растворимым, что ведет к увеличению его содержания в толще воды, описанное E. Cavaliere.

Озеро Чагытай, из изучаемых объектов является единственной проточной. Из всех анализируемых озер, оз. Чагытай характеризуется относительно низкими концентрациями РОУ. Сравнительно низкие концентрации РОУ по сравнению с наблюдаемыми уровнями в термокарстовых озерах можно объяснить отличительными гидрологическими характеристиками – вытекающей рекой, которая может способствовать вымыванию органического вещества и приводить к общему снижению концентрации РОУ. В сезонной динамике, высокое содержание РОУ отмечается в летнее время, а РНУ в зимнее. Анализ макроэлементов показывает, что в озере преобладают натрий, кальций и магний. Наиболее значительная сезонная изменчивость наблюдается в концентрациях натрия, которые увеличиваются от 26 ± 4 мг/л (в среднем зимой, весной, летом) до 67 мг/л осенью.

Расположенное на юге региона исследования, в Убсунурской котловине, для бессточного оз. Торе-Холь характерен высокий степень испарения, что приводит к высокому содержанию РНУ. Сезонные тенденции показывают, что для обоих показателей растворенного углерода, самые высокие концентрация приходится на зиму,

низкие – на весну. Эти сезонные колебания можно объяснить недостаточным перемешиванием воды зимой, что способствует накоплению концентраций РОУ и РНУ. Расслоение воды под ледяным покровом ограничивает разбавление и смешивание растворенных веществ, что приводит к повышению уровня растворенных соединений углерода. Напротив, наступление весны характеризуется активным притоком талых вод, что способствует снижению концентрации этих соединений в озере (Tiwari, 2018). Анализ катионного состава озера выявил доминирование магния (Mg), за которым в порядке убывания следуют Na, K, Ca. Сезонная динамика показывает, что наибольший приток магния, натрия и калия приходится на зиму. Это явление может быть объяснено ограничениями, налагаемыми ледяным покровом, как и в случае с показателями растворенного углерода, который ограничивает газообмен и биохимические процессы в толще воды.

В целом, понимание сезонных колебаний как показателей растворенного углерода, так и концентраций макроэлементов имеет решающее значение для управления экосистемами озер и прогнозирования их реакции на изменения окружающей среды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-14-20015).

Литература

Cavaliere E., Baulch H. Winter in two phases: Long-term study of a shallow reservoir in winter // Limnology and Oceanography. 2021. V. 66, Iss. 4. P. 1335-1352.

Tiwari T., Sponseller R.A., Laudon H. Extreme climate effects on dissolved organic carbon concentrations during snowmelt // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2018. 123. P. 1277–1288.

BIOGEOCHEMICAL ANALYSIS OF LAKE SYSTEMS OF DIFFERENT GENESIS IN THE REPUBLIC OF TYVA

A.A. Byzaakay, T.V. Raudina, O.S. Pokrovsky, S.N. Kirpotin

This study presents a spatiotemporal analysis of geographically distinct lake systems (fresh and saline) during four different hydrological seasons. Geochemical characterization of each system included quantification of dissolved organic carbon (DOC), dissolved inorganic carbon (DIC) and key macronutrients (Na, Mg, P, K, Ca).

РОЛЬ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПРИ ПОСТУПЛЕНИИ ЖЕЛЕЗА В ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Е.А. Вахрамеева, Т.А. Жибарева
Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН

Представлены данные органического вещества (ОВ) и железа и их зависимость от гранулометрического состава донных осадков заливов и центральной части Онежского озера. Установлено, что накопление железа в донных отложениях увеличилось в связи с поступлением речных вод водосборной площади озера. Железо в составе взвесей, поступающих в донные отложения, находится преимущественно в форме оксидов, (FeO

Fe_2O_3), которые в результате захоронения и изменения окислительно-восстановительных условий подвергается диагенетическим преобразованиям.

Онежского озера состоит из 14 крупных объектов и более 30 малых губ и бухт. Нами было исследовано всего 5 (Центральное Онего, Большое Онего, Петрозаводская губа, Кондопожская губа, Уницкая губа). Площадь озера составляет 9720 км^2, средняя глубина 30 м, максимальная – 120 м, объем воды 295 км^3, площадь водосборного бассейна 53 100 км^2. Онежское озеро питают 152 реки, вытекает из озера р. Свирь (Калинкина и др., 2017).

Различия в процессе формирования донных отложений для разных районов Онежского озера, связанные как с естественными причинами (морфология котловины, речной сток, геологические и геоморфологические особенности водосбора и т. д.), так и с неравномерным распределением антропогенной нагрузки, явились основанием для разработки уникальной программы мониторинга донных отложений Онежского озера (Белкина, 2011).

Железо поступает в озеро как во взвешенной, так и в растворенной форме в виде комплексных соединений трехвалентного железа с гумусовыми веществами, а также металлоорганических комплексов железа двухвалетного которые легко ассоциируется с гуминовыми и фульвокислотами (Васильева, 1990).

Целью данного исследования является изучение гранулометрического состава и распределение в донных отложениях (ДО) органических веществ по содержанию потерь при прокаливании (ППП), органического углерода ($C_{орг}$), органического азота ($N_{орг}$) и железа в донных отложениях кернов Онежского озера.

Отбор кернов ДО в Онежском озере проводился в августе 2015 г. совместно с сотрудниками КарНЦ РАН поршневой трубкой длиной 50 см (модифицированный вариант стратометра Алексона) (Белкина, 2011). Дискретность отбора проб 5 см.

Во влажных образцах определялась естественная влажность при температуре 105±2 ^{0}C, гранулометрический состав и железо Fe(II) и Fe(III). В воздушно-сухих образцах - органическое вещество по содержанию ППП при 550 ^{0}C (Heiri et al., 2001). Расчет ППП проводили на абсолютно-сухую навеску.

Определение общего органического углерода и органического азота проводили методом сухого сжигания с последующим газохроматографическим разделением газовой смеси на CHN-анализаторе фирмы «Hewlett-Packard».

Гранулометрический состав ДО озер определяли в соответствии с МИ №88-16365-010-2017. Относительная погрешность измерения для всех гранулометрических фракций составляет от 19 до 29 %. Гранулометрические фракции представлены в классификации Н. А. Качинского (Логвиненко, 1988).

Определение реакционноспособных форм железа проводили 3,5 N серной кислотой, извлекающей в отсутствие нагревания железо из аморфных и слабо кристаллизованных гидроксидов и железосодержащих минералов (Соколов, 1980). Fe(II) определяли в аликвоте раствора титрованием $K_2Cr_2O_7$, Fe(III) – из другой аликвоты, титрованием $Na_2S_2O_3$ выделившегося I_2 после обработки KI.

Условия формирования донных отложений отдельных районов Онежского озера, прежде всего, определяются морфологией озерной котловины и объемом водной массы.

Так, седиментогенез в Центральном и Большом Онего контролируется механическим (гидродинамическим) барьером. По данным Н. И. Семеновича (1973), органическое вещество, оседающее на дно, переносится здесь с пелитовой фракцией (<0,01 мм). По особенностям стратификации донных отложений и условиям осадкообразования и северные губы Онежского озера (Кондапожская, Уницкая) характеризуются распространением по площади тонкодисперсных осадков.

Петрозаводская губа отличается наличием грубодисперсного осадка с черными прослойками (рис. 2).

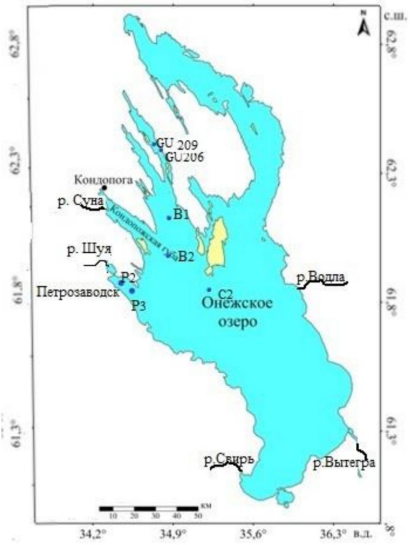


Рис. 1. Карта-схема отбора проб кернов донных отложений в Онежском озере

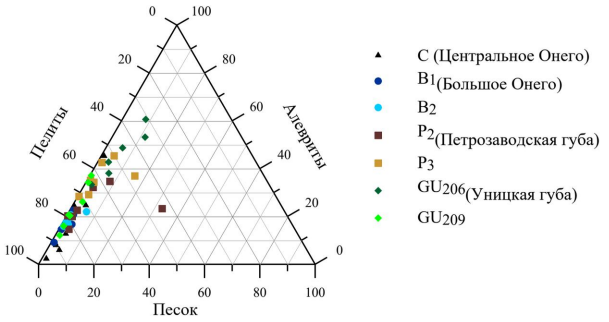


Рис. 2. Трехкомпонентная диаграмма гранулометрического состава донных отложений Онежского озера

Общее содержание органического вещества по параметру ППП практически одинаково и варьирует от 7,25 % до 10,04 % на всех станциях (средние значения). Также и содержание $C_{орг}$ в исследуемых ДО (от 0,87 % до 3,97 %) равномерно распределяется по глубине в изучаемых объектах. Повышенное содержание отмечено в Петрозаводской губе в поверхностном слое на ст. Р3 от 3,97 % до 2,33 % на глубине 35 см является следствием поступления сточных вод от г. Петрозаводска и близлежащих сельхозугодий.

Повышенные значения $C_{орг}$ на данной станции обусловлено значительным поступлением аллохтонного материала речного стока р. Шуя.

Среднее значение $C_{орг}/N_{орг}$ в поверхностном слое ДО составляет 14. Аллохтонное происхождение ОВ наблюдается в Центральном Онего ($C_{орг}/N_{орг}$-25), в Большом Онего на ст. В1 внизу керна ($C_{орг}/N_{орг}$-27), на ст. В2 в слое керна до 15 см ($C_{орг}/N_{орг}$-26). На станции GU-209 в Уницкой губе на глубине 8 см керна найдена самая высокая величина $C_{орг}/N_{орг}$ -206.

Аллохтонное ОВ поступает с водосборной площади (твердые и растворенные вещества речного стока, антропогенное вещество) и, именно, в побережье заливов, где берега обладают наибольшей устойчивостью и не подвержены существенным изменениям, происходит его активная трансформация.

На всех станциях количество Fe(II) распределяется по всей глубине колонок неравномерно от 0,25 % на ст. С2 до 2,63 % на ст. GU-209 в середине керна. А с трехвалентным железом наблюдается совсем иная картина. Высокие концентрации Fe(III) наблюдаются в поверхностном слое 0-8 см со средним значением – 5,86 % на ст. GU-209.

Общей закономерностью исследованных ДО на ст. С2 является наличие взаимосвязи между $C_{орг}$ и содержанием пелитовой фракции с коэффициентом корреляции $r_{0.95} = 0,92$ (n = 5) и содержанием железа Fe(III) на этой же станции, где $r_{0.95} = 0,92$ (n = 5). На ст. Р3 в Петрозаводской губе также обнаружена корреляция между $C_{орг}$ и содержанием железа Fe(III) с коэффициентом корреляции $r_{0.95} = 0,89$ (n = 7), Подобную зависимость наблюдали в Кондопожской губе в ДО на ст. К6 (Вахрамеева, Жибарева, 2024).

Таким образом, в исследованных донных осадках при невысоком содержании аллохтонного ОВ, поступающего с водосборной площади, наблюдаются повышенные концентрации железа Fe(III).

Литература

Белкина Н.А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. №4. С. 35-42.

Васильева Е.П. Донные отложения. Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. С. 147–175.

Вахрамеева Е.А., Жибарева Т.А. Распределение гранулометрического состава, органического вещества и железа донных отложений Кондопожской губы (Онежское озеро) // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. №5. С. 18-27.

Калинкина Н.М., Теканова Е.В., Сярки М.Т. Экосистема Онежского озера: реакция водных сообществ на антропогенные факторы и климатические изменения // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. №1. С. 4–18.

Логвиненко Н.В., Сергеева Э.И. Методы определения осадочных пород. Л.: Недра, 1986. 240 с.

МИ 88-16365-010-2017. Донные отложения водоемов. Определение гранулометрического состава ситовым и пипеточным методами.

Семенович Н.И. Донные отложения Онежского озера. Л., 1973. 102 с.

Соколов В.С**.** Химический анализ морских осадков. М: Химия, 1980.

Heiri O., Lotter A., Lemeke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibilility and comparability of results. // J. of Paleolimnol. 2001. V. 25. P. 101–110.

THE ROLE OF ORGANIC MATTER IN THE INPUT OF IRON THE BOTTOM SEDIMENTS OF ONEGA LAKE

E.A. Vakhrameeva, T.A. Zhibareva

The data on organic matter and iron and their dependence on the grain-size composition of bottom sediments in of the bays and the central part of Onega Lake are presented. It is established that the accumulation of iron in bottom sediments has increased due to the influx of river water from the lake catchment area. Iron in the composition of sediments suspensions is presented mainly in the form of oxides (FeO Fe_2O_3), which undergo diagenetic transformations as s result of burial and changes in oxidation-reduction conditions.

ОЦЕНКА ЭМИССИИ МЕТАНА С ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ПО ДАННЫМ СЪЕМОК

М.Г. Гречушникова[1,2], В.А. Ломов[1], В.С. Казанцев[3]
[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
[2]Институт водных проблем РАН
[3]Институт физики атмосферы РАН

В статье представлено обобщение материалов комплексных съемок Иваньковского водохранилища, проведенных в 2022-2024 гг. с целью изучения сезонных изменений содержания метана в воде и его эмиссии с поверхности водоема. Измерения проведены методом камер. Значения удельного потока метана на продольном и поперечных разрезах значительно различались во второй половине лета при установлении бескислородных условий в придонном слое. Наибольшее значение удельного потока метана приурочено к участку со значительной антропогенной нагрузкой (от устья Шошинского плеса до г. Конаково. Предложена методика оценки эмиссии метана с водохранилища с учетом факторов, определяющих его удельный поток. Показаны сезонные изменения эмиссии, обосновано учащение проведения измерений и необходимость измерений потока метана над разнотипными макрофитами.

Актуальность исследования эмиссии метана из искусственных водоемов связана с малой изученностью данного вопроса в РФ и отсутствием регулярных наблюдений подобного рода. Из-за различных погодных условий, проточности и уровенного режима межгодовая вариация выхода метана в один и тот же период для водохранилища может быть значительна, как было показано на примере Иваньковского водохранилища в (Гречушникова и др., 2023): в 2020 и 2021 г. удельный поток метана в начале августа отличался на 1−2 порядка на одних и тех же станциях. Данная работа обобщает новейшие данные, полученных в период с августа 2022 г. по март 2024 г. (5 съемок) и демонстрирует сезонные изменения содержания и эмиссии метана исследуемом водоеме и причины их пространственно-временных изменений.

Иваньковское водохранилище с 1937 осуществляет сезонное регулирование стока р. Волги (коэффициент водообмена 10.3 год$^{-1}$). Водохранилище относится к долинному типу и имеет сложную морфологическую структуру, определяющую эколого-биологические различия плесов (Никаноров, 1975). Наиболее мелководный его участок это обособленный железнодорожной дамбой Шошинский плес Подпор водохранилища распространяется до г. Твери (Иваньковское..., 2000). В последние десятилетия отмечается значительный рост селитебной территории на правобережье на участке от п. Новозивидовский до г. Конаково. Донные отложения (ДО) водоема представлены

первичными трансформированными и вторичными грунтами с различным содержанием органического вещества (ОВ). Суммарная площадь таких отложений, как галька, песок, илистый песок и песчанистый ил составляет 166.9 км^2, или 58.2%. Остальную долю занимают заболоченные почвы, серый и торфянистый ил и отложения из макрофитов (Законнов и др., 2018). Зарастание Иваньковского водохранилища характеризуется массовым распространением болотных растений и образованием в заливах сплавин, что особенно значительно выражено на Шошинском плёсе. По оценкам на 2012 г. переход сплавин в заболоченные почвы оценен в 40 км^2 или 14% площади водохранилища (Законнов и др., 2018).

Съемки водохранилища были проведены 5-6.08.2020, 4-5.08.2021, 4-5.08.2022, 15−16.05.2023, 04−05.08.2023, 31.05-1.06.2024, 2-3.08.2024 в интервале 9-21 ч. По данным (https://allrivers.info/) уровень воды в дни измерений составлял 123,98; 123,83 123,46; 123,73; 123,92, 123,67, 123,63 абс. м соответственно. Виды работ на станциях съемок: измерение вертикального распределения температуры воды, растворенного кислорода, электропроводности, прозрачности воды, метеорологических характеристик над водой. Отбор проб воды производился из поверхностного и придонного горизонта на фарватере (над затопленным руслом), а в последние три съемки дополнительно над затопленной поймой р. Волги в створе русловой станции. Концентрацию метана в пробах воды определяли методом «headspace» (Bastviken et al., 2010). Удельный поток метана в атмосферу определяли методом «плавучих камер» (Bastviken et al., 2004). Содержание метана определялось на газовом хроматографе Хроматэк-Кристалл 5000.2. Определение органического вещества в донных отложениях производилось методом потерь при прокаливании.

Для первичной оценки эмиссии метана авторы предлагают районировать водоем: выделить характерные участки в соответствии с глубиной и особенностями гидроэкологического режима: 1) Тверь − п. Видогощи, 2) п. Видогощи − д. Плоски, 3) д. Плоски – устье р. Созь, 4) устье р. Созь − о. Клинцы, 5) о. Клинцы − плотина ГЭС, 6) Шошинский плес. Для всех районов, кроме первого, принять соотношение разнотипных по выделению метана донных отложений 60% (песок, заиленный песок) к 40% (ил, опесчаненный ил) согласно (Законнов и др., 2018). Для первого района принять характерными песчаные донные отложения. В каждом районе задать коэффициент выброса метана в соответствие со средними данными натурных измерений за съемку над руслом и над поймой. При отсутствии данных над поймой принять значения по аналогии в соответствии с глубиной (для первого и шестого районов аналог − шестой район). Результаты оценочного расчета приведены в таблице. Данные о батиграфической кривой приняты по Приказу Росводресурсов (Приказ …, 2019), распределение площадей по отсекам принято по (Гидрометеорологический …,1973).

Минимальные значения суммарной суточной эмиссии (до 4.2 тС/сут) приходятся на начало вегетационного периода, что обусловлено невысокими значениями удельного потока метана, который в этот период еще не имеет значительных пространственных различий. Летние съемки были проведены примерно в одно время – в первую декаду августа, что позволяет сравнивать результаты. Суммарная эмиссия изменяется в этот период в широких пределах: от 5.4 до 57.2 тС/сут. Такой разброс обусловлен различным сочетанием таких факторов, как уровень воды, атмосферное давление и предшествовавшие синоптические условия, которые способствовали формированию определенной структуры водной толщи. Минимальная эмиссия в период съемки 2020 г. обусловлена как высоким уровнем воды, так и прохладной погодой и хорошей аэрацией водной толщи.

Таблица. Расчет эмиссии метана в период проведения съемки (т С в сутки)

Характеристики	Номера отсеков водохранилища						Итого за съемку, тС/сут	Давление, Гпа
	1	2	3	4	5	6		
5-6.08. 2020							5.43	1001
Площадь (123.98 м абс), км^2	17.10	28.25	32.10	71.11	75.91	94.59		
УП метана над русловыми станциями, мгС/м^2·сут	63	9.15	9.15	9.75	2.85	30.60		
Итого для района, тС/сут	1.08	0.26	0.29	0.69	0.22	2.89		
4-5.08. 2021							53.97	999
Площадь (123.83 м абс), км^2	16.93	27.83	31.93	69.26	74.39	93.61		
УП метана над русловыми станциями, мгС/м^2·сут	10.5	31.9	31.9	223.8	68.9	334.00		
Итого для района, тС/сут	0.18	0.89	1.02	15.50	5.13	31.26		
4-5.08. 2022							13.69	1009
Площадь (123.46 м абс), км^2	16.52	26.79	31.52	64.69	70.65	91.17		
УП метана над русловыми станциями, мгС/м^2·сут	13.2	110.4	7.8	12.9	1.2	102.50		
Итого для района, тС/сут	0.22	2.96	0.25	0.83	0.08	9.35		
15-16.05.2023							0.77	1010
Площадь (123.81 м абс), км^2	16.82	27.55	31.82	68.02	73.38	92.95		
УП метана над русловыми станциями, мгС/м^2·сут	4.4	3.9	1.99	1.94	0.29	3.97		
Итого для района, тС/сут	0.07	0.11	0.06	0.13	0.02	0.37		
3−4.08. 2023							14.01	995
Площадь (123,92 м абс), км^2	17.03	28.08	32.03	70.37	75.30	94.20		
Песчаные отложения 60% (100% для р-на 1), км^2	17.9	16.86	19.68	43.26	44.89	37.68		
Ил, затопленные почвы, отложения из макрофитов (40%), км^2	0	11.24	13.12	28.84	26.94	56.52		
УП метана для песчаных отложений, мгС/м^2·сут	5.6	4	2.5	20.1	2.7	4.00		
УП метана для илистых отложений, мгС/м^2·сут		290	96	142	3	70.00		
Итого для района, тС/сут	0.1	3.33	1.31	4.96	0.2	4.11		
31.05-1.06.2024							4.21	1004
Площадь (123,67 м абс), км^2	16.75	27.38	31.75	67.28	72.78	92.55		
Песчаные отложения 60% (100% для р-на 1), км^2	16.84	15.96	19.14	40.91	42.95	37.02		
Ил, затопленные почвы, отложения из макрофитов (40%), км^2	0	10.64	12.76	27.28	25.77	55.53		
УП метана для песчаных отложений, мгС/м^2·сут	25.7	21.3	12.1	2.9	2.3	4.50		
УП метана для илистых отложений, мгС/м^2·сут		74	34.5	5.7	2	25.10		
Итого для района, тС/сут	0.43	1.13	0.67	0.27	0.15	1.56		
2-3.08.2024							57.16	992

Характеристики	Номера отсеков водохранилища						Итого за съемку, тС/сут	Давление, Гпа
	1	2	3	4	5	6		
Площадь (123,63 м абс), км^2	16.71	27.27	31.71	66.79	72.37	92.29		
Песчаные отложения 60% (100% для р-на 1), км^2	16.67	15.81	19.06	40.54	42.64	36.92		
Ил, затопленные почвы, отложения из макрофитов 40% (100% для р-на 5), км^2	0	10.54	12.7	24.32	25.58	55.37		
УП метана для песчаных отложений, мгС/м^2·сут	39.7	19.2	67.2	8.8	108.8	19.20		
УП метана для илистых отложений, мгС/м^2·сут		21.7	131.3	102.4	75.1	774.70		
Итого для района, тС/сут	0.66	0.53	2.95	2.85	6.56	43.61		

В противоположность этой съемке в августе 2021 и 2024 г. жаркая погода, обусловившая наличие бескислородных условий в придонном горизонте, и пониженный уровень воды способствовали формированию большего потока. Самым жарким летним периодом отличался 2022 г., но бурное цветение с пересыщением поверхностного слоя кислородом и высокое давление обусловили относительно небольшую эмиссию (13.7 тС/сут), несмотря на самый низкий уровень воды, а в 2023 г., несмотря на низкое атмосферное давление, высокий уровень воды обусловил небольшой удельный поток. Т.е. наибольшая эмиссия наблюдалась при сочетании трех факторов: пониженный уровень воды, пониженное атмосферное давление и низкое содержание кислорода в придонном горизонте, что имело место в 2021 и 2024 гг. Итого средневзвешенный поток в мае оценивается в 2.5-13.7 мгС/м^2·сут, а в августе 17.2-187.7 мгС/м^2·сут (в среднем 93,3).

Если не учитывать поперечную дифференциацию потока метана, связанную с различием содержания органического вещества в донных отложениях на глубоководных (затопленное русло) и мелководных (затопленные пойма, острова) станциях, и по аналогии с первыми съемками в 2020-2022 гг. использовать только результаты измерений над руслом, то эмиссия за последние три съемки составит 28,1; 6,4 и 89,2 тС/сут, что в 1,5-2 раза больше. Также следует отметить, что измерения велись только в дневное время, и расчеты не учитывают возможное наличие внутрисуточных изменений, что не освещено наблюдениями.

Сравнение полученных значений УП метана с данными (Johnson et al., 2021), которые использованы для глобальной оценки выбросов метана водохранилищами, показали, что измеренные авторами потоки значительно ниже тех, что приведены в упомянутой публикации: для мая 135 мгС/м^2·сут, а для августа 240 мгС/м^2·сут. По сравнению с другими водохранилищами Волжско-Камского каскада (Гречушникова и др., 2023) интервал изменения УП метана с Иваньковского водохранилища (0.2-334 мгС/м^2·сут) близок к Рыбинскому (2.4-315 мгС/м^2·сут). Для Горьковского, Куйбышевского и Волгоградского водохранилищ наибольшие значения УП метана на порядок меньше. Это значит, что глобальные оценки выбросов метана водохранилищами умеренной зоны, для которых были использованы указанные в (Johnson et al., 2021) коэффициенты, завышены и требуют уточнений.

По результатам полевых кампаний получены данные о внутригодовом изменении содержания метана в водной толще и его эмиссии с поверхности Иваньковского водохранилища в 2020-2024 гг.

Показаны значительные изменения потока метана в различные периоды открытой воды, расчет суммарной эмиссии с поверхности воды подтверждает ее изменение на

порядок от мая к августу в зависимости от гидрологической структуры водной толщи, уровня воды и атмосферного давления.

Основной фактор, определяющий удельный поток метана в пределах морфологически однородных районов, это не глубина, а состав донных отложений.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 24–27–00034, обработка проб на хроматографе произведена при поддержке ЛПГ ИФА РАН (госзадание 1022030400001–9 «Мониторинг и анализ динамики эмиссии парниковых газов из наземных и пресноводных экосистем арктической зоны России»).

Литература

Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водохранилища Верхней Волги. Л.: Наука, 1973. 158 с.

Законнов В.В., Григорьева И.Л., Законнова А.В. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги // Водное хозяйство России. 2018. №3. С. 35–48.

Иваньковское водохранилище: Современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука, 2000. 344 с.

Никаноров Ю.И. Иваньковское водохранилище // Известия ГосНИОРХ. 1975. Т. 102. С. 5–25.

Приказ Росводресурсов от 31.05.2019 №125 «Об утверждении Правил использования водных ресурсов Иваньковского водохранилища на р. Волге».

Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate, Global Biochemical Cycles. 2004. V. 18. P. 1–12.

Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling. 2010. V. 44, №14. P. 5450–5455.

ASSESSMENT OF METHANE EMISSION FROM THE IVANKOVSKOYE RESERVOIR BASED ON SURVEY DATA

M.G. Grechushnikova, V.A. Lomov, V.S. Kazantsev

The article presents a summary of the materials of complex surveys of the Ivankovskoye Reservoir, conducted in 2022-2024 in order to study seasonal changes in the methane content in water and its emission from the surface of the reservoir. The measurements were carried out using the chamber method. The values of the specific methane flow in the longitudinal and transverse sections differed significantly in the second half of the summer when anoxic conditions were established in the bottom layer. The highest value of the specific methane flow was confined to the area with significant anthropogenic load (from the mouth of the Shoshinsky reach to the town of Konakovo. A method for assessing methane emissions from a reservoir is proposed, taking into account the factors determining its specific flow. Seasonal changes in emissions are shown, and the need for more frequent measurements and the need to measure methane flow over different types of macrophytes are substantiated.

МЕЖГОДОВАЯ И ВНУТРИГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ВОДЫ ОЗЕР СТЕРЖ И СЕЛИГЕР (БАССЕЙН ВЕРХНЕЙ ВОЛГИ)

И.Л. Григорьева[1], В.В. Кузовлев[2, 3], Е.А. Чекмарева[4]
[1]Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН
[2]Тверской государственный технический университет
[3]Тверской центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиал ФГБУ «Центральное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»
[4]Иваньковская научно-исследовательская станция – филиал Института водных проблем РАН

Проанализировано изменение показателей качества воды озер Стерж и Селигер в 2020–2024 гг. Выявлена межгодовая и внутригодовая изменчивость величин большинства показателей. Установлено, что максимальные зафиксированные концентрации металлов превышают предельно допустимые для рыбохозяйственных водоемов. Отмечено увеличение содержание свинца, никеля и марганца в воде озер, по сравнению с началом 21 века.

Актуальность исследований вод Селигера и Верхневолжских озер, одним из которых является озеро Стерж, определяется их ведущей ролью в формировании водного баланса и качества вод верхней Волги, являющихся основным источником водоснабжения Московской агломерации (Суслова и др., 2015). Исследование качества воды этих водоемов особенно возрастает в связи с климатическими изменениями и увеличивающейся рекреационной нагрузкой.

Озеро Стерж (ложбинное) – первое, через которое проходит верхнее течение реки Волги. Является частью Верхневолжского водохранилища. Берега озера, относительно высокие, дно и берега сложены песком и галькой (Григорьева и др., 2024). Селигер – цепочка озер ледникового происхождения, соединенных между собой протоками, расположенными на Валдайской возвышенности, на границе Тверской и Новгородской областей. Площадь водосбора, согласно данным Государственного водного реестра – 2310 км^2. Озеро питают 110 притоков, а сток из озера происходит по р. Селижаровке (левый приток р. Волги) (Григорьева и др., 2024). Морфометрические характеристики озер Стерж и Селигер представлены в таблице 1.

Таблица 1. Морфометрические характеристики исследованных озер (Григорьева и др., 2019)

Озера	Площадь водного зеркала, км^2	Длина, км	Ширина, км	Глубина, м (максимальная/ средняя)	Отметка уреза воды, м	Длина береговой линии, км
Селигер	212	–	–	24/5.2	205.0	500
Стерж	18	12	до 1.5	8/5	206.5	–

Для оценки качества воды исследованных озер использованы данные регулярных мониторинговых наблюдений Тверского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды на озере Стерж (д. Коковкино) и оз. Селигер (г. Осташков) за 2020–2024 гг. Диапазоны изменения показателей качества воды представлены в таблицах 2–5. Оценка качества производилась в сравнении с предельно-допустимыми концентрациями для рыбохозяйственных водоемов, с концентрациями, характерными для незагрязненных вод (Зенин, Белоусова, 1988) и в сравнении с данными, полученными ранее авторами и другими исследователями. Глубина вертикали отбора

проб воды на озере Стерж равнялась 3 м, а на озере Селигер – 10 м. Отбор проб воды производился из поверхностного и придонного горизонтов в феврале, апреле, мае и августе каждого из исследованных лет.

Анализ величин pH в воде оз. Стерж, показал, что наблюдается внутригодовая и межгодовая изменчивость этого параметра. В 2021–2023 гг. наибольшие значения наблюдались в мае-августе, а наименьшие – в апреле. В 2020 г. наоборот наибольшие значения отмечались в апреле. В основном величина pH колебалась в интервале 6,5-8,5, но иногда отмечались значения немного меньше нижнего и немного выше предела нормы.

Таблица 2. Диапазоны значений гидрохимических характеристик оз. Стерж (д. Коковкино) в поверхностном горизонте за период с 2020 по 2024 гг.

Источник информации	Показатель						
	pH, ед. pH	O_2, мг/л	% нас. O_2	Цв., град. Pt-Co шкалы	Ж, мг-экв/л	∑ионов, мг/л	P-$PO4^{3+}$, мгР/л
Данные авторов	6.3-8.7	3.9-15.7	42-142	49-141	0.6-1.5	60-122	0.002-0.030
$ПДК_{рыб.}$	6.5-8.5	>6 летом >4 зимой	–	–	–	1000	0.05 – для олиготрофных
Суслова др., 2015	7-7.7	–	–	–	–	80-90	0.013-0.062

Таблица 3. Диапазоны значений гидрохимических характеристик оз. Селигер (г. Осташков) в поверхностном горизонте за период с 2020 по 2024 гг.

	Показатель						
	pH, ед. pH	O_2, мг/л	% нас. O_2	Цв., град. Pt-Co шкалы	Ж, мг-экв/л	∑ионов, мг/л	P-$PO4^{3+}$, мгР/л
Данные авторов	6.9-8.3	8.2-14.7	85-114	17-64	0.8-1.4	76-117	0.001-0.012
$ПДК_{рыб.}$	6.5-8.5	>6 летом >4 зимой	-	-	-	1000	0.05 – для олиготрофных
Суслова, др., 2015	6.3-7.7					70-100	0.005-0.025

Таблица 4. Диапазон изменения концентраций тяжелых металлов (мкг/л) за период с 2020 по 2024 гг. в поверхностном/придонном горизонтах пункта наблюдений оз. Стерж (д. Коковкино)

Источник информации	$Fe_{общ.}$	Mn	Cu	Zn	$Cr_{общ.}$	Pb	Ni
Данные авторов	40-340/ 160-510	1.5-226/ 2.20-145	0.5-35/ 0.4-8.2	8-47/ 8-42	0.2-3/ 0.2-3.5	0.2-7/ 0.1-10.2	0.5-7/ 0.4-6.5
$ПДК_{рыб.}$	100	10	1	20	-	5	5
$К_{п.в.}$ (Зенин, Белоусова, 1988)	10-90	1-160	2-30	3-120	0.1-1	0.8-10	>1
Региональный фон (Шилькрот, Кудерина, 2003)	-	24	9	-	1.6	5	5
Труды …, 2006	420-1080	56-130	1-1.3	6.7-15.6	5.1-9.0	0.38-0.6	0.38-1.8

В озере Селигер изменчивость величины pH внутри года была менее выражена (табл. 3), чем в оз. Стерж. Наблюдались различия значений между годами, но все зафиксированные величины попадали в интервал 6,5-8,5 ед. pH. В озере Стерж

практически во все сезоны последних пяти лет кислородный режим был благоприятный, за исключением августа 2020 г., когда в поверхностном и придонном горизонтах наблюдался дефицит кислорода (42% насыщения).

В более глубоком озере Селигер в августе 2023 г. содержание кислорода у дна снизилось практически до нуля. Значительное недосыщение кислородом (64%) отмечалось также в начале августа жаркого 2022 г. Вода в обоих озерах отличается низкой жесткостью (менее 1,5 мг-экв/л), что соответствует категории «очень мягкая» и малой минерализацией. В оз. Стерж сумма главных ионов во все исследованные годы и сезоны не превышала 122 мг/л в поверхностном горизонте и 140 мг/л – в придонном. Сумма главных ионов в озере Селигер изменялась в диапазоне 76-120 мг/л. Как правило, самые низкие значения отмечались в апреле, а наибольшие – в феврале. Величины летних показателей pH, жесткости и суммы главных ионов сопоставимы с данными, приведенными в (Григорьева, Комиссаров, 2014). В оз. Стерж в 2020–2024 гг. вода была более цветной, чем в озере Селигер. Наиболее высокие значения цветности отмечались в феврале и апреле, а наиболее низкие в августе. В летний период в первом озере цветность во все годы наблюдений изменялась от года к году незначительно (47 - 65 град. Pt-Co шкалы). Зимой значения цветности колебались в более широком диапазоне и достигали 141-153 град. Pt-Co шкалы в феврале 2024 и 2023 гг. и 76 и 88 град. Pt-Co шкалы в 2021 и 2022 гг. соответственно. Цветность воды озера Селигер изменялась летом в диапазоне от 31 до 47 град. Pt-Co шкалы, а в апреле 17-63 град. Pt-Co шкалы. Концентрации фосфатов (табл. 2,3) в пересчете на фосфор в воде обоих озер были значительно ниже $ПДК_{рыб.}$ для олиготрофных водоемов и ниже, чем отмечено в (Суслова и др., 2015). Наибольшие концентрации нитратов во все годы зафиксированы зимой.

Наибольшие концентрации железа общего во все годы наблюдались в воде оз. Стерж в феврале и апреле, а наименьшие значения отмечены в августе. Внутригодовая изменчивость концентраций железа общего более выражена, чем межгодовая. Максимальные концентрации марганца отмечались зимой, а минимальные летом. Внутригодовые различия концентраций меди, никеля, хрома и свинца слабо выражены. Но для большинства микроэлементов характерны межгодовые различия. Максимальные зафиксированные концентрации всех тяжелых металлов превышали $ПДК_{рыб.}$ (табл. 4). Зафиксированы концентрации всех тяжелых металлов, превышающие значения, приведенные в (Шилькрот, Кудерина, 2003; Труды ..., 2006). В воде озера Селигер (табл. 5) зафиксированы более низкие, чем в оз. Стерж, концентрации железа общего, в основном не превышающие $ПДК_{рыб.}$ и $К_{п.в.}$. Наблюдались внутригодовые и межгодовые различия концентраций всех микроэлементов.

Таблица 5. Диапазон изменения концентраций тяжелых металлов (мкг/л) за период с 2020 по 2024 гг. в поверхностном/придонном горизонтах в пункте наблюдений оз. Селигер (г. Осташков)

Источник информации	$Fe_{общ.}$	Mn	Cu	Zn	$Cr_{общ.}$	Pb	Ni
Данные авторов	20-100/ 20-90	1-70/ 1-94	0.4-6.8/ 0.4-7.4	8-44/ 11-33	0.3-3.4/ 0.2-4	0.04-4.8/ 0.2-6.9	0.3-5.5/ 0.5-6.3
$ПДК_{рыб.}$	100	10	1	20	-	5	5
$К_{п.в.}$ (Зенин, Белоусова, 1988)	10-90	1-160	2-30	3-120	0.1-1	0.8-10	>1
Региональный фон (Шилькрот, Кудерина, 2003)	-	24	9	-	1.6	5	5

Качество воды по гидрохимическим показателям водных объектов, начиная с 2002 г. по настоящее время, оценивается организациями Гидрометеослужбы комплексным критерием УКИЗВ. В 2006 г. по этому индексу вода в оз. Селигер характеризовалась как «очень загрязненная» (3 класс), в 2007-2009 гг. как

«загрязненная», а, начиная с 2010 г., как «слабо загрязненная» (2 класс) (Шапоренко, Кузовлев, 2016). В 2020-2023 гг. качество воды в озере Селигер соответствовало классу «загрязненная». Вода оз. Стерж в 2020 и 2023 гг. соответствовала классу «очень загрязненная», а в 2021 и 2022 гг. – «загрязненная».

Мониторинговые исследования в 2020-2024 гг. показали, что вода озер Стерж и Селигер по-прежнему гидрокарбонатно-кальциевая, малой минерализации. Кислородный режим в основном благоприятный. Наиболее выраженная межгодовая и внутригодовая изменчивость характерна для таких показателей как железо общее, марганец и цветность. Настораживает увеличение концентраций свинца, никеля и хрома в воде озер в последние годы. Озеро Селигер по-прежнему остается наиболее чистым водоемом бассейна верхней Волги и Тверской области. Концентрации, зафиксированные в воде озера Селигер, могут использоваться в качестве фоновых значений для других водных объектов бассейна верхней Волги, испытывающих антропогенный пресс.

Работа выполнена в рамках темы 124032100076-2 Государственного задания ИБВВ РАН.

Литература

Григорьева И.Л., Комиссаров А.Б. Сравнительная гидрохимическая оценка современного состояния некоторых водных объектов Верхней Волги // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, №3. С. 269-283.

Григорьева И.Л., Комиссаров А.Б., Кузовлев В.В., Чекмарева Е.А. Современное состояние качества воды различных типов озер Тверской области // Материалы II Международной конференции «Озера Евразии: проблемы и пути их решения». Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2019. Ч. 2. С. 60−65.

Григорьева И.Л., Комиссаров А.Б., Кузовлев В.В., Чекмарева Е.А. Сравнительная гидрохимическая характеристика различных типов озер Тверской области // Вестник Тверского государственного университета. Сер. География и геоэкология. 2024. №1. С. 13–22.

Зенин А.А., Белоусова Н.В. Гидрохимический словарь. Л.: Гидрометеоиздат. 1988. 239 с.

Суслова С.Б., Шилькрот Г.С., Кудерина Т.М. Гидрогеохимическая характеристика вод Селигера и верхневолжских озер (по многолетним данным) // Сборник материалов VI Международной научной конференции «Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах». Белгород: Политерра, 2015. С. 324−328.

Труды Пресноводного Исследования. Der AndereVerlag, 2006. Т. 1. Отчет об экспедиции по Верхней Волге (2005). 140 с.

Шапоренко С.И., Кузовлев В.В. Многолетние тенденции изменения качества воды озера Селигер в районе г. Осташкова // Сборник научных трудов Всеросс. конф. по крупным внутренним водоемам (V Ладожский симпозиум). СПб: Изд-во «Лема», 2016. С. 449–454.

Шилькрот Г.С., Кудерина Т.М. Характеристика потоков веществ в системе озеро Селигер – река Селижаровка // Материалы международной научно-практической конференции «Туризм, экология и устойчивое развитие». Тверь: Тверской государственный университет, 2003. С. 426−432.

INTERANNUAL AND INTRAANNUAL VARIABILITY OF WATER QUALITY INDICATORS OF LAKE STERZH AND SELIGER (UPPER VOLGA BASIN)

I.L. Grigoryeva, V.V. Kuzovlev, E.A.Chekmareva

The changes in the water quality indicators of Lake Sterzh and Seliger in 2020-2024 are analyzed. The interannual and intraannual variability of the values of most indicators has been revealed. It has been established that the maximum recorded concentrations of trace elements exceed the maximum permissible concentrations for fishery reservoirs. An increase in the content of lead, nickel and manganese in lake water has been noted, compared with the beginning of the 21st century.

БИОАККУМУЛЯЦИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МОЛЛЮСКАМИ DREISSENA POLYMORPHA В ИВАНЬКОВСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Е.С. Гришанцева[1], Л.П. Федорова[2], М.Л. Григорьева[1], И.Ю. Николаева[1], М.Е.Тарнопольская[1]

[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

[2]Институт водных проблем РАН, Иваньковская научно-исследовательская станция

В работе приводятся результаты определения концентраций ряда элементов в мягких тканях и раковинах двустворчатых моллюсков вида *Dreissena polymorpha* Pallas в Иваньковском водохранилище в 2023 г. Рассчитанные значения коэффициентов биологического поглощения относительно поверхностных и иловых вод, а также мелкодисперсной фракции донных осадков, свидетельствуют о высокой биоаккумулирующей способности моллюсков данного вида в отношении Cd, Pb, V, Cr, Cu, Zn.

Ареал обитания моллюсков семейства дрейссенид в России, который изначально ограничивался южными частями бассейнов Черного, Каспийского и Азовского морей, к началу 21-ого века значительно расширился и в настоящее время представители этого вида расселились во многих регионах с благоприятными для жизнедеятельности климатическими, гидрологическими и гидрохимическими условиями, распространившись на севере до 62 параллели, на востоке – до бассейна р. Камы. В верхневолжских водохранилищах это семейство представлено двумя видами – дрейссеной речной или полиморфной (Dreissena polymorpha Pallas) и дрейссеной бугской (Dreissena bugensis Andrusov). В Иваньковском водохранилище обитает только Dreissena polymorpha Pallas, которая была обнаружена в водохранилище еще в середине прошлого столетия (цит. по Федорова, 2023). Этот вид относится к числу наиболее вредных и опасных инвазивных видов как в России, так и во всем мире (Самые…, 2018) и не является аборигенным для Верхней Волги. Моллюски этого вида являются организмами-фильтраторами, способны быстро размножаться, находятся в прикрепленном к одному месту состоянии большую часть жизни, являются важным звеном пищевых цепей, что делает этот вид перспективным объектом для биомониторинга загрязненных водоемов.

Цель исследований – выявление закономерностей биоаккумуляции ряда элементов (Cd, Pb, V, Cr, Cu, Zn) дрейссеной речной (Dreissena polymorpha Pallas) в Иваньковском водохранилище.

Отбор проб проводился на одном из Верхневолжских водохранилищ - Иваньковском водохранилище, которое находится в Московской области между

городами Тверь и Дубна и используется главным образом для целей питьевого водоснабжения города Москвы, а также гидроэнергетики, судоходства, рыбного хозяйства и рекреации. Пробоотбор донных осадков, поверхностных вод и гидробионтов проводился в июле 2023 г. в створах Корчева, водозабор Конаковской ГРЭС, в устьевой зоне Мошковического залива (рис. 1). Кроме того, отбор проб проводился в местах с высокой антропогенной нагрузкой на водоем – в устье р. Донховка и в месте сброса сточных вод в Мошковическом заливе. Донные отложения отбирали с помощью дночерпателя в пластиковые емкости, масса каждой пробы составляла 500 гр. Поверхностные воды отбирали из горизонта 1-1,5 метра от поверхности с помощью горизонтального батометра и сразу фильтровали через шприц-насадку с ацетатно-целлюлозным мембранным фильтром с диаметром пор 0.45 мкм для удаления взвеси, затем пробы воды подкисляли 0.5 мл HNO_3 марки ОСЧ на 15 мл пробы. В лаборатории из проб донных осадков мокрым ситованием выделяли тонкодисперсную фракцию размерностью менее 0.1 мм, которую переносили в фарфоровые тигли и высушивали при 105^0С до постоянной массы. Иловые воды выделяли из донных осадков центрифугированием, затем фильтровали через шприц-насадки, как поверхностные воды. Образцы моллюсков отбирались с помощью драги с площади 1 $м^2$ в пластиковые контейнеры. В лаборатории двустворчатых моллюсков промывали от взвеси в дистиллированной воде и хранили в замороженном виде. Перед анализом на содержание металлов дрейссену размораживали, препарировали на мягкие ткани и раковины, измеряли размер и массу. Моллюски были разделены на две возрастные группы по размеру раковины – двухлетки и четырехлетки. Двухлетние особи имели следующие морфологические характеристики: длина створок раковины 10-15 мм, ширина 8-10 мм, средняя масса 0.85 г в сыром виде. Четырехлетние особи имели длину раковины 25-30 мм, ширину 10-15 мм и массу в среднем 2,2 г в сыром виде. Мягкие ткани помещали в фарфоровые тигли и высушивали в сушильном шкафу при температуре 50^0С около 6 часов до постоянной массы, а затем разлагали в $HNO_{3\ конц.}$ Раковины сушили, дробили и истирали в агатовой ступке, а затем разлагали методом спекания (Бычкова, 2018), как и тонкодисперсную фракцию донных осадков. Абсолютная весовая влажность составляла для раковин от 2 до 13%, для мягких тканей 56-91%. Определение содержания микроэлементов в гидробионтах, донных осадках и воде проводилось методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на масс-спектрометре ELEMENT-2 фирмы Thermo Scientific на кафедре геохимии Геологического факультета МГУ (рис.2). Контроль полноты разложения образцов и оценку правильности результатов анализа проводили по государственным и международным стандартным образцам: для донных отложений и раковин - СДО-3 (известковый ил); для тканей гидробионтов - MODAS 3 (M-3HerTis Herring tissue, Clupea harengus from the North Sea - ткань атлантической сельди из Северного моря). Контроль правильности для анализов проб воды проводил по международным стандартным образцам CRM TMDW (Trace Metals in Drinking Water Standart - многоэлементный калибровочный стандарт следов металлов в питьевой воде).

В месте сброса сточных вод в Мошковическом заливе и в р. Донховка были обнаружены только танатоценозы, живые дрейссены обнаружить не удалось. Результаты определения содержания металлов в органах моллюсков вида Dreissena polymorpha Pallas, в донных осадках и воде Иваньковского водохранилища приведены в таблице 1.

Ряды биоаккумуляции металлов в мягких тканях дрейссены имеют вид: Zn>Cu>Cr >V>Pb>Cd, в раковинах концентрации убывают в ряду Cu>V>Zn>Cr>Pb>Cd. Сравнение полученных для тканей дрейссены рядов с соответствующими рядами для двустворчатых моллюсков семейств Unionidae и Cyrenidae (Богатов, 2018) показало их большое сходство, что, по-видимому, является отличительной биогеохимической чертой

данной группы организмов (двустворчатых моллюсков) и отражает их физиологическую потребность в химических элементах.



Рис. 1. Карта отбора проб на Иваньковском водохранилище

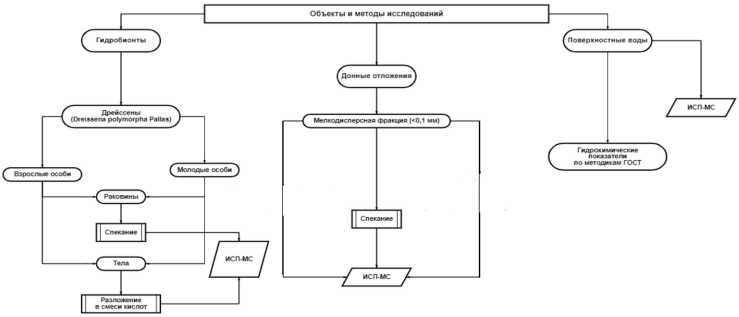


Рис. 2. Объекты и методы исследования

Для выявления особенностей распределения металлов между органами дрейссены, была рассчитана относительная доля металла в общей биомассе организма. Внутри организма исследованные элементы распределяются по органам не равномерно: Cd, Pb, Zn, Cr преимущественно накапливаются тканях, где сосредоточено от 52 до 93% этих металлов, а V, Cu напротив накапливаются в раковинах (68-92%). Для Cd, V, Cr, Cu уровень биоаккумуляции микроэлементов в мягких тканях не зависит от возраста и размера дрейссен. Свинец и цинк в большей степени накапливается в четырехлетних особях.

Коэффициент биологического поглощения рассчитывался как отношение содержания микроэлемента в органе моллюска к содержанию в компоненте среды, из которого в организм могут поступать металлы (из тонкодисперсной фракции донных осадков, поверхностных и иловых вод) (табл.2). Самые высокие значения коэффициентов биологического поглощения мягкими тканями из воды были получены для Zn, что говорит в высокой физиологической потребности данного вида организмов в этом элементе. Высокие КБП мягкими тканями, полученные для Pb и Cd, видимо являются результатом их постоянного антропогенного поступления, поскольку эти

элементы не являются эссенциальными для гидробионтов. Для раковин моллюсков самые высокие КБП получены для Cu и V.

Таблица 1. Содержание металлов в двустворчатых моллюсках, донных осадках и воде Иваньковского водохранилища.

	Cd	Pb	V	Cr	Cu	Zn
концентрация в тканях, мг/кг сухой биомассы						
2-летние N=12	0.19-0.4 0.39	0.14-2.76 0.85	0.89-2.48 1.62	1-4.52 2.68	7.1-20 14.09	41.8-141 82.4
4-летние N=12	0.18-0.51 0.46	0.43-6.75 1.49	0.11-2.96 1.48	2.06-7.9 3.5	7.02-18.02 13.3	75.9-258 125.4
концентрация в раковинах, мг/кг сухой биомассы						
2-летние N=12	0.04-0.06 0.05	0.21-1.82 0.82	12-17.03 15.5	2.7-5.08 3.62	14.08-42 27.11	2.47-25.15 13.7
4-летние N=12	0.075-0.078 0.075	0.2-1.1 0.6	16.5-17.6 16.9	2.5-3.76 3.26	22.09-38 27.62	6.09-13 9.7
концентрация в тонкодисперсной фракции донных осадков, мг/кг сухой массы						
N=5	0.68-3.76 2.09	14.6-45.5 23.7	67.5-136.4 100.9	53.4-129.8 79.8	25.28-75.55 52.9	131.9-402.7 254
концентрация в поверхностной воде, мкг/л						
N=5	0.01-0.015 0.01	0.02-0.35 0.13	<0.5-0.88 0.51	0.66-1.87 1.25	0.9-3.1 1.83	0.37-3.82 2.36
концентрация в иловой воде, мкг/л						
N=5	0.003-0.04 0.018	0.21-0.9 0.46	0.96-3.24 1.69	1.7-4.96 2.68	1.42-3.7 2.46	4.61-7.99 6.82

Примечание: в числителе минимальное - максимальное значение, в знаменателе – среднее.

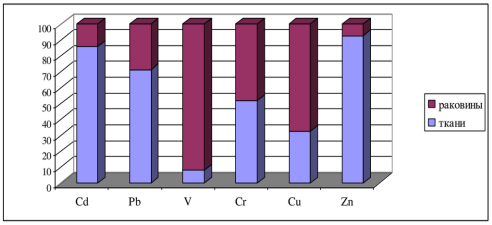


Рис. 3. Доля микроэлементов в общей биомассе моллюска для различных органов, %

Таблица 2. Средние значения коэффициентов биологического поглощения (КБП) металлов в органах дрейссены из донных осадков, поверхностных и иловых вод

	Cd	Pb	V	Cr	Cu	Zn
КБП в мягких тканях четырехлетних моллюсков						
из тонкодисперсной фракции донных осадков	0.22	0.06	0.02	0.04	0.25	0.49
из поверхностных вод	$4.6 \cdot 10^3$	$11.4 \cdot 10^3$	$2.9 \cdot 10^3$	$2.8 \cdot 10^3$	$7.3 \cdot 10^3$	$53 \cdot 10^3$
из иловых вод	$25.5 \cdot 10^3$	$3.2 \cdot 10^3$	$0.87 \cdot 10^3$	$1.3 \cdot 10^3$	$5.4 \cdot 10^3$	$18.4 \cdot 10^3$
КБП в раковинах четырехлетних моллюсков						
из тонкодисперсной фракции донных осадков	0.04	0.03	0.17	0.04	0.52	0.04
из поверхностных вод	$7.5 \cdot 10^3$	$4.6 \cdot 10^3$	$33 \cdot 10^3$	$2.6 \cdot 10^3$	$15 \cdot 10^3$	$4.1 \cdot 10^3$
из иловых вод	$4.2 \cdot 10^3$	$1.3 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	$1.2 \cdot 10^3$	$11.2 \cdot 10^3$	$1.42 \cdot 10^3$

Определены содержания микроэлементов (Cd, Pb, V, Cr, Cu, Zn) в двустворчатых моллюсках вида *Dreissena polymorha Pallas,* обитающих в Иваньковском водохранилище, а также описаны особенности их распределения внутри организма. Полученные уровни накопления отражают физиологическую потребность в исследованных элементах для гидробионтов данного вида, а также отражают уровень антропогенной нагрузки на водохранилище.

Авторы благодарят директора ИВП РАН В.О. Полянина за организацию экспедиционных работ и ценные рекомендации при выполнении работы. Часть работы, связанная с аналитическими и биогеохимическими исследованиями выполнена в рамках Государственного задания МГУ (№121071200143-2). Часть работы, связанная с экспедиционными и гидробиологическими исследованиями выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (FMWZ-2025-0002).

Литература

Богатов В.В., Прозорова Л.А., Чернова Е.Н., Лысенко Е.В. Особенности биоаккумуляции у двустворчатых моллюсков (Bivalvia) в природных водоемах Восточной Азии // Вестник ДВО РАН. 2018. №4. С. 79-87.

Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100). М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. 688 с.

Федорова Л.П., Полянин В.О. Оценка фильтрационной активности Dreissena polymorpha – южного вида-вселенца Иваньковского водохранилища// Аридные экосистемы. 2023. Т. 23, №3. С. 148-155.

BIOACCUMULATION OF POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS BY DREISSENA POLYMORPHA MOLLUSKS IN THE IVANKOVO RESERVOIR

E.S. Grishantseva, L.P. Fedorova, M.L. Grigorieva, I.Yu. Nikolaeva, M.E. Tarnopolskaya

The paper presents the results of determining the concentrations of a number of elements in the soft tissues and shells of bivalve mollusks of the species Dreissena polymorpha Pallas in the Ivan'kovo Reservoir in 2023. The calculated values of the biological absorption coefficients relative to surface and silt waters, as well as the fine fraction of bottom sediments, indicate a high bioaccumulation capacity of mollusks of this species in relation to Cd, Pb, V, Cr, Cu, Zn.

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ФОНОВОГО РАЙОНА МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ (НА ПРИМЕРЕ ОСТРОВА КИЛЬДИН)

В.А. Даувальтер, П.Н. Адамская, Ю.М. Банникова, З.И. Слуковский, И.Р. Елизарова
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

В статье приводятся результаты впервые проведенных исследований микроэлементного состава 12 водных объектов (8 озер и 4 ручья) поверхностных вод острова Кильдин, расположенного в полутора км к востоку от выхода Кольского залива в Баренцево море. Микроэлементный состав в воде водных объектах определялся методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Установлено, что на формирование микроэлементного состава поверхностных вод острова Кильдин влияют морские аэрозоли, геохимические особенности горных пород на водосборах, и возможно

незначительное антропогенное влияние атмосферных выбросов промышленных и энергетических предприятий, автотранспорта и портов г. Мурманска, расположенного в 60 км на юго-запад от острова по направлению превалирующих ветров с материка.

Остров Кильдин расположен в 1.5 км от Мурманского берега Кольского п-ова к востоку от выхода Кольского залива Баренцева моря (рис. 1). Длина острова 17.6 км, ширина до 7 км. Остров представляет собой холмистое плато высотой до 280 м.

Целью впервые проведенных гидрохимических исследований является определение содержания микроэлементов в водных объектах острова Кильдин и установление основных факторов формирования микроэлементного состава этого фонового района, находящегося в Арктической зоне Российской Федерации.

Проведены исследования микроэлементного состава 12 водных объектов поверхностных вод – в 8 озерах, включая реликтовое озеро Могильное, и 4 ручьях (рис. 1). Пробы воды отбирались с берега водных объектов с их поверхности вследствие отсутствия лодки в пластиковые бутылочки объемом 100 мл и хранились при температуре 4°С до проведения анализа. Микроэлементный состав определялся методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на масс-спектрометре ELAN-9000 (PerkinElmer, США). Проводилось определение более 40 микроэлементов, включая тяжелые металлы и редкоземельные элементы (РЗЭ). Содержание микроэлементов в поверхностных водах острова Кильдин и сопоставление их с содержанием в озерах северо-запада Мурманской области (Моисеенко и др., 2020) и в озере Большой Вудъявр (Даувальтер и др., 2022) приведены в таблице.

На острове Кильдин находится реликтовое озеро Могильное, примечательное наличием плотностной стратификации с высокими значениями градиента плотности, вследствие чего толща воды в озере имеет несколько слоев воды разной солености, от почти пресной на поверхности (соленость не более 3‰) до солености более 30‰ в придонном слое, характеризующегося наличием анаэробного сероводородного слоя.

Исследования микроэлементного состава поверхностных вод о-ва Кильдин сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН в 2024 г. были проведены впервые. До настоящего времени химический состав воды был исследован только в оз. Могильное, и подробное его описание дано по результатам исследований сотрудников ММБИ КНЦ РАН, проведенные в 70-х гг. прошлого века (Реликтовое…, 1975). Вследствие проникновения морских вод в оз. Могильное через хорошо проницаемую перемычку, вода во всех слоях хлоридно-натриевого состава, на втором месте среди главных ионов сульфат-ион и магний. Вследствие набольших размеров озера Могильное влияние морских аэрозолей должно сказываться на формировании химического состава всех водных объектов озера, поэтому можно предполагать, что поверхностные воды здесь должны быть хлоридно-натриевого состава, как это было отмечено в озерах прибрежной зоны северо-запада Мурманской области (Моисеенко и др., 2020). Но наличие карбонатных отложений и сульфидной минерализации в составе горных пород о-ва Кильдин может вносить свои коррективы в формирование главного ионного состава поверхностных вод острова. Например, известно, что вода подземного источника, впадающего в оз. Могильное и оказывающего опресняющее воздействие на поверхностный слой оз. Могильное, сульфатно-натриевого состава при минерализации 0.52 г/л (Реликтовое…, 1975), что не характерно для природных вод Мурманской области.

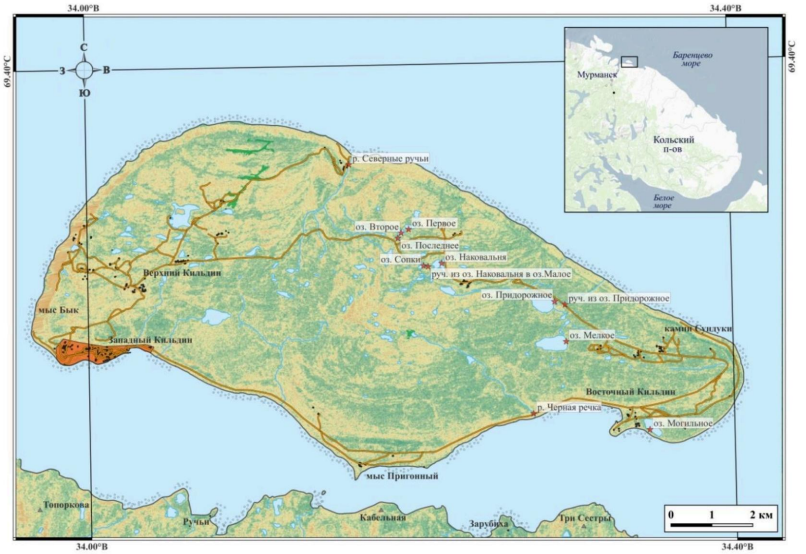


Рис. 1. Карта-схема отбора проб поверхностных вод о-ва Кильдин (автор М. Шестаков)

На микроэлементный состав оз. Могильное оказывает влияния просачивание морской воды, поэтому даже в опресненном поверхностном слое воды озера сохранялись особенности химического состава морской воды. Поэтому среди всех исследованных водных объектов о-ва Кильдин наибольшие содержания щелочных и щелочноземельных металлов (Li, Rb, Sr, Cs и Ba), а также тяжелых металлов (Ni, Cu, Co, Sb, V, Ti, Bi, U, Nb, W, Mo) зафиксировано в оз. Могильное (рис. 2), и они выше, чем в озерах северо-западной части Мурманской области (Моисеенко и др., 2020), что, вероятно, связано с особенностями морской воды, химический состав которой характеризуется повышенным микроэлементным содержанием щелочных, щелочноземельных и тяжелых металлов. Содержание щелочных и щелочноземельных металлов в воде озера Могильное на 1-2 порядка выше, чем во всех других водных объектах, и также выше их концентраций в озере Большой Вудъявр Хибинского горного массива, в которое поступают стоки апатит-нефелинового производства из АО «Апатит» (Даувальтер и др., 2022). Апатит-нефелиновые руды характеризуются повышенным содержанием всех щелочных и щелочноземельных металлов, а также редкоземельных элементов (РЗЭ) (Яковенчук и др., 1999), поэтому сточные воды АО «Апатит» также содержат повышенные концентрации вышеперечисленных элементов.

Наибольшие содержания всех РЗЭ, а также Cd, Zr и Hf, обнаружены в воде озера Последнее, что, вероятно, связано с особенностями геохимического состава слагающих водосбор этого озера горных пород. Эти максимальные содержания также выше концентраций РЗЭ и других вышеперечисленных элементов в озере Большой Вудъявр. Высокое содержание РЗЭ, а также сопутствующих им Zr и Hf, связано, скорее всего, с наличием выходящих на поверхность острова фосфоритов (Чикирев, 1995). В воде озера Последнее фиксируются также высокие содержания тяжелых металлов, что связано с упомянутыми выше геохимической ассоциацией P, Mo, Pb и Cu и рудопроявлениями Zr и Cu.

Таблица. Медиана и вариабельность (min-max) содержания микроэлементов (мкг/л) в поверхностных водах острова Кильдин, медианные и вариабельность (min-max) содержания в озерах северо-запада Мурманской области (Моисеенко и др., 2020) и в озере Большой Вудъявр (Даувальтер и др., 2022)

Элементы	Остров Кильдин	С-З Мурманской обл.	Большой Вудъявр
Ni	0.64 (0.14-2.44)	0.9 (<0.2-5.5)	3.65
Cu	0.68 (0.15-1.30)	0.7 (0.2-2.9)	11.8
Cr	0.82 (0.50-3.43)	0.20 (<0.1-0.5)	0.36
Sr	6.01 (3.88-1120)	11 (4-23)	123
Zn	1.91 (0.30-5.59)	0.9 (0.2-4.7)	4.60
Pb	0.071 (0.003-0.183)	0.1 (<0.1-0.6)	0.028
Mn	0.89 (0.06-4.76)	1.6 (0.2-18)	0.44
Cd	0.008 (0.002-0.014)	0.09 (<0.05-0.21)	0.020
Co	0.070 (0.006-0.128)	0.20 (<0.2-0.3)	0.036
Li	0.64 (0.27-31.7)	0.18 (0.11-0.65)	0.64
La	0.025 (0.001-0.106)	0.24 (0.07-0.62)	0.008
Ce	0.068 (0.0003-0.188)	0.29 (0.12-1.13)	0.009
Pr	0.0113 (0.0004-0.0265)	0.04 (0.01-0.07)	0.002
Nd	0.061 (0.002-0.139)	0.10 (0.04-0.21)	0.005
Y	0.059 (0.004-0.121)	0.07 (0.02-0.10)	0.004
Σ REE	0.316 (0.017-0.722)	0.92 (0.37-2.81)	0.031
Sc	0.20 (<0.003-0.24)	0.4 (<0.1-0.8)	1.86
Ba	2.42 (0.78-8.12)	–	3.49
Sb	0.019 (0.015-0.094)	0.04 (0.01-0.13)	0.483
Sn	0.0048 (0.0012-0.0102)	0.09 (0.04-0.32)	0.154
V	0.37 (0.14-9.59)	0.35 (<0.02-0.76)	1.72
Ti	0.26 (0.045-0.59)	1.79 (0.48-8.27)	0.88
Cs	0.0034 (0.0025-0.0661)	–	0.063
Bi	0.0008 (<0.0007-0.0123)	0.01 (<0.01-0.03)	0.046
Rb	0.53 (0.34-14.2)	0.63 (0.34-1.73)	8.13
U	0.006 (0.001-0.376)	0.03 (0.01-0.30)	0.237
Nb	0.0028 (0.0003-0.0355)		0.005
W	0.023 (0.004-0.101)	0.02 (<0.02-0.05)	0.68
Mo	0.031 (0.012-2.74)	0.14 (0.04-0.32)	9.23
Tl	0.0015 (<0.0001-0.0034)		0.055
Zr	0.074 (0.006-0.163)	0.05 (<0.02-0.15)	0.007
Hf	0.0025 (0.0004-0.0044)	–	–

Для выявления связей между содержаниями микроэлементов в поверхностных водах о-ва Кильдин был использован корреляционный анализ и факторный анализ методом главных компонент (рис. 3), традиционно применяемые для интерпретации результатов гидрохимических исследований (Даувальтер и др., 2022). По результатам корреляционного и факторного анализа выявлено две группы микроэлементов и два значимых фактора, объясняющих 65% общей дисперсии. Первая группа микроэлементов объединяет РЗЭ, Zr и Hf и основную часть тяжелых металлов (Mn, Pb, Zn, Cu, Cd, Co, Ni и др.). Это первый фактор в факторной модели (рис. 3), и он объясняется влиянием особенностей геохимического состава коренных горных пород, т.е. отмеченные ранее сульфидная минерализация, геохимическая специализация фосфоритов, включающая P, РЗЭ, Zr, Pb, Cu и другие тяжелые металлы в составе сульфидов.

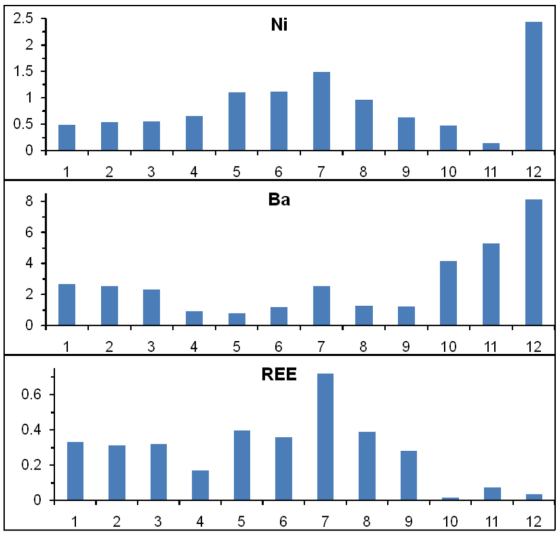


Рис. 2. Распределение микроэлементов (Ni, Ba, Σ REE) в водных объектах поверхностных вод острова Кильдин:
1 – оз. Мелкое, 2 –ручей из оз. Придорожное,
3 – оз. Придорожное, 4 – оз. Наковальня, 5 – ручей из оз. Наковальня, 6 – оз. Сопки,
7 – оз. Последнее, 8 – оз. Второе, 9 – оз. Первое, 10 – Северные ручьи, 11 – р. Черная, 12 – оз. Могильное

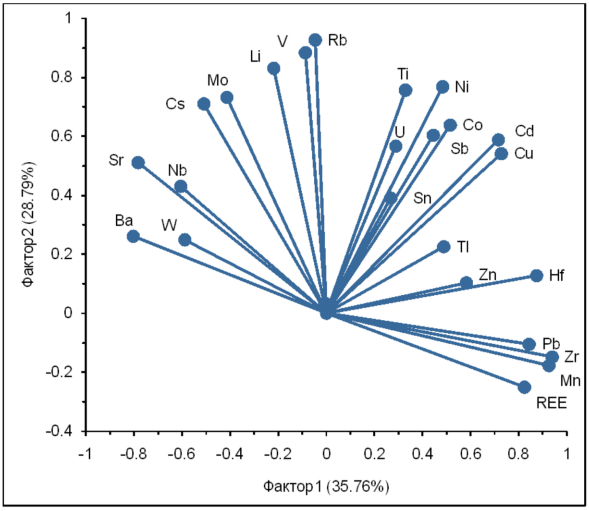


Рис. 3. Факторный анализ методом главных компонент микроэлементного состава водных объектов острова Кильдин

Влияние морских аэрозолей и морских вод, поступающих в оз. Могильное сказалось в формировании второй группы микроэлементов – это объединение щелочных и щелочноземельных металлов (Li, Rb, Sr, Cs и Ba) и сопутствующие им V, Mo, Nb, W (рис. 3).

Литература

Даувальтер В.А., Денисов Д.Б., Слуковский З.И. Влияние стоков апатит-нефелинового производства на биогеохимические процессы в арктическом горном озере // Геохимия. 2022. Т. 67, №10. С. 1013-1028.

Моисеенко Т.И., Дину М.И., Гашкина Н.А., Кремлева Т.А., Хорошавин В.Ю. Геохимические закономерности распространения элементов в водах озер арктических регионов // Геохимия. 2020. Т. 65, №6. С. 521-532.

Реликтовое озеро Могильное. Л.: Наука, 1975. 298 с.

Чикирев И.В. Верхнедокембрийские фосфоритсодержащие отложения Кольского полуострова: Автореф. дис. ... канд. г.-м.н. М., 1995. 18 с.

Яковенчук В.Н., Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А., Меньшиков Ю.П. Минералы Хибинского массива. М.: Земля, 1999. 326 с.

FORMATION OF THE TRACE ELEMENT COMPOSITION OF SURFACE WATERS IN THE BACKGROUND AREA OF THE MURMANSK REGION (ON THE EXAMPLE OF KILDIN ISLAND)

V.A. Dauvalter, P.N. Adamskaya, Yu.M. Bannikova, Z.I. Slukovskii, I.R. Elizarova

The article presents the results of the first studies of the chemical composition of 12 water bodies (8 lakes and 4 streams) of the surface waters of Kildin Island, located one and a half kilometers east of the exit from the Kola Bay to the Barents Sea. The trace element composition in water bodies is determined by the method of mass spectrometry with inductively coupled plasma (ICP MS). It has been established that the formation of the trace element composition of the surface waters of Kildin Island is influenced by marine aerosols, geochemical features of rocks in the catchment areas, and possibly a minor anthropogenic impact of atmospheric emissions from industrial and energy enterprises, motor transport and the ports of Murmansk, located 60 km southwest of the Island in the direction of the prevailing winds from the mainland.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА КОШЕЕР И ТОРФА ЕГО СПЛАВИНЫ

Ю.П. Демаков [1], А.В. Исаев [2]

[1] *Поволжский государственный технологический университет,*

[2] *Государственный природный заповедник «Большая Кокшага»*

В статье показано, что донные отложения на объекте исследования значительно отличаются по зольности и содержанию химических элементов от торфа, образовавшегося на его сплавине и заболоченных берегах, свидетельствуя о различиях протекания биологического круговорота веществ в этих средах. Так, доля зольного остатка наиболее велика в образцах из нижних слоев торфянистой почвы, а содержание в ней чистого органического вещества намного меньше, чем в других субстратах. Донные отложения по элементному составу наиболее схожи с переходным торфом.

Самое низкое содержание всех оцененных нами 17 химических элементов отмечается в верховом торфе.

Вопрос о структуре и развитии ландшафтов является одним из важнейших в современной геоэкологии. В настоящее время он приобрел большое практическое значение в связи проблемой глобального изменения климата и техногенного загрязнения окружающей среды. Важными источниками информации о происходящих процессах являются озерно-болотные комплексы, которые давно являются предметом пристального внимания многих исследователей (Бахнов, 1986; Болотные системы …, 2001; Вомперский, 1994). Их развитие протекало чаще всего по следующему сценарию (Коломыцев, 1993; Новиков, 1991): после схода ледника около 10-12 тыс. лет назад в пониженных элементах рельефа образовались озера различного размера, на берегах которых эвтрофная растительность постепенно заменялась мезотрофной и олиготрофной. На песчаных зандровых равнинах некоторые озера с очень низкой минерализацией воды зарастали с берегов мозаичной сплавиной из сфагновых мхов. В современный период происходит заболачивание суши за счет увеличения площади сфагновых болот, которые из подчиненного элемента ландшафта постепенно превращаются в главный (Нейштадт, 1977; Степанова, Волкова, 2017). Так, на Васюганском болоте, расположенном на территории Западно-Сибирской равнины, 19 самостоятельных болот превратились за последние 500 лет в один огромный болотный массив (Инишева, Березина, 2013).

Цель работы – оценка элементного состава донных отложений в озере Кошеер, находящегося в заповеднике «Большая Кокшага», и торфа на его сплавине, что необходимо для выявления геохимических особенностей территории.

Объектом исследования явился озерно-болотной комплекс «Кошеер», расположенный в пределах первой надпойменной террасы р. Большая Кокшага в кв. 66 одноименного заповедника (координаты 56°39′24,19″ с.ш., 47°18′30,61″ в.д.) (рис. 1). Литологическая основа территории представлена мощной толщей древнеаллювиальных и современных аллювиальных песков и супесей (Смирнов, 1968). Площадь открытой водной поверхности озера равна 5,7 га, а глубина достигает 22,5 м. Дно его имеет сложную форму (рис. 2) и покрыто отложениями мощностью до 3 м. Озеро со всех сторон окружено сфагновой сплавиной, площадь которой составляет 3,4 га, а толщина изменяется от 0,4 м у кромки воды до 1,8 м на границе с верховым болотом, мощность торфяной залежи которого достигает 6 м. Озеро имеет, по данным исследователей (Озера …, 1976), карстовое происхождение, однако по форме поверхности и дна оно похоже на воронку от падения метеорита. По степени минерализации воды, составляющей всего 19,5 мг/л, озеро является самым «пресным» во всем Среднем Поволжье (Озера …, 1976; Физико-химические …, 2009).

Образование торфа на берегах озера началось, по данным радиоуглеродного анализа (Изменение состава …, 2020), около 10,5 тыс. лет назад. В процессе эволюции озерно-болотного комплекса, протекавшего по типичному сценарию, происходили значительные изменения всех его параметров, обусловленные как внешними, так и внутренними факторами. Так, в частности, около 9-10 тыс. лет назад уровень поверхности озера, заполняющего в то время небольшую по площади замкнутую песчаную котловину, был ниже современного на 6-8 м. Минерализация воды в озере, питаемом в основном атмосферными осадками, постепенно снижалась за счет поступления их новых порций, а также поглощения солей торфом, по мере развития которого закономерно увеличивалось содержание в нем P, Cl, Mg, Cu, Ca и Sr, а содержание же S, Al, Si, Fe, K и Zn снижалось (Изменение состава …, 2020).



Рис. 1. Общий вид озерно-болотного комплекса «Кошеер»

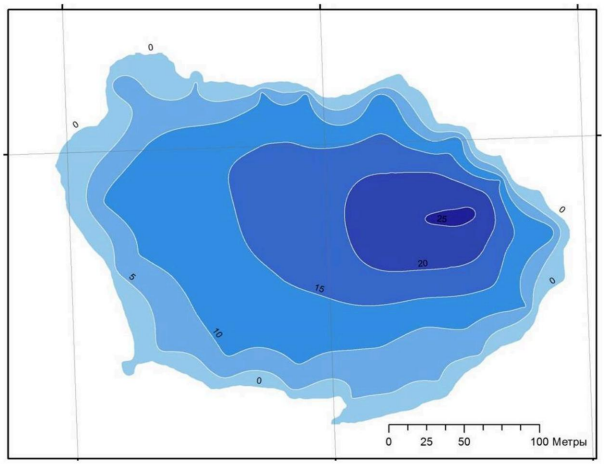


Рис. 2. Изометрическая карта глубин оз. Кошеер

Для отбора образцов донных отложений привлекали аквалангистов, которые отбирали их с помощью пластиковых труб, погружаемых вручную на глубину до 2 м. Эти трубы после отбора образцов закрывали с обеих сторон заглушками. Образцы же торфа извлекали из нескольких скважин специальным ручным буром Eijelkamp с шагом 0,5 м по всему вертикальному профилю, максимальная глубина которого достигала 6 м.

Содержание валовых форм элементов и потерь при прокаливании определяли в научно-исследовательском центре «ГеоЛаб» Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского государственного университета на рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 Tiger (Bruker, Германия) по стандартизированной методике Geoquant® фирмы Bruker. Полученные минимальные значения содержания элементов не выходили за пределы чувствительности использованной аппаратуры. Всего проанализировано 25 образцов торфа и три образца донных отложений. Для оценки геохимической

специализации ландшафта использовали значения кларков элементов в верхней части континентальной земной коры (Касимов, Власов, 2015).

В донных отложениях и торфах оз. Кошеер выявлено содержание 24 химических элементов, наиболее распространенными из которых являются 17, формирующие по средним значениям следующие ранговые ряды:

– донные отложения: Fe>Si>Ca>S>Al>K>P>Ti>Zn>Cu>Br>Cl>Mn>Sr>Mg>Ni;

– низинный торф: Si>Al>Fe>K>S>Ca>Mg>Ti>P>Sr>Mn>Cu>Ni>Zn;

– переходный торф: Si>Fe>Ca>S>Al>K>P>Ti>Br>Cl>Zn>Sr>Mn>Mg>Cu>Ni;

– верховой торф: Ca>Fe>Si>S>Al>P>Cl>K>Ti>Mg>Br>Sr>Zn>Cu>Mn>Ni.

В ряде образцов было отмечено также присутствие Na, Cr, Rb, Ba, As, Pb, V и Zr.

Донные отложения на объекте исследования значительно отличаются по зольности и содержанию химических элементов от торфа, образовавшегося на его сплавине и заболоченных берегах, что свидетельствует о существенных различиях биологического круговорота веществ в водных и наземных экосистемах. Так, доля зольного остатка и содержание литофильных элементов (Si, Al, Ti, K и Mg) наиболее велико в низинном торфе и торфянистых почвах (табл. 1). Элементный состав переходного торфа и донных отложений наиболее схож между собой, характеризуясь высоким содержанием Fe, Ca, P, Zn, Cu, Br, Cl, Mn, Sr, Ni и As. Минимальное же содержание всех химических элементов отмечается в верховом торфе, зольность которого составляет 1,7%.

Таблица 1. Элементный состав донных отложений и торфа на объекте исследования

Элемент	Среднее содержание элемента в образцах			
	донных отложений	торфа		
		низинного	переходного	верхового
Зола, %	14,8	85,2	13,8	1,70
Fe, г/кг	25,8	10,8	20,4	2,43
Si, г/кг	24,2	329,6	22,8	1,20
Ca, г/кг	14,6	5,35	12,6	3,44
S, г/кг	6,09	9,53	8,97	1,14
Al, г/кг	3,46	38,2	3,81	0,52
K, г/кг	3,42	9,80	2,83	0,27
P, г/кг	2,01	0,58	1,85	0,36
Ti, г/кг	1,22	2,19	1,11	0,15
Zn, г/кг	1,07	40,6	0,42	0,07
Cu, г/кг	1,05	54,3	0,12	0,04
Br, г/кг	0,93	-	0,78	0,10
Cl, г/кг	0,70	-	0,63	0,28
Mn, г/кг	0,47	0,11	0,25	0,04
Sr, г/кг	0,35	0,14	0,31	0,09
Mg, г/кг	0,30	0,38	0,20	0,11
Ni, г/кг	0,10	0,04	0,12	0,03
As, г/кг	0,07	0,03	0,09	-

Геохимическая обстановка, как следует из приведенных данных, способствовала формированию в донных отложениях и переходном торфе озерно-болотного комплекса естественной положительной геохимической аномалии Cu, Zn, As, S, P, Ni и особенно Br, кларк концентрации которого составил 582 и 490 соответственно (табл. 2). В верховом торфе его величина значительно ниже, но также довольно высока. Отмечается небольшое превышение кларка концентрации Cu, у большинства же химических элементов он близок к единице или значительно ниже ее, свидетельствуя о том, что озерно-болотный комплекс является замкнутой геохимической системой, не связанной латеральным стоком с окружающим его ландшафтом. В противном случае, Br, Cl, S и As, отличающиеся очень высокой мобильностью (Гордеев, Лисицын, 2014),

мигрировали бы с поверхностными и грунтовыми водами к местам разгрузки. Однако надо отметить, что Br и Cl могут накапливаться и в условиях подчиненных ландшафтов, но в более низких концентрациях. Так, в перегнойно-глеевых почвах и низинных торфяниках, сформировавшихся в поймах малых рек заповедника, содержание Cl составляет в среднем 250 и 203 мг/кг, а содержание Br в низинных торфяниках – 58,2 мг/кг. В аллювиальных иловато-торфяных почвах содержание Cl не превышает 229 мг/кг (Isaev et al., 2023).

Таблица 2. Геохимические особенности донных отложений и торфа на объекте исследования

Элемент	Величина кларка концентрации (+) и кларка рассеяния (-)			
	донные отложения	низинный торф	переходный торф	верховой торф
Br	582	-	490	62,6
Cu	38,9	2,0	4,5	1,6
Zn	14,2	-1,8	5,5	-1,1
As	13,2	5,2	17,8	-
S	6,4	10,0	9,4	1,2
P	2,9	-1,2	2,7	-1,9
Ni	2,0	-1,2	2,3	-1,7
Sr	1,3	-2,0	1,2	-3,0
Cl	1,1	-	1,0	-2,3
Fe	-1,6	-3,8	-2,0	-16,7
Mn	-1,6	-7,2	-3,0	-19,2
Ca	-1,8	-4,8	-2,0	-7,5
Ti	-3,2	-1,8	-3,5	-26,1
K	-6,8	-2,4	-8,2	-85,0
Al	-22,0	-2,0	-20,0	-147,6
Mg	-49,9	-3,9	-74,1	-139,5

В донных отложениях и торфах озерно-болотного комплекса Кошеер выявлено содержание 24 химических элементов, наиболее распространены их которых 17. Установлено, что в них сформировались сильные естественные положительные геохимические аномалии содержания Br. Полученные данные не позволяют пока полностью охарактеризовать геохимические особенности заболоченных ландшафтов на всей территории заповедника «Большая Кокшага» и являются лишь одним из этапов исследований, предусмотренных долгосрочным планом. Для полной его реализации необходимо не только изучение других объектов, но также использование новых методик и оборудования, расширение сотрудничества с ведущими специалистами вузов и академических учреждений. Для детальной оценки динамики изменений условий внешней среды в процессе эволюции озер, которые являются важными элементами ландшафтов, целесообразно оценивать элементный состав всех субстратов, а не ограничиваться только лишь донными отложениями.

Литература

Бахнов В.К. Биогеохимические аспекты болотообразовательного процесса. Новосибирск: Наука, 1986. 193 с.

Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и Кº, 2001. 584 с.

Вомперский С.Э. Биосферное значение болот в углеродном цикле // Природа. 1994. №7. С. 44-50.

Гордеев В.В., Лисицын А.П. Геохимическое взаимодействие пресноводной и морской гидросфер // Геология и геофизика. Сер. Седиментология и палеогеография. 2014. Т. 55, №5–6. С. 721-744.

Инишева Л.И., Березина Н.А. Возникновение и развитие процесса заболачивания на Западно-Сибирской Равнине // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 366. С. 172–179.

Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география. 2015. №2. С. 7–17.

Коломыцев В.А. Болотообразовательный процесс в среднетаежных ландшафтах Восточной Фенноскандии. Петрозаводск: КНЦ РАН, 1993. 83 с.

Нейштадт М.И. Возникновение и скорость развития процесса заболачивания // Научные предпосылки освоения болот Западной Сибири. М.: Наука, 1977. С. 39–48.

Новиков С.М. О развитии болотных массивов в лесной зоне // Метеорология и гидрология. 1991. №3. С. 17–24.

Озера Среднего Поволжья. Л.: Наука, 1976. 236 с.

Смирнов В.Н. Почвы Марийской АССР, их генезис, эволюция и пути улучшения. Йошкар-Ола: Марийское кн. изд-во, 1968. 532 с.

Степанова В.А., Волкова И.И. Особенности формирования верховых болот в лесостепи Западной Сибири // западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее. Томск: Изд. дом Томского гос. ун-та, 2017. С. 118-120.

Isaev A.V., Demakov Y.P., Sharafutdinov R.N. Specific Features of the Elemental Composition of Alluvial Soils in the Middle Reaches of the Bolshaya Kokshaga River // Eurasian Soil Science. 2023. Vol. 56, No. 7. Pp. 868–878.

GEOCHEMICAL FEATURES OF THE BOTTOM SEDIMENTS OF LAKE KOSHEER AND ITS PEAT DEPOSITS

Yu.P. Demakov, A.V. Isaev

The article shows that the bottom sediments at the research site differ significantly in ash content and chemical elements from peat formed on its bottom and swampy shores, indicating differences in the biological cycle of substances in these environments. Thus, the proportion of ash residue is highest in samples from the lower layers of peaty soil, and the content of pure organic matter in it is much lower than in other substrates. Bottom sediments are most similar in their elemental composition to transitional peat. The lowest content of all the estimated 17 chemical elements is found in the upper peat.

ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОЗЕР И ВОДОХРАНИЛИЩ

В.В.Законнов, А.В.Законнова
Институт биологии внутренних вод им.И.Д. Папанина РАН

В работе рассматриваются эволюционная природная и техногенно-антропогенная трансформация озер и водохранилищ: проточных древних лимнических систем (Лача, Воже, Белое, Кубенское, Неро, Плещеево) и современных искусственных водоемов замедленного водообмена водохранилищ Волжского каскада с элементами река-озеро (озеровидные расширения), расположенных в меридиональном направлении от зоны тайги до полупустынь. Анализируемые водные объекты прошли не только тысячелетние процессы эволюции, но и вековые. Их функционирование происходит в новых условиях, вызванных регулированием водного стока в интересах хозяйственной деятельности, или включенных в крупные проекты, связанные с навигацией (Волго-Балтийский и Северо-

Двинский каналы), переброской стока северных рек на юг и улучшением экологической обстановки.

Функционирование озер и водохранилищ, а, следовательно, и их проблемы связаны с естественно-техногенным фактором – загрязнением природных экосистем, регулированием уровня воды посредством создания плотин или гидроэлектростанций для управления режимами эксплуатации водных объектов в интересах энергетики, судоходства, рыболовства, лесосплава и реакреации. Когда такая необходимость отпадает, то водоемы становятся бесхозными и неуправляемыми, что приводит лимнические системы к еще большей деградации и ускоренному старению.

Цель работы – установление закономерностей эволюции функционирования озер и водохранилищ под воздействием антропогенной трансформации водных экосистем для обоснования оптимального использования их природно-ресурсного потенциала и устойчивого развития.

Главное отличие естественных водоемов от водохранилищ – это резкое нарушение сложившегося равновесия в природе, которое коренным образом раскрывает сущность данной проблемы. Замкнутая цепь взаимодействия в природно-техногенных средах – решающий фактор нестабильности пресноводных экосистем и стимул для их усовершенствования.

В работе использованы материалы исследования лимнических систем (озер и водохранилищ) за период 1974-2024 гг., расположенных в меридиональном направлении от г. Каргополь (N 61°30.7′, E 38°57.5′) до г. Волгограда (N 48°44.5′, E 44°29.7′). Район находится между 36° и 50° меридианами, значительная часть которого принадлежит бассейну Волги, включая гумидную и аридную зоны. Обработка проводилась стандартными методами (Географические …, 2024).

Характеристики озер и их трансформация определены на основании мониторинговых исследований процессов осадконакопления в пространстве и во времени выполненных Институтом озероведении (ИО), а затем Институтом биологии внутренних вод (ИБВВ) РАН, примерно через 40 лет, а водохранилищ Волги систематически через 10–20 лет (табл. 1, 2).

Таблица 1. Основные гидроморфометрические характеристики отдельных озер Европейской территории России

Озера	F, км^2	V, км^3	H, м	L, км	Кв, год$^{-1}$	Q, мм · год$^{-1}$
Лача	345	0.5	1.6	33	7.4	0.4
Воже	418	0.6	1.4	36	3.5	0.2
Белое	1284	5.3	4.1	46	0.9	0.5
Кубенское	417	1.0	2.5	47	3.6	1.3
Неро	58	0.9	1.6	13.2	2.2	1.5
Плещеево	52	5.8	11.2	9.6	3.0	1.0

Примечание. F, км^2 – площадь акватории; V, км^3– объем: H, м – средняя глубина; L, км – длина; Кв, год$^{-1}$ – коэффициент водообмена; Q, мм · год$^{-1}$ – скорость осадконакопления.

Водосборный бассейн озер и водохранилищ ЕТР представляет собой озерно-ледниковую равнину с частичным карстообразованием, густой речной сетью в долинах рек Праонега, Сухоны, Шексны с постепенным ее уменьшением к Нижней Волге.

Современное состояние озер и водохранилищ испытывает постоянную трансформацию, усиливаемую необратимыми последствиями, как на водосборе (вырубка леса, промышленное и сельскохозяйственное освоение земель), так и в самих водоемах, вызываемых внутренними факторами (зарастанием акватории, отчуждением сушей водной поверхности в результате образования болотных ландшафтов и гидроморфного почвообразования).

Таблица 2. Проектные гидроморфометрические характеристики водохранилищ и их трансформация

Водохранилища	Год заполнения	F, км^2	V, км^3	Период эксплуатации	F, км^2	V, км^3
Шекснинское	1963	1665	6.52	62	1650	5.78
Рыбинское	1941	4550	25.42	84	4480	25.00
Угличское	1940	249	1.24	85	226	1.22
Иваньковское	1937	327	1.12	88	287	1.10
Горьковское	1955	1591	8.70	70	1509	8.59
Чебоксарское*	1981*	2270	13.85	44*	1200	5.20
Куйбышевское**	1955	6450	58.00	70	5885	56.40
Саратовское	1967	1950	13.40	58	1833	11.97
Волгоградское	1958	3126	31.40	67	3248	28.08

Примечание. * уровень 68 м БС, уровень 63.5 м БС, ** до и после создания Нижнекамской (1978 г.) и Чебоксарской (1981 г.) ГЭС.

Водные балансы озер Лача и Воже, рассчитанные за разные периоды с 1900 по 2014 гг., практически не изменились, что свидетельствует об отсутствии влияния низконапорной плотины на их экосистемы (Законнов, Чуйко, 2019).

То же самое происходит и на зарегулированных озерах Неро и Плещеево (Состояние …, 2008; Экосистема …, 1989).

В результате создания Волго-Балтийского и Северо-Двинского каналов, озера Белое и Кубенское, входящие в их состав, продолжают приспосабливаться к новым гидрологическим условиям, и напрямую зависят от режима эксплуатации, туристической и рекреационной нагрузок.

По данным исследований ИО и ИБВВ РАН каких-либо серьезных изменений в верхнем и нижнем ярусах экосистем не произошло. Темпы седиментации находятся в пределах 0.2–1.5 мм · год$^{-1}$.

Иначе обстоят дела в системе водохранилищ Волжского каскада, где темпы осадконакопления носят характер «лавинной седиментации» от 2.5 до 7.0 мм·год$^{-1}$, подтверждая ранее установленную географическую зональность не только в целом по водохранилищам (Законнов, Законнова, 2008), но и по озеровидным плесам или расширениям – от 1 в Рыбинском, Иваньковском, Угличском, Саратовском до 8 в Куйбышевском (рис.).

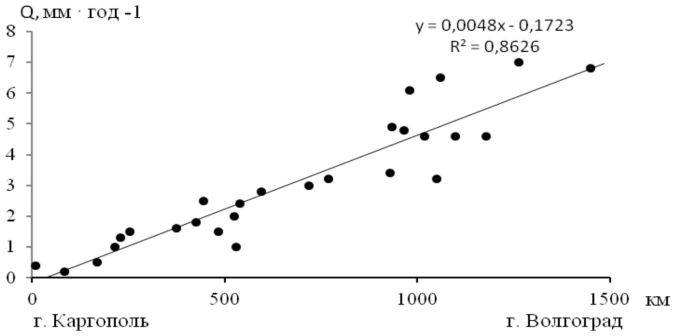


Рис. Географическая зональность осадконакопления в озерах и озеровидных расширениях в меридиональном направлении

Гидроморфометрическая трансформация молодых техногенных водоемов с элементами озеровидных плесов за период их эксплуатации до 100 лет, четко показана в табл. 2. Данный процесс будет продолжаться длительное время, пока не установится стабилизация между береговыми профилями абразии и эрозией ложа водоема, что также зависит от гидроклиматического пресса, режима эксплуатации гидросооружений, а также качества воды.

Предполагаемая переброска стока северных рек на юг в Каспийское море объемом до 17 км^3 коренным образом изменила бы веками установившуюся минерализацию воды, что скажется весьма негативно для гидробионтов Волго-Шекснинского водного участка «Волго-Балт» (Экологические …, 1982).

Таким образом, осадконакопление в озерах и водохранилищах, расположенных в меридиональном направлении, подчинено географической зональности по целому ряду показателей: солнечная радиация, атмосферные осадки и испарение, водный и твердый сток рек, продолжительность периода открытой воды, продолжительность и скорость ветра, количество пыльных бурь, эрозия, абразия, дефляция, процессы почвообразования (зональность типов почв водосборов), тип лимногенеза, литология ложа и берегов.

Приведенные примеры наглядно свидетельствуют:

– экосистемы озер Северо-Запада России и озеровидные расширения водохранилищ Волжского каскада по увеличению темпов осадконакопления имеют четкую географическую зональность в меридиональном направлении с севера на юг;

– лимнические системы (озера и водохранилища) при отсутствии антропогенных стоков и техногенного вмешательства быстро восстанавливаются;

– регулирование стока через плотины следует рассматривать как экологические мероприятия по реабилитации экосистем водоемов.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства высшего образования и науки РФ (гос. тема № 124032100076-2).

Литература

Географические методы изучения экосистем внутренних водоемов. Ярославль: Филигрань, 2024. 206 с.

Законнов В.В., Законнова А.В. Географическая зональность осадкообразования в системе волжских водохранилищ // Изв. РАН. Сер. геогр. 2008. № 2. С. 105–111.

Законнов В.В., Законнова А.В. Изменение природной среды под воздействием водохранилищ // Комплексные исследования водохранилищ и их водосборов // Сб. трудов, посв. 100-летию со дня рожд. Ю.М. Матарзина. ПГНИУ, Пермь, 2024. С. 52–56.

Законнов В.В., Чуйко Г.М. Проблемы крупных мелководных озер гумидной зоны Европейской территории России // Озера Евразии: проблемы и пути их решения / Материалы II Междун. конф. Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2019. Ч. II. С. 76–80.

Состояние экосистемы озера Неро в начале XXI века М.: Наука, 2008. 406 с.

Экологические исследования водоемов Волго-Балтийской и Северо-Двинской водных систем. Л.: Наука, 1982. 288 с.

Экосистема озера Плещеево. Л.: Наука, 1989. 264 с.

NATURAL AND TECHNOGENIC TRANSFORMATION OF LAKES AND RESERVOIRS

V.V. Zakonnov, A.V.Zakonnova

The paper considers evolutionary natural and technogenic-anthropogenic transformation of lakes and reservoirs: flowing ancient limnic systems (Lacha, Vozhe, Beloe, Kubenskoye, Nero, Pleshcheevo) and modern artificial reservoirs of slow water exchange of the Volga cascade reservoirs with river-lake elements (lake-like extensions), located in the meridional direction from the taiga zone to semi-deserts. The analyzed water bodies have undergone not only millennia-long evolutionary processes, but also century-long ones. Their functioning takes place under new conditions caused by regulation of water flow in the interests of economic activity, or included in large projects related to navigation (Volga-Baltic and Northern Dvina canals), transfer of runoff of northern rivers to the south and improvement of ecological situation.

ОЦЕНКА СБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Д.В. Катенович[1], М.О. Осипова[2], С.Л. Лузянин[2]
[1]ООО «Разрез Пермяковский»
[2]Кемеровский государственный университет

Исследование посвящено мониторингу и нормированию качества вод в условиях антропогенного воздействия угольных разрезов на примере разреза «Пермяковский» в Кемеровской области. Проведен анализ сточных и поверхностных вод, оценена эффективность работы очистных сооружений, выявлены основные загрязняющие вещества и их концентрации. Несмотря на наличие превышений ПДК в исходных карьерных водах по ряду показателей (аммоний-ион, нитрит-ион, железо и др.), существующая система водоотведения и очистки сточных вод позволяет снижать их уровень до нормативных значений, что минимизирует негативное воздействие на водные объекты. Работа подчеркивает важность комплексного экологического контроля и внедрения эффективных технологий водоочистки в условиях угледобывающей промышленности.

Кемеровская область – Кузбасс обладает значительным водным потенциалом. На территории региона сосредоточены крупные запасы как подземных, так и поверхностных вод, что создает благоприятные условия для развития промышленности и других экономических отраслей (Брель и др., 2020). Кузбасс является крупнейшим центром добычи каменного угля в России. В настоящее время добычу в регионе ведут 39 шахт и 57 угольных разрезов (Харионовский и др., 2018). Разработка угольных месторождений оказывает негативную нагрузку на различные компоненты окружающей среды. Карьерные работы приводят к разрушению ландшафтов, уничтожению экосистем, загрязнению грунтовых и поверхностных вод тяжелыми металлами, кислотами и другими токсичными веществами, вымываемыми из вскрышных пород. Кроме того, добыча угля способствует снижению уровня грунтовых вод, что нарушает гидрологический баланс, усугубляя экологические проблемы (Стратегирование…, 2021).

Цель работы: провести оценку качества сточных вод в условиях антропогенного воздействия угольных разрезов на примере ООО «Разрез Пермяковский».

Разрез «Пермяковский» расположен в Беловском муниципальном округе Кемеровской области, действует с октября 2002 года. Предприятие ведет добычу энергетического угля марки Д, ДГ и Г на Караканском и Соколовском каменноугольных

месторождениях.

Рядом с участками изысканий расположены водотоки и водоемы. Ближайший основной водоток – река Иня и ее притоки (относятся к бассейну реки Обь). Водоемы представлены Беловским водохранилищем и небольшим количеством мелких стариц. По данным Доклада о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области – Кузбасса в 2023 году вода в данных водных объектах характеризуется как «загрязненная» (класс качества 3 «А»).

Согласно утвержденной программе производственного экологического контроля на разрезе «Пермяковский» ведется ежегодный мониторинг воздействия на окружающую среду и, в частности, на водные объекты. Исследование поверхностных и сточных карьерных вод проводится ежемесячно – 36 проб в год. Процедура отбора проб и водоподготовки осуществляется согласно ГОСТ Р 59024-2020. Физико-химический анализ проб выполняется в ФКГУ «Центр лабораторного анализа и технических измерений по Сибирскому федеральному округу».

Система водоотведения всех объектов разреза «Пермяковский» отличается высокой надежностью, минимизируя риск загрязнения реки Иня и близлежащих водоемов сточными водами. Она эффективно защищает разрез от затопления, а также предотвращает загрязнение и истощение подземных вод.

Оценка сточных вод проводится по 26 загрязняющим веществам (ЗВ), наиболее характерные ЗВ представлены в таблице 1. Как видно из полученных данных концентрация загрязняющих веществ в сточных водах в момент выпуска их в приемный водный объект не превышает предельно допустимых значений.

Таблица 1. Концентрация ЗВ в сточных водах на выпуске в водный объект (р.Иня), а также в 500 м выше и в 500 м ниже от места сброса за 2024 год, мг/дм^3

Наименование ЗВ	Выпуск № 1	Выше сброса	Ниже сброса	ПДК
Аммоний-ион	0,390±0,023	0,404±0,024	0,395±0,023	0,5
Нитрит-ион	0,068±0,004	0,064±0,006	0,064±0,004	0,08
Нитрат-ион	6,05±1,35	3,583±0,327	3,816±0,286	20
Нефтепродукты	0,024±0,001	0,026±0,002	0,024±0,001	0,05
Хлориды	11,892±0,792	7,416±0,596	7,291±0,317	50
Сульфаты	46,417±1,052	27,583±1,781	27,75±1,057	50
Железо	0,095±0,004	0,196±0,006	0,185±0,006	0,1
Марганец	0,007±0,0001	0,046±0,005	0,037±0,002	0,01
Сухой остаток	455,166±7,931	299,416±5,992	296,583±7,646	500
Фосфаты	0,056±0,002	0,027±0,006	0,029±0,007	0,1
СПАВ	0,065±0,0001	0,014±0,0006	0,015±0,0005	0,1
$БПК_{полн.}$	1,525±0,019	2,249±0,045	2,231±0,048	3
ХПК	12,250±0,392	19,166±0,569	19±0,527	15
Взвешенные вещества	8,775±1,524	11,258±2,204	10,808±1,918	*

*Содержание в контрольном створе не должно увеличиваться по сравнению с естественными условиями более чем: на 0,25 мг/дм³ для высшей и первой категории водопользования, на 0,75 мг/дм³ для второй категории водопользования. При содержании в межень более 30 мг/дм³ природных взвешенных веществ, допускается увеличение их содержания в воде в пределах 5%. Сброс взвешенных веществ со скоростью осаждения более 0,4 мм/с запрещается.

На предприятии существует действующая система карьерного и поверхностного водоотлива, которая включает в себя зумпфы-водосборники (общий объем 120 тыс. м^3),

находящиеся в горной выработке. В них происходит аккумуляция осадков и карьерный водоприток в виде подземных вод. Далее насосными установками накопленная вода перекачивается в очистные сооружения, где происходит очистка карьерных вод (рис.).

Очистные сооружения карьерных сточных вод представляют собой двухсекционную грунтовую конструкцию. Загрязненные карьерные сточные воды от водоотливных установок поступают в приемную секцию, где, проходя боновые фильтры, очищаются от нефтепродуктов до допустимых концентраций.

В приемной емкости сточные воды проходят первичное осветление, основная масса взвешенных веществ выпадает в осадок по пути от точки сброса до фильтрующего массива. Из приемной секции карьерные сточные воды, поступают в фильтрующий массив. При прохождении фильтрующего массива сточные воды очищаются от взвешенных веществ до допустимых концентраций. Для доочистки карьерных сточных вод от тяжелых металлов, сульфатов, железа и других загрязняющих веществ в фильтрующем массиве выполнена двойная прослойка из цеолита. После фильтрующего массива очищенная вода поступает в водосливную секцию, откуда через водослив шахтного типа отводится в р. Иня. Обеззараживание сточных вод в очистных сооружениях осуществляется путем реагентной обработки воды препаратом «Биопаг».



Рис. 1. Общий вид приемного резервуара очистных сооружений

Проведена оценка эффективности работы существующих очистных сооружений на примере рассматриваемых ЗВ. Сравнительный анализ полученных данных показал, что до поступления на очистные сооружения в карьерных сточных водах наблюдается превышение предельно допустимых концентраций по ряду ЗВ: аммоний-ион, нитрит-ион, сульфаты, железо, марганец, сухой остаток, фосфаты (табл. 2).

Пройдя систему очистки, сточные воды доводятся до нормативных показателей. Наиболее высокая степень очистки наблюдается для взвешенных веществ (71,1 %), а также для марганца (65 %) и нефтепродуктов (63,1 %), менее всего снижается показатель для $БПК_{полн.}$ (3,7 %).

Основной объем очищенных сточных вод (96,6 %) поступает на сброс в поверхностный водный объект – р. Иня. Сброс осуществляется на основании Решения о предоставлении водного объекта в пользование № 1573/РРИ/Сс-12.2024 от 05.12.2024 г., выданное Министерством природных ресурсов и экологии Кузбасса. Кроме того, на предприятии предусмотрено использование очищенных карьерных вод на производственные нужды – полив технологических дорог, обеспыливание поверхностей

(склонов отвалов, взрываемых блоков и т.д.).

Таблица 2. Эффективность очистки карьерных сточных вод на очистных сооружениях разреза «Пермяковский»

Наименование ЗВ	р. Иня, фон	Карьерные воды		Степень очистки, %
		до очистки	после очистки	
Аммоний-ион	0,16	*0,71±0,25*	0,39±0,02	45,1
Нитрит-ион	0,005	*0,17±0,03*	0,07±0,004	58,8
Нитрат-ион	0,51	11,89±2,84	6,05±1,35	49,1
Нефтепродукты	0,04	0,065±0,009	0,024±0,001	63,1
Хлориды	4,0	13,8±2,2	11,89±0,79	13,8
Сульфаты	24,1	*73,5±7,5*	46,42±1,05	36,8
Железо	0,12	*0,17±0,03*	0,095±0,004	29,4
Марганец	0,009	*0,02±0,02*	0,007±0,0001	65
Сухой остаток	343,4	*622±56*	455,166±7,931	26,8
Фосфаты	24,1	*0,069±0,03*	0,056±0,002	18,4
СПАВ	Нет данных	0,1±0,03	0,065±0,0001	35
$БПК_{полн.}$	2,1	1,47±0,21	1,525±0,019	3,7
ХПК	Нет данных	14±3	12,250±0,392	12,5
Взвешенные вещества	12,9	30,4±3,65	8,775±1,524	71,1

Примечание: курсивом выделены концентрации загрязняющих веществ с превышением ПДК.

На предприятии предусмотрено ежегодное проведение водохозяйственных мероприятий и мероприятий по охране водного объекта:

- поддержание в технически исправном состоянии системы водоотвода и очистных сооружений (своевременное обследование и ремонт);
- ведение регулярных наблюдений за водным объектом (его морфометрическими особенностями) и его водоохранной зоной в границах участка водного объекта, предоставленного в пользование;
- осуществление мероприятий по очистке и поддержанию в надлежащем состоянии водоохраной зоны, прибрежной защитной и береговой полосы р. Иня в границах части водного объекта, предоставленной в пользование;
- осуществление контроля качества (химические, бактериологические и паразитологические показатели, токсичность) сбрасываемых сточных вод;
- осуществление контроля качества (химические, бактериологические и паразитологические показатели, токсичность) в поверхностном водном объекте р. Иня в контрольных створах.

Таким образом, результаты работы подчеркивают важность строгого контроля за водопользованием, регулярного мониторинга качества воды и совершенствования очистных технологий для минимизации негативного влияния угольных разрезов на водные экосистемы региона. Кроме того, подчеркивается необходимость комплексного подхода к охране водных ресурсов в условиях активной угледобычи.

Литература

Брель О.А. Задорожная Г.В., Сасаев Н.И., Егорова А.И. Стратегирование водных ресурсов Кузбасса // Экономика в промышленности. 2020. Т. 13/ №3. С. 357–365.

ГОСТ Р 59024-2020 Вода. Общие требования к отбору проб.

Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области – Кузбасса в 2023 году. Кемерово: Администрация правительства Кузбасса; Министерство природных ресурсов и экологии Кузбасса, 2023. 510 с.

Стратегирование водных ресурсов Кузбасса. Кемерово: КемГУ, 2021. 388 с.

Харионовский А.А., Калушев А.Н., Васева В.Н., Симанова Е.И. Экология угольной промышленности: состояние, проблемы, пути решения // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2018. №2. С. 70–81.

ASSESSMENT OF POLLUTANT EMISSIONS DURING COAL MINE DEVELOPMENT AND THEIR IMPACT ON WATER ECOSYSTEMS

D.V. Katenovich, M.O. Osipova, S.L. Luzyanin

The study focuses on monitoring and standardization of water quality under the conditions of anthropogenic impact of coal mines using the example of the Permyakovsky open-pit coal mine in the Kemerovo region. Wastewater and surface water were analyzed, the efficiency of treatment facilities was assessed, and the main pollutants and their concentrations were identified. Despite exceeding the maximum permissible concentrations for several indicators (such as ammonium ion, nitrite ion, and iron) in the initial quarry waters, the existing water disposal and wastewater treatment system effectively reduces these levels to standard values, minimizing the negative impact on water bodies. The study emphasizes the importance of comprehensive environmental monitoring and the implementation of advanced water treatment technologies in the coal mining industry.

МОНИТОРИНГ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БОЛОТНЫХ ВОД (НА ПРИМЕРЕ БОЛОТ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ)

В.А. Кирьянова, Е.В. Линкевич, Е.Н. Гуляева, А.Ю. Родин

Отдел комплексных научных исследований Карельского научного центра РАН

Представлены результаты гидрохимического анализа поверхностных вод естественных болот Республики Карелия за 2024 г. Особое внимание уделяется изучению кислотности и окислительно-восстановительным свойствам воды. Проведена оценка общей минерализации в период с мая по август и растворенного органического углерода. Показано, что олиготрофные болота Близкое и Агвен-Суо схожи по своему гидрохимическому составу. Установлено влияние экологических факторов на динамику растворенного органического углерода и его компонентов – низкомолекулярных карбоновых кислот.

Болотные экосистемы являются природным резервуаром органического углерода, образующегося в результате жизнедеятельности микробного сообщества под действием экологических факторов (Вомперский и др., 1994; Garcia 2023; Xu 2021). В Республике Карелия почти 20 % территории занимают болота с различным гидрологическим режимом в зависимости от типа минерального питания, микрорельефа, растительности (Елина, Кузнецов, Максимов, 1987; Лозовик, 2007; Филимонова, 1988). Сформированный состав поверхностных вод, выполняющий роль стока углерода, характеризует особенности развития болот и распределение растворенного органического углерода.

Основная цель данной работы заключалась в оценке изменения органического углерода и ионного состава воды в зависимости от кислотных и окислительно-восстановительных характеристик поверхностных вод.

Поверхностные воды отбирали на олиготрофных болотах Близкое (62°26’83” N, 33°99’45” E), расположенное в государственном природном заповеднике «Кивач» (Кондопожский район, Республика Карелия), и Агвен-Суо (61°84'21"02 N, 33°16'26"63 E) (Пряжинский район, пос. Эссойла). Количество проб для исследования физико-химический характеристик составляло от 6 до 12 проб на каждом объекте на расстоянии 50 – 100 м между местами отбора. Всего проанализировано 50 проб. На болоте Близкое заборы проводили раз в месяц с мая по август по всей территории болота. На болоте Агвен-Суо отбирали поверхностные воды с июня по август также на расстоянии. Окислительно-восстановительный потенциал (*Eh*) измеряли на лабораторном иономере И-160МИ с применением платинового редокс-электрода ЭРП-101. Содержание углерода и азота определяли на элементном анализаторе CN 802 (VELP Scientific, Италия). Идентификацию и количественное определение катионов (NH_4^+, K^+, Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}), органических и неорганических анионов (Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-, F^-, PO_4^{3-}, ацетат-, оксалат-, формиат-ионы) и органических кислот в болотной воде проводили на приборе Капель-105М методом капиллярного электрофореза при длине волны 254 нм.

Болотные воды содержат продукты трансформации органического вещества в результате деструкции растений-торфообразователей (Головченко и др., 2021). Особое влияние на катионно-анионный состав воды оказывают геохимические особенности торфяной залежи. Общее содержание органических и неорганических веществ болотных вод различных объектов выражается величиной минерализации (рис. 1). Олиготрофные болота Близкое и Агвен-Суо характеризуются низким количеством растворенных веществ – 75–105 в июне и 100–125 мг/л в начале августа, что свойственно подобным типам болот (Шварцев, 2012; Женихов и др.,2022).

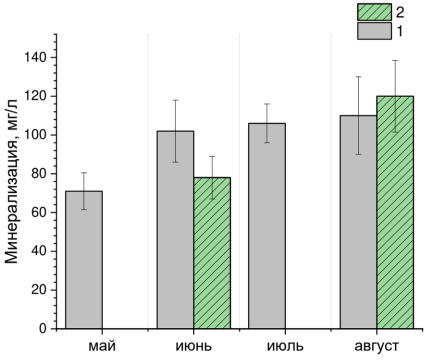


Рис. 1. Общая минерализация болотных вод в зависимости от сезона:
1 – болото Близкое, 2 – болото Агвен-Суо

Болотная вода, являясь стоком органических и неорганических веществ, в результате процессов разложения торфа выполняет функцию сохранения, накопления и переноса растворенного вещества, а также обмена с другими участками болот. Проведенный гидрохимический анализ болотных вод в таблице 1 показывает сходство

минерального питания олиготрофных болот и различие в питании нарушенных и мелиорированных участков болот.

Таблица 1. Химический состав болотных вод олиготрофных болот в период с мая по август 2024 года

мкмоль/л	Болото Близкое				Болото Агвен-Суо	
	май	июнь	июль	август	июнь	июль
NH_4^+	30,1±1,0*	47,7±2,0	66,9±0,6	57,0±2,8	37,8±7,1	34,4±0,5
K^+	20,0±0,2	23,8±0,6	52,8±0,5	52,1±2,3	23,3±5,1	34,3±0,3
Na^+	41,7±4,0	44,9±0,5	53,0±1,3	33,9±0,4	54,7±1,3	48,7±8,0
Mg^{2+}	39,1±3,0	41,5±0,7	69,5±0,7	34,5±1,2	41,9±0,9	53,9±5,0
Ca^{2+}	105,0±2,0	119,7±0,2	161,7±2,0	100,3±2,7	119,0±6,0	159,0±9,0
Cl^-	37,5±0,8	63,7±0,2	101,0±5,0	41,5±2,8	37,0±2,0	33,0±2,0
SO_4^{2-}	27,1±0,3	16,3±0,4	40,6±1,8	12,3±3,7	20,6±0,6	15,0±1,0
PO_4^{3-}	2,5±0,1	4,1±0,1	20,0±1,4	3,2±0,2	0	0

Катионный состав болотных вод преимущественно представлен NH_4^+, K^+, Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} (таблица 1). Количество Ca^{2+} достигает наиболее высоких значений в июле на олиготрофных болотах Близкое и Агвен-Суо – 161,7 и 159,0 мкмоль/л соответственно, что обусловлено низким количеством жидких осадков и жарким летом. Анионный ряд представлен Cl^-, SO_4^{2-}, PO_4^{3-}, среди которых преобладает Cl^- (на болоте Близкое в июле концентрация достигает 101,0 мкмоль/л). Нитраты и фториды не были обнаружены. Относительно высокое минеральное питание болота Близкое по сравнению с Агвен-Суо связано с влиянием развития на позднеледниковых глинах и окружением суглинистыми моренами. По преобладающему аниону болотная вода относится к хлоридному классу. А преобладающим катионом является кальций, следовательно, вода относится к типу кальциевых вод.

Зависимости величин *Eh* от *pH* поверхностных вод на исследуемых объектах имеют линейный характер и описываются уравнениями, по которым можно сравнить интенсивность окислительно-восстановительного процесса (Jackson R. E. 1982):

$$Eh_{1\ ox/red} = 0{,}907 - 0{,}1498pH,\ R^2 = 0{,}81 \quad (1)$$

$$Eh_{2\ ox/red} = 2{,}83 - 0{,}66pH,\ R^2 = 0{,}97 \quad (2)$$

Преобразование выражений (1) и (2) позволяет сравнить константы $E^0_{ox/red}$, характерные для двух объектов:

$$Eh_1'_{\ ox/red} = 0{,}357 - 0{,}059pH \quad (3)$$

$$Eh_2\ '_{ox/red} = 0{,}252 - 0{,}059pH \quad (4)$$

Так, в воде болот Близкое и Агвен-Суо протекают однообразные окислительные процессы, которые характеризуются низкими значениями констант $E^0_{ox/red}$, определяющие схожий механизм передачи электронов. Стоит отметить, низкое значение константы для болота Агвен-Суо (0,252), которое указывает на относительно слабые окислительные условия по сравнению с болотом Близкое. Также обнаружен широкий диапазон изменчивости pH на болоте Близкое от 3,6 до 4,5, и небольшой диапазон pH болотных вод Агвен-Суо, что указывает на неоднородность микрорельефа.

Количество растворенного органического углерода на болоте Близкое закономерно увеличивалось с мая (20±2 мг/л) по август (43±2 мг/л). Схожие результаты были показаны на болоте Агвен-Суо: закономерный рост органического углерода в воде в течение вегетационного периода. В болотах обнаружены такие карбоновые кислоты, как щавелевая, муравьиная, молочная и уксусная, которые являются индикаторами активности микробного сообщества и развития болотных растений (табл. 2). Количество органических кислот для естественных болот находилось в следующей зависимости: уксусная > молочная > муравьиная > щавелевая. Суммарная концентрация низкомолекулярных кислот была выше на болоте Близкое (106,1 мкмоль/л) в 3 раза по

сравнению с болотом Агвен-Суо (29,7 мкмоль/л), что может быть связано с особенностями рельефа болота.

Таблица 2. Сравнительная характеристика количества низкомолекулярных органических кислот болотных вод (июнь 2024)

Кислота	Показатель кислотности	Концентрация, мкмоль/л	
		Близкое	Агвен-Суо
Щавелевая кислота	pK_{a1} 1,25; pK_{a2} 4,27	3,4±0,6	2,0±0,1
Муравьиная кислота	3,75	15,0±2,0	6,7±0,5
Молочная кислота	3,86	28,7±6,1	9,2±0,9
Уксусная кислота	4,76	59,0±5,0	11,8±0,8

Константы диссоциации органических кислот практически совпадают с *pH* воды или превышают его, что свидетельствует о низкой концентрации молекулярной формы кислоты и преобладании ионной формы, неполной диссоциации кислот при данном pH воды. Однако в случае уксусной кислоты (pK_a 4,76) концентрация молекулярной формы будет выше в воде и может влиять на кислотность pH болотной воды.

Полученные результаты анализа болотных вод показали сходство гидрохимического состава на олиготрофных болотах Близкое и Агвен-Суо, расположенных на расстоянии 150 км на территории Республики Карелия. Широкий диапазон кислотности и величин окислительно-восстановительного потенциала на болоте Близкое свидетельствуют об особенностях микрорельефа с отличным уровнем болотных вод и, соответственно, неравномерным распределением растворенного органического вещества. Обнаруженная динамика гидрохимического состава поверхностных болотных вод и растворенного органического углерода обусловлена экологическими факторами и сезонной трансформацией органического вещества.

Работа выполнена при поддержке госбюджетной темы Карельского научного центра РАН.

Литература

Филимонова Л.В., Еловичева Я.К. Основные этапы развития растительности лесов и болот в голоцене на территории заповедника «Кивач» // Болотные экосистемы Европейского Севера. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1988. С. 94-109.

Garcia P.E., Garcia R.D., Jara F.G. Heterogeneity in the dissolved organic matter features as expression of precipitation gradient in seasonal wetlands in austral forest of Patagonia //Wetlands Ecology and Management. 2023. Т. 31. №5. С. 661-672.

Hines M.E., Duddleston K.N., Kiene R.P. Carbon flow to acetate and C1 compounds in northern wetlands //Geophysical Research Letters. 2001. V. 28. №22. С. 4251-4254.

Jackson R.E. Interpretation of pH and Eh Trends in a Fluvial-Sand Aquifer System // Water Resour. Res. 1982. V. 18 (4). P. 1255– 268.

MONITORING OF HYDROCHEMICAL INDICATORS OF SWAMP WATERS (ON THE EXAMPLE OF SWAMPS IN THE REPUBLIC OF KARELIA)

V.A. Kiryanova, E.V. Linkevich, E.N. Gulyaeva, A. Yu. Rodin

The results of hydrochemical analysis of surface waters of natural swamps of the Republic of Karelia for 2024 are presented. Special attention is paid to the study of acidity and redox properties of water. Total mineralization in the period from May to August and dissolved organic carbon are assessed. It is shown that oligotrophic bogs Blizkoye and Agven-Suo are similar in their hydrochemical composition. The influence of environmental factors on the

dynamics of dissolved organic carbon and its components - low molecular weight carboxylic acids was established.

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЗЕР БОЛЬШИЕ И МАЛЫЕ ХРУСЛОМЕНЫ (ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИИ 2024 ГОДА)

Н.М. Кокрятская, Г.Н. Лосюк, С.С. Попов, К.В. Титова
ФИЦ комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН

Приведены результаты гидрохимических исследований, полученные в ходе экспедиционных работ в августе 2024 года, двух озер – Большие Хрусломены и Малые Хрусломены (ныне оз. Банное), бывших морских заливов, отделенных от моря в начале XX века при строительстве лесозавода на острове Олений (Кандалакшский залив Белого моря). В настоящее время оз. Банное полностью пресное, а оз. Большие Хрусломены, несмотря на регулярное поступление морской воды во время прилива, является меромиктическим водоемом с эвксинной аноксией.

Данная работа является продолжением наших исследований по изучению водоемов, в разной степени отделившихся от Белого моря, расположенных в районе Беломорской биологической станции МГУ им. М.В. Ломоносова. Она выполнена на примере двух озер Большие и Малые Хрусломены, расположенных на острове Олений, губа Ковда, пос. Лесозаводский, Кандалакшский залив Белого моря. В отличие от ранее исследованных прибрежных озер (Краснова, 2021, Лосюк и др., 2023, Шапоренко и др., 2005), на отделение этих водоемов от моря не влияли природные процессы (например, постепенное постгляциальное поднятие суши). Они были отделены от моря искусственно при постройке лесозавода на о. Олений в 1895 г., путем увеличения высоты естественных порогов, отделявших их от моря, с целью опреснения для заправки паровых машин лесозавода. До этого времени это были глубоко врезающиеся в сушу морские заливы. В настоящее время оз. Малые Хрусломены (ныне оз. Банное) полностью пресное, а оз. Большие Хрусломены, несмотря на то, что морская вода поступает в него через порог во время прилива, является меромиктическим водоемом с эвксинной аноксией (Краснова, 2021, Лосюк и др., 2019, Лунина и др., 2023, Savvichev et al., 2020). В ходе экспедиционных работ в августе 2024 года был выполнен комплекс гидрохимических исследований для оценки современного состояния обоих водоемов.

Основные гидрохимические характеристики определяли непосредственно на борту лодки при помощи портативного оксиметра HQ30D.99 с люминесцентным датчиком LDO (Hach Lange), кондуктометра HI 8733 (Hanna) и pH-метра HI 991001 с автотермокомпенсацией (Hanna). В условиях полевой лаборатории в день отбора проб определяли концентрации сероводорода (фотометрическим и иодомотрическим методами), форм растворенного железа (в отфильтрованных при отборе через фильтр 0.45 мкм пробах воды фотометрическим методом с использованием феррозина) и биогенных элементов по стандартным и апробированным методикам. При этом аналитические процедуры осуществлялись с учетом всех тонкостей отбора и анализа воды с большим содержанием сероводорода (Лосюк и др., 2021), что позволило максимально сократить его потери и получить корректные результаты. Ионный состав воды (сульфатов, хлоридов, натрия, калия, магния, кальция) определяли на жидкостном хроматографе Shimadzu LC-20 Prominence с кондуктометрическим детектором.

Пробы воды отбирали горизонтальным поликарбонатным батометром объемом 5 л на двух станциях в оз. Банное: Bn1 (глубина 5,5 м) и Bn2 (глубина 3,5 м) и на трех

станциях в оз. Большие Хрусломены: Нг1 (глубина 18,5 м), Нг2 (глубина 6,5 м) и Нг3 (глубина 4 м). Расположение станций отбора приведено на рисунке 1.

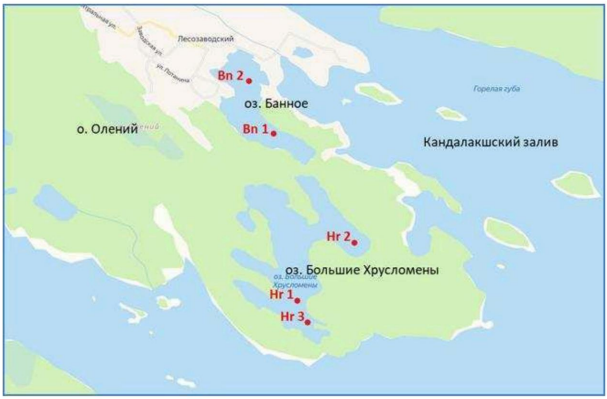


Рис. 1. Расположение станций отбора проб воды в озерах Банное и Большие Хрусломены в августе 2024 г.

В ходе проведенных исследований установлено, что в августе 2024 г. поверхностные воды обоих озер были прогреты до температуры 19-21°С, но в оз. Банное они занимали глубины до 2 м, а в оз. Большие Хрусломены только до 1,5 м (рис. 2). Затем температура начинала уменьшаться, причем, некоторое уменьшение температуры отмечено даже в придонном слое ст. Вп2 (до 16°С), расположенной на открытой относительно мелководной части акватории оз. Банное. При этом придонный слой воды глубоководной ст. Вп1 имел температуру всего 13,5°С.

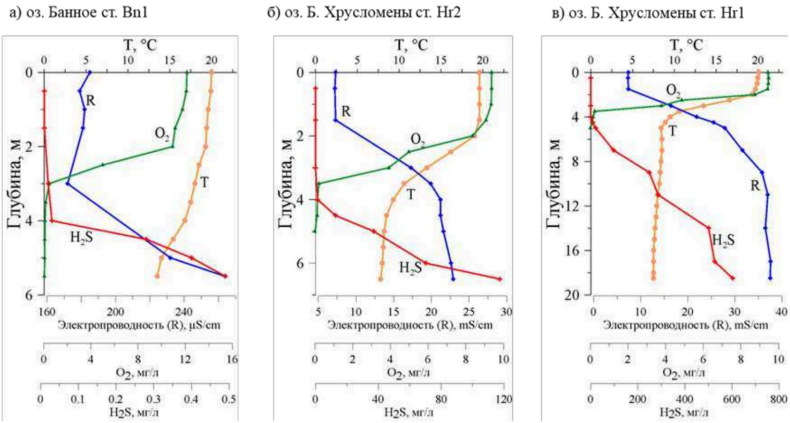


Рис. 2. Вертикальное распределение гидрохимических параметров в озерах Банное и Большие Хрусломены в августе 2024 г.

В оз. Банное вода по всей глубине имела слабую коричневатую окраску, по-видимому, за счет содержания в ней небольшого количества гуминовых веществ – ее цветность составляла 85-90 град. (по хром-кобальтовой шкале). Скорее всего, по этой же причине, но более слабую окраску до глубины 1,5 м имели воды оз. Б. Хрусломены (38-39 град.). Влияние на окраску воды гуминовых веществ подтверждают данные о количестве растворенного железа, наиболее высокие концентрации которого отмечены в пресных и поверхностных распресненных водах обоих водоемов. Ниже до глубины хемоклина (2,5 – 3,5 м) вода была бесцветная, затем ее цвет менялся на зеленовато-желтый и интенсивно зеленый (только на ст. Hr1, где он обусловлен развитием зелено окрашенных аноксигенных фототрофных бактерий (Savvichev et al., 2020; Лунина и др., 2023)); затем вода вновь становилась бесцветной и немного желтела к придонным горизонтам, однако, ее цветность с глубиной увеличивалась.

Величина pH существенно различалась для водоемов с пресной и соленой водой. Так в оз. Банное, она изменялась в пределах от 9,05 до 9,97. Столь высокие значения показателя связаны с активным продуцированием кислорода фитопланктоном в ходе фотосинтеза (наблюдалось цветение озера), при этом на глубинах до 2-х метров насыщение вод кислородом составляло 107-136 %. Минимальные значения отмечены в придонном слое ст. Bn1 – 6,57-6,78. В оз. Большие Хрусломены величина pH изменялась преимущественно в интервале 7,1-7,5; на всех трех станциях отмечено возрастание показателя до 7,99-8,06 на глубине 1,5 м (над галоклином).

Озеро Большие Хрусломены в пределах всей обследованной нами акватории характеризовалось четко выраженной стратификацией, наличием термо-, хемо- и галоклина на глубине 2–4 м (рис. 2б, в). На всех станциях верхние слои воды до глубины 1,5 м имели минерализацию/соленость (получена расчетным путем) 4,6-4,7 г/л; затем она резко увеличивалась и постепенно достигала максимальных значений в придонных горизонтах – 14,7 г/л на глубине 6,5 м на ст. Hr2 и 24 мг/л (18,5 м) на ст. Hr1. Термоклин на всех трех станциях, включая наиболее мелкую приближенную к морскому краю озера ст. Hr3, начинался на глубине 2,5-3 м. Можно отметить, что по всей акватории озера на всех обследованных участках акватории с глубиной 6 м и более температура воды на глубине 4 м составляла 9,3- 9,5°C; затем она постепенно снижалась до минимальных значений в нижних слоях монимолимниона: 8-7,8°C на ст. Hr2 (8,4-8,5°C на этой же глубине на ст. Hr1) и 7,6-7,5°C на глубоководной станции. Эта же глубина 4 м являлась нижней границей распространения кислородных вод, ниже находятся воды зараженные сероводородом. Слой сосуществования аэробных и сероводородных вод (хемоклин) занимал глубины от 3,5 до 4 м.

В оз. Большие Хрусломены сероводород фиксировался повсеместно, начиная с глубины 3,5-4,5 м. Даже на наиболее приближенной (~500 м) к морскому краю озера ст. Hr3 он появляется сначала в следовых количествах (0,01 мг/л) на глубине 3 м, а затем в придонном слое воды (4 м) - 0,12 мг/л. В этом же диапазоне глубин отмечено появление сероводорода и на других станциях (рис. 2б, в). По мере нарастания глубины количество его постоянно увеличивается, достигая максимальных значений в придонных горизонтах – 117 мг/л на ст. Hr2 на глубине 6,5 м (97 мг/л на этой же глубине на ст. Hr1) и 603 мг/л на глубине 18,5 м ст. Hr1. Полученные в текущем году высокие концентрации сероводорода в придонных глубинных водах хорошо согласуются с результатами, полученными нами здесь ранее – с 2013 по 2019 гг. (Лосюк и др., 2019) и сопоставимы с данными для меромиктического оз. Трехцветное (Ругозерская губа Кандалакшского залива Белого моря), отделившегося от моря в результате поднятия суши, начавшегося после схода ледника 10-12 тыс. лет назад (Лосюк и др., 2021). Высокие концентрации сероводорода в монимолимнионе, особенно в его нижних горизонтах обусловлены высокой активностью сульфатредуцирующих бактерий, как по данным (Savvichev et al.,

2020) скорость восстановления сульфата увеличиваясь с глубиной, достигая пика в придонных горизонтах (до 0,6–1,1 мкмоль S/л в день). Наряду с высоким содержанием H_2S в толще вод монимолимниона наблюдаются также и экстремально высокие концентрации метана - до 1,8 ммоль/л на глубине 18 м (Саввичев и др., 2019). В ходе исследований ионного состава проб воды было установлено уменьшение количества сульфата по мере увеличения глубины озера. Данный процесс сопровождался и изменением сульфатно-хлоридного коэффициента от 126-136 в аэробных водах миксолимниона (что близко к данным для морской воды, разбавленной поверхностным стоком) до 8-9 на глубине 18,5 м. Можно отметить, что полученные данные близки к результатам, приведенным в работе (Savvichev et al., 2020).

Появление сероводорода было отмечено в придонных водах на ст.Bn1 оз. Банное (рис. 2а), где его концентрации составили 0,40-0,49 мг/л. К активизации процесса сульфатредукции могло привести с одной стороны обогащение придонных горизонтов воды лабильной органикой (мы наблюдали густую зеленую взвесь отмершего фитопланктона в придонных слоях воды на этой станции). С другой стороны, воды этих придонных горизонтов имели несколько более высокую минерализацию (рис. 2а), по сравнению с данными для вышерасположенных вод по всей акватории озера. Как показали результаты жидкостной хроматографии, и содержание основных ионов здесь было также повешено, всех, кроме сульфатов, количество которых было почти в два раза ниже, что позволяет предположить их расходование в восстановительном процессе, в ходе которого и генерируется сероводород. Наличие это слоя, возможно, является результатом проникновения соленых вод из расположенного рядом оз Большие Хрусломены сквозь/через неширокую низкую перемычку, разделяющую эти водоемы (рис. 1). С другой стороны, оз. Банное может являться поставщиком биогенных элементов в оз. Большие Хрусломены, что может стимулировать развитием в нем водорослей и цианобактерий (Лунина и др., 2023). Так, например, количество фосфатов в оз. Банное составляет в среднем 200 мкг/л, что почти в 100 раз выше, чем в оз. Большие Хрусломены.

Таким образом, результаты, полученные по данным экспедиционных работ в августе 2024 года позволили установить основные гидрохимические показатели двух искусственно отделенных более ста лет назад от моря озер. Показано, что в настоящее время более мелкое (оз. Банное) является пресным, воды на открытой части его акватории однородны по всей глубине, однако на относительно глубоком участке отмечено развитие стратификации с появлением сероводорода в придонном горизонте. В озере Большие Хрусломены подтверждена устойчивость меромиктической структуры на всей акватории водоема с сохранением ранее установленных параметров.

Литература

Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Демиденко Н.А., Кокрятская Н.М., Пантюлин А.Н., Рогатых Т.А., Самсонов Т.Е., Фролова Н.Л., Шапоренко С.И. К инвентаризации реликтовых водоемов, отделяющихся от Белого моря // Труды Беломорской биостанции МГУ. 2016. Т. 12. С. 211–241.

Краснова Е.Д. Экология меромиктических озер России. 1. Прибрежные морские водоемы // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. №3. С. 322–333.

Лосюк Г.Н., Краснова Е.Д., Кокрятская Н.М., Воронов Д.А. Основные гидрологические параметры озера Большие Хрусломены (Кандалакшского залива Белого моря) // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием LXXII Герценовские чтения «География: развитие науки и образования». Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена. СПб, 2019. Т.1. С. 334-336.

Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М., Краснова Е.Д. Сероводородное заражение прибрежных озер на разных стадиях изоляции от Белого моря // Океанология. 2021. Т. 61, №3. С. 401-412.

Лунина О.Н., Груздев Д.С., Пацаева С.В., Жильцова А.А., Сузина Н.Е., Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Кокрятская Н. М., Веслополова Е.Ф., Саввичев А.С. Аноксигенные фототрофные бактерии меромиктического озера Большие Хрусломены (о. Олений, Кандалакшский залив, Мурманская область, Россия) // Микробиология. 2023. Т. 92. №6. С. 564–580.

Саввичев А.С., Кадников В.В., Каллистова А.Ю., Русанов И.И., Воронов Д.А., Краснова Е.Д., Равин Н.В., Пименов Н.В. Фотозависимое окисление метана – важнейший процесс цикла метана в водной толще полярного озера Большие Хрусломены // Микробиология. 2019. Т. 88, №3. С. 367–371.

Шапоренко С.И., Корнеева Г.А., Пантюлин А.Н., Перцова Н.М. Особенности экосистем отшнуровывающихся водоемов Кандалакшского залива Белого моря // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. №5. С. 517-532.

Savvichev A.S., Kadnikov V.V., Rusanov I.I., Beletsky A.V., Krasnova E.D., Voronov D.A., Kallistova A.Yu, Veslopolova E.F., Zakharova E.E., Kokryatskaya N.M., Losyuk G.N., Demidenko N.A., Belyaev N.A., Sigalevich P.A., Mardanov A.V., Ravin N.V., Pimenov N.V. Microbial Processes and Microbial Communities in the Water Column of the Polar Meromictic Lake Bol'shie Khruslomeny at the White Sea Coast // Frontiers in microbiology. 2020. №11.

HYDROCHEMICAL PARAMETERS OF THE LAKES BOL'SHIE AND MALYE KHRUSLOMENY (BASED ON THE 2024 EXPEDITION DATA)

N.M. Kokryatskaya, G.N. Losyuk, S.S. Popov, K.V. Titova

The article presents the results of hydrochemical studies of two lakes – Bolshye Khruslomeny and Malye Khruslomeny (now lake Bannoe), obtained during the expeditionary work in August 2024. These lakes were sea bays until the beginning of the 20th century. However, during the construction of a timber mill on Oleniy Island (Kandalaksha Bay of the White Sea), it were separated from the sea. Currently, Bannoye lake is completely freshwater, and the lake Bolshye Bolshye Khruslomeny, despite the regular supply of seawater at high tide, is a meromictic reservoir with euxinic anoxia.

ЦИКЛ УГЛЕРОДА В СИСТЕМЕ ВОДА-АТМОСФЕРА ЗАРАСТАЮЩЕЙ ЛИТОРАЛИ ЭВТРОФНОГО ОЗЕРА КУЧАК (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

В.Н. Колотыгина[1,2], Е.А. Солдатова[1]
[1]Институт лесоведения ИЛАН РАН
[2]Тюменский государственный медицинский университет

В работе исследуется влияние плавающих макрофитов на потоки парниковых газов и геохимию углерода в эвтрофном озере Кучак. Измерения проводились с мая по октябрь 2023 года с использованием эмиссионных камер. Результаты показывают, что потоки углекислого газа снижаются с 80 до -40 мгCO_2м$^{-2}$ч$^{-1}$ в летний период за счет фотосинтетической активности фитопланктона и высших водных растений. Потоки метана со свободной поверхности воды в среднем составляют 1,5–2 мгCH_4м$^{-2}$ч$^{-1}$ и увеличиваются в 6 раз при попадании листьев *Nuphar lutea* под диффузионную камеру, что связано со способностью макрофитов транспортировать метан от прикорневой зоны

к поверхности воды. Осенью разложение растительности в 3,3 раза увеличивает концентрацию DOC, что способствует росту концентрации растворенных CO_2 и CH_4 и снижение насыщения воды кислородом. Эти данные подчеркивают значительное влияние макрофитов на углеродный цикл в озерах и эмиссию парниковых газов.

Современное изменение климата, вызванное увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере, в частности углекислого газа и метана, является одной из наиболее острых проблем (Berdsi et al., 2011; Залесов, 2021). Пресные водоемы, хотя и занимают относительно небольшую часть поверхности Земли, играют значительную роль в глобальном цикле углерода, влияя на климат (Cole et al., 2007; Verpoorter et al., 2014; Tranvik et al., 2018). Озера не только активно трансформируют и перераспределяют углерод, поступающий с суши, но и служат местами его активного секвестирования, что делает их воздействие на климат непропорционально большим по сравнению с их размерами (Dean and Gorham, 1998; Cole et al., 2007; Battin et al., 2008; Rosentreter et al., 2021). Особое внимание в исследовании углеродного баланса привлекают щелочные озера (Bergier, 2012; Wen, 2016; Melo, 2022), такие как малые озера юга Тюменской области. Эти водоемы обладают уникальной способностью поддерживать жизнедеятельность алкалифильных микроорганизмов, которые адаптированы к высоким значениям pH и способны осуществлять как фотосинтетические, так и гетеротрофные процессы, включая метаногенез и метанотрофию (Horikoshi, 1999; Santos, Sant'anna, 2010; McGenity, Sorokin, 2010; Khmelenina et al., 2010). Кроме микроорганизмов, значительное влияние на углеродный баланс озера оказывают водные растения, в частности, плавающие макрофиты, такие как кубышка желтая (*Nuphar lutea*). Эти растения не только поглощают углекислый газ в процессе фотосинтеза, но и обеспечивают поступление органического вещества, которое является субстратом для метаногенеза, а также способствуют транспорту газов из прикорневой зоны в атмосферу (Dacey, 1981; Armstrong, 1978; Visser, 1997; Ribaudo, 2023). В данной статье мы фокусируемся на изучении временной динамики ключевых физико-химических параметров воды и цикла углерода на литорали, заросшей преимущественно *Nuphar lutea.*

Для этого исследования выбрано мелководное эвтрофное озеро Кучак, расположенное в зоне умеренного климата в Нижнетавдинском районе Тюменской области (Российская Федерация, Западная Сибирь) (рис. 1). Площадь водного зеркала составляет 342 га, глубина (по данным измерений в июне-июле 2022 г.) до 5 м, дно илистое, пологие берега сложены суглинками, местами торфом. Согласно (Алекин, 1970), воды озера Кучак характеризуются как ультрапресные, слабощелочные либо щелочные в зависимости от сезона, гидрокарбонатные магниево-кальциевые. Трофность озера определяли по трофическому индексу Карлсона (Carlson, 1977). Согласно расчетам, озеро Кучак является эвтрофным, характеризуется пониженной прозрачностью, наличием сине-зеленых водорослей, в теплые месяцы образуется водорослевая пена, наблюдается зарастание макрофитами.

Отбор проб воды и измерение потоков парниковых газов (ПГ) проводились с мая по октябрь 2023 года в светлое время суток на литорали, заросшей Nuphar lutea. Измерения диффузионных потоков ПГ (далее – удельные потоки, УП) выполнялись методом эмиссионных темных камер с газоанализатором GasScouter G4301 (Picarro). Метеорологические параметры фиксировались метеостанцией Kestrel 5000. Удельные потоки рассчитывались с использованием линейной регрессии (Глаголев и др. 2010). Концентрацию растворенного метана определяли газохроматографически на «Кристалл-2000». Анализ растворенного органического углерода (DOC) проводился методом каталитического окисления на VarioTOCcube, а компоненты карбонатной системы —

методом титрования. Физико-химические параметры измерялись мультиметром WTW Multi 3630 IDS. Компоненты карбонатной системы (HCO_3^-, CO_3^{2-}, $CO_{2раств}$) определялись потенциометрическими титрованием.



Рис. 1. Схема размещения пункта наблюдения за химическим составом вод и потоками парниковых газов озера Кучак

В летний период значения pH увеличиваются, достигая 9,0 в июле (рис. 2а), среда изменяется со слабощелочной до щелочной, что связано с усиленной фотосинтетической активностью фитопланктона и водных растений, которые поглощают CO_2, повышая щелочность воды. К октябрю pH падает до минимальных 7,5, среда становится нейтральной, из-за снижения фотосинтетической активности и интенсивного разложения плавающих макрофитов (Wetzel, 2001).

Процент насыщения воды кислородом (DO) (рис. 2в) до середины лета обычно превышал 100%, достигнув максимума в конце июля. Далее DO начинал снижаться, упав более чем в 6 раз к сентябрю. Это связано с расходованием кислорода на минерализацию органического вещества, поступающего в результате окончанием разложения *Nuphar Lutea*. В октябре, когда процесс активной минерализации растворенного органического вещества завершается и с понижением температуры воды уровень DO вновь повысился и к середине октября уже превышал 100%.

В летний период значения электропроводности (EC) ниже, чем весной и осенью (рис. 2г), что связано с активным потреблением доступных питательных веществ растительностью летом и минерализацией органического вещества осенью (Schindler, 2006).

В летний период концентрация HCO_3^- снижается, а CO_3^{2-} увеличивается (рис. 2г). Эти колебания связаны с изменениями pH, так как более высокие значения pH (больше 8,3) способствуют преобразованию HCO_3^- в CO_3^{2-}, а более низкие – в растворенный CO_2 (Stumm, Morgan, 1996; Morel, 1993). Концентрация растворенного CO_2 (рис. 2г) остается относительно низкой в течение всего года (0–2 мг/л), но в сентябре более чем в 20 раз. Одновременно с этим в 3 раза увеличивается концентрации DOC (рис. 2б). Это говорит о том, что происходит минерализация растворенного органического вещества, поступившего в результате разложения *Nuphar Lutea* (Wetzel, 2001; Human, 2015), и при снижении фотосинтетической активности CO_2 накапливается в воде. Одновременно с этим наблюдается увеличение концентрации растворенного CH_4 в 5 раз по сравнению с весенне-летним периодом (рис. 5а). Можно сделать вывод, что это тоже связано с поступлением органического вещества, являющегося субстратом для метаногенеза.

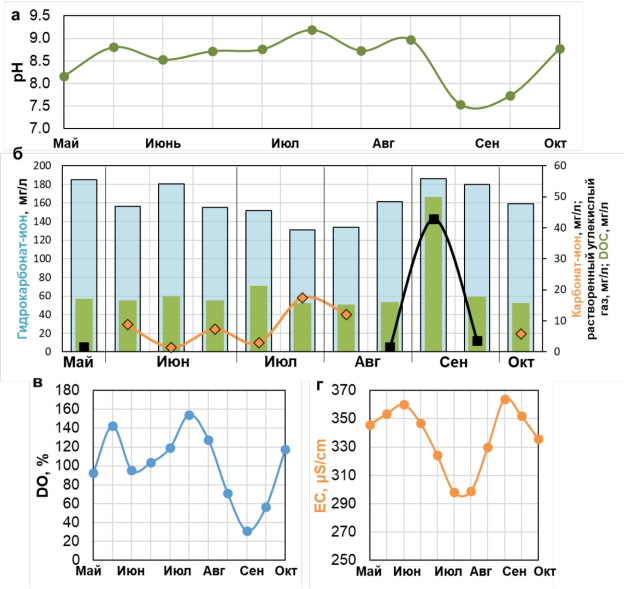


Рис. 2. Динамика изменения физико-химических параметров воды озера Кучак и компонентов карбонатной системы: а – водородный показатель (pH), б – содержание HCO_3^-, CO_3^{2-}, CO_2 раств., в – содержание растворенного кислорода (DO), г – электропроводность (EC)

Удельные потоки (УП) метана в течение года остаются относительно стабильными, за исключением пика в июле, где УП CH_4 увеличивается в 6,3 раза по сравнению с медианным значением (рис. 4а). Мы предполагаем, что этот пик связан с попаданием листьев *Nuphar lutea* под эмиссионную камеру. Результаты эксперимента с измерением УП на свободной поверхности воды, листьях и при срезанных листьях показали, что УП как CH_4, так и CO_2 ниже со свободной поверхности воды (рис. 5). Увеличение УП CH_4 при попадании листьев под камеру связано со способностью высших сосудистых растений транспортировать газ от прикорневой зоны в атмосферу (Dacey, 1981; Armstrong, 1978; Visser, 1997). Увеличение УП CO_2 связано с тем, что под темной камерой фотосинтетическая активность снижается и растения начинают выделять CO_2. Еще одной вероятной причиной увеличения потоков CO_2, может быть окисление метана, который накапливается под листьями *Nuphar lutea* в результате пузырьковой эмиссии. Соответственно, в июле реальный диффузионный поток как CH_4, так и CO_2, должен был быть ниже измеренного.

В весенний и осенний периоды при pH ниже 8,3 происходит эмиссия CO_2 в атмосферу. В летний период наблюдается чистое поглощение CO_2, при котором минимальное значение УП составило -40 мгCO_2м$^{-2}$ч$^{-1}$ (рис. 3б). Это связано с пиковой фотосинтетической активностью фитопланктона и водных растений (Wetzel, 2001; Attermeyer, 2016). Снижение фотосинтетической активности и начало интенсивного отмирания растительности в сентябре объясняют возвращение к положительным потокам CO_2.

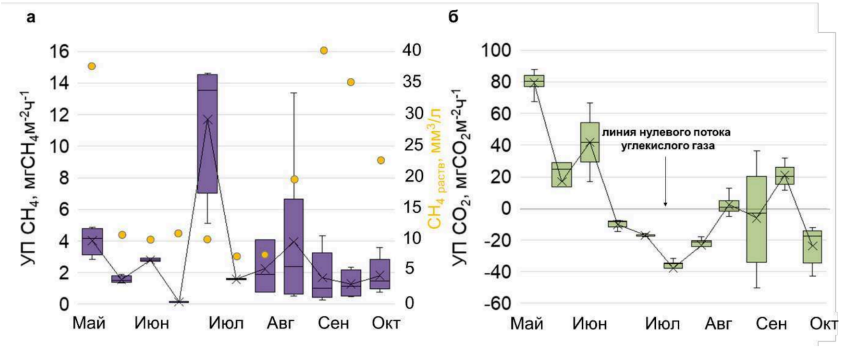


Рис. 3. Динамика изменения потоков парниковых газов с поверхности водного зеркала зарастающей литорали озера Кучак: а – удельные потоки метана и содержание растворенного метана в воде, б – удельные потоки углекислого газа

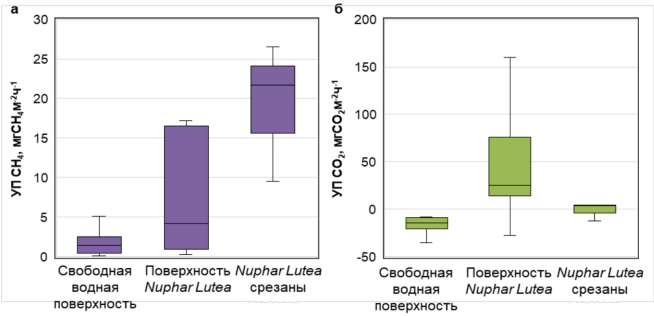


Рис. 4. Удельные потоки метана и углекислого газа, измеренные на различных участках зарастающей литорали озера Кучак: а – удельные потоки метана, б – удельные потоки углекислого газа

В ходе исследования было выявлено значительное влияние плавающих макрофитов на цикл углерода в озере. В летние месяцы зафиксировано чистое поглощение CO_2, связанное с фотосинтетической активностью фитопланктона и высших водных растений, основным из которых является *Nuphar lutea*. Прекращение жизнедеятельности и разложение *Nuphar lutea* в начале осени приводят к снижению значений pH, увеличению концентрации DOC, растворенных CO_2, и CH_4, уменьшению концентрации растворенного кислорода. Макрофиты также способствуют транспортировке метана от прикорневой зоны к поверхности, увеличивая потоки CH_4. Эти результаты подчеркивают необходимость учета влияния высшей водной растительности на баланс углерода водоемов.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ 23-77-10012.

Литература

Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С. Измерение газообмена на границе почва/атмосфера. Томск: Изд.-во Томского ГПУ, 2010.

Залесов С.В. Роль болот в депонировании углерода // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. №7-2. С. 6-9.

Attermeyer K. Invasive floating macrophytes reduce greenhouse gas emissions from a small tropical lake // Scientific reports. 2016. V. 6. №1. 20424.

Bergier I. The role of space-time shifts in alkaline lakes of Nhecolândia in the regional carbon dioxide and methane cycles // 4 Anais do Simpósio de Geotecnologias do Pantanal-GeoPantanal, Bonito. Embrapa. INPE Brasília, 2012. P. 39-49.

Carlson R.E. A trophic state index for lakes 1 // Limnology and oceanography. 1977. V. 22. №2. H. 361-369.

Dacey J.W.H. Pressurized ventilation in the yellow waterlily // Ecology. 1981. V. 62. №5. P. 1137-1147.

Dean W.E., Gorham E. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands // Geology. 1998. V. 26. №6. P. 535-538.

Horikoshi K. Alkaliphiles: some applications of their products for biotechnology // Microbiology and molecular biology reviews. 1999. V. 63. №4. P. 735-750.

McGenity T.J., Sorokin D.Y. Methanogens and methanogenesis in hypersaline environments // Handbook of hydrocarbon and lipid microbiology. 2010. P. 665-680.

Morel F.M.M. Principles and Applications of Aquatic Chemistry. John Wiley & Sons, 1993.

Ribaudo C. Macrophyte growth forms and hydrological connectivity affect greenhouse gas concentration in small eutrophic wetlands // Aquatic Botany. 2023. V. 188. 103660.

Rosentreter J.A., Borges A.V., Deemer B.R., Holgerson M.A., Liu S., Song C., Eyre B. D. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources // Nature Geoscience. 2021. V. 14. №4. P. 225-230.

Santos K.R.S., Sant'anna C.L. Cianobactérias de diferentes tipos de lagoas representativas do Pantanal da Nhecolândia, MS, Brasil // Brazilian journal of botany. 2010. V. 33. P. 61-83.

Schindler D.W. Recent advances in the understanding and management of eutrophication //Limnology and oceanography. 2006. V. 51. №1. P. 356-363.

Tranvik L., Cole J.J., Prairie Y.T. The study of carbon in inland waters-from isolated ecosystems to players in the global carbon cycle // Limnology and Oceanography letters. 2018. V. 3. №3. P. 41-48.

Verpoorter C., Kutser T., Seekell D. A., Tranvik L. J. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery // Geophysical Research Letters. 2014. V. 41. №18. P. 6396-6402.

Visser E.J.W. Elongation by primary lateral roots and adventitious roots during conditions of hypoxia and high ethylene concentrations // Plant, Cell & Environment. 1997. V. 20. №5. P. 647-653.

Wen Z. Carbon dioxide and methane supersaturation in lakes of semi-humid/semi-arid region, Northeastern China // Atmospheric Environment. 2016. V. 138. C. 65-73.

Wetzel R.G. Limnology: lake and river ecosystems. Gulf professional publishing, 2001. 1006 p.

CARBON CYCLE IN THE WATER-ATMOSPHERE SYSTEM OF THE OVERGROWN LITTORAL OF EUTROPHIC LAKE KUCHAK (WESTERN SIBERIA)

V.N. Kolotyagina, E.A. Soldatova

This study examines the impact of floating macrophytes on greenhouse gas fluxes and carbon geochemistry in eutrophic Lake Kuchak. Measurements were conducted from May to October 2023 using emission chambers. Results show that carbon dioxide fluxes decrease from 80 to -40 $mgCO_2m^{-2}h^{-1}$ in summer due to the photosynthetic activity of phytoplankton and higher aquatic plants. Methane fluxes from the open water surface average 1.5–2 mg CH_4 m^{-2} h^{-1}, increasing sixfold when Nuphar lutea leaves are under the diffusion chamber, due to macrophytes transporting methane from the root zone to the water surface. In autumn, plant decomposition increases DOC concentration by 3.3 times, promoting higher dissolved CO_2 and CH_4 levels and reducing oxygen saturation. These findings highlight the significant influence of macrophytes on the carbon cycle in lakes and greenhouse gas emissions.

ХЛОРОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В ДОННЫХ ОСАДКАХ МАЛЫХ ОЗЕР КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ

Е.С. Колпакова, А.В. Вельямидова
ФИЦ комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уро РАН

В работе представлены результаты изучения особенностей поведения хлорорганических соединений, включая устойчивые, в донных осадках малых озер на разной стадии отделения от Белого моря. Выявлено присутствие в осадках высокохлорированных бензолов и хлорфенольных соединений. Суммарное содержание стойких органических загрязнителей составляло от 2,7 до 27,6 нг/г; поступление их в донные осадки исследованных озер связано с дальним переносом из низких/умеренных широт и близлежащих регионов. Хлорфенольные соединения определены в количествах от 0,022 до 0,256 мкг/г. Состав хлорфенольных соединений представлен преимущественно моно- и дихлорированными фенолами. Показано влияние морской воды на состав и распределение хлорорганических соединений в донных осадках.

Экосистемы северных территорий отличаются слабой устойчивостью к различного вида воздействиям и крайне медленной скоростью восстановления. Акватория и береговая зона Белого моря подвержены антропогенному влиянию источников как регионального, так и глобального значения. Большую опасность по-прежнему представляют источники эмиссии хлорорганических соединений (ХОС), в первую очередь относящихся к стойким органическим загрязнителям (СОЗ) (Stockholm, 2024). Опасность этих соединений связана с устойчивостью к разложению в компонентах природных экосистем, высокой липофильностью, биоаккумуляционной способностью и многоплановым токсичным воздействием на живые организмы. В то же время, присутствие ХОС (например, хлорфенольных соединений, ХФС) в природных экосистемах может быть связано не только с антропогенными/техногенными факторами (Водяницкий и др., 2017). К настоящему времени накоплено достаточно информации об образовании ХОС естественным путем, а именно, в результате хлорирования органического вещества при взаимодействии с хлорид-ионами, а также в процессах ферментативного продуцирования (Водяницкий и др., 2017, Дембицкий и др., 2003). Так, крупным биогенным источником образования ХФС являются морские экосистемы.

Бурые водоросли северных морей, планктон, находящийся в толще воды, диатомовые водоросли, цианобактерии являются активными продуцентами ХФС. В пресноводных водоемах эти соединения продуцируются диатомовыми, зелеными и сине-зелеными водорослями (Дембицкий и др., 2003). ХФС являются ионогенными соединениями с разной степенью гидрофобности, липофильности и кислотности и включают хлорированные фенолы и их производные. Наиболее значимыми с точки зрения экологической опасности для окружающей среды считаются высокохлорированные фенолы, метоксихлорфенолы и гидроксихлорфенолы с высокой липофильностью (log Kow 3,7-5,06), острой и подострой токсичностью (Lyytikainen, 2004). Самыми токсичными являются пентахлорфенол (ПХФ) и пентахлоранизол (ПХА), отнесенные к стойким органическим загрязнителям (Stockholm, 2024).

Интенсивное поднятие береговой зоны Белого моря приводит к постепенному отделению от моря небольших водоемов, в которых формируется уникальный гидролого-гидрохимический режим, обусловленный морфометрическими характеристиками, особенностями водообмена, соотношением поступающих объемов пресной и морской воды (Краснова, 2007). Эти факторы определяют развитие водоема в направлении осолонения, опреснения или формирования меромиктической структуры. В процессе отделения водоема происходят значительные изменения водной биоты: морскую биоту сменяет комплекс видов, способных обитать в широком диапазоне солености воды, а также в пресноводной среде. Исследование таких, отделяющихся от моря, водоемов позволяет прогнозировать процессы образования хлорорганических соединений в более крупных природных объектах, изучение которых требует больших затрат.

В качестве объектов исследования выбраны малые озера, расположенные на побережье Кандалашского залива Белого моря, на острове Оленьем. Особенностью этих водоемов является связь с морем в прошлом и/или настоящем. Озеро Большие Хрусломены – меромиктическое с постоянным поступлением морских вод через проницаемые породы (Саввичев и др., 2019), имеет четко выраженную стратификацию; глубина озера составляет около 18 м. Озеро Банное более 100 лет назад полностью отделилось от моря и на данный момент является уже пресным водоемом; глубина озера достигает 5 м.

Отбор проб донных осадков проводился сотрудниками лаборатории экоаналитических исследований ФГБУН ФИЦКИА РАН в ходе экспедиционных работ в марте 2019 г.

Для извлечения индивидуальных ХОС (гексахлорбензола, ГХБ; пентахлорбензола, ПеХБ; ПХФ, ПХА, а также других хлорированных фенолов и их производных) использовался метод ускоренной жидкостной проточной экстракции воздушной-сухой пробы донных осадков горячей смесью органических растворителей (гексан:ацетон) при температуре ниже точки кипения. Определение концентраций ХОС проводилось газохроматографическим методом в соответствии с РД 52.24.417-2011 и ISO 14154:2005. Нижний предел обнаружения индивидуальных соединений – 0,0001 мкг/г в.с.в. (Колпакова и др., 2019)

Стойкие органические загрязнители (ГХБ, ПеХБ, ПХФ, ПХА) были обнаружены в донных осадках исследованных озер практически повсеместно в количествах от 2,7 до 27,4 нг/г, с наибольшими суммарными концентрациями в оз. Большие Хрусломены. В порядке убывания концентраций СОЗ располагались следующим образом: ГХБ > ПХФ > ПеХБ > ПХА. Среди полихлорированных бензолов преобладал ГХБ (2,4-17,2 нг/г); количества ПеХБ не превышали 1,4 нг/г. Такими же незначительными были концентрации ПХА (не более 0,2 нг/г). Количества ПХФ в осадках определены практически на том же уровне, что и ГХБ – от 0,1 до 12,7 нг/г. Вклад ПХФ в сумму ХФС

при этом составлял всего 4,1-5,3%. Учитывая, что в настоящее время исследованные озера считаются удаленными от источников прямого антропогенного воздействия, поступление СОЗ в донные осадки, вероятнее всего, связано с дальним переносом из низких/умеренных широт и близлежащих регионов.

Содержание ХФС в донных осадках соленого оз. Большие Хрусломены оказалось на порядок выше по сравнению с осадками пресного оз. Банное – 0,206-0,256 мкг/г и 0,022-0,060 мкг/г, соответственно.

Компонентный состав ХФС в осадках оз. Большие Хрусломены представлен только хлорированными фенолами, разной степени замещения, производные хлорфенолов в осадках не были найдены. В составе ХФС в осадках оз. Большие Хрусломены преобладают (47,2%) монохлорфенолы, источниками которых являются природные процессы образования, такие как ферментативное продуцирование (Gribble, 2004). При этом идентифицированные ХФС были определены в основном в трудноэкстрагируемой фракции, в небиодоступном для микробной деградации состоянии, что приводит к их накоплению в осадках. Морские воды не благоприятствуют активности микробных сообществ, участвующих в процессах деградации/трансформации хлорорганических соединений (Field et al., 2007).

В осадках оз. Банное наряду с хлорфенолами определены еще их производные. ХФС были обнаружены в основном в легкоэкстрагируемой фракции, в биодоступном для микробной деградации состоянии. Доля трудноэкстрагируемых ХФС составляла в среднем 32,6%. Состав ХФС в осадках оказался шире: наряду с хлорфенолами присутствовали еще их производные. В наибольших количествах были найдены моно- и дихлорфенолы. Из производных хлорфенолов найдены хлорированные метоксифенолы, что свидетельствовало об активном протекании в озере процессов трансформации ХОС (Field et al., 2007).

Таким образом, в донных осадках исследованных малых озер, в разной степени удаленных от Белого моря и не испытывающих антропогенного воздействия, отмечено присутствие ХОС, включая стойкие органические загрязнители. Компонентный состав этих соединений представлен высокохлорированными бензолами и хлорфенольными соединениями. Состав ХФС в озерных осадках свидетельствовал о влиянии морских вод на протекание процессов трансформации хлорорганических соединений.

Литература

Водяницкий Ю.Н., Макаров М.И. Хлорорганические соединения и биогеохимический цикл хлора в почве (обзор) // Почвоведение. 2017. №9. С. 1065–1073.

Дембицкий В.М. Толстиков Г.А. Природные галогенированные моноядерные фенолы и их производные // Химия в интересах устойчивого развития. 2003. №4. С. 579–587.

Колпакова Е.С., Вельямидова А.В. Стойкие органические загрязнители в современных почвах на юге Архангельской области // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. №3. С. 32–41.

Field J. A., Sierra-Alvarez R. Biodegradability of chlorinated aromatic compounds. Science dossier // Euro Chlor. 2007. P. 15–33.

Gribble G. W. Natural Organohalogens. Science dossier // Euro Chlor. 2004. 60 p.

Lyytikainen M. Environmental fate and bioavailability of wood preservatives in freshwater sediments near an old sawmill site // Chemosphere. 2001. 44. P. 341–350.

Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs). Revised in 2023 [Электронный ресурс]. Text and Annexes // UNEP Chemicals. 2024. 83 p.

ORGANOCHLORINE COMPOUNDS IN BOTTOM SEDIMENTS OF SMALL LAKES OF KANDALAKSH BAY OF THE WHITE SEA

E.S. Kolpakova, A.V. Velyamidova

The results of studying the behavior of organochlorine compounds, including persistent organic pollutants, in the bottom sediments of small lakes at different stages of separation from the White Sea are presented. The presence of highly chlorinated benzenes and chlorophenolic compounds in the sediments was revealed. The total content of persistent organic pollutants ranged from 2.7 to 27.6 ng/g; their input into the bottom sediments of the studied lakes was associated with long-range transport from low/temperate latitudes and adjacent areas. Chlorophenolic compounds were determined in concentrations from 0.022 to 0.256 μg/g. The composition of these compounds was represented mainly by mono- and dichlorinated phenols. The influence of sea water on the composition and distribution of organochlorine compounds in bottom sediments was shown.

ГАЛОГЕНОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ НА ТЕРРИТОРИИ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Т.А. Королева, Е.С. Колпакова, Р.Д. Коробицына
ФИЦ комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова УроРАН

В 2023 г. Правительством РФ утвержден перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды. В перечне для водных объектов внесен параметр - концентрация адсорбируемых галогенорганических соединений, однако информации об этом параметре в природных объектах на территории России недостаточно. В работе приведены результаты многолетних исследований водных объектов на территории Архангельской области, которые свидетельствуют о том, что концентрация адсорбируемых галогенорганических соединений в воде не стабильна во времени. Эти изменения также зависят от интенсивности и направленности процессов, протекающих в водоеме и на его водосборной территории, которые формируются под прямым влиянием гидрометеорологических условий и антропогенной нагрузки.

В мировой практике содержание галогенорганических соединений (ГОС) в природной, питьевой и сточной воде оценивается по интегральному параметру – адсорбируемые галогенорганические соединения (АОГ). Величина АОГ указывает на суммарную концентрацию хлорированных, бромированных, йодированных и фторированных органических соединений с различной структурой и степенью токсичности (Kodavanti et al., 2023). В 1970-х гг в Германии впервые была создана методика определения ГОС для контроля качества питьевой воды (Мерц, 1994). Но уже с 1989 по 1999 гг. в Германии и США было разработано несколько стандартов по определению АОГ для сточных/промышленных и природных вод (Baiyang et al., 2020). В настоящее время, благодаря, многолетним мировым научным исследованиям влияния токсичных ГОС антропогенного происхождения на экологическое состояние окружающей среды (Стокгольмская …, 2023), параметр АОГ стал широко применяться для контроля промышленных сточных вод во многих странах. Например, в странах Европейского Союза, разработаны отраслевые справочники с нормированием сброса АОГ для текстильной, кожевенной, кузнечно-литейной промышленности, для производства органических и неорганических химикатов, целлюлозы, бумаги, картона,

полимеров, для переработки черных металлов, для общих систем очистки и управления сточными водами и др. (Directive 2010/75/EU, 2010).

В Российской Федерации данный параметр в качестве контроля сброса АОГ со сточными водами применяется только для предприятий целлюлозно-бумажной промышленности. Определение параметра АОГ проводится по различным методикам и ГОСТ Р 54263-2010, разработанным в соответствии с международным европейским стандартом ISO 9562.

С момента открытия первого галогенорганического соединения природного происхождения (дийодтирозина) в 1896 г. (Gribble, 2023) по настоящее время идентифицировано более 8000 ГОС в наземной и морской среде, включая полярные регионы, кроме того глубоко изучены физико-химические свойства, токсикологические характеристики и механизмы образования этих соединений (Baiyang et al., 2020). В соответствии с информацией о распределении идентифицированных ГОС в окружающей среде (Gribble, 2018), количество хлорорганических соединений составляет 51%, броморганических - 46%, йодорганических - 2% и фторорганических - 1%. Долгосрочное использование галогенидов в промышленности и их распространение в качестве естественного компонента органического вещества привело к сосредоточению ГОС во всех оболочках Земли (Gribble, 2023).

В период с 2011 по 2019 гг. сотрудниками ФИЦКИА Уро РАН были проведены межсезонные исследования концентрации АОГ в воде бореальных озер, расположенных на юго-западе Архангельской области. Исследуемые озера на территории Кенозерского национального парка исторически испытывали только рекреационную нагрузку. В озерах Коношского района, донные отложения включали достаточное высокое содержание стойких органических загрязнителей (Вельямидова и др., 2012), что явилось следствием долгосрочной деятельности деревоперерабатывающего предприятия. Тем не менее, в воде озер Кенозерского национального парка и в озерах Коношского района среднегодовое значение концентрации АОГ в целом не превысило 35 мкг/дм^3 (Королева и др., 2023). Было показано, что величина АОГ не постоянна во времени и зависит от множества факторов, в первую очередь, от интенсивности и направленности процессов, протекающих как в самом водоеме, так и на его водосборной территории. Это позволяет утверждать, что данный параметр не является однозначным «маркером загрязнения» воды и не дает представления о степени загрязнения природных водоемов (Королева и др., 2023).

Контроль АОГ в воде крупнейшей реки Европейского Севера России – Северной Двине в 2022 г. на участке рукава Мечка показал, что среднегодовое значение концентрации АОГ составило 31,2±8,3 мкг/дм^3 при максимальном значении 58 мкг/дм^3 и минимальном 17,1 мкг/дм^3.

Наряду с исследованием концентрации ГОС в пробах воды озер Коношского района и в рукава Мечка в р. Северной Двине был изучен компонентный состав хлорфенольных соединений (ХФС), являющихся одной из распространенных групп галогенорганических соединений. Ионогенные ХФС обладают различной подвижностью, биодоступностью и сорбционной способностью по отношению к органическому веществу и отличаются по степени липофильности и токсичности. Самыми токсичными из группы ХФС являются тетрахлорфенолы и пентахлорфенол, их природа имеет исключительно антропогенное происхождение, последнее соединение признано стойким органическим загрязнителем (Стокгольмская, 2023).

Значение концентрации ХФС в речной воде варьировалось в интервале от 0,025 до 0,374 мкг/дм^3, в озерной воде от 0,014 до 0,141 мкг/дм^3 (Колпакова 2019). Несмотря на то, что концентрация ХФС в озерной воде в среднем была ниже в 2,5 раза, количество ХФС по отношению к суммарной концентрации галогенорганических соединений отличалось несущественно и не превышало 0,5 % в речной воде и 0,4 % в озерной воде. В

компонентном составе ХФС речной воды преобладали монохлорфенолы и пентахлорфенол, тогда как в озерной воде в основном присутствовали три-, тетра- и пентахлорфенолы, а также их производные (Колпакова 2019). Значение концентрации ПХФ в пробах речной воды изменялось от 0,016 до 0,088 мкг/дм^3. В озерной воде концентрация пентахлорфенола не превысила 0,006 мкг/дм^3, что на порядок ниже, чем в речной воде. Здесь важно отметить, что, не смотря на различный состав ХФС, вклад этих соединений в содержание АОГ и непосредственно сама концентрация АОГ в воде исследуемых объектов не имеют существенной разницы.

Таким образом, анализ, полученных данных, показал, что среднее значение концентрации АОГ в исследуемых объектах с различной антропогенной нагрузкой отличались незначительно, но точечные значения варьировались в достаточно широком интервале: в рукаве Мечка р. Северной Двины от 17 до 58 мкг/дм^3; в озерах Кенозерского национального парка и Коношского района от 10 до 87 мкг/дм^3. Установлено, что величина АОГ зависит от множества факторов, в первую очередь, от интенсивности и направленности процессов, протекающих в водоеме и на его водосборной территории, формируемых под прямым влиянием гидрометеорологических условий и антропогенной нагрузки. Внесение параметра АОГ в перечень загрязняющих веществ №2909-р, обязывает проводить долгосрочные исследования по наблюдению и изменению «фонового» уровня АОГ в природных водных объектах, что даст возможность для грамотного введения мер государственного регулирования в отношении данного параметра.

Литература

Вельямидова А.В., Троянская А.Ф., Колпакова Е.С., Никитина И.А. Устойчивые хлорорганические соединения в донных осадках озера Святое на территории Архангельской области // Вестник Московского государственного областного университета. 2012. №2. С. 44-48.

Колпакова Е.С. Хлорфенольные загрязнители водных экосистем Архангельской области; особенности определения // Сб. матер. VI Междун. научно-практ. конф. «Актуальные проблемы биологической и химической экологии». Мытищи, 2019. С. 274–278.

Королева Т.А., Вельямидова А.В., Колпакова Е.А. Интегральный параметр контроля качества воды – концентрация адсорбируемых галогенорганических соединений // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. №8. С. 36–41.

Мерц В. Современные обобщенные показатели при мониторинге природных и сточных вод // Журнал аналитической химии. 1994. Т. 49. №6. С. 557–566.

Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях с поправками, внесенными в 2023 г. // UNEP Chemicals, 2023. 83 с.

Baiyang C., Yinan B., Jie Y., Weimin N., Siyan H. Methods for total organic halogen (TOX) analysis in water: Past, present, and future // Chemical Engineering Journal. 2020. V. 399. 125675.

Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) [Electronic resource] // URL: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/30466f6e-19fb-11eb-b57e-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-192891093 (accessed 21.01.2025).

Gribble G.W. Newly discovered naturally occurring organohalogens // Arkivoc. Part I. 2018. P. 372–410.

Gribble G.W. Naturally Occurring Organohalogen Compounds – A Comprehensive Review // Prog. Chem. Org. Nat. Prod. 2023. P. 1–546.

Kodavanti P.R.S., Costa L.G., Aschner M. Perspective on halogenated organic compounds // Advances in neurotoxicology. 2023. V. 10. P. 1.

ORGANOHALINE COMPOUNDS IN WATER BODIES IN THE ARKHANGELSK REGION

T.A. Koroleva, E.S. Kolpakova, R.D. Korobitsyna

In 2023, the Government of the Russian Federation approved a list of pollutants subject to state regulation in the field of environmental protection. The list for water bodies includes a parameter - the concentration of adsorbable organic halogens (AOX), but there is insufficient information on this parameter in environmental compartment in Russia. This study presents the results of long-term studies of water reservoirs in the Arkhangelsk Region, which indicate that the concentration of AOX in the water reservoirs is not stable over time and depends on the intensity and direction of the processes occurring in the reservoir and its catchment area, which are formed under the direct influence of hydrometeorological conditions and anthropogenic impact.

ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ И ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЗЕРА РАИФСКОЕ ВОЛЖСКО-КАМСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

М.В. Косова[1], Е.Н. Унковская[3], О.Ю. Деревенская[2], Н.В. Шурмина[1], Ф.М. Мухаметзянова[1], Ю.А. Игнатьев[1], В.В. Маланин[1], В.С. Валиев[1]
[1]*Институт проблем экологии и недропользования АН РТ*
[2]*Казанский (Приволжский) федеральный университет*
[3]*Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник*

В статье обсуждаются результаты исследований гидрохимического режима и структуры зоопланктонного сообщества оз. Раифское, расположенного на территории Волжско-Камского заповедника (Республика Татарстан), выполненные в 2023 г. Выполнена оценка качества воды по гидрохимическим показателям по УКИЗВ, проанализированы изменения минерализации, газового режима, содержания биогенных показателей в поверхностных и придонных горизонтах в весенне-осенний период. Выявлен видовой состав и доминирующие комплексы зоопланктона. Продемонстрирована сезонная динамика численности и биомассы зоопланктона и его отдельных групп в период открытой воды. Дана оценка качества воды по биотическим индексам зоопланктона.

Оз. Раифское является центральным озером гидрологической сети Раифского участка Волжско-Камского заповедника, состоящей из 10 разнотипных водоёмов, связанных в единую систему малыми реками Сумка и Сер-Булак. Озеро Раифское – проточный водоем карстово-суффозионного происхождения, расположенный в долине р. Сумка. Площадь водного зеркала составляет 0.32 км^2, максимальная глубина достигает 19.8 м, средняя – 6.5 м. Длина озера составляет 1.3 км, при максимальной ширине 0.3 км, в долине отмечаются три воронки, глубиной от 11 до 19 м. На берегу озера расположен Раифский мужской монастырь и одноименный поселок.

Многолетний мониторинг химического и гидробиологического состава вод Раифского участка (более 30 лет) позволил выявить основные закономерности динамики экосистемы (Деревенская, Унковская, 2007, 2016, 2017, Унковская и др., 2016, 2023). В настоящей работе анализируются результаты исследований, проведенных в 2023 году с повышенной частотой пробоотборов, что позволило сделать детальную оценку сезонной динамики гидрохимических параметров и структуры зоопланктонного сообщества.

Отбор проб воды для химического анализа (на ст. 2) осуществляли с мая по сентябрь из поверхностного и придонного горизонтов. Гидрохимический анализ

выполнялся по аттестованным в экологическом анализе методикам. Полученные концентрации сравнивали с ПДК, установленными для водоемов рыбохозяйственного значения (Приказ …, 2016). Качество воды оценивали методом комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям [РД 52.24.643-2002] с расчетом удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ). В расчет включены 15 загрязняющих веществ, а также 3 специфических показателя, имеющих локальное значение в исследуемых водоёмах вследствие часто фиксируемых превышений $ПДК_{р.х.}$ (pH, фосфат-ион, сероводород и сульфиды).

Пробы зоопланктона отбирали ежемесячно в период с мая по сентябрь 2023 года на двух контрольных глубоководных станциях (ст. 1 – глубина 10 м, ст. 2 – глубина 17 м), расположенных в профундальной зоне центральной части озера. Отбор проводили сетью Джеди с размером ячеи 90 мкм послойно в соответствии с термической стратификацией водной толщи, облавливались слои эпи-, мета- и гиполимниона. Обработка материала выполнена в соответствии с общепринятыми гидробиологическими методами (Методические …, 1982). Таксономическую идентификацию видов проводили при помощи определителей (Алексеев, 2010; Котов, 2010; Кутикова, 2010). Видовое разнообразие зоопланктона оценивали по индексу Шеннона (Shennon, Weaver, 1965). Для оценки видового сходства применяли индекс Серенсена-Чекановского (Sorensen, 1948). Уровень органического загрязнения оценивали по индексу сапробности, который рассчитывали по методу Пантле и Букк в модификации Сладечека (Sladeček, 1977).

Вода в оз. Раифское в 2023 году характеризовалась достаточно высокой прозрачностью – 1.25–2.0 м при зеленовато-желтом цвете. Температурный режим был характерен для стратифицированных водоёмов. Слой эпилимниона в летний период составлял 0–4 м с изменением температуры от 15.5 (на глубине 4 м) до 26 ˚С в поверхностном горизонте. Мощность слоя металимниона составляла 4–6 м, температура изменялась от 9.2 (6 м) до 19.7 ˚С (4 м) и гиполимниона – 6–17 м, температура – 4.5–12 ˚С, соответственно.

Тип воды относился к гидрокарбонатному классу кальциевой группы. Формула Курлова, рассчитанная по усредненным показателям для поверхностного и придонного горизонтов, отличалась незначительно (рис.1). Общая минерализация демонстрировала слабую вариабельность по горизонтам, составляя 237.7–286.1 мг/дм^3 в поверхностном слое и 231.5–299.12 мг/дм^3 в придонном, с максимальным значением, зарегистрированным у дна в июне. Соотношение главных ионов в сезонной динамике оставалось стабильным (рис. 1).

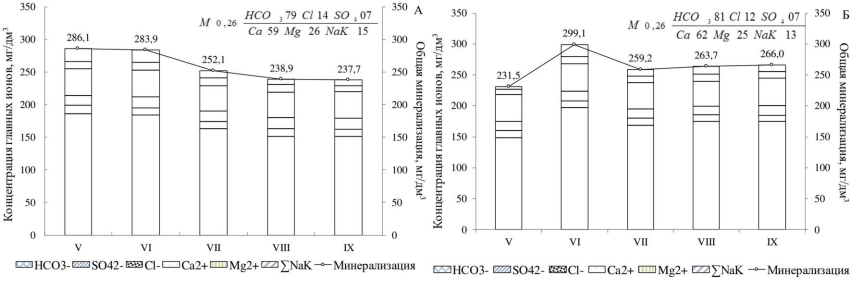


Рис. 1. Динамика соотношения концентраций главных ионов и общей минерализации в поверхностном (А) и придонном (Б) слоях оз. Раифское в сезонной динамике

Общая жесткость соответствовала категории «мягкая вода», варьируя в пределах 2.1–

2.97 ммоль/дм^3. Водородный показатель характеризовал слабощелочную среду (средние значения 7.2–7.54 ед. pH) во всех горизонтах, с максимальным значением (8.19 ед. pH) в поверхностном слое в августе, что, вероятно, связано с процессами «цветения» воды. Концентрация растворенного кислорода в поверхностном горизонте соответствовала нормальному насыщению (111.3 %), изменяясь от 8.43 до 10.4 мг/дм^3, тогда как в придонном слое наблюдался его дефицит (36.9%) с концентрацией 2.79–6.33 мг/дм^3. Содержание сероводорода и сульфидов у дна находилось на уровне аналитического нуля (0.002 мг/дм^3).

Концентрация органических веществ, определяемая по величинам биологического потребления кислорода (БПК$_5$) и химического потребления кислорода (ХПК) находилась на относительно низком уровне и составляла по горизонтам в среднем для БПК$_5$ – 1.72-2.07 ± 0.10 мгO$_2$/дм^3 и ХПК – 16.4 ± 0.1 и 20.2 ± 2.7 мг/дм^3. Существенных сезонных колебаний данных параметров зафиксировано не было (табл. 1). Значение аммоний-иона в поверхностном слое воды в среднем достигало 0.18 ± 0.05 мг/дм^3, тогда как в придонном горизонте оно увеличивалась до 1.56 ± 0.15 мг/дм^3, что соответствует 3.1 ПДК. Содержание фосфатов оставалось незначительным и не превышало установленных нормативов, варьируя в пределах 0.01–0.17 ± 0.06 мг/дм^3 в зависимости от глубины. Содержание нитрит-и нитрат-ионов было невелико и находилось в пределах ПДК (табл. 1).

Таблица 1. Содержание органического вещества (БПК$_5$, ХПК) и показателей биогенных веществ в оз. Раифское в сезонной динамике

Месяц	БПК$_5$, мгO$_2$/дм^3	ХПК, мг/дм^3	NH_4^+, мг/дм^3	NO_2^-, мг/дм^3	NO_3^-, мг/дм^3	PO_4^{3-}, мг/дм^3
ПДК $_{р/х}$	2.1		0.5	0.08	40	0.2 по P
Май	1.80* 2.16	13.34 18.4	0.432 1.65	0.02 0.55	0.375 3.27	0.019 0.021
Июнь	1.75 1.83	19.7 13.4	0.066 1.25	0.02 0.036	0.32 1.25	0.005 0.053
Июль	2.18 2.07	17.0 18.1	0.108 1.85	0.02 0.062	0.236 1.38	0.015 0.123
Август	1.18 2.52	16.3 15.4	0.172 1.02	0.02 0.075	0.236 1.06	0.012 0.223
Сентябрь	1.70 1.78	15.4 35.5	0.108 2.01	0.008 0.033	0.278 1.25	0.006 0.435

Примечание: *в числителе – значения в поверхностном слое, в знаменателе – в придонном.

В сезонной динамике отмечалось достаточно стабильное содержание минеральных форм азота и фосфора в поверхностных слоях озера в течение всего периода исследований, но в придонных регистрировалось их превышение (рис. 2).

Концентрации тяжелых металлов (ТМ) часто превышали допустимые нормы и составляли в среднем за период исследований по горизонтам (поверхность–дно) следующие значения: по содержанию меди – 0.0023–0.0024 ± 0.0001 мг/дм^3 (2.3 ПДК), по марганцу – 0.01–0.18 ± 0.14 мг/дм^3 (18 ПДК), по железу – 0.15–0.98 ± 0.14 мг/дм^3 (9.8 ПДК), по свинцу – 0.01 ± 0.0 мг/дм^3 (1.7 ПДК). Наблюдаемые концентрации отражают природную специфику территории.

Максимальные концентрации фенолов в воде оз. Раифское наблюдались в мае, достигая значений 2,39 мг/дм^3 в поверхностном слое и 1,67 мг/дм^3 в придонном горизонте. В последующие месяцы отмечается снижение их содержания ниже предельно допустимого уровня. В летний период с ростом температуры из-за увеличения скорости распада происходит уменьшение содержания фенолов. (Опекунова, 2016).

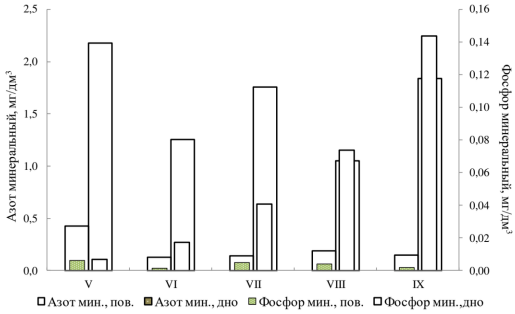


Рис. 2. Динамика содержания минеральных форм азота и фосфора в воде оз. Раифское в сезонной динамике

Качество воды оз. Раифское соответствовало 2 классу (*«слабо загрязненные»)* в поверхностном слое и 3 «б» классу (*«очень загрязненная»)* – в придонном. УКИЗВ изменялся от 1,70 у поверхности до 3,71 у дна (17–19 м).

В 2023 году в зоопланктоне озера Раифское было зарегистрировано 46 видов, более всего было коловраток (Rotifera) – 22 вида (48%), ветвистоусых ракообразных (Cladocera) было определено 15 видов (33%) и веслоногих рачков (Copepoda) – 9 видов (19%). Максимальное видовое богатство зоопланктона наблюдалось в мае и составило 37 видов, при этом среднее число видов за вегетационный период составляло 29.6 ± 2.3. В исследуемый период зоопланктон демонстрировал достаточно высокое видовое сходство (63–83%). Наименьший показатель отмечен между маем и июнем (63%).

В 2023 году структура зоопланктонного сообщества характеризовалась выраженной сезонной динамикой, как по численности, так и по биомассе (рис. 3), с доминированием различных таксономических групп в разные месяцы.

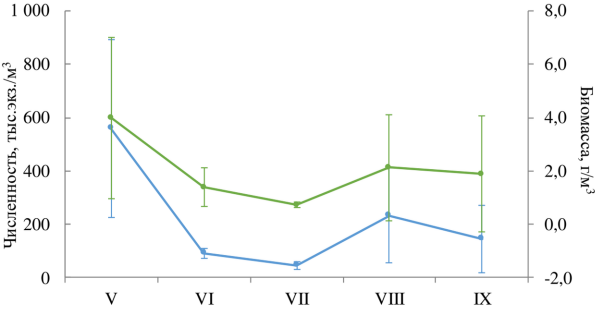


Рис. 3. Численность (тыс. экз./м^3) и биомасса (г/м^3) зоопланктона оз. Раифское в сезонной динамике

Наибольшая численность зоопланктона зафиксирована в мае (5596 ± 334.1 тыс. экз./м^3), при этом основу сообщества составляли коловратки (46%). В июне–июле наблюдалось резкое снижение общей численности (91.2 ± 18.1 тыс. экз./м^3 и 45.9 ± 15.8 тыс. экз./м^3, соответственно) с доминированием ветвистоусых ракообразных (49–50%). В августе отмечен рост численности (2339 ± 177.4 тыс. экз./м^3) за счёт увеличения численности науплиальных стадий веслоногих ракообразных. В сентябре произошло снижение численности (145.2 ± 127.8 тыс. экз./м^3), сообщество формировалось

ветвистоусыми и веслоногими рачками в равных пропорциях (44–46%). Средняя численность за вегетационный период составила 215.0 ± 102.4 тыс. экз./м^3. Доминантами по численности в мае–июне и сентябре были *Daphnia cucullata* и *Daphnia cristata*, тогда как в августе преобладали ювенильные стадии веслоногих ракообразных.

Максимальные значения биомассы зарегистрированы в мае (3.98 ± 3.03 г/м^3) и июне (1.38 ± 0.73 г/м^3), основной вклад вносили веслоногие ракообразные (41–53%). В июле и августе доминировали ветвистоусые рачки (48–59%) при общей биомассе 0.73 ± 0.10 г/м^3 и 2.12 ± 2.0 г/м^3, соответственно. В сентябре биомасса составила 188 ± 2.16 г/м^3 с преобладанием веслоногих (54%). Средняя биомасса за период исследований достигла 20 ± 061 г/м^3. Доминирующими видами по биомассе в июне были *Daphnia cristata* и *Eudiaptomus graciloides*, в июле – *Daphnia cucullata* и *Eudiaptomus graciloides*, в августе – *Daphnia cristata*, а в сентябре – *Eudiaptomus graciloides* и *Daphnia cristata*.

Вертикальное распределение зоопланктона в озере Раифское имеет свои особенности из-за выраженной температурной стратификации. В эпилимнионе и металимнионе отмечается наибольшая плотность зоопланктона, особенно в мае и августе. Гиполимнион оставался зоной с низкой численностью, за исключением августа. Коловратки имели высокую численность в металимнионе в мае, но их количество резко снижалось в последующие месяцы. Ветвистоусые и веслоногие ракообразные демонстрировали конкуренцию за доминирование в августе и сентябре.

Видовое разнообразие зоопланктона было наибольшим в июле–августе (3.21–3.44), в остальные месяцы на уровне (2.73–2.93).

Трофический статус озера в течение 2023 года оценивался как мезотрофный (по С.П. Китаеву), изменяясь в пределах 1.39–3.99, лишь в июле соответствовал олиготрофному (0.73).

Индекс сапробности, определяющий уровень загрязненности вод, относил водоем к β-мезосапробной зоне в большинстве случаев (1.51–1.56), снижаясь до олигосапробной зоны в июне и в августе (1.47–1.49). Важным фактором, влияющим на динамику органического загрязнения озера, является приток озера – река Сумка.

Литература

Алексеев В.Р. Циклопиды (Cyclopiformes). Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. С. 277–283.

Деревенская О.Ю., Унковская Е.Н. Структура пищевых сетей в сообществах зоопланктона разнотипных озер Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника // Биология внутренних вод. 2007. № 2. С. 55–61.

Деревенская О.Ю., Унковская Е.Н. Структура сообществ зоопланктона озер Волжско-Камского заповедника // Труды Зоологического института РАН. 2016. Т. 320. № 3. С. 294–303.

Деревенская О.Ю., Унковская Е.Н. Эколого-фаунистическая характеристика зоопланктона озер Волжско-Камского заповедника // Вестник ТГУ. 2017. Т. 22. № 5. С. 885–890.

Котов А.А., Синев А.Ю, Глаголев С.М., Смирнов Н.Н. Ветвистоусые ракообразные (Cladocera). Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. С. 151.

Кутикова Л.А., Стойко Т.Г., Мазей Ю.А., Телеш И.В. Коловратки (тип Rotifera Cuvier, 1798). Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. С. 16–150.

Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях пресноводных водоемов. Зоопланктон и его продукция. Л.: ГосНИОГХ, 1982. 33 с.

Опекунова М.Г. Биоиндикация загрязнений. СПб.: 2016. 300 с.

Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. N 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (с изменениями и дополнениями 13 июня 2024 г.).

Унковская Е.Н., Тарасов О.Ю. Гидрохимический режим водоемов и водотоков Раифского участка Волжско-Камского заповедника и его охранной зоны // Тр. Волж.-Камск. гос. природ. биосфер. зап-ка. 2016. Вып. 7. С. 9–41.

Унковская Е.Н., Косова М.В., Шурмина Н.В., Мухаметзянова Ф.М., Игнатьев Ю.А. Гидрохимическая характеристика разнотипных озер Волжско-Камского заповедника // Труды Карельского научного центра РАН. Серия: Лимнология и Океанология. 2023. № 2. С. 39–50.

Shannon C.E., Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana: Univ. Illinois Press. 1949. P. 131.

Sladečhek V. System of water quality from biological point of view// Egetnisse der Limnologie. Heft 7. 1973. P. 218.

Sorensen T. A new method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of a species content and its application to analysis of vegetation on Danish common. Det kongelige Danske videnskabernes selskab. 1948. Bd.5. №4. P. 1.

HYDROCHEMICAL AND HYDROBIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF RAIFSKOE LAKE IN THE VOLZHSKO-KAMSKY STATE NATURE RESERVE

M.V. Kosova, E.N. Unkovskaya, O.Yu. Derevenskaya, N.V. Shurmina, F.M. Mukhametzyanova, Yu.A. Ignatiev, V.V. Malanin, V.S. Valiev

The article presents the results of a study on the hydrochemical regime and the structure of the zooplankton community in Raifskoe lake, located within the Volzhsko-Kamsky Nature Reserve (Republic of Tatarstan), conducted in 2023. The water quality was assessed based on hydrochemical parameters using the UKIZV. Variations in mineralization, gas regime, and nutrient concentrations in surface and bottom layers during the spring-autumn period were analyzed. The species composition and dominant zooplankton assemblages were identified. Seasonal dynamics of zooplankton abundance and biomass, as well as those of individual taxonomic groups, were examined during the open-water period. Water quality was also evaluated using zooplankton-based biotic indices.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ БИОТЕСТИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА СТОЧНЫХ ВОД И ЭКСТРАКТОВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ЭМБРИОНОВ РЫБ *DANIO RERIO*

Д.А. Коцур

ФИЦ комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лавёрова УрО РАН

В материале описаны общепринятые подходы к процессам биотестирования различных ксенобиотиков, а также качества сточных вод и экстрактов донных отложений водных

экосистем с помощью эмбрионов рыб *Danio rerio*. Биотестирование качетсва сточных вод и экстрактов донных отложений как метод имеет актуальность в условиях повышенного антропогенного воздействия на водные объекты, которое влияет на гидрохимические характеристики воды и уровень загрязнений, в том числе биоаккумулируемых и биомагнифицируемых. Кроме общепринятых подходов в биотестировании в материале также рассматриваются перспективы развития технологий автоматизации процессов биотестирования, с помощью которых тесты биотестирования могли бы стать высокопроизводительными.

Биотестирование с помощью эмбрионов рыб *Danio rerio* является весьма популярным методом оценки антропогенного воздействия на популяции промысловых рыб в результате работы промышленных предприятий. Например, сбросы сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий (ЦБП), регулярно поступающие в водоемы бассейна реки Северная Двина. Кроме этого, загрязнения водоемов также вызваны в результате работы в различных отраслях сельского хозяйства, заготовки леса, аэротехногенных выбросов, сбросов загрязняющих веществ из площадей торфоразработок (Новоселов и др., 2022), а также накоплением повышенных концентраций нефтеуглеводоворов в результате транспортной активности (Климовский, Матвеев, 2023).

Таким образом, увеличенная антропогенная нагрузка на водные экосистемы явно повлияла на гидрохимические характеристики воды, и, следовательно, на структуру сообществ гидробионтов. Другими словами, это вызвало снижение видового разнообразия гидробионтов, в частности гибель планктонных сообществ, ухудшение кормовой базы для промысловых рыб, что привело в конечном итоге к утрате рыбохозяйственного значения некоторых водоемов на территории Архангельской области (Бреховских и др., 2003). Помимо снижения рыбохозяйственного значения также потенциально может снизиться продовольственная безопасность употребления рыб в этих загрязненных водоемах, поскольку некоторые загрязнители могут аккумулироваться в рыбе по пищевой цепи (например, стойкие органические загрязнители). Они плохо метаболизируются живыми организмами и могут нанести существенный вред здоровью и жизнеспособности в целом. Однако, данные об этих загрязнителях в промысловой рыбе в водоемах Архангельской области достаточно скудны. Но есть основание полагать о том, что данные загрязнители накапливаются в донных отложениях в результате работы ЦБП. В исследовании у (Massei et al., 2019) ученые производили отбор донных отложений в трех участках в Ботническом заливе, которые регулярно подвергались загрязнению из-за работы ЦБП. Экстракты отложений подвергали химическому анализу, в процессе которого измерены концентрации ряда соединений стойких органических загрязнителей и некоторых элементов. Накопленные концентрации некоторых из них были значительно завышены.

Исходя из всего вышесказанного, биотестирование может служить индикатором загрязнения водной среды обитания гидробионтов, который показывает насколько благоприятны условия обитания для водных сообществ в тех или иных водных объектах. Методика биотестирования различных соединений и сред (их экстрактов) постоянно менялась на протяжении многих лет. Однако, биотестирование часто проводят согласно директивам OECD TG 236, OECD TG 203 (Wlodkowic, Campana, 2021).

Для биотестирования обычно используют эмбрионов и предличинок (элеутероэмбрионов) до начала личиночной стадии. Онтогенез эмбрионов протекает в оболочке икры – хорионе. Затем после вылупления из хориона предличинки питаются эндогенно из желточного мешочка. Оболочка хориона может служить защитным барьером эмбриона от воздействия различных ксенобиотиков. В некоторых работах

упоминается необходимость дехорионирования (извлечение эмбриона из оболочки хориона ферментативным или механическим путем) с целью избегания ложноотрицательных результатов при биотестировании в связи со сниженной проницаемости некоторых ксенобиотиков через хорион (Henn, Braunbeck, 2011). Однако, в случае с экспериментальным моделированием воздействия загрязнения сточных вод или экстрактов донных отложений все же предпочтительнее обходиться без дехорионирования, поскольку воздействие сред на эмбрионы с хорионом наиболее релевантно. Дехорионирование наиболее предпочтительно при тестировании определенных ксенобиотиков для повышения чувствительности эмбриона к воздействию тестируемых ксенобиотиков.

Процедура биотестирования обычно выглядит следующим образом (рис.).

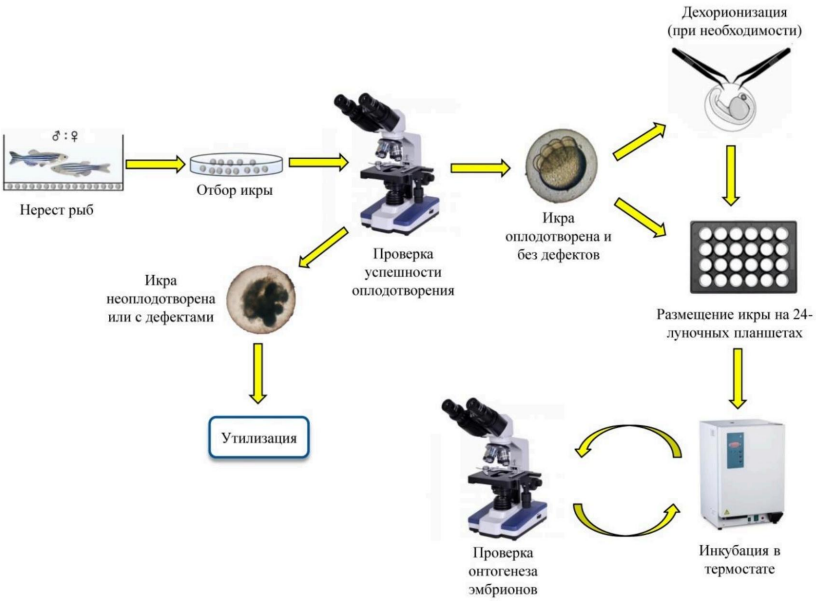


Рис. Общая схема биотестирования соединений, сточных вод и экстрактов донных отложений

Ее начинают практически сразу после окончания нереста на стадии бластулы (ближе к началу эпиболии, ориентировочно до 3 часов после оплодотворения). Оплодотворенную икру случайным образом отбирают в чашки Петри, которые наполнены экстрактами донных отложений (сточных вод) или фильтрованной (отстойной) водой в качестве контроля. Также помимо основного контроля можно предусмотреть положительный контроль в виде экстрактов донных отложений (сточных вод) из антропогенно незатронутого водного объекта или водных объектов с минимальной антропогенной нагрузкой, которая не оказывает существенных угроз на снижение разнообразия сообществ гидробионтов. Предполагается, что воздействие вод и экстрактов донных отложений от водных объектов с минимальной антропогенной нагрузкой маловероятно может оказать существенное влияние на отногенез эмбрионов *Danio rerio*.

После отбора икры в чашке Петри их определяют на наличие оплодотворения и дефектов. Это проверяется с помощью инвертированного микроскопа или бинокуляра с функциями не ниже 25-кратного увеличения изображения (Lammer et al., 2009). Оплодотворенная икра характеризуется прозрачностью пространства под хорионом. В этом пространстве содержатся желток и зародышевый диск. После оплодотворения деление клеток происходит спустя 15 минут после оплодотворения при температуре 26 ºС. В зародышевом диске происходит деление бластомеров в первые 3-4 часа после оплодотворения, где число бластомеров удваивается и уплощается бластодиск. Поэтому на этапе дробления бластомеров вполне можно отличить от неоплодотворенной икры, у которой отсутствуют бластомеры, а на более поздних этапах становится непрозрачной (Kimmel et al., 1995). Кроме того, обычно отсеивают икру с явно выраженными дефектами, такими как асимметрия, образование пузырьков, повреждение мембран.

Далее после отбора оплодотворенной икры производят ее перенос на микротитрационные планшеты (обычно на 24 лунки), которые предварительно заполнены тестируемым веществом с различными концентрациями и контрольными водами. Материал планшета предпочтителен преимущественно из стекла, так как такой материал не адсорбирует остаточные концентрации загрязнителей, которые могут повлиять на результаты тестирования. Обычно ксенобиотики рекомендуется тестировать в 5 концентрациях, однако в случае с тестированием качества вод или экстрактов донных отложений достаточно одной искомой концентрации в нескольких повторах. Причем пробы обычно отбирают у водоемов в нескольких местах, поскольку загрязнения могут распределяться неравномерно.

Далее после распределения икры планшеты накрывают самоклеющейся фольгой и инкубируют при 26 ^{0}С в течение 24, 48, 72, 96, 108 и более часов. На протяжении всего периода инкубирования фиксируются летальные и сублетальные конечные точки. В качестве летальных точек оценивается коагуляция икры (гибель эмбриона), отсутствия вылупления из оболочки икры, отделения хвоста, образования сомитов и сердцебиения. В качестве сублетальных конечных точек оценивается образование отеков, завершение гаструляции, изменение кровообращения/частоты сердцебиения. Наиболее часто наблюдают тератогенные изменения, такие как отек перикарда, желточного мешочка, головного мозга, деформации глаз, хвоста, позвоночника (Lammer et al., 2009).

На этапах развития вылупления из икры и развития предличинки (обычно 48-72 часа с момента оплодотворения и позже) применимы технологии, с помощью которых возможно вычислить размеры и площади интересующих морфологических характеристик. Для этого во время биотестирования проводится фотофиксация изображения эмбрионов с помощью микроскопа, затем снимки редактируют в программном обеспечении ImageJ, которое доступно в сети интернет без установки на персональный компьютер (Hong et al., 2024; URL: https://ij.imjoy.io). С помощью инструментов этого программного обеспечения можно измерить точную длину эмбрионов относительно друг друга, измерить размеры отеков, отклонений в морфологии, размеры отдельных органов и т. д. Таким образом, благодаря этому инструментарию, возможно собрать наиболее точную и подробную характеристику развития эмбрионов в процессе биотестирования и определить степень воздействия тех или иных экстрактов донных отложений (сточных вод).

Нельзя также не отметить, что процедура биотестирования сама по себе весьма трудоемка, не говоря о трудовых затратах на содержание аквариального вивария и нересте нового поколения рыб перед биотестированием. В связи с этими причинами, а также по причине огромного количества различных тестируемых соединений в наши дни уже обсуждаются и разрабатываются технологии высокопроизводительных тестов, основанных на процессах автоматизации для ускорения процессов биотестирования.

Однако, отсутствуют технологии автоматизации некоторых процессов, таких как идентификация, сортировка, распределение икринок, их потоковая дехорионизация, неинвазивная микроперфузия, иммобилизация эмбрионов и анализ полученных изображений эмбрионов. В обзоре у (Wlodkowic, Campana, 2021) описаны некоторые разработки под каждый этап биотестирования. Например, были попытки создания автоматизированных технологий сортировки и распределения икринок. Эта система может проводить скрининг эмбрионов на поздних стадиях развития, однако не может надежно отличить оплодотворенную икру от неоплодотворенной. Также приведен пример успешного автоматизированного дехорионирования эмбрионов, демонстрирующего низкую смертность эмбрионов. В целом, многие технологии автоматизации биотестирования пока низкоэффективны (или имеют существенные недоработки) и весьма дороги, поэтому не получили широкого признания. Поэтому все процессы биотестирования происходят ручным способом (Wlodkowic, Campana, 2021).

Несмотря на отсутствие автоматизации процессов, биотестирование качества сточных вод и экстрактов донных отложений с помощью эмбрионов рыб *Danio rerio* полноценно является частью процесса долгосрочных мониториговых исследований, в которых оценивается влияние накопленных загрязнений на видовое разнообразие сообществ гидробионтов. Он позволяет улучшить прогнозы экологического состояния водных объектов с целью предупреждения рисков снижения продовольственной безопасности потребления промысловой рыбы и утери их рыбохозяйственного значения. Этот метод оценки антропогенного воздействия вполне можно считать экспериментальной моделью в системе *in vivo*.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме ФНИР FUUW-2025-0034 «Изучение экосистем бассейнов речных систем, а также водоемов особо охраняемых природных территорий (ООПТ) Европейского севера России в условиях климатических сукцессий и воздействия антропогенных факторов» (№ гос. регистрации 125021902575-3).

Литература

Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Колесниченко Н.Н. Проблемы качества поверхностных вод в бассейне Северной Двины. М.: Наука, 2003. 233 с.

Климовский Н.В., Матвеев Н.Ю. Характеристика загрязнения поверхностных вод и донных отложений нефтяными углеводородами нижнего течения р. Северная Двина // Экологическая химия. 2023. Т. 32. №4. С. 199-207.

Новоселов А.П., Имант Е.Н., Артемьев С.Н., Матвеев Н.Ю., Матвеева А.Д. Современное состояние планктонных и бентосных сообществ устьевой области реки Северная Двина // Экология. 2022. Т. 60. №3. С. 211-220.

Henn K., Braunbeck T. Dechorionation as a tool to improve the fish embryo toxicity test (FET) with the zebrafish (Danio rerio) // Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology. 2011. V. 153. №1. P. 91–98.

Hong T., Park J., Song G., Lim W. Brief guidelines for zebrafish embryotoxicity tests // Molecules and cells. 2024. V. 47. №8. 100090.

Lammer E., Carr G. J., Wendler K., Rawlings J. M., Belanger S. E., Braunbeck T. Is the fish embryo toxicity test (FET) with the zebrafish (Danio rerio) a potential alternative for the fish acute toxicity test? // Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology. 2009. V. 149. №2. P. 196–209.

Massei R., Hollert H., Krauss M., von Tümpling W., Weidauer C., Haglund P., Küster E., Gallampois C., Tysklind M., Brack W. Toxicity and neurotoxicity profiling of contaminated

sediments from Gulf of Bothnia (Sweden): a multi-endpoint assay with Zebrafish embryos // Environmental Sciences Europe. 2019. V. 31. 8.

Wlodkowic D., Campana O. Toward High-Throughput Fish Embryo Toxicity Tests in Aquatic Toxicology // Environmental Science & Technology. 2021. V. 55. №1. P. 3505-3513.

MODERN APPROACHES TO BIOTESTING THE QUALITY OF WASTEWATER AND BOTTOM SEDIMENT EXTRACTS USING EMBRYOS OF FISH *DANIO RERIO*

D.A. Kotsur

This material describes generally accepted approaches and processes for biotesting of various xenobiotics, as well as the quality of wastewater and bottom sediment extracts of aquatic ecosystems using embryos of fish *Danio rerio*. Biotesting the quality of wastewater and bottom sediment extracts as a method is relevant in conditions of increased anthropogenic impact on water bodies, which affects the hydrochemical characteristics of water and the level of pollution, including bioaccumulative and biomagnified. In addition to generally accepted approaches in biotesting, the material also examines the prospects for the development of technologies for automating biotesting processes, with the help of which biotesting tests could become highly productive.

КАЧЕСТВО ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР БАССЕЙНА Р. ВИЛЮЙ

М.И. Ксенофонтова

Северо-восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

Каждый водоем возникает и развивается в определенной географической среде и взаимодействует с ней. Специфические природные условия создают определенный режим водоема. В режиме озера существенную роль играет форма и размеры его котловины. Котловины озер возникают под действием ряда различных факторов, формирующих рельеф земной поверхности (Богословский, 1960).

В бассейне р. Вилюй доминирующими типами происхождения озер являются термокарстовые озера (около 80% изученных водоемов), водно-эрозионные – 11%, тукулановые – 10%, эрозионно-термокарстовые – 3% от всей выборки. Схема расположения изученных озер бассейна р. Вилюй представлена на рисунке.

Основные гидрохимические параметры исследованных озер бассейна р. Вилюй представлены в таблице.

В районе исследования величина минерализации варьирует в широких пределах, что указывает на значительную неоднородность состава воды. Высокое стандартное отклонение и дисперсия свидетельствуют о наличии как пресных, так и сильноминерализованных вод. В целом, в бассейне р. Вилюй преобладают мало- и среднеминерализованные воды (до 40% и 42%, соответственно), высокоминерализованные воды, а также рассолы встречаются в бассейне р. Кемпендяй. Таким образом, минерализация вод левобережных озер закономерно понижается с запада на восток (от 800 до 400 мг/л), в правобережных озерах этот показатель мало меняется и остается относительно постоянным (187 - 250 мг/л).

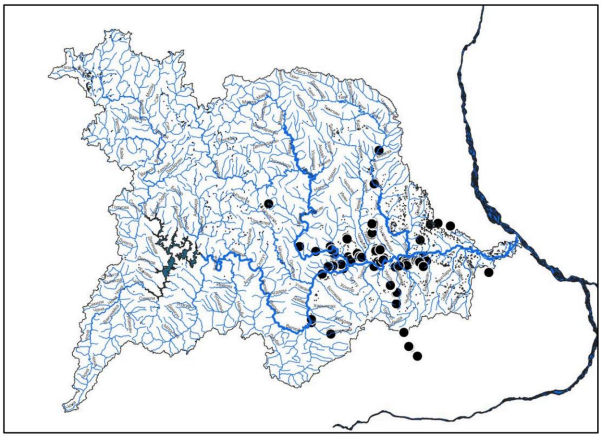


Рис. Схема расположения изученных озер бассейна р. Вилюй

Сравнительный анализ минерального состава вод озер, расположенных на левом и правом берегам р. Вилюй показал, что они существенно отличаются между собой. В частности, на правобережной части р. Вилюй преобладают воды малой минерализации (63%), а доля вод с повышенной минерализацией выше в левобережной стороне и составляют 52%. Здесь встречаются водоемы с высокоминерализованной водой.

Таблица. Основные статистические параметры состава воды озер бассейна р. Вилюй (n=108)

Показатели	M	Me	Мин.	Макс.	δ
Минерализация, мг/дм^3	690,6	287,2	20,1	20900,7	2427,1
Водородный показатель pH, ед. pH	7,9	8,0	6,0	9,9	0,8
Жесткость общая, ^{o}Ж	4,8	2,7	0,1	111,0	11,3
Кальций, мг/дм^3	35,7	22,0	0,0	1100,0	105,0
Магний, мг/дм^3	38,3	17,3	1,0	680,0	81,4
Натрий+калий, мг/дм^3	139,9	12,8	0,1	5820,0	774,6
Ион-аммония, мг/дм^3	0,5	0,3	0,0	3,9	0,6
Гидрокарбонаты, мг/дм^3	226,8	171,2	9,2	2242,9	242,2
Сульфаты, мг/дм^3	46,4	5,0	0,0	1470,5	179,7
Хлориды, мг/дм^3	207,8	5,7	0,3	11830,2	1412,7
Общее железо, мг/дм^3	0,3	0,1	0,0	5,1	0,6

Величина водородного показателя в районе исследования указывают на преобладание слабощелочной реакции воды (более 50%), при этом доля слабокислых вод выше на правобережной части р. Вилюй и составляет 13%. Щелочные, нейтральные и слабощелочные воды распределены более равномерно на лево- и правобережных водоемах р. Вилюй.

В районе исследования наиболее часто встречаются водоемы с очень мягкой, мягкой и умеренно-жесткой водой. Доля жестких и очень жестких вод мала, также наблюдается пространственная дифференция: в правобережной стороне р. Вилюй

преобладают озера с очень мягкими водами (50%), в левобережной стороне большинство озер с умеренно-жесткими водами.

В бассейне р. Вилюй основными преобладающими типами вод по классификации О.А. Алекина (1953) являются гидрокарбонатно-магниево-кальциевые воды (65%), доля остальных типов воды невелика (гидрокарбонатно-кальциевые воды – 21%, гидрокарбонатно-натриевые – 10%, гидрокарбонатно-натриевые – 4%).

Более подробно рассмотрим качество озерных вод и донных отложений на территории Нюрбинского района РС (Я).

В настоящее время в северной части Нюрбинского района наблюдается усыхание озер из-за снижения уровня воды в связи с созданием искусственных каналов. Особенно это характерно у с. Хаты Мегежекского наслега. Здесь близлежащие водоемы находятся на стадии усыхания.

Изученные озерные воды на территории Нюрбинского района характеризуются от малой до высокой минерализации, pH варьирует от нейтральных до сильнощелочных вод. По показателю жесткости характеризуются от очень мягких до очень жестких вод. В ионном составе идет преобладание гидрокарбонатов, натрия, магния и кальция. Кроме озер с. Хаты в стадии усыхания, где отмечается доминирование сульфатов в анионном состав. В стадии усыхания наблюдается увеличение минерализации, главных ионов, биогенных элементов, марганца, железа и меди, превышающие нормативы ПДКрх в несколько десятков раз.

Большинство исследованных вод имеют высокую цветность и мутность, которая не соответствует гигиеническим нормативам. Также по гигиеническим нормативам озерные воды не соответствуют по марганцу и железу.

В большинстве озерных вод зафиксированы фториды, стронций и барий, что, вероятно, связано с тем, что на питание водоемов влияют подземные воды (подозерные талики).

Кроме того, большая часть озер находятся в стадии эвтрофикации, которая подтверждается высокими концентрациями фосфат и нитрит-ионов. В процессе эвтрофикации играет роль ряд факторов: сельскохозяйственные и хозяйственно-бытовые стоки, а также малое количество атмосферных осадков (преобладание испарения над выпадением осадков).

В качестве поверхностных источников водоснабжения из исследованных озер по химическому составу более походят озера Марха (Муосааны), Урэн, Кубалаах. Урэн и Кубалаах расположены на удалении от населенного пункта. Озеро Марха (Муосааны) находится вблизи населенного пункта, поэтому должны обязательном условии соблюдаться зоны санитарной охраны (ЗСО) и кроме того, вероятность ухудшения качества воды очень велика из-за сельскохозяйственных и хозяйственно-бытовых стоков. Эти озерные воды могут быть использованы в качестве питьевого водоснабжения только после проведения микробиологических, паразитологических, радиологических исследований, а также водоподготовки, так как в естественном состоянии отмечаются незначительные превышения гигиенических нормативов по железу и по показателю цветности. Кроме того, в таких водоемах согласно СанПиН 2.1.4.1110-02 «Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения», граница второго пояса ЗСО на водоемах должна быть удалена по акватории во все стороны от водозабора на расстояние 3 км - при наличии нагонных ветров до 10% и 5 км - при наличии нагонных ветров более 10%. В пределах второго пояса не допускается отведения сточных вод в зоне водосбора источника водоснабжения, включая его притоки, не отвечающих гигиеническим требованиям к охране поверхностных вод, в границах второго пояса зоны санитарной охраны запрещается сброс промышленных, сельскохозяйственных, городских и ливневых сточных вод, содержание в которых

химических веществ и микроорганизмов превышает установленные санитарными правилами гигиенические нормативы качества воды.

В Мегежекском наслеге (с. Хаты) наблюдается острая нехватка в источниках водоснабжения. Близкорасположенные озера находятся стадии усыхания. Точной причины процесса усыхания неизвестно, но вероятно, связано с совокупностью ряда причин: спускания воды из озер, засушливое лето, малое количество атмосферных осадков, а также снижением подземного питания водоемов.

Озера с. Хаты, находящиеся в стадии усыхания, характеризуются повышенной и высокой минерализацией с щелочной средой и очень жесткой водой. В ионном составе идет доминирование сульфатов, магния и натрия. Увеличивается концентрация взвеси в воде, а также биогенных элементов (аммония, нитритов, фосфатов). Зафиксированы высокие концентрации марганца, меди, железа, фенолов. Показатель цветности достигает до 210 град, мутности до 9 ЕМФ.

В настоящее время искусственно созданный водоем на руч. Мар Юрях непригоден как источник водоснабжения, так как отмечаются очень высокие концентрации марганца (до 7 ПДКхп) и железа (до 6 ПДКхп), кроме того, по показателю цветности (до 300 град) и мутности (13,5 ЕМФ) не соответствует гигиеническим нормативам.

Возможно, грамотный подход к проектированию искусственного водоема на руч. Мар Юрях с предварительным проведением инженерно-гидрометеорологических и инженерно-экологических изысканий с последующей организацией ложа малого водохранилища, дал бы возможность решить проблему с нехваткой питьевого водоисточника в с. Хаты.

Единственным возможным источником водоснабжения остается только озеро Багадя, однако, в связи с малыми количествами осадков в теплое время года, и преобладания испарения над атмосферными осадками, возможно будет колебание уровня водоема в сторону уменьшения площади водного зеркала и глубины, что в последствие может привести к ухудшению качества озерной воды.

В в донных отложениях озер Хорулинского наслега отмечено накопление кадмия, мышьяка и марганца, в озерах и в искусственном водоеме (дамба) руч. Мар Юрях Мегежекского – накопление кобальта, хрома, цинка кадмия.

Наибольшие вариации концентраций металлов наблюдаются в донных отложениях оз. Мархa (Муосааны) в районе водозабора и в старице с. Мар. Для них характерно накопление цинка, марганца, кобальта, мышьяка, никеля, свинца и железа. Ниже села превышений локального фона не выявлено.

В озерах Аканинского наслега зафиксировано накопление никеля, кобальта и железа. В озере Уодэй донные отложения обогащены железом. В донных отложениях оз. Дженкюдя в трех местах отбора превышений геохимического фона не отмечается.

Накопление подвижных форм металлов наблюдается в донных отложениях с высоким содержанием органических веществ.

В целом, по результатам проведенных исследований качества вод и донных отложений озер бассейна реки Вилюй установлено значительная неоднородность гидрохимических параметров, включая минерализацию, pH и жесткость воды. В данном бассейне преобладают маломинерализованные и слабощелочные воды, однако в некоторых районах, например, на территории Сунтарского района в бассейне р. Кемпендяй, а также в Нюрбинском районе, выявлены высокоминерализованные воды. Высокая минерализация связана и с природными условиями (Кемпендяйское месторождение соли), а также может быть связана с усыханием озер, сопровождающееся увеличением минерализации и концентрации биогенных элементов, что приводит к ухудшению качества воды. Донные отложения в ряде озер содержат повышенные концентрации тяжелых металлов, таких как кадмий, мышьяк и марганец. Для улучшения

ситуации необходимы меры по охране водных ресурсов и предотвращению эвтрофикации.

Литература

Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1953.

Богословский Б.Б. Озероведение. М.: Изд-во Московского университета, 1960.

QUALITY OF WATER AND BOTTOM SEDIMENTS OF LAKES IN THE VILYUY RIVER BASIN

M.I. Ksenofontova

The article presents an analysis of the quality of water and bottom sediments of lakes in the Vilyuy River basin. Significant heterogeneity of hydrochemical parameters has been revealed: mineralization varies widely, weakly alkaline and low-mineralized waters predominate. It has been established that the accumulation of heavy metals such as cadmium, arsenic, manganese in bottom sediments is associated with a high content of organic matter. In the Nyurbinsky district, drying up of lakes is observed, leading to an increase in mineralization, concentration of biogenic elements and pollution of lake waters with iron and copper. Eutrophication processes due to anthropogenic impact are noted. Measures for the protection of water resources and the design of artificial reservoirs taking into account environmental requirements are recommended.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ПОРОВЫХ ВОД ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР ПРЕРЫВИСТОЙ ЗОНЫ МЕРЗЛОТЫ

Д.Г. Курашев, Р.М. Манасыпов

Томский государственный университет

Термокарстовые озера на торфяниках с многолетней мерзлотой являются важными индикаторами изменения климата и значительным источником выбросов парниковых газов в северных широтах. Основным составляющим пула углерода в этих экосистемах является растворенное органическое вещество (РОВ), которое активно участвует в биогеохимических процессах. Проанализированы пробы, полученные из поровых вод термокарстовых озер прерывистой зоны мерзлоты. Проведено исследование спектрофотометрических характеристик растворенного органического вещества в поровых водах донных отложений. Результаты позволили охарактеризовать качественные характеристики органического вещества. Для изучения процессов формирования озерных вод и источников питания озер исследован изотопный состав H и O трех термокарстовых озер, находящихся на разных стадиях развития.

Термокарстовые озера Западно-Сибирской низменности (ЗСН) являются естественными индикаторами современных и прошлых изменений климата, а также проявлениями современной динамики ландшафтов (Kirpotin et al., 2009). Зачастую они характеризуются низкими концентрациями неорганических растворенных веществ и низкими показателями pH, а также темной окраской и высокими концентрациями растворенного органического углерода (РОУ) (Manasypov et al., 2014).

Ключевой участок, расположенный в районе пос. Ханымей (ЯНАО) (63,78° с.ш.; 75,61° в.д.), представлен плоскобугристыми мерзлыми болотами северной тайги зоны прерывистого распространения многолетнемерзлых пород. На междуречьях здесь повсеместно развита многолетняя мерзлота и преобладают безлесные торфяные плоско– и крупнобугристые болота. Территория термокарстовых озер занимает до 40% исследуемой площади.

Образцы осадков отбирались с использованием пробоотборника Aquatic Research Instruments, оснащенного поликарбонатной керновой трубкой. Средняя глубина кернов составляла 35 см (в пределах 20–50 см), что зависело от общей толщины органического слоя и механической прочности нижележащего минерального горизонта. После отбора влажные образцы осадков разрезались на слои и подвергались центрифугированию при 3000 g в течение 15 минут для извлечения поровой воды из осадка (Audry et al., 2011).

Для характеристики растворенного органического вещества (РОВ) были использованы наиболее распространенные показатели, позволяющие качественно оценить природу, происхождение и состав органического вещества ($SUVA_{254}$, Коэффициенты *E2:E3*, *E2:E4*, *E4:E6*), а также показатель средневзвешенной молекулярной массы (WAMW).

Изотопный состав кислорода и водорода в поровой воде определялся методом масс-спектрометрии изотопного равновесия с использованием изотопного масс-спектрометра DELTA V Advantage (Thermo Fisher Scientific, Германия) и системы GasBench II. Значения среднего и стандартного отклонения (среднее±sd) использовались для описания неопределенности данных. Далее был проведен парный сравнительный анализ (тест Манна-Уитни) для выявления различий между независимыми выборками данных.

РОУ варьировал от 14–28 мг/л в верхних 2 см отложений до 47–74 мг/л в нижней части, со средним значением 36±14 мг/л. Значения коэффициента $SUVA_{254}$ в поровой воде изменялись от 3,1 до 4,5. Высокие показатели ароматичности (до 5,6), указывают на полное преобладание гидрофобного материала, полученного из торфяной мерзлой толщи, окружающей озеро. При этом, необходимо отметить уменьшение показателя $SUVA_{254}$ с глубиной донных отложений в маленьком озере (R_S=-0,97), что вероятно, может объясняться увеличением доли автохтонного органического вещества с более низкой молекулярной массой (рис. 1).

На поведение РОУ повлияло активное развитие озера среднего размера и менее выраженный рост малого озера. Обратная динамика РОВ заключалась в постепенном увеличении индекса $SUVA_{254}$ с увеличением размера озера. Это можно объяснить эффективной биодеградацией лабильного ОВ с низкой молекулярной массой и увеличением поступления ароматических органических веществ в поровые воды через поверхностные и надмерзлотные воды.

Значение WAMW варьировалось от 1800–2000 Да в верхних 2 см отложений до 1500–2000 Да в нижней части (рис. 2А), среднее значение WAMW для поровой воды составило 2019±311 Да. WAMW демонстрировала систематическое увеличение значений с глубиной в озере среднего размера (R_S=0,68), и уменьшение наблюдалось в маленьком озере (R_S= -0,94). Распространение многолетней мерзлоты оказывает существенное влияние на оптические характеристики, ароматичность и средневзвешенную молекулярную массу (WAMW). Это свидетельствует об активной мобилизации продуктов выщелачивания органического вещества из поровых вод торфяников и почвенных поровых вод в озера, предположительно, через подземный или надмерзлотный сток.

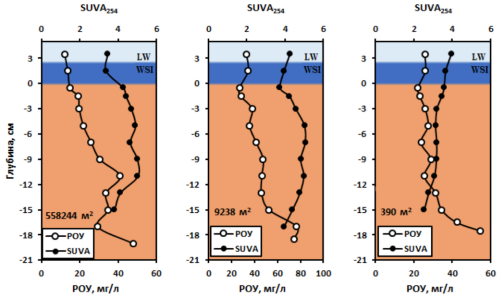


Рис. 1. Вертикальные профили РОУ (мг/л) и $SUVA_{254}$ (л/мг/м) в поровой воде трех исследованных термокарстовых озер. LW – озерная вода, WSI – граница раздела вода-осадок

Средние значения $E_2:E_3$ были равны 4,22±0,3, что свидетельствует о низком среднемолекулярном весе органических соединений это характерно для свежего, менее разложившегося органического вещества, в глубоких слоях значение показателя снижается, что указывает на присутствие более крупных молекул. В большом и среднем озере значения ниже, что свидетельствует о более разложившемся и переработанном ОВ (рис. 2Б). В верхних слоях $E_2:E_4$ выше, что свидетельствует о более свежем органическом веществе, поступающем из водной толщи. В глубине осадков коэффициент снижается, что соответствует накоплению гумусированных веществ с высоким содержанием ароматических структур. В большом и среднем озере $E_2:E_4$ ниже, что соответствует более стабильному, переработанному органическому веществу. В малом озере коэффициент выше, что говорит о большем вкладе свежих органических соединений, средние значения были равны $E_2:E_4$ – 11,4±1,6 (рис.2В). Значение $E_4:E_6$, которое является показателем гумификации или ароматичности, варьировало от 11±3 в верхних 2 см до 5,8±2 в нижних слоях донных отложений. Понижение значений $E_4:E_6$ в поровой воде донных отложений может соответствовать увеличению содержания гуминовых кислот в более глубоких слоях донных отложений. Это может быть объяснено возможностью притока неглубоких грунтовых вод (рис. 2Г).

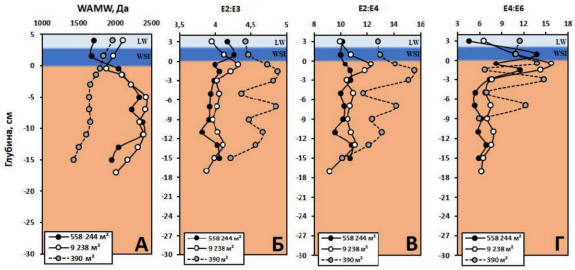


Рис. 2. Вертикальные профили средневзвешенной молекулярной массы (WAMW, Да) и коэффициентов $E_2:E_3$, $E_2:E_4$ и $E_4:E_6$ в поровой воде трех исследованных термокарстовых озер. LW – озерная вода, WSI – граница раздела вода-осадок

Впервые были получены результаты изотопного состава поровых вод трех термокарстовых озер разных классов размеров. В малом озере δD варьирует от –80,1 до –68,4 ‰ (среднее значение –76,5 ‰), а $\delta^{18}O$ варьирует от –11,9 ‰ до –8,4 ‰ (среднее

значение –10,2 ‰). В среднем озере значение δD составляет –72,7 ‰ (от –83,9 ‰ до –65,4 ‰), а среднее значение $\delta^{18}O$ составляет –11,8 ‰ (от –13 ‰ до –10,5 ‰). В большом озере среднее значение δD составляет –88,3 ‰ (от –93,8 до –83,9 ‰), а среднее значение $\delta^{18}O$ составляет –10,8 ‰ (от –12,9 ‰ до –9,3 ‰) (рис. 3). Отметим, что статистически значимые различия в d-избытке были выявлены между всеми озерами. Однако не было выявлено различий в δD между малым и средним озером (рис. 3) и $\delta^{18}O$ между большим и малым озером (рис. 3). Наиболее тяжелый водородный и наиболее легкий кислородный изотопные составы характеризуют среднее термокарстовое озеро, что, вероятно, связано с фракционированием при испарении. Растворенный органический углерод демонстрирует корреляции с изотопными показателями, что указывает на связь между гидрологическими процессами и содержанием органического вещества. Наблюдается статистически значимая положительная корреляция РОУ с δD (Rs=0,38) и отрицательная с $\delta^{18}O$ (Rs=-0,47). Эти зависимости могут отражать влияние процессов разложения органического вещества и его взаимодействия с водной средой. Кроме того, связь *избытка дейтерия* с РОУ (Rs = 0,55) может свидетельствовать об усилении испарительных процессов в более органически насыщенных водах (табл.).

Изотопный состав озерной воды (LW) и придонной воды (WSI) также показал разницу между исследованными озерами. δD варьировал от –78,8 до –78,3 ‰ в малом озере, от –69,3 до –72,7 ‰ в среднем озере, от –83,9 до –83,9 ‰ в большом озере (для LW и WSI соответственно). Изменения значений δD между LW и WSI были выявлены только в среднем озере, вероятно, из-за влияния надмерзлотного стока на придонные воды. Изменения $\delta^{18}O$ в LW и WSI были более выражены во всех трех озерах. $\delta^{18}O$ варьировал от –11,9 до –10,9 ‰ в малом озере, от –1,5 до –12,7 ‰ в среднем озере, от –12,3 до –9,3 ‰ в большом озере (для LW и WSI соответственно). Таким образом, в среднем озере изотопный состав кислорода становится легче от поверхности к придонной части озерной воды, что также влияет на значения d-избытка.

Таблица. Зависимость параметров РОВ поровой воды от глубины залегания отложений (коэффициент ранговой корреляции Спирмена Rs, $p \leq 0,05$, выделен красным шрифтом)

	Глубина	РОУ, мг/л	SUVA254	WAMW	E_2:E_3	E_2:E_4	E_4:E_6	δ2H, ‰	$\delta^{18}O$, ‰	d-избыток
Глубина	1	0,55	0,07	0,08	-0,18	-0,03	-0,31	-0,12	0,01	-0,12
DOC, мг/л	0,55	1	0,39	0,45	-0,32	-0,12	-0,14	0,38	-0,47	0,55
$SUVA_{254}$	0,07	0,39	1	0,99	-0,8	-0,47	-0,29	-0,15	-0,33	0,23
WAMW	0,08	0,45	0,99	1	-0,79	-0,46	-0,29	-0,08	-0,37	0,29
E_2:E_3	-0,18	-0,32	-0,8	-0,79	1	0,82	0,61	0,32	0,05	0,08
E_2:E_4	-0,03	-0,17	-0,47	-0,46	0,82	1	0,61	0,26	-0,11	0,2
E_4:E_6	-0,31	-0,14	-0,29	-0,29	0,61	0,61	1	0,4	0,07	0,2
δD(δ2H) (‰)	-0,12	0,38	-0,15	-0,08	0,32	0,26	0,4	1	-0,21	0,72
δ18O(‰)	0,01	-0,47	-0,33	-0,37	0,05	-0,11	0,07	-0,21	1	-0,79
d-избыток	-0,12	0,55	0,23	0,29	0,08	0,2	0,2	0,72	-0,79	1

Поровые воды малого озера по изотопному составу и избытку дейтерия наиболее близки к GMWL (Global Meteoric Water Line), что может быть связано с их атмосферным питанием в летний период. Поровые воды среднего озера имеют наиболее сложный изотопный состав, что, вероятно, можно объяснить многообразием процессов формирования и питания.

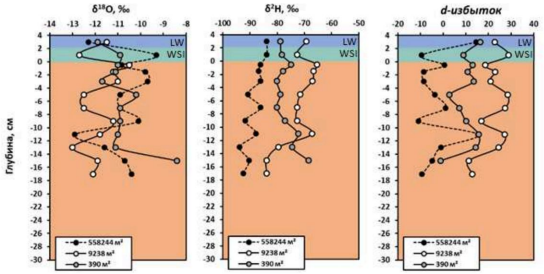


Рис. 3. Вертикальные профили d-избытка, δ^2H и $\delta^{18}O$ в поровой воде трех исследованных термокарстовых озер. LW – озерная вода, WSI – граница раздела вода-осадок

Значения избытка дейтерия показали заметную разницу между озерами с разной площадью поверхности, что может указывать на разные процессы кинетического фракционирования изотопного состава. Значение избытка дейтерия для большого озера составило –3,6±7,6 ‰. Значения δ^2H были самыми легкими, что отражает формирование изотопного состава в существенно холодных условиях. Поскольку это озеро имеет наибольшую площадь и незначительную глубину, это, вероятно, обусловлено процессами снеготаяния. Изотопный состав поровых вод небольшого озера (390 м^2) имеет среднее значение избытка дейтерия, равное 9,52, что приходится на глобальную линию метеорных вод и может отражать преобладание атмосферного питания (дождевой воды, ранее подвергшейся испарению). Установлено, что небольшие термокарстовые озера могут пересыхать в жаркие и сухие летние периоды и наполняться в периоды обильных осадков (Pokrovsky et al., 2013). Для среднего, активно растущего озера характерно наибольшее фракционирование изотопного состава (d-избыток составил 21,8). Вероятно, на изотопный состав поверхностных и поровых вод совместно влияют несколько различных процессов: таяние окружающих озеро многолетнемерзлых торфяников (надмерзлотный сток), обильные осадки и процессы криофракционирования с наступлением зимы. Кроме того, поровые воды имеют наиболее тяжелый изотопный состав водорода, характерный для более теплых условий формирования. Таким образом, можно предположить, что на формирование поровых вод влияют и процессы эвапотранспирации (Newman et al., 2020).

Описанные выше различия в изотопном составе кислорода и водорода поровых вод исследованных термокарстовых озер, вероятно, обусловлены рядом факторов, в том числе криофракционированием при промерзании донных отложений в зимний период, поступлением осадков в летний и зимний периоды, а также процессами таяния многолетнемерзлых пород.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 24-77-10049.

Литература

Audry S., Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Dupré B. Organic matter mineralization and trace element post-depositional redistribution in Western Siberia thermokarst lake sediments // Biogeosciences. 2011. V. 8. P. 3341–3358.

Kirpotin S., Berezin A., Bazanov V., Polishchuk Yu., Vorobiov S., Mironycheva-Tokoreva N., Kosykh N., Volkova I., Dupré B., Pokrovsky O., Kouraev A., Zakharova E., Shirokova L., Mognard N., Biancamaria S., Viers J., Kolmakova M. Western Siberia wetlands

as indicator and regulator of climate change on the global scale // International Journal of Environmental Studies. 2009. V. 66. P. 409–421.

Manasypov, R.M., Pokrovsky, O.S., Kirpotin, S.N., Shirokova, L.S. Thermokarst lake waters across the permafrost zones of western Siberia // Cryosphere. 2014. V. 8. P. 1177–1193.

Newman, C.P., Poulson, S.R., Hanna, B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA // Journal of Geochemical Exploration. 2020. V. 210. P. 106445.

Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Kulizhsky S.P., Vorobiev S.N. Impact of western Siberia heat wave 2012 on greenhouse gases and trace metal concentration in thaw lakes of discontinuous permafrost zone // Biogeosciences. 2013. V. 10, №8. P. 5349–5365.

CHARACTERIZATION OF DISSOLVED ORGANIC MATTER AND ISOTOPIC COMPOSITION OF PORE WATERS IN THERMOKARST LAKES OF THE DISCONTINUOUS PERMAFROST ZONE

D.G. Kurashev, R.M. Manasypov

Thermokarst lakes in peatlands with permafrost are important indicators of climate change and significant sources of greenhouse gas emissions in northern latitudes. The primary component of the carbon pool in these ecosystems is dissolved organic matter, which actively participates in biogeochemical processes. Samples collected from pore waters of thermokarst lakes in the discontinuous permafrost zone were analyzed. A study of the spectrophotometric characteristics of dissolved organic matter in the pore waters of bottom sediments was conducted. The results allowed for the characterization of the qualitative properties of organic matter. To investigate the processes of lake water formation and the sources of lake recharge, the isotopic composition of hydrogen and oxygen was analyzed in three thermokarst lakes at different stages of development.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ГИПЕРГАЛИННОГО ОЗЕРА МАЛОЕ ЯРОВОЕ В ГОЛОЦЕНЕ (КУЛУНДИНСКАЯ РАВНИНА, АЛТАЙСКИЙ КРАЙ)

Г.А. Леонова[1], А.Е. Мальцев[1], Л.В. Мирошниченко[1], С.К. Кривоногов[1,2]
[1]Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
[2]Кызылординский университет им. Коркыт-Ата (Казахстан)

Приведены результаты исследования геохимии разреза донных отложений по длинным кернам бурения (450 см) гипергалинного оз. Малое Яровое, расположенного в цент-ральной части Кулундинской равнины Алтайского края. По вещественному составу керн неоднороден и имеет четкую слоистость. Характер распределения химических элементов по глубине разреза донных отложений показал смену условий седиментации в голоцене. Наиболее существенные изменения в состоянии озера произошли ~7.1–6.5 кал. тыс.л.н. и заключались в переходе от мелководной стадии водоема к глубоководному озеру.

Гипергалинные озера широко распространены на юге Западной Сибири в степных ландшафтах Кулундинской равнины. Все они считаются остаточными водоемами крупного, последовательно сокращавшегося четвертичного водного бассейна (Сидоренко, 1972). В силу специфических естественно-географических условий (бессточные котловины, близкое залегание грунтовых вод, превышение испарения над осадками) Кулундинская равнина является огромной соленосной провинцией

(Никольская, 1961). Освоение сырьевых ресурсов гипергалинных озер Кулундинской равнины обусловило, в первую очередь, изучение состава высокоминерализованных рассолов, биологической продуктивности и экологического состояния озер. Однако гипергалинные озера Кулундинской равнины представляют собой еще и уникальные объекты для палеоклиматических и палеогеографических реконструкций, которые помогут расширить наши представления об эволюции озерных систем и динамики климата прошлого, а донные отложения оз. Малое Яровое представляют собой самые продолжительные записи климата Степного Алтая и юга Западной Сибири, позволяющие с высокой точностью описать историю окружающей среды региона с момента последнего оледенения (Rudaya et al., 2020).

Гипергалинное оз. Малое Яровое находится в системе озер центральной части Кулундинской равнины в Славгородском районе Алтайского края рядом с селом Владимировка. Озеро бессточное, расположено на высоте 96 м над уровнем моря. имеет глубокую, округлую котловину правильной формы. Площадь водного зеркала озера составляет 35 км^2, площадь водосборного бассейна — 1010 км^2. Средняя глубина озера около 2 м, максимальная – 5 м. Вода озера горько-соленая и представляет собой сульфатную рапу. В июле 2020 г. проведено бурение донных отложений вибрационным методом с помощью модифицированного поршневого пробоотборникам Ливингстона в точке с координатами 53°03′21″ с.ш., 79°07′19″ в.д. Поднят непрерывный керн длиной 470 см с ненарушенной структурой.

Озерные отложения неоднородны и имеют мощность 450 см, подстилаются опесчаненными суглинками с признаками почвообразования около кровли (рис. 1). Характер распределения химических элементов по глубине разреза донных отложений оз. Малое Яровое указывает на смену условий седиментации. Изменение содержаний (увеличение/уменьшение) элементов по разрезу имеет четко выраженные закономерности.

Для интервала 0–190 см установлены более высокие средние значения Al (4.86±0.48%), Fe (2.58±0.29%), K (1.46±0.15%), Na (4.47±1.21), P (0.048±0.005%), Si (16.84±1.59), Ti (0.37±0.03%). При этом в данном интервале можно выделить участок 0–43 см, для которого характерно значительное увеличение Na (5.14–6.30%) на фоне падения концентраций ряда терригенных элементов (Al, Fe, K), что указывает на активные процессы осаждения эвапоритовых минералов, например, галита (NaCl). Для нижележащих отложений (190–450 см) характерно резкое увеличение средних содержаний Ca (с 5.09±1.50 до 10.70±1.95%), Mg (с 2.67±0.66 до 3.24±1.10%), Mn (с 0.064±0.014 до 0.080±0.019%), что указывает на уменьшение доли терригенной компоненты и активное осаждение карбонатных минералов. В данном интервале можно выделить нижний участок осадка 210–113 см, для которого установлено заметное увеличение содержаний ряда терригенных элементов: Al, Fe, K, Na и Si на фоне некоторого снижения Ca до 3.15–4.55%. Стоит также выделить участок 190–247 см, для которого характерны максимальные по разрезу содержания Mg на уровне 4.11–4.66%. Подстилающие отложения хорошо отбиваются от озерных по росту содержаний Al (6.26–6.74%), Fe (2.56–3.27%), K (1.45–1.63%), Si (17.59–16.18%), Ti (0.32–0.39%).

Главной особенностью развития современного и древнего галогенеза является ярко выраженная стадиальность этого явления — строго определенная последовательность выпадения твердых фаз солей: карбонатная стадия сменяется гипс-ангидритовой, галитовой и, наконец, калий-магниевой (Холодов, 2006; Шварцев и др., 2014). Поэтому по характеру распределения типичных эвапоритовых минералов (гипс, галит) в разрезе донных отложений можно выделить различные уровни солености озерных вод на этапе формирования осадков. Характер распределения минеральных

компонентов по разрезу донных отложений указывает на то, что оз. Малое Яровое претерпело несколько изменений в своем состоянии (рис. 2).

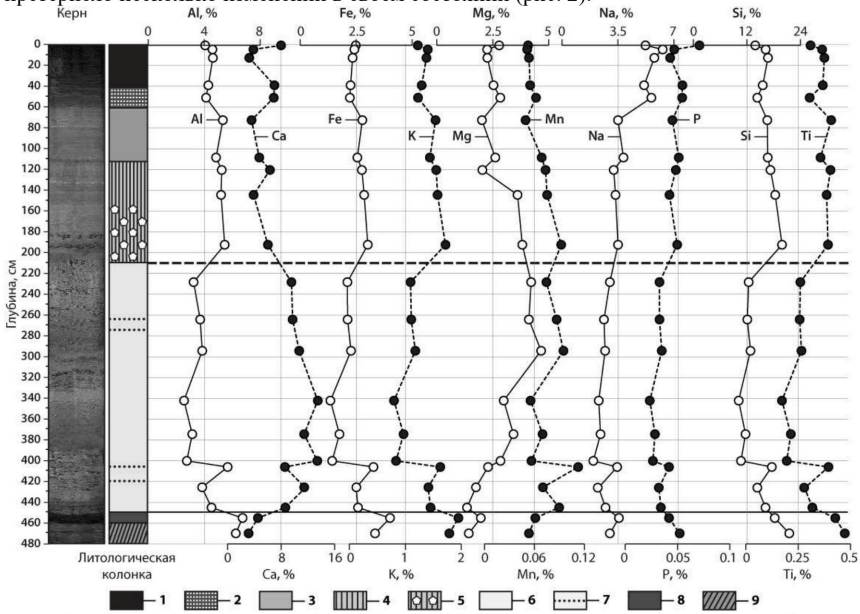


Рис. 1. Распределение химических элементов по разрезу донных отложений

1 – черные, сероводородные илы (0–41 см); 2 – темно-серые глины (41–60 см); 3 – серые однородные глины (60–113 см); 4 – светло-серые слоистые глины (113–210); 5 – включения крупных (1–3 см) кристаллов гипса (156–207 см); 6 – однородные, голубовато-серые глины, содержащие большое количество гипса (207–450 см); 7 – опесчаненные прослои (1–2 см) с большим количеством мелких кристаллов гипса. Подстилающие отложения: 8 – темные (почти черные) суглинки с признаками почвообразования (450–460 см), 9 – коричневые, опесчаненные суглинки (460–480 см). Пунктирной линией показан участок донных отложений с резкой сменой геохимических параметров, жирной – подстилающие породы

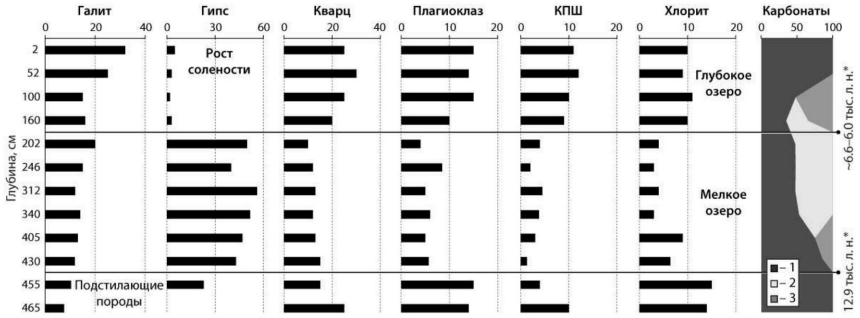


Рис. 2. Вертикальные профили распределения минеральных компонентов (%) в донных отложениях:

1 – кальцит, 2 – низко-Ca-магнезит, 3 – арагонит. * – калиброванные даты (по Rudaya et al., 2020). Жирными линиями показаны участок донных отложений с резкой сменой распределения минеральных компонентов и подстилающие породы

Так, интервал ~202–450 см характеризуется активным осаждением гипса и низко-Ca-магнезита. Снижение доли кварца, плагиоклаза, КПШ и хлорита указывает на низкий уровень озерных вод и слабую эрозию береговой линии. Данный интервал можно условно охарактеризовать как стадию «мелководного (мелкого) озера», который соответствует согласно (Rudaya et al., 2020) временному периоду примерно с 12.9 до 6.6–6.0 кал. тыс. л. н. В интервале ~0–202 см, после резких изменений водного баланса водоема, вызванных увеличением поступления воды, минеральные ассоциации характеризуются резким ростом доли алюмосиликатных минералов на фоне роста крупноразмерной песчаной фракции осадка, которая сопровождалась значительным увеличением содержаний галита, карбонатов, почти полным отсутствием гипса и исчезновением низко-Ca-магнезита. Этот участок можно условно выделить в стадию «глубоководного (глубокого) озера», который иллюстрирует усиление эрозии береговой линии и высокое стояния уровня озерных вод. Таким образом, стадия «мелкого водоема» соответствует условно сульфатному классу, а стадия «глубокого озера» — условно хлоридному классу. Согласно (Страхов, 1963) в озерах сульфатного класса галогенная стадия начинается гипсом, за которым следует стадия осаждения глауберита, мирабилита и тенардита, после чего на хлоридной стадии выпадает галит и магнезит, а в хлоридном классе после кратковременной стадии осаждения гипса и галита (гипсовая стадия) следует длительная стадия выпадения большого количества NaCl (галитовая стадия).

Таким образом, наиболее существенные изменения в состоянии озера произошли около 7.1–6.5 кал. тыс. л. н. – переход от мелководной стадии водоема к глубоководной. Данный временной промежуток согласно (Kolpakova et al., 2020) характеризуется как переходный от холодного и сухого к теплому и влажному климату, что отражается в изменении минерального состава осадков (рис. 2), т.е. в холодных и сухих условиях голоцена в озере доминировало осаждение гипса. Это находит подтверждение в литературе (Last, 2002) – осаждение разных классов эвапоритовых минералов (сульфатных и/или карбонатных) контролируется помимо ионного состава и минерализации рапы еще и суточными/сезонными колебаниями температуры: для теплых периодов характерно осаждение тенардита, ангидрита и термонатрита, для более низких температур – мирабилита, эпсомита и гипса.

На основании полученной возрастной модели (Kolpakova et al, 2020; Rudaya et al., 2020), изучения минералого-геохимических особенностей донных отложений и изменения химического состава поровых вод были выделены стадии эволюции оз. Малое Яровое (рис. 3) в зависимости от изменений регионального климата Кулундинской равнины.

Образование озера (интервал 450–415 см) можно связать с предполагаемой влажной фазой конца потепления беллинг-аллеред ~12.9–12.2 кал. тыс. л. н., которая соответствует стадии (I-а) более глубокого и опресненного озера с некоторым ростом биологической продуктивности, на что указывает характер распределения C/H, ФКМ, Sr/Ba, Zn/Nb, Ca/Fe, SO_4^{2-}/Cl^-, Ca^{2+}/Cl^-, $Na^+ + K^+/Ca^{2+} + Mg^{2+}$. В этот период озерные воды, по-видимому, характеризовались большим содержанием сульфатов и гидрокарбонатов. Последующий холодный и сухой период позднего дриаса способствовал снижению уровня озерных вод и переходу водоема на стадию «мелкого озера» (стадия I-б). Наступление холодных условий маркирует рост отношения La/Y, а на снижения уровня озерных вод указывает рост Sr/Ba и Ca/Fe, что привело к максимальному осаждению гипса в интервале 420–300 см. Далее уровень озерных вод стал расти — на это указывает изменение характера распределения ряда геохимических маркеров (SO_4^{2-}/Cl^-, Ca^{2+}/Cl^-, Cl^-/M) в интервале 300–230 см, что позволяет выделить стадию I-в. О последующем росте уровня озерных вод после 6.6 кал. тыс. л. н. свидетельствует состав осадков с

высоким содержанием «терригенной» компоненты — Al, Fe, Si, Ti, ФКМ и ТМ (стадии II-а-в). Резкое увеличение содержания водорастворимых солей и преобладание их над карбонатами отмечается в верхней части керна с ~1.4 кал. тыс. л. н., на глубине 30–40 см (стадия III).

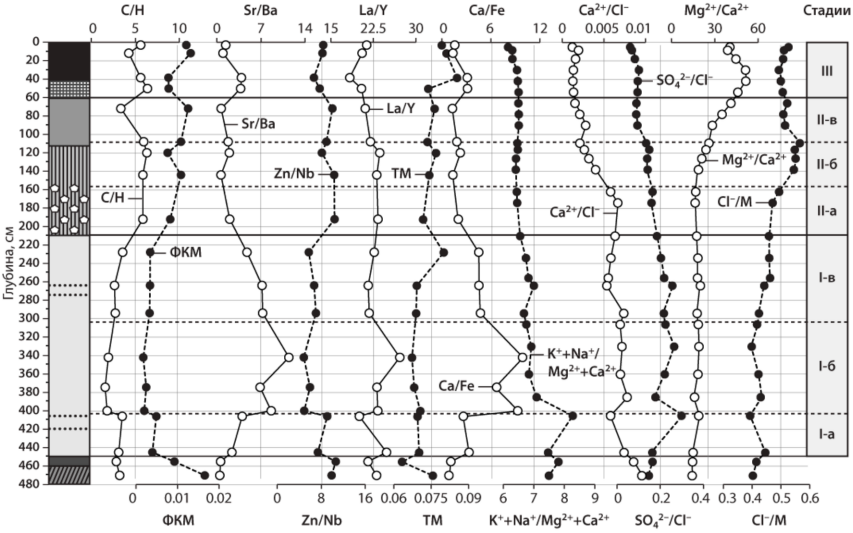


Рис. 3. Геохимические индикаторы условий осадконакопления. ФКМ – фосфор-кальциевый модуль (P_2O_5/CaO), ТМ – титановый модуль (TiO_2/Al_2O_3), М – минерализация. I–III стадии эволюции озера (см. в тексте). Жирными линиями показаны участки донных отложений с резкой сменой распределения геохимических маркеров (отделяющие основные этапы развития озера) и подстилающие породы

Работа выполнена по государственному заданию Института геологии и минералогии СО РАН (проект № 122041400193-7). Анализы проведены в Центре коллективного пользования научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований Института геологии и минералогии СО РАН.

Литература

Никольская Ю.П. Процессы солеобразования в озерах и водах Кулундинской степи. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1961. 182 с.

Сидоренко М.Н. География Алтайского края. Барнаул, Алт. кн. изд-во, 1972. 96 с.

Страхов Н.М. Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. М.: Госгеолиздат, 1963. 535 с.

Холодов В.Н. Геохимия осадочного процесса в аридных зонах // Геохимия осадочного процесса. М., ГЕОС, 2006. С. 314–370.

Шварцев С.Л., Колпакова М.Н., Исупов В.П., Владимиров А.Г., Ариунбилэг С. Геохимия и формирование состава соленых озер Западной Монголии // Геохимия. 2014. №5. С. 432–449.

Kolpakova M.N., Gaskova O.L., Krivonogov S.K., Naymushina O.S., Rudaya N.A. Distribution Profile of Chemical Elements during the Last 13 Thousand Years from the Sediments of Maloye Yarovoe Lake (Western Siberia, Russia) // Water. 2020. №12. 3001.

Last W.M. Geolimnology of salt lakes // Geosci. J. 2002. M. 6, P. 347–369.
Rudaya N., Krivonogov S, Słowi M., Cao X., Zhilich S. Postglacial history of the Steppe Altai: Climate, fire and plant diversity // Quaternary Science Reviews. 2020. 249.

GEOCHEMICAL FEATURES OF THE FORMATION OF BOTTOM SEDIMENTS OF THE HYPERHALINE LAKE MALOE YAROVOYE IN THE HOLOCENE-LATE GLACIAL PERIOD (KULUNDA PLAIN, ALTAI REGION)

G.A. Leonova, A.E. Maltsev, L.V. Miroshnichenko, S.K. Krivonogov

The article presents the results of a study of the geochemistry of the bottom sediment section, using long drilling cores (450 cm), of the hyperhaline lake Maloe Yarovoe, located in the central part of the Kulunda Plain of the Altai Territory. The core is heterogeneous in its material composition and has a clear layering. The nature of the distribution of chemical elements by the depth of the bottom sediment section showed a change in sedimentation conditions in the Holocene. The most significant changes in the state of the lake occurred ~7.1–6.5 cal ka BP and consisted of a transition from the shallow-water stage of the reservoir to a deep-water lake.

СОЕДИНЕНИЯ ВОССТАНОВЛЕННОЙ СЕРЫ В ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ВОДОЕМАХ БЕЛОГО МОРЯ

Г.Н. Лосюк, Н.М. Кокрятская, С.С. Попов
ФИЦ комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН

В работе представлены данные сравнения нескольких стратифицированных озер морского типа, отделяющихся от Кандалакшского залива Белого моря. Все они находятся на меромиктической стадии отделения или стремятся к ней. Для донных осадков таких водоемов характерно достаточно высокие значения концентраций органического вещества (до 14,9%), особенно в поверхностных слоях. Четыре формы серы (пиритная, сульфидная, элементная и органическая) составляют в сумме общую восстановленную серу осадков (ΣS_{H2S}), количество которой варьировалось для всех озер в диапазоне от 0,2 до 1.6%. Основной вклад в ΣS_{H2S} в осадках вносит пиритная форма серы ($S_{пир}$) – в среднем по колонкам 49-58%, на органическую форму ($S_{орг}$) заметная доля приходится только в поверхностных слоях.

На Карельском берегу Белого моря обнаружены и исследуются стратифицированные озера морского типа (Краснова, 2021). Все они имеют небольшую глубину и размеры, и находятся недалеко друг от друга. Эти водоемы отделились от моря в результате поднятия берега (Романенко, 2012; Dreßler, 2009) и сформировали стратифицированную структуру с сероводородным придонным слоем (Krasnova, 2018; Лосюк, 2021). В водной толще этих водоемов можно выделить несколько слоев с разной плотностью, соленостью и температурой. Придонный анаэробный слой накапливает большие концентрации сероводорода, который образуется в результате процесса бактериального восстановления сульфатов. Процесс сульфатредукции активно идет и в осадках этих озер: образуются и накапливаются продукты трансформации сероводорода, а именно органические и неорганические соединения восстановленной серы, общее содержание которых характеризуют параметром «сумма производных бактериального сероводорода (ΣS_{H2S})». В его состав входят: сера кислоторастворимых моносульфидов

железа (S^{-2}), пиритная сера ($S_{пир}$), элементная сера (S^0) и сера в составе органических соединений ($S_{орг}$).

В работе представлено сравнение данных по содержанию соединений восстановленной серы следующих озер: Еловое (N 66º 28.7′ E 33º 16.9′), Трехцветное (N 66º 35.53′ E 32º 59.97′), Кисло-Сладкое (N 66º 32.87′ E 33º 08.14′) и Лагуны на Зеленом мысе (N 66º31.80′ E 33º05.55′). Все озера небольшие по глубине (4-6 м) и расположены недалеко от Беломорской Биологической станции МГУ им. Н.А. Перцова Биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. В структуре этих водоемов можно выделить три слоя – это опресненный аэробный слой, ниже расположен хемоклин и цветной слой, обусловленный развитием различных микроорганизмов (Krasnova, 2018), далее соленый анаэробный слой с сероводородом. Максимальные концентрации которого в придонных слоях этих озер находились в достаточно большом диапазоне 120-600 мг/л.

Для изучения геохимических параметров сульфатредукции в донных отложениях (ДО) во всех озерах были отобраны керны ударной прямоточной грунтовой трубкой Aquatic Research Instruments (США) с внутренним диаметром 50 мм, длиной 60 см, дискретность отбора проб 5 см. Анализ на содержание восстановленных форм серы проводили по методике, разработанной в лаборатории геохимии Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Волков, 1980). Определение массовой доли органического углерода ($C_{орг}$) проводили использованием анализатора элементного состава EuroEA3000 (Eurovector, S.p.A., Италия), оснащенного персональным компьютером с программным обеспечением Callidus.

Содержание органического вещества (определялось по $C_{орг}$), доступность и количество которого, влияет на интенсивность протекания микробного восстановления сульфатов в донных осадках, поэтому является важной характеристикой для понимания протекающих процессов. Для всех осадков исследованных озер характерно довольно большое количество органического вещества и постепенное уменьшение его количества с глубиной до ~3% (рис. 1). Лагуна на Зеленом мысе отличается от других водоемов большим содержанием $C_{орг}$ на глубине, что, скорее всего, связано с гранулометрическом составом осадков – преобладанием пелитовых фракций, в отличие от других озер, где значительный вклад вносит песчаная фракция. Озеро Еловое отличается от других исследованных водоемов повышенным количеством $C_{орг}$ в поверхностном слое – до 14,9%. Так как этот водоем является последним в системе проточных, соединенных ручьем озер, то и поступление органического вещества, скорее всего, происходит с наибольшей водосборной территории. Так же известно, что в районе хемоклина был зафиксирован слой красного цвета, обусловленный развитием криптофитовой водоросли из рода Rhodomonas (Краснова, 2014), которые являются еще одним источником поступления органического вещества в поверхностные донные осадки.

Количество общей восстановленной серы в осадках (ΣS_{H2S}) варьировалось для всех озер в широком диапазоне от 0,2 до 1.6% (Рис. 1), при этом в осадках озера Еловое изменялось от 0,28 до 1,24 %, составляя в среднем 0,67 %; в оз. Трехцветное от 0,22 до 1,47% (в среднем 0,99%); в оз. Кисло-Сладкое от 0,29 до 0,68% (в среднем 0,48%); в Лагуне на Зеленом мысе от 0,21 до 1,47% (в среднем коло 0,99%). Как и для содержания $C_{орг}$ в ДО оз. Еловое отличается повышенным количеством ΣS_{H2S}, что, скорее всего, связано с поступлением в большем, чем в других озерах, доступном для сульфатредуцирующих бактерий, органического вещества, что особенно заметно в поверхностных горизонтах.

Если сравнить распределение соединений восстановленной серы в составе суммы ΣS_{H2S}, то все донных осадки исследованных водоемов можно отнести к морскому типу

распределения (Рис. 2). Основной вклад в ΣS_{H2S} в таких осадках вносит пиритная форма серы ($S_{пир}$) – в среднем по колонкам для исследованных осадков 49-58%, на нижележащих горизонтах ее доля доходила до 68 и 77 % для оз. Кисло-Сладкое и лагуны на Зеленом мысе соответственно. Органическая форма серы ($S_{орг}$), которая представляет собой сумму серы биогенного происхождения и диагенетической серы, которая является продуктом трансформации бактериального сероводорода, в среднем вносит вклад в диапазоне 29-46%. При этом наиболее заметная ее доля приходится на поверхностные слои осадков. Доля сульфидной (S^{2-}) и элементной (S^0) серы небольшая – до 7-15%.

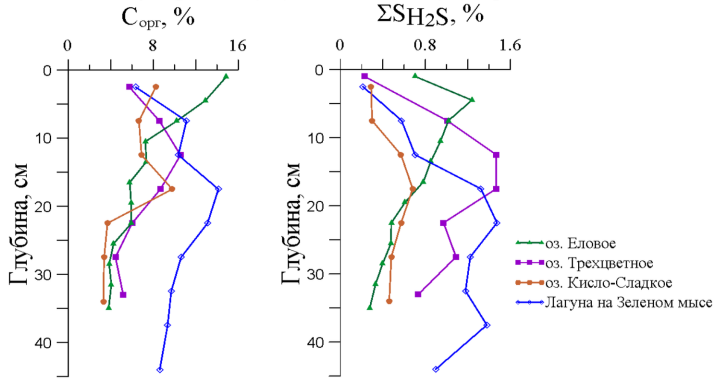


Рис. 1. Содержание органического углерода и суммы соединений восстановленной серы в донных осадках исследуемых водоемов

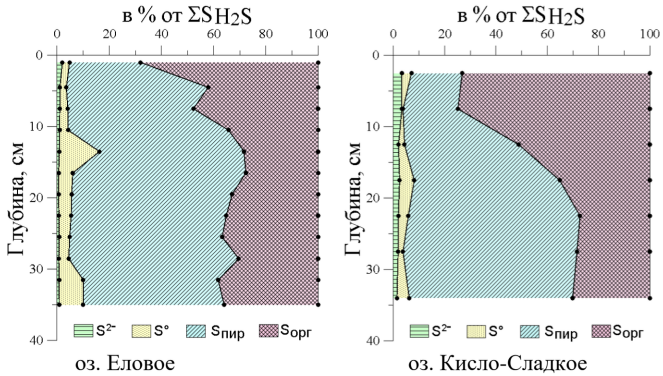


Рис. 2. Содержание (а) и соотношение суммы соединений восстановленной серы в ДО озер

Оз. Еловое наименее изученное нами по сравнению с другими ранее исследованными отделяющимися водоемами. По всем полученным характеристикам данный водоем можно отнести к меромиктическим, все данные хорошо согласовываются с данными ранее полученными для других подобных озер. В водной толще и в осадках таких водоемов протекает процесс сульфатредукции и идет накопление продуктов трансформации бактериального сероводорода. Для оз. Елового характерно накопление достаточно большого количества органического вещества,

особенно в верхних слоях осадков, как и для исследованных стратифицированных водоемов. В ДО идет накопление соединений восстановленной серы в сходных диапазонах значений. Профиль распределения различных форм серы и их вклад в сумму ΣS_{H2S} соответствует морскому типу – преобладает пиритная форма серы, заметный вклад органической формы серы наблюдался только в поверхностном слое.

Литература

Волков И.И. Геохимия серы в осадках океана. М.: Наука, 1984. 272 с.

Волков И.И., Жабина Н.Н. Методы определения различных соединений серы в морских осадках // Химический анализ морских осадков. М.: Наука, 1980. С. 5-27.

Краснова Е.Д. Экология меромиктических озер России. 1. Прибрежные морские водоемы // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 3. С. 322–333.

Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М., Краснова Е.Д. Сероводородное заражение прибрежных озер на разных стадиях изоляции от Белого моря // Океанология. 2021. Т. 61. № 3. С. 401–412.

Романенко Ф.А., Шилова О.С. Послеледниковое поднятие Карельского берега Белого моря по данным радиоуглеродного и диатомового анализов озерно-болотных отложений п-ова Киндо // Доклады Академии наук. 2012. Т. 442. С. 544–548.

Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М., Вахрамеева Е.А., Алиев Р.А. Соединения восстановленной серы в донных осадках водоемов на разных стадиях отделения от Кандалакшского залива Белого моря (меромиктическое озеро Трехцветное) // Океанология. 2023. Т. 63, №5. С. 784-795.

COMPOUNDS OF REDUCED SULFUR IN THE SEPARATING WATER BODIES OF THE WHITE SEA

G.N. Losyuk, N.M. Kokryatskaya, S.S. Popov

The paper presents data on the comparison of several stratified marine lakes separating from the Kandalaksha Bay of the White Sea. All of them are at the meromictic stage of separation or tend to it. The bottom sediments of such reservoirs are characterized by fairly high values of organic matter (up to 14.9%), especially in the surface layers. Four forms of sulfur (pyrite, sulfide, elemental and organic) make up the total reduced sulfur of sediments (ΣS_{H2S}), the amount of which varied for all lakes in the range from 0.2 to 1.6%. The main contribution to ΣS_{H2S} in sediments is made by the pyrite form of sulfur (S_{pyr}) – on average, 49-58% in the columns, the organic form (S_{org}) accounts for a noticeable share only in the surface layers.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ УСЛОВИЙ СЕДИМЕНТОГЕНЕЗА ГИПЕРГАЛИННОГО ОЗЕРА БОЛЬШОЕ ЯРОВОЕ КАК ОТРАЖЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФЛУКТУАЦИЙ ГОЛОЦЕНА СТЕПНОЙ ЗОНЫ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (КУЛУНДИНСКАЯ РАВНИНА)

А.Е. Мальцев[1], Г.А. Леонова[1], Л.В. Мирошниченко[1], С.К. Кривоногов[1,2]
[1]Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
[2]Кызылординский университет им. Коркыт-Ата (Казахстан)

Геохимические исследования донных отложений оз. Большое Яровое позволили выделить 4 стадии эволюции озера, обусловленные вариациями регионального климата. I (6.84–3.75 кал. тыс. л. н.) — этап активного осаждения гипса, относительно теплый и

сухой климат; II (3.75–2.66 кал. тыс. л. н.) — повышение уровня водоема и интенсивный привнос терригенной компоненты с водосборов; III (2.66–1.10 кал. тыс. л. н.) — характеризуется резким изменением характера осадконакопления, биопродуктивности экосистемы водоема и солёности озерных вод; IV (1.1–0 кал. тыс. л. н.) — условно современный этап развития озера, для которого характерно формирование минерализованных сульфидных илов. Установлены значительные изменения природно-климатических обстановок на территории Кулундинской равнины за последние ~6.9 тыс. л. н., которые определялись циклами аридизации/гумидизации регионального климата в голоцене.

На Кулундинской равнине находятся уникальные по запасам минеральных солей гипергалинные озера. Все они считаются остаточными водоемами крупного, последовательно сокращавшегося четвертичного водного бассейна. По мере уменьшения его акватории освобождались участки суши, которые подвергались водной эрозии и приобретали гривистый рельеф. Понижения между гривами были заняты реками и бессточными озерами (Сидоренко, 1972), среди которых одним из самых крупных является гипергалинное оз. Большое Яровое.

Оз. Большое Яровое занимает глубокую котловину (около 25 м) в западной части Кулундинской равнины Обь-Иртышского междуречья (Алтайский край). Северные и северо-восточные берега озера пологие, возвышаются над уровнем воды на 1.5–2.0 м. Юго-западные берега озера крутые и обрывистые с перепадами высот 10–15 м, изрезаны глубокими оврагами, имеют вид крутых яров высотой до 20 м. Озеро находится на высоте около 80 м над уровнем моря. Длина озера составляет 11 км, а ширина — 7.9 км. Площадь акватории озера равна 70 км^2, средняя глубина составляет 4 м, максимальная — около 8 м (Водоемы …, 1999).

В центральной части озера (52°52′09.2″ с.ш. и 78°36′32.9″ в.д.) в августе 2022 г. была пробурена скважина и поднят непрерывный керн с ненарушенной структурой, длиной 4.8 м и диаметром 7.5 см. Бурение донных отложений проведено с использованием разборной бурильной установки, состоящей из надувного понтона водоизмещением около 5 тонн, вышки с грузоподъемными механизмами, бура с набором штанг длиной 30 м. Применялась вибрационная технология бурения с помощью модифицированного пробоотборника Ливингстона (Krivonogov et al., 2012). Пробурить на всю мощность озерных отложений, до подстилающих пород, не удалось из-за высокой плотности осадка. На берегу керн выдавливали из пробоотборника, упаковывали в полиэтилен и пластиковые пеналы целиком и в таком виде транспортировали.

Методом ИСП-АЭС были определены концентрации Fe, Al, Ca, Mg, K, Na, Mn, Ba, Sr, Zn, Co, Ni, Cu, Cr, V, Li, Sb, Be в осадке и поровых водах. Методом рентгеновской порошковой дифрактометрии исследован минеральный состав донных отложений на дифрактометре ДРОН-4, излучение Cu-Kα. Количественный элементный анализ органического вещества выполнен на автоматическом CHNS-анализаторе Euro EA 3000 (EuroVector S.p.A., Италия) в Институте органической химии СО РАН. Формы серы (сульфатная S (VI), сульфидная S (II) и общая) в образцах донных отложений были определены в Институте катализа СО РАН. Донные отложения датированы методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS^{14}C) в радиоуглеродной лаборатории Центра коллективного пользования «Геохронология кайнозоя» СО РАН. Калибровка радиоуглеродных дат сделана с помощью программы OxCal 4.4.

Донные отложения оз. Большое Яровое представлены мергелистыми глинами с относительно высоким содержанием терригенной компоненты (до 85%) и карбонатов (до 22%). В донных отложениях можно выделить две пачки: 1. темные и обводненные сероводородные илы (плотность = 1.09 г/см^3, влажность = 29.02%) в интервале 0–203 см;

2. более светлые и плотные озерные осадки (плотность = 1.39 г/см^3, влажность = 21.77%) в интервале 203–480 см (рис. 1). Современные озерные отложения (0–51 см) представлены черными сероводородными илами — это минерализованные сульфидные грязи, пелоиды. Ниже по разрезу (51–72 см) залегают темно-серые озерные отложения. Интервал 72–104 см имеет четкие границы и визуально выделяется, он представлен серыми илами, которые, по-видимому, характеризуют смену условий озерного седиментогенеза, что отразилось в вещественном составе отложений. Глубже по разрезу (104–203 см) залегают донные отложения очень сходные с осадками из интервала 51–72 см. Далее (203–480 см) осадки представлены серо-голубоватыми плотными глинами, в которых выделяются хорошо заметные опесчаненные слойки (0.2–0.5 см) содержащие большое количество очень мелких кристаллов гипса и галита.

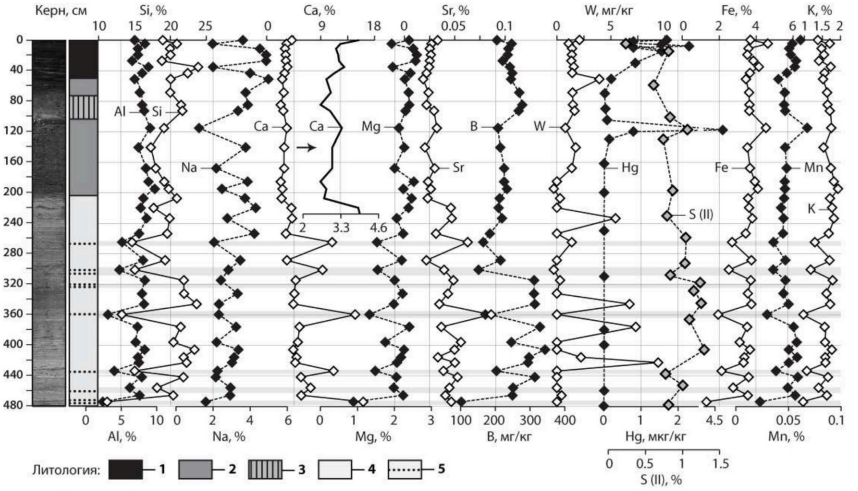


Рис. 1. Распределение химических элементов по разрезу донных отложений.
1 – черные, сильно обводнённые сероводородные илы (0–51 см), 2 – темно-серые сероводородные илы (51–72 и 104–203 см), 3 – серые илы (72–104 см), 4 – серо-голубые, плотные глины (104–480 см), 5 – скопления кристаллов соли.

Характер распределения химических элементов по глубине донных отложений, указывает на смену седиментологических условий осадконакопления в голоцене (рис. 1). Изменение содержаний (увеличение/уменьшение) элементов по разрезу имеет четко выраженные закономерности. Так для верхней пачки (1) характерны более высокие средние содержания Na, Mg и W. Для нижней (2) пачки отмечается увеличение средних содержаний Ca, Sr и наличие хорошо выраженных пиков Ca, W, которые соответствуют в осадке мелким слойкам гипса — они сопровождаются падением K, Al, Si, Fe, Mn. Для нижних интервалов осадка (305–480 см) характерно значительное увеличение содержаний B. Распределение ртути по глубине разреза происходит неравномерно, здесь можно выделить три пика: первый на глубине 8–11 см, (1.5–2.3 мг/кг), второй в интервале 26–28 см (0.9 мг/кг) и третий, самый мощный, на глубине 117–119 см (4.5 мг/кг). В интервале 120–300 см содержание ртути составляют 0.011–0.8 мг/кг, глубже (300–480 см) концентрации Hg падают ниже предела обнаружения. Пик Hg в интервале 117–119 см сопровождается увеличением Fe, Mn, восстановленных форм серы S (II) и присутствием фрамбоидального пирита. Возможно — это сульфидный геохимический

барьер, где происходит накопление Hg. Ртуть является основным элементом-загрязнителем экосистемы озера в зоне отвалов твердых ртутьсодержащих отходов комбината «Алтайхимпром» на восточном берегу водоема (Леонова и др., 2007).

Установлено, что присутствующие в отложениях терригенные минералы представлены кварцем, плагиоклазом, диоктаэдрической слюдой (мусковитом), 14Å-хлоритом и небольшим количеством смектита. Среди аутигенных минералов установлены галит, гипс, Mg-кальцит, эпизодически встречается арагонит и пирит. Ассоциация терригенных минералов неизменна на протяжении всего разреза, однако их количественные соотношения в образцах меняются в широких пределах. Распределение в отложениях типичных эвапоритовых минералов (галита, гипса) отличается существенной вариативностью: в ряде образцов присутствие солей не установлено, тогда как в других частях разреза встречаются прослои содержащие их большое количество.

Возраст донных отложений охарактеризован 3 радиоуглеродными датами и оценивается в 6.8 тыс. л. н. (табл.). Возрастная модель показывает наличие эффекта старого углерода — сильное удревнение первой даты за счет привноса более древнего органического вещества. Эта особенность типична для отложений озер аридной зоны. Поэтому первая дата (2766 кал. л. н.) была удалена из возрастной модели.

Таблица. Возраст донных отложений по данным AMS-датирования и изотопный состав углерода

Горизонт, см	Шифр ЦКП	Радиоуглеродный возраст, л. н.	Калиброванный возраст, л. н.	
			Интервал возможных возрастов (2-sigma)	Медианное значение наиболее вероятного возраста
54–56	688458	2660±30	2739–2794	2766
260–262	688459	2840±30	2865–3058	2945
478–480	688460	6000±30	6746–6937	6837

Наши датировки хорошо сопоставимы с датировками, полученными с помощью геомагнитного подхода (Rudaya et al., 2012), представленными на рисунке 2. В работе (Косарева и др., 2020) получены уже радиоуглеродные даты осадков оз. Большое Яровое: так, для глубин 1.55–1.63 м приводится возраст в 3.81 кал. тыс. л. н., для глубины 3.13–3.21 м возраст составляет 7.55 кал. тыс. л. н., для 4.15–4.19 м — 8.62 кал. тыс. л. н. При этом имеются инверсии дат в ~50 лет для глубин 3.13–3.21 и 3.81–3.85 м. Однако, приведенные датировки отличаются от полученных нами дат для сходных глубин, поэтому мы опирались на даты (Rudaya et al., 2012), отмеченные (*). На основании полученных датировок и минералого-геохимического состава донных отложений были выделены стадии эволюции оз. Большое Яровое в зависимости от изменений регионального климата Кулундинской равнины.

Стадия I (411–305 см, ~6.84–3.75* кал. тыс. л. н.) — этап активного осаждения гипса, который приходится на конец атлантика и условно вторую половину суббореала, характеризуется заметным ростом в осадке Ca и отношений B/Mg, Cr/Ni, Si/Al (рис. 2), что указывает на низкое стояние уровня озерных вод и аридные условия в это время. Так, согласно (Rudaya et al., 2012) в условиях относительно теплого и сухого климата открытые полупустынные и степи с березовыми лесами распространялись в Кулунде между 4.4 и 3.75 тыс. л. н., а появление хвойных лесов началось после 3.75 тыс. л. н. Стадия II (208–411 см, ~3.75*–2.84 (2.66*) кал. тыс. л. н.) — этап, соответствующий периоду повышения уровня водоема и интенсивного привноса терригенной компоненты с водосборов, который приходится на первую половину суббореала. Это выражается в изменении отношений B/Mg, Si/Al и Cr/Ni примерно 3.75 тыс. л. н. Стоит отметить, что стадии I и II имеют схожее распределение ряда геохимических палеомаркеров: они

характеризуются заметным снижением отношений Sr^{2+}/Ca^{2+} Mg^{2+}/Ca^{2+} в поровых водах и Mg/Ca, H/C в осадке на фоне линейного роста Ca.

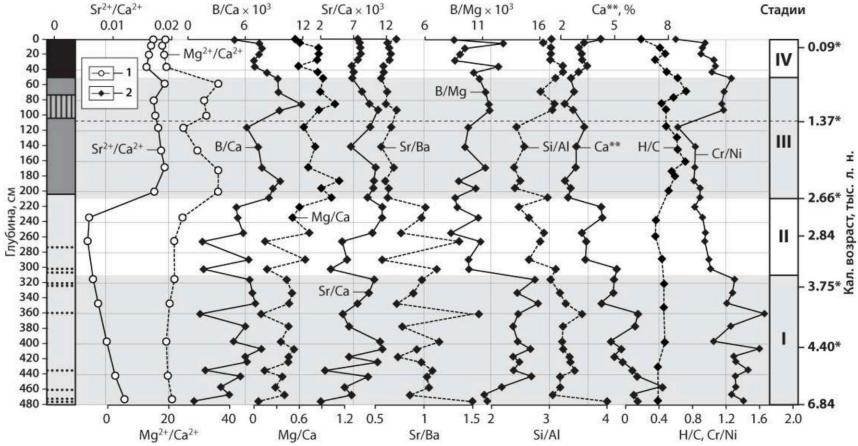


Рис. 2. Геохимические показатели седиментации оз. Большое Яровое в голоцене и стадии развития водоема (I–IV).

1 – поровые воды, 2 – осадок. * даты по (Rudaya et al., 2012), ** кальций дан без интервалов, содержащих гипс.

Стадия III (51–208 см, ~2.84 (2.66*)–1.10* кал. тыс. л. н.) приходиться на субатлантик и характеризуется резким изменением характера осадконакопления, что в первую очередь отразилось на химическом составе поровых вод: резкий рост Sr^{2+}/Ca^{2+} и Mg^{2+}/Ca^{2+}, а также в распределении H/C в осадке. Что, по-видимому, связанно с изменением биопродуктивности экосистемы водоема и солёности озерных вод. Здесь же отмечается снижение содержаний Ca и падение отношения B/Ca, что может свидетельствовать о тренде на похолодание климата. Выше глубины 105 см (показано пунктиром) происходит заметное увеличение отношений B/Ca, Si/Al, Cr/Ni, что говорит о снижении уровня озерных вод. Стадия IV (0–51 см, ~1.1*–0 кал. тыс. л. н.) — условно современный этап развития озера, для которого характерно формирование минерализованных сульфидных илов. Здесь отмечается заметное снижение Mg^{2+}/Ca^{2+} в поровых водах и некоторое снижение B/Ca и Cr/Ni в донных отложениях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-05-00403 А, № 19-29-05085 мк и № 21-55-53037 ГФЕН_а. Работа выполнена по государственному заданию Института геологии и минералогии СО РАН (проект № 122041400193-7). Анализы проведены в Центре коллективного пользования научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований Института геологии и минералогии СО РАН (ЦКП МИИ СО РАН).

Литература

Водоемы Алтайского края: биологическая продуктивность и перспективы использования / Под ред. В.П. Соловова. Новосибирск: Наука, 1999. 285 с.

Косарева Л.Р., Щербаков В.П., Нургалиев Д.К., Нургалиева Н.Г., Сычева Н.К., Антоненко В.В., Кузина Д.М., Евтюгин В.Г. Периодизация климатических циклов в голоцене по синхронным вариациям магнитных и геохимических параметров осадков озера Большое Яровое (юго-запад Сибири) // Геология и геофизика. 2020. Т. 61, №7. С. 889–907.

Леонова Г.А., Богуш А.А., Бычинский В.А., Бобров В.А. Оценка биодоступности и потенциальной опасности химических форм тяжелых металлов в экосистеме озера Большое Яровое (Алтайский край) // Экологическая химия. 2007. Т.16. (1). С. 18–28.

Сидоренко М.Н. География Алтайского края. Барнаул: Алт. кн. изд., 1972. 96 с.

Krivonogov S.K., Takahara H., Yamamuro M., Preis Yu.I., Khazina I.V., Khazin L.B., Safonova I.Yu., Ignatova N.V. Regional to local environmental changes in southern Western Siberia: evidence from biotic records of mid to late Holocene sediments of Lake Beloye // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2012. V. 331–332. P. 177–193.

Rudaya N., Krivonogov S, Słowi M., Cao X., Zhilich S. Postglacial history of the Steppe Altai: Climate, fire and plant diversity // Quaternary Science Reviews. 2020. 249.

GEOCHEMICAL INDICATORS OF SEDIMENTOGENESIS CONDITIONS OF THE HYPERHALINE LAKE BOLSHOYE YAROVOYE AS A REFLECTION OF HOLOCENE CLIMATIC FLUCTUATIONS IN THE STEPPE ZONE OF THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA (KULUNDA PLAIN)

A.E. Maltsev, G.A. Leonova, L.V. Miroshnichenko, S.K. Krivonogov

The conducted geochemical studies of the bottom sediments of Lake Bolshoe Yarovoye made it possible to distinguish 4 stages of the lake evolution, caused by variations in the regional climate. I (6.84–3.75 cal ka BP) — the stage of active gypsum sedimentation, relatively warm and dry climate; II (3.75–2.66 cal ka BP) — an increase in the water level of the reservoir and an intensive input of the terrigenous component from the catchment areas; III (2.66–1.10 cal ka BP) — characterized by a sharp change in the nature of sedimentation, bioproductivity of the reservoir ecosystem and salinity of lake waters; IV (1.1–0 cal ka BP) — a conditionally modern stage of the lake development, which is characterized by the formation of mineralized sulfide silts. Significant changes in the natural and climatic conditions on the territory of the Kulunda Plain have been established over the past ~6.9 thousand years, which were determined by the aridization/humidization cycles of the regional climate in the Holocene.

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВНЕШНЕЙ БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА КУЙБЫШЕВСКОЕ И НИЖНЕКАМСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩА В ГРАНИЦАХ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

Е.А. Минакова[1], А.П. Шлычков[1], С.А. Кондратьев[2], В.З. Латыпова[1]
[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет
[2] Институт озероведения РАН - Санкт-Петербургский ФИЦ РАН

В работе приведены результаты оценки основных факторов внешней биогенной нагрузки на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах Республики Татарстан (РТ) за период 2001–2019 гг. с использованием методов математического моделирования на базе усовершенствованной модели *ILLM*. Для информационного обеспечения модели создана база данных «Внешняя биогенная нагрузка на поверхностные воды Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах

Республики Татарстан». Выполнена количественная оценка и рассчитана доля вклада организованных и диффузных источников в формирование внешней биогенной нагрузки на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах РТ.

Изучение процессов формирования биогенной нагрузки на водные объекты для разработки способов ее снижения – актуальная проблема геоэкологии как с научной, так и практической точек зрения. Химический состав вод определяется совокупностью физических, химических и биологических процессов, происходящих на водосборе и в самом водоеме. В естественных условиях биогенные элементы поступают в водоемы в результате природных процессов, благодаря чему поддерживается равновесие между поступлением химических элементов в воду и выведением их из нее. В настоящее время на водоемы и водотоки, помимо природных, воздействуют антропогенные факторы, ускоряющие процессы протекания эвтрофирования. Антропогенное воздействие приводит к нарушению гомеостаза водных экосистем и биохимических циклов, особенно в замкнутых и полузамкнутых водоемах и выражается в увеличении потоков вещества и возрастанием биохимической активности, а также нарушением циклов биогенных элементов.

Детальное изучение причинно-следственных связей и количественная оценка основных составляющих внешней биогенной нагрузки водной геосистемы «водосбор–водный объект» (поступление, удержание и вынос биогенных элементов с водосбора) необходимы для разработки водоохранных мероприятий по регулированию биогенной нагрузки на водосборе (Минакова и др., 2020, 2022, Минакова, 2023).

Для расчета внешней биогенной нагрузки на водные объекты в работе использована усовершенствованная модель выноса растворенных примесей с водосбора и формирования внешней нагрузки на водный объект *Institute of Limnology Load Model* (*ILLM*) (Свидетельство о регистрации…, 2014). Основу модели составляет системный анализ, как один из наиболее перспективных методов оценки внешней биогенной нагрузки бассейнов речных геосистем, основанный на синтезе геоситуационной концепции и ландшафтно-экологического подхода (Исаченко, 1980), базирующийся на математическом моделировании природных процессов, принципах геоэкологической оценки качества окружающей среды и рационального природопользования природно-антропогенных объектов. Используемая в настоящей работе модель *ILLM* является промежуточным вариантом между эмпирическими моделями с сосредоточенными параметрами и физико-математическими моделями с распределенными параметрами (Кондратьев и др., 2007, 2019, 2020).

Для информационного обеспечения исследования разработана и создана база данных «Внешняя биогенная нагрузка на поверхностные воды Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах Республики Татарстан», содержащая информацию о природных и антропогенных факторах, обусловливающих формирование внешней биогенной нагрузки (природно-климатические условия, гидрологический и гидрохимический режим, источники точечной и диффузной биогенной нагрузки), а также материалы проведенной количественной оценки с использованием усовершенствованной модели *ILLM* основных составляющих внешней биогенной нагрузки на поверхностные воды Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ за период 2001–2019 гг. (Свидетельство …, 2024).

С использованием усовершенствованной модели *ILLM* за период 2001–2019 гг. рассчитана доля вклада в совокупную диффузную биогенную нагрузку на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах РТ со стороны следующих факторов:

– аэротехногенные выпадения, тыс. т/год;

– побочные продукты животноводства, тыс. т/год;
– поступление с сельскохозяйственных угодий, тыс. т/год;
– сток с естественной подстилающей поверхности, тыс. т/год;
– сток с урбанизированных территорий, тыс. т/год;
– нагрузка от населения, проживающего в неканализованных районах, тыс. т/год.

Расчеты проводились для соединений азота в пересчете на общий азот (*N*) и соединений фосфора в пересчете на общий фосфор (*P*). Результаты оценки приведены на рисунке.

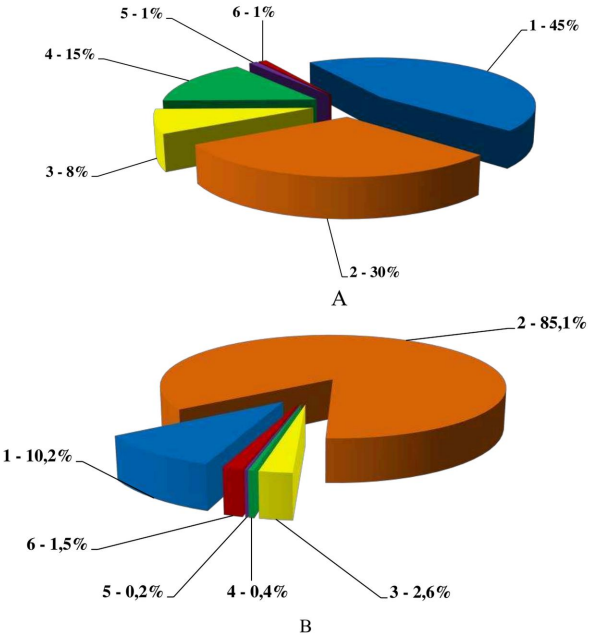


Рис. Доля вклада исследуемых факторов в совокупную диффузную нагрузку *N* и *P* на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах РТ, %

1 – аэротехногенные выпадения; 2 – побочные продукты животноводства; 3 – поступление с сельскохозяйственных угодий; 4 – сток с естественной подстилающей поверхности; 5 – сток с урбанизированных территорий; 6 – нагрузка от населения, проживающего в неканализованных районах

Анализ данных, приведенных на рисунке 1, показывает, что формирование совокупной диффузной биогенной нагрузки *N* на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах РТ в основном определяется аэротехногенными выпадениями (45%) и влиянием побочных продуктов животноводства (30%). Существенный вклад в поступление *N* вносит сток с естественной подстилающей поверхности (15%), а также внесение минеральных и органических удобрений (8%). Поступление *N* со стоком с урбанизированных и неканализованных территорий поселений является незначительным и составляет в совокупности около 2%.

Как показывает анализ рисунка 2, формирование совокупной диффузной биогенной нагрузки *P* на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах РТ

определяется воздействием побочных продуктов животноводства (85,1%) и аэротехногенными выпадениями (10,2%). Вклад от внесения минеральных и органических удобрений составляет 2,6%, вклад нагрузки от населения, проживающего на неканализованных территориях поселений, составляет 1,5%, вклад от естественной подстилающей поверхности и стоков с урбанизированных территорий является незначительным (0,4% и 0,2%, соответственно).

В настоящей работе впервые с использованием усовершенствованной модели *ILLM* для водосборов Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ получены новые данные об основных составляющих внешней биогенной нагрузки в современных условиях.

Выявлена доля вклада исследуемых факторов в совокупную диффузную биогенную нагрузку на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ.

Установлено, что формирование диффузной биогенной нагрузки *N* определяется массообменом с атмосферой (45%) и побочными продуктами животноводства (30%). Существенный вклад в поступление *N* вносит сток с естественной подстилающей поверхности (15%), а также внесение минеральных и органических удобрений (8%). Поступление *N* со стоком с урбанизированных и неканализованных территорий является незначительным и составляет в совокупности около 2%.

Показано, что основным фактором, оказывающим влияние на формирование диффузной биогенной нагрузки *P* являются побочные продукты животноводства 85,1% и массообмен с атмосферой 10,2%. Вклад от внесения минеральных и органических удобрений составляет 2,6%, вклад нагрузки от населения, проживающего в неканализованных районах, составляет 1,5%, вклад от естественной подстилающей поверхности и стоков с урбанизированных территорий является незначительным и составляет 0,4 % и 0,2%, соответственно.

Литература

Исаченко А.Г. Методы прикладных ландшафтных исследований. М.: Наука, 1980. 263 с.

Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 253 с.

Кондратьев С.А. Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор-водоток-водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 248 с.

Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Родионов В.З. Опыт моделирования процессов массопереноса в системе «водосбор-водоток-водоем» // Общество. Среда. Развитие. 2020. №3. С. 95-105.

Минакова Е.А. Концептуальные основы оптимизации биогенной нагрузки на водосборе // Проблемы региональной экологии. 2023. №1. С. 52–56.

Минакова Е.А., Шлычков А.П., Биктемирова Э.И., Кондратьев С.А. Внешняя биогенная нагрузка организованных источников на водотоки в пределах Республики Татарстан в современный период // Проблемы региональной экологии. 2020. №1. С. 74-78.

Минакова Е.А., Шлычков А.П., Кондратьев С.А. Миграционные потоки биогенных элементов в геосистеме «водосбор-водный объект» в современных условиях // Экология урбанизированных территорий. 2022. №2. С. 13–21.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614210 Российская Федерация. Расчет формирования стока на водосборе на основе модели ILHM. № 2014664208 / С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова.

Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024623845 «Внешняя биогенная нагрузка на поверхностные воды Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах Республики Татарстан» / Е. А. Минакова.

MAIN FACTORS FOR FORMING EXTERNAL NUTRIENT LOAD ON THE KUIBYSHEV AND NIZHNEKAMSK RESERVOIRS WITHIN THE BOUNDARIES OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN

E.A. Minakova, A.P. Shlychkov, S.A. Kondratyev, V.Z. Latypova

Based on the results of the work, estimates of the main factors of external nutrient load on the Kuibyshev and Nizhnekamsk reservoirs on the borders of the Republic of Tatarstan for the period 2001–2019 yrs are presented. Calculations were carried out using mathematical modeling methods based on the improved *ILLM* model. To provide information support for the model, a database "External nutrient load on surface waters of the Kuibyshev and Nizhnekamsk reservoirs within the borders of the Republic of Tatarstan" was created. Using mathematical modeling methods, a quantitative assessment of the main components of the external nutrient load was carried out. The contribution of factors to the total diffuse nutrient load on the Kuibyshev and Nizhnekamsk reservoirs within the borders of the Republic of Tatarstan was calculated.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДЫ ПОСОЛЬСКОГО СОРА ОЗ. БАЙКАЛ

С.Ю. Неронова
Байкальский филиал ВНИИ рыбного хозяйства и океанографии
Иркутский государственный университет

Впервые представлены данные об оценке качества воды по зоопланктону Посольского сора (оз. Байкал), полученные биоиндикаторным методом. Сапробный индекс организмов зоопланктона в заливе варьировал от ксеносапробного до бета-альфа-мезосапробного. Оценка уровня загрязнения воды по гидробиологическим показателям показала, что пелагическая зона водоёма незначительно отличается от мелководных прибрежных участков. Показатели индекса сапробности в течение периода открытой воды в 2024 г. характерны для I класса вод (условно чистые).

Мелководные байкальские заливы и соры – это уникальные экосистемы с особыми условиями обитания фауны, отличными от самого озера. Небольшие глубины Посольского сора способствуют хорошему прогреванию водоема, что создаёт благоприятную среду для развития планктонных организмов: увеличивается видовое разнообразие, возрастают количественные показатели, меняется соотношение таксономических групп. Это в свою очередь отражается на следующем звене экосистемы – личинках и молоди рыб (в т.ч. байкальского омуля), для которых организмы зоопланктона являются основой пищевого рациона.

Особенности структуры и функционирования зоопланктона мелководий оз. Байкал изучались на протяжении многих лет. Мы располагаем данными о планктонном сообществе Посольского сора, полученными гидробиологами (Вилисова, 1954; Шнягина, 1963; Левковская, 1977; Кардашевская, 1981; Павлицкая, 2000). Однако оценка качества воды по гидробиологическим показателям была дана только для пролива Малое Море и залива Лиственничный озера Байкал (Bondarenko et al., 2024; Kravtsova et al.,

2021). Для Посольского сора подобная информация приведена впервые. Цель работы – провести оценку качества воды по показателям зоопланктона Посольского сора методом биоиндикации; определить экологическое состояние водоёма.

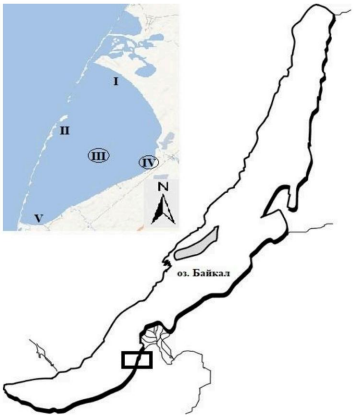


Рис. 1. Карта Посольского сора

Посольский сор – это лагуна затопления, отделённая от основной части озера косами – Северной и Южной (рис. 1). Связь с Байкалом осуществляется через пролив (прорву) шириной более 200 м. Сор расположен в юго-восточной части озера, в 20 км к югу от дельты р. Селенга. Общая площадь Посольского сора около 35 км^2, максимальная длина 12,6 км, ширина 4,6 км (Кожов, 1962).

Юго-восточный берег сора является зоной повышенного антропогенного давления. Здесь расположены турбазы и площадки для отдыха местного населения.

Исследования велись в период открытой воды с мая по октябрь 2024 г. на 5 станциях (рис. 1). В мае и июне отбор проб зоопланктона проводили дважды в месяц, т.к. в этот период в соре происходит нагул личинок байкальского омуля, выпускаемых с Большереченского рыбоводного завода. В качестве контрольных были выбраны две станции: станция III в пелагической зоне и станция IV в прибрежной зоне, подверженной антропогенному влиянию (табл.).

Таблица. Характеристика станций отбора проб зоопланктона в Посольском соре

Станция	Координаты станций		Температура воды, °C (min – max)	Глубина, м	Грунт
	с. ш.	в. д.			
I	51°58’37.90”	106°10’62.59”	4,0 – 11,0	1,2	песок
II	51°57’13.89”	106°10’88.14”	4,0 – 22,9	3,0	ил
III	51°56’59.42”	106°09’51.44”	4,2 – 23,2	3,5	ил
IV	51°55’90.84”	106°11’25.61”	3,0 – 25,6	1,0	песок, растительность
V	51°54’30.25”	106°06’88.26”	4,0 – 23,6	2,0	заиленный песок, растительность

Сбор проб зоопланктона на станциях с глубинами 1,0-1,2 м осуществлялся путем процеживания 100 л воды через сеть Апштейна, на глубинах свыше 1,2 м – планктонной сетью Джеди от дна до поверхности (диаметр входного отверстия – 25 см, размер ячеи – 70 мкм). При отборе материала измеряли поверхностную температуру воды, прозрачность. Обработка планктонных проб осуществлялась по стандартной гидробиологической методике (Руководство …, 1984; Кожова, Мельник, 1978). При статистической обработке данных использовали стандартные компьютерные программы.

Оценка качества воды исследуемого водоёма проводилась с помощью методов биологического анализа вод с использованием сапробного индекса (S), основанного на присутствии видов-индикаторов загрязнения. Для данной работы сапробные индексы для широко распространенных видов были взяты из существующей литературы (Унифицированные …, 1977; Sládeček, 1983), а сапробные индексы для байкальских ракообразных и представителей Rotifera были приняты равными 0,4, что классифицирует их как ксеносапробные виды.

Оценка сапробности проводилась с использованием модифицированного метода Пантле-Букка (Sládeček, 1973):

$S = \frac{\sum h \times s}{\sum h}$, где

h – количество особей зоопланктонных организмов (тыс. экз./м³); s – сапробное значение, присвоенное каждому виду.

Оценка качества воды проводилась в соответствии с принятым Руководящим Документом 52.24.309-2016, что обеспечило стандартизированный подход к анализу. Данный метод предоставляет информацию об экологическом состоянии водоема, позволяя выявлять потенциальные уровни загрязнения и общее состояние водной экосистемы.

В момент исследования планктонное сообщество Посольского сора содержало 54 вида-индикатора органического загрязнения воды. Наибольшее количество видов отмечено у Rotifera (25 видов), 14 и 15 видов соответственно определено у Cladocera и Copepoda. Сапробный индекс организмов зоопланктона варьировал в диапазоне от ксеносапробного до бета-альфа-мезосапробного. Все ксеносапробионты, отмеченные в пробах, - эндемики Байкала (*Notholca intermedia*, *Chydorus baicalensis*, *Epischura baikalensis*, *Harpacticella inopinata*). 32 % от общего количества отмеченных в соре видов, составляли олигосапробионты. Среди бета-альфа-мезосапробионтов определён всего один вид *Brachionus angularis*. Он обнаружен на глубинной станции III.

В пелагической зоне сора (станция III) было отмечено 29 видов зоопланктонных животных: 15 видов Rotifera, 5 – Cladocera, 9 – Copepoda. Сапробный индекс варьировал от ксеносапробного до бета-альфа-мезосапробного. Доминирующее положение занимали олигосапробионты (35 %) и олиго-бета-мезосапробные организмы (28 %).

Показатели сапробности глубинного участка на протяжении всего периода исследований колебались в пределах 1,3–1,48. Это характеризует воду открытой части сора как условно чистую (олигосапробную).

Прибрежная зона сора (станция IV) в видовом отношении незначительно отличалась от глубинного участка. Так, здесь было определено 13 видов коловраток, 5 видов ветвистоусых и 12 видов веслоногих ракообразных. Всего 30 видов. Сапробный индекс варьировал от ксеносапробного до бета-олиго-мезосапробного. Как и в пелагической зоне, здесь преобладали виды олигосапробионты (33 %). Субдоминирующее положение занимали бета-мезосапробионты (27%).

Показатели индекса сапробности мелководной зоны варьировали от 1,29 до 1,53. Это соответствует I-II классам качества воды – условно чистая–слабо загрязнённая. Максимальное значение индекса на данной станции было получено в первой декаде июня и связано с массовым развитием ß-о-мезосапробионта *Keratella cochlearis*. В остальные даты отбора проб в мелководной зоне вода соответствовала олигосапробной.

Оценка уровня загрязнения воды по показателям фауны планктона указывает, что открытая (глубоководная) часть сора незначительно отличается от мелководных участков (рис. 2). Колебания значений индекса сапробности на исследуемых станциях находятся в пределах 1,29-1,53. Эти изменения несущественны в разные сезоны года и не выходят за границы I класса качества воды. Исключение составляет июньский показатель, полученный в литоральной зоне. Класс качества воды здесь соответствовал II классу (слабо загрязнённая вода). В целом величины сапробности в прибрежном участке были выше, чем в открытой части водоёма.

Использование метода биоиндикации показывает, что степень загрязнения глубинных и мелководных участков Посольского сора незначительная. Класс качества воды на исследуемых станциях соответствует I классу. В соре доминируют олигосапробионты, что указывает на благоприятные экологические условия в водоёме.

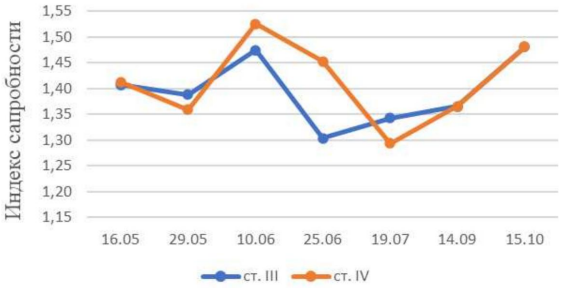


Рис. 2. Индекс сапробности организмов зоопланктона

Литература

Вилисова И.К. Сравнительный обзор зоопланктона Посольского сора и прибрежных районов открытого Байкала // Труды Байк. лимнол. ст. АН СССР. 1954. Т. XIV. С. 190–262.

Кардашевская Г.П., Николаева Е.П., Топорков И.Г. Зоопланктон Посольского Сора озера Байкал (1972-1975 гг.) // Гидробиологические исследования в Восточной Сибири. Иркутск, 1981. С. 93–105.

Кожов М.М. Биология озера Байкал. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 314 с.

Кожова О.М., Мельник Н.Г. Инструкция по обработке проб планктона счётным методом. Иркутск, 1978. 52 с.

Левковская Л.А. Зоопланктон заливов и озер прибрежной зоны // Лимнология прибрежно-соровой зоны Байкала. Новосибирск: Наука, 1977. С. 175–191.

Павлицкая В.П., Бобков А.И. Особенности функционирования раннелетнего зоопланктона Посольского сора оз. Байкал в современный период // Проблемы гидроэкологии на рубеже веков / Материалы международной конф. СПб, 2000. С. 6–8.

Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 24 с.

Унифицированные методы исследования качества вод: Ч. III. Методы биологического анализа вод. Приложение 1. Индикаторы сапробности. 1977. С. 11-42.

Унифицированные методы исследования качества вод: Ч. III. Методы биологического анализа вод. Приложение 2. Атлас сапробных организмов. 1977. 228 с.

Шнягина Г.И. Изменения зоопланктона Посольского сора и прилегающих мелководных участков Байкала в мае-августе 1960 и 1961 гг. // Труды Всесоюз. гидробиол. общества. 1963. Т. XIII. С. 56–62.

Bondarenko N. A., Pen'kova O.G., Zaitseva Y.P., Sheveleva N.G. Trophic state and water quality of the Maloe More Strait, Lake Baikal. Acta Biologica // Sibirica. 2024. 10. P. 489–505.

Kravtsova L., Vorobyeva S., Naumova E., Izhboldina L., Mincheva El., Potemkina T., Pomazkina G., Rodionova E., Onishchuk N., Saki M., Nebesnykh I., Khanaev I. Response of Aquatic Organisms Communities to Global Climate Changes and Anthropogenic Impact: Evidence from Listvennichny Bay of Lake Baikal // Biology. 2021. V. 10, №9. P. 904.

Sládeček V. System of water quality from the biological point of view // Archivfür Hydrobiologie und Ergebnisse Limnologie. 1973. 7 (1). P. 1–218.

Sládeček V. Rotifers as indicators of water quality // Hydrobiologia. 1983. V. 100. P. 169–200.

ASSESSMENT OF WATER QUALITY OF POSOLSKY BAY, LAKE BAIKAL

S.Y. Neronova

Data are presented on the assessment of water quality based on zooplankton from Posolsky bay (Lake Baikal) for the first time. The saprobic index of zooplankton organisms in the bay varied from xenosaprobic to beta-alpha-mesosaprobic. The assessment of water pollution levels based on hydrobiological indicators showed that the pelagic area of the bay is not significantly different from the shallow coastal areas. The saprobity index values in 2024 are characteristic of Class I waters (conditionally clean).

ОЦЕНКА ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ОТ КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ G-RES

О.В. Никитин[1], Н.Ю. Степанова[2], Р.С. Кузьмин[1], В.З. Латыпова[2,3]
[1]ООО «Экоаудит»
[2]Казанский (Приволжский) федеральный университет,
[3]Институт проблем экологии и недропользования АН РТ

В работе представлена оценка эмиссии парниковых газов (CO_2, CH_4) от Куйбышевского водохранилища с использованием модели G-res. Суммарная эмиссия составила 566 г CO_2-экв. $м^{-2}·год^{-1}$, из которых 86 % приходится на углекислый газ и 14 % – на CH_4. Основные пути эмиссии метана включают диффузию (77 %), пузырьковую эмиссию (18 %) и дегазацию при сбросе воды (6 %). Полученные результаты согласуются с литературными данными и демонстрируют возможность использования моделирования эмиссии при проведении инвентаризации парниковых газов от водохранилищ.

Водохранилища занимают важное место в структуре современных ландшафтов и выполняют широкий спектр хозяйственных функций, таких как выработка гидроэнергии, управление водными ресурсами, контроль наводнений, обеспечение водоснабжения, рекреация и судоходство. Кроме того, они играют ключевую роль в поддержании экосистемных функций, включая регулирование гидрологических процессов, обеспечение биоразнообразия и участие в круговороте веществ. В контексте углеродного цикла водохранилища выступают как аккумуляторы и источники углерода, оказывая значительное влияние на локальные и глобальные биогеохимические процессы. Они участвуют в переработке аллохтонного органического вещества (ОВ), поступающего с водосборного бассейна, и автохтонного ОВ, образующегося в результате жизнедеятельности гидробионтов и деструкции детрита. В процессе физико-химической и биологической трансформации органического вещества образуются диоксид углерода (CO_2) и метан (CH_4), что вносит существенный вклад в глобальный бюджет парниковых газов (Deemer et al., 2016; Beaulieu et al., 2020; Johnson et al., 2021).

Недавние исследования показывают, что метан, образующийся в пресноводных экосистемах, может превосходить по объему прямые антропогенные выбросы, включая выбросы от сельского хозяйства и использования ископаемого топлива. В совокупности водные экосистемы, включая водно-болотные угодья, могут обеспечивать до половины глобального бюджета выбросов CH_4 (Rosentreter et al., 2021). Это подчеркивает необходимость разработки методов оценки эмиссии парниковых газов (ПГ) с поверхности водохранилищ, что является важным элементом для понимания их вклада в глобальный углеродный цикл и разработки мер по смягчению последствий климатических изменений (Nikitin et al., 2024). В данной работе представлена оценка

эмиссии парниковых газов (CH_4, CO_2) от Куйбышевского водохранилища с использованием модели G-res.

Куйбышевское водохранилище (КВ) расположено в Среднем Поволжье и Нижнем Прикамье Европейской части России. Оно было создано в 1955–1957 гг. при строительстве плотины Жигулёвской гидроэлектростанции на р. Волге вблизи г. Тольятти в Самарской области. КВ – крупнейшее водохранилище Волжско-Камского каскада и одно из самых больших водохранилищ мира, оно занимает площадь 5900 км^2 и имеет общую ёмкость 57,3 км^3. Водохранилище характеризуется выраженным сезонным типом регулирования расходов воды, долгосрочное регулирование не проводится (Никитин и др., 2024).

Модель G-res представляет собой инструмент для оценки чистых выбросов парниковых газов из водохранилищ. Она основана на статистических соотношениях, полученных из опубликованных исследований потоков ПГ, и учитывает такие переменные, как широта, срок эксплуатации водохранилища, содержание углерода в затопленных почвах и другие факторы (Prairie et al., 2021). Модель охватывает основные пути эмиссии парниковых газов из водоемов: диффузный путь для CO_2 и CH_4, пузырьковый путь, а также дегазацию метана при сбросе воды через плотину водохранилища. Это делает её универсальной и пригодной для разнообразных гидрологических и экологических условий. Кроме того, G-res позволяет проводить оценку эмиссий для всего водохранилища в целом, что особенно полезно для масштабных экологических исследований. Важной характеристикой модели G-res является её способность работать с минимальным объёмом исходных данных, что делает её особенно полезной для регионов с ограниченной доступностью информации и в условиях недостаточной изученности территории.

Разработка G-res велась под эгидой ЮНЕСКО и Международной ассоциации гидроэнергетики ведущими специалистами в этой области. Модель соответствует принципам методологии МГЭИК и рекомендована для инвентаризации выбросов парниковых газов (IPCC, 2019), что подтверждает её научную ценность и применимость для глобальных оценок. Модель получила признание в мировой практике (Prairie et al., 2017, 2021; Hansen et al., 2022), что делает её подходящей для долгосрочных экологических и климатических исследований.

Методология разработки модели G-res и её применения для оценки выбросов парниковых газов с поверхности водохранилищ подробно представлена в работах Prairie и соавторов (2017; 2021). Здесь остановимся на параметрах модели, описывающих зависимости потоков парниковых газов от экологических факторов. В модели G-res каждый путь поступления парниковых газов (диффузия CO_2, CH_4, пузырьковый путь эмиссии и дегазирование) был смоделирован как многовариантная зависимость между годовыми эмиссионными показателями на единицу площади и потенциальными переменными-предикторами, с учетом соответствующих преобразований. Потоки эмиссии представлены в единицах эквивалента CO_2, при этом предполагается, что потенциал глобального потепления CH_4 в 34 раза выше, чем у CO_2, в расчете на 100 лет. Наиболее важные входные параметры модели G-res, характер их влияния и относительная значимость для каждого пути поступления в атмосферу суммированы для каждой подмодели в таблице 1.

Эмиссия CO_2 в модели G-res в основном определяется содержанием фосфора в воде и углерода в донных отложениях, а эмиссия метана зависит от площади литоральной зоны и количества поступающей солнечной радиации. Температура является важным фактором для обоих парниковых газов. Ряд переменных, используемых в модели, являются независимыми, поскольку они определяются климатическими особенностями региона или историческими факторами (например, исходной структурой

ландшафтов и почв до затопления). Другие переменные зависят от режима эксплуатации водохранилища. К числу последних относится, в первую очередь, доля литоральной зоны от общей площади водохранилища, которая существенно зависит от установленного уровня воды.

Таблица 1. Влияние входных параметров на основные пути эмиссии парниковых газов в соответствии с моделью G-res

Параметры модели	CO_2 diffusion	CH_4 diffusion	CH_4 ebullition	CH_4 degassing
Срок эксплуатации водохранилища	–	–		
Температура	+	+		
Содержание углерода в верхнем слое почвы	+			
Содержание общего фосфора	+			
Площадь водохранилища	+			
Доля литоральной зоны		+	+	
Суммарная радиация*			+	
Сброс гиполимниона				x
Время водообмена				+
Диффузионная эмиссия CH_4				+

* Суммарная радиация оценивается как средняя глобальная горизонтальная радиация за период без ледяного покрова, умноженная на количество месяцев без ледяного покрова. Путь эмиссии газа: diffusion – диффузный поток, ebullition – пузырьковый поток, degassing – дегазация при сбросе воды через плотину водохранилища. Знаки минус (−) или плюс (+) указывают на отрицательную или положительную связь между путём эмиссии и параметром соответственно. «x» – обозначает бинарное решение о включении данного пути поступления в общий расчёт.

Для получения входных переменных математической модели использовалась фондовая информация, данные литературы, полевых наблюдений и дистанционного зондирования, а также глобальные ГИС-данные, содержащие климатическую, географическую и экологическую информацию. Эти данные отражают особенности рельефа, почвенных условий, климата и других факторов для территории расположения Куйбышевского водохранилища. ГИС-данные были получены с использованием облачной платформы геопространственного анализа Google Earth Engine. Для взаимодействия с облачной платформой, извлечения исходных геопространственных растровых данных, а также определения статистических характеристик изучаемых переменных использовались специализированные прикладные программы сопровождения комплексного геоэкологического мониторинга: CLIMATERA, CLIMATERA: WIND, COSMOCOMPOSIT: TERRAIN, COSMOCOMPOSIT: LOAD, MONITOR-W: HAB, THERMOCARTA, GEOSPHERA-INTEGRA.

Оцененная в соответствии с моделью G-res эмиссия парниковых газов (CO_2-экв.) от Куйбышевского водохранилища представлена в таблице 2. Суммарная эмиссия парниковых газов с поверхности водохранилища составляет 566 г CO_2-экв. $м^{-2}·год^{-1}$. Основную долю выбросов (86 %) формирует углекислый газ – 489 г CO_2-экв. $м^{-2}·год^{-1}$ (1339 мг CO_2 $м^{-2}·сут^{-1}$), тогда как на долю метана приходится 77,2 г CO_2-экв. $м^{-2}·год^{-1}$. Углекислый газ часто является доминирующим компонентом эмиссии для водохранилищ (Bevelhimer et al., 2016), что особенно заметно при использовании исходных данных (2,3 г CH_4 $м^{-2}·год^{-1}$, или 6,2 мг CH_4 $м^{-2}·сут^{-1}$), не учитывающих потенциал глобального поступления метана. Согласно расчётной модели, основная часть метана поступает через диффузию (77%), тогда как 18 % связано с пузырьковой

эмиссией, а оставшаяся доля приходится на дегазацию при сбросе воды из водохранилища. Несмотря на относительно небольшую долю (6%) в общем объёме выбросов, этот путь эмиссии имеет важное значение, поскольку он часто недооценивается и редко учитывается в существующих моделях оценки выбросов парниковых газов (Zhou et al., 2024). Преобладание диффузного пути эмиссии метана над другими механизмами также отмечается в литературе для других водохранилищ (Descloux et al., 2017).

Таблица 2. Оценка эмиссии парниковых газов от Куйбышевского водохранилища (интегральная за срок эксплуатации водохранилища) по модели G-res

Параметр эмиссии	Значение	Доля
Эмиссия на единицу поверхности водохранилища, г CO_2-экв. $м^{-2}·год^{-1}$	566	100 %
в том числе:		
Эмиссия CO_2	489	86 %
Эмиссия CH_4	77,2	14 %
в том числе:		
за счёт диффузии/пузырьков/дегазации	59,2/13,6/4,6	77/18/6 %
Эмиссия на единицу поверхности водохранилища, г ПГ $м^{-2}·год^{-1}$		
Эмиссия CO_2	489	99,5 %
Эмиссия CH_4	2,3	0,5 %
в том числе:		
за счёт диффузии/пузырьков/дегазации	1,7/0,4/0,1	77/18/6 %

Результаты проведённых расчётов показывают, что Куйбышевское водохранилище является источником парниковых газов, включая метан и углекислый газ. Полученные данные хорошо соотносятся с диапазонами значений, представленными в литературе для эвтрофных водохранилищ, в соответствии с которыми эмиссия углекислого газа составляет в среднем 1409 мг CO_2 $м^{-2}·сут^{-1}$ (Deemer et al., 2020), а также в целом согласуются с результатами натурных измерений на водохранилищах Волжско-Камского каскада. Например, в работе (Гречушникова и др., 2023) приведены данные для Куйбышевского водохранилища, согласно которым удельный поток метана с основной акватории варьировал от 1,5 до 71,5 мг CH_4 $м^{-2}·сут^{-1}$.

Таким образом, результаты моделирования с использованием G-res подтвердили, что Куйбышевское водохранилище может являться значимым источником парниковых газов, а основные пути их поступления включают диффузию, пузырьковую эмиссию и дегазацию при сбросе воды. Полученные результаты согласуются с литературными данными и подчёркивают необходимость дальнейших исследований для уточнения влияния различных экологических факторов на эмиссию парниковых газов. Эти данные могут быть полезны для разработки стратегий по снижению выбросов ПГ и повышению эффективности управления водохранилищами.

Исследование выполнено за счёт средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2024-0004.

Литература

Гречушникова М.Г. Репина И.А., Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Ломов В.А., Соколов Д.И., Степаненко В.М., Ефимов В.А., Мольков А.А., Капустин И. А. Содержание и потоки метана в Волжских водохранилищах // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87, № 6. С. 899–913.

Никитин О.В., Степанова Н.Ю., Кондратьева Т. А., Кузьмин Р.С., Латыпова В.З. Пространственно-временная динамика «цветения» фитопланктона в Куйбышевском водохранилище по данным спутникового зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 6. С. 284–293.

Beaulieu J.J., Waldo S., Balz D.A., Barnett W., Hall A., Platz M.C., White K.M. Methane and carbon dioxide emissions from reservoirs: controls and upscaling // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2020. V. 125(12).. e2019JG005474.

Bevelhimer M.S., Stewart A.J., Fortner A.M., Phillips J.R., Mosher J.J. CO_2 is dominant greenhouse gas emitted from six hydropower reservoirs in southeastern United States during peak summer emissions // Water. 2016. V. 8(1). 15.

Deemer B.R., Harrison J.A., Li S., Beaulieu J.J., DelSontro T., Barros N., Bezerra-Neto J.F., Powers S.M., dos Santos M.A., Vonk J.A. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis // BioScience. 2016. V. 66(11). P. 949–964.

Deemer B.R., Harrison J.A., Li S., Beaulieu J.J., DelSontro T., Barros N., Bezerra-Neto J.F., Powers S.M., dos Santos M.A., Vonk J.A. Data from: Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis [Dataset]. Dryad, 2020.

Descloux S., Chanudet V., Serça D., Guérin F. Methane and nitrous oxide annual emissions from an old eutrophic temperate reservoir // Science of The Total Environment. 2017. V. 598. P. 959–972.

Hansen C., Pilla R., Matson P., Skinner B., Griffiths N., Jager H. Variability in modelled reservoir greenhouse gas emissions: comparison of select US hydropower reservoirs against global estimates // Environmental Research Communications. 2022. V. 4(12). 121008.

IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A., Baasansuren J., Fukuda M., Ngarize S., Osako A., Pyrozhenko Y., Shermanau P., Federici S. (eds). Switzerland: IPCC, 2019.

Johnson M.S., Matthews E., Bastviken D., Deemer B., Du J., Genovese V. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2021. V. 126(8). e2021JG006305

Nikitin O., Stepanova N., Gubeeva S., Kuzmin R., Latypova V. Assessment of methane levels throughout a temperate reservoir area using remote sensing data // E3S Web of Conferences. 2024. 555. 01009.

Prairie Y.T., Alm J., Beaulieu J., Barros,N., Battin T., Cole J., del Giorgio P., DelSontro T., Guérin F., Harby A., Harrison J., Mercier-Blais S., Serça D., Sobek S., Vachon D. Greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs: what does the atmosphere see? // Ecosystems. 2017. V. 21(5). P. 1058–1071.

Prairie Y.T., Mercier-Blais S., Harrison J.A., Soued C., Giorgio P. del, Harby A., Alm J., Chanudet V., Nahas R. A new modelling framework to assess biogenic GHG emissions from reservoirs: the G-res tool // Environmental Modelling & Software. 2021. V. 143. 105117.

Rosentreter J.A., Borges A.V., Deemer B.R., Holgerson M.A., Liu S., Song C., Melack J., Raymond P.A., Duarte C.M., Allen G.H., Olefeldt D., Poulter B., Battin T.I., Eyre B.D. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources // Nature Geoscience. 2021. V. 14(4). P. 225–230.

Zhou Y., Xu H., Xia T., Xiong L., Chang L.-C., Chang F.-J., Xu C.-Y. Methane degassing in global river reservoirs and its impacts on carbon budgets and sustainable water management // Science of The Total Environment. 2024. V. 957. 177623.

ASSESSMENT OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM THE KUIBYSHEV RESERVOIR USING THE G-RES MODEL

O.V. Nikitin, N.Yu. Stepanova, R.S. Kuzmin, V.Z. Latypova

This paper presents an assessment of greenhouse gas emissions (CO_2, CH_4) from the Kuibyshev Reservoir (Russia) using the G-res model. The total emissions were estimated at 566 g CO_2-eq $m^{-2} \cdot yr^{-1}$, with 86% attributed to carbon dioxide and 14% to methane. The main methane emission pathways include diffusion (77%), ebullition (18%), and degassing during water discharge (6%). The obtained results are consistent with literature data and highlight the potential of emission modeling for greenhouse gas inventory assessments in reservoirs.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАЛЕОРЕКОНСТРУКЦИЙ ВЫСОКОГО ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА ОСНОВАНИЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ОЗЕРНЫХ ОСАДКОВ

В.С. Новиков, А.В. Дарьин
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

Данная работа рассматривает изменения элементного состава в донных отложениях озер, вызванные климатическими факторами, и их потенциал как палеоархивов. Ключевое внимание уделяется глубоким пресноводным озерам с тонкослоистыми осадками, обеспечивающим высокую точность климатических реконструкций. Описаны методики пробоотбора, определения возраста осадков, а также аналитической микростратиграфии с использованием сканирующего микро-РФА. Результаты позволяют строить временные ряды геохимических данных, связывая их с современными климатическими условиями и оценивать среднегодовую температуру за длительные временные интервалы.

Изменения, происходящие в озерах на протяжении их жизненного цикла и отражаемые в донных отложениях, преимущественно обусловлены климатическими факторами (Wehrli et al., 1997). Озерные осадки содержат данные о прошлой температурной изменчивости, количестве и характере атмосферных осадков, естественных темпах изменений окружающей среды и влиянии человека. Осадки озер, особенно тонко ламинированные с годичной слоистостью, являются наиболее подходящими объектами для изучения изменений окружающей среды за последние тысячелетия. Кроме того, изучение таких тонкослоистых отложений позволяет точно привязывать интервалы осадков к временной шкале, что делает озерные осадки важнейшими палеоархивами (Brauer, 2004; Ojala, 2012; Melles et al., 2012; Zolitschka et al., 2015).

Динамика среднегодовых температур воздуха северного полушария за последние 2000 лет исследована достаточно хорошо и формируется на основе ряда локальных палеореконструкций (Esper et al., 2002; Mangini et al., 2005; Oppo et al., 2009), однако пространственные закономерности еще не полностью определены. Большинство исследований сосредоточены на климатических изменениях в голоцене в Европе, Северной Америке, Гренландии и Китае (Svendsen et al., 2004; Melles et al., 2022).

В России детальные реконструкции климатических изменений, в основном, проводились для северо-западных территорий (Хотинский, 1977; Величко и Фаустова, 1989; Суббето, 2009 и др.). В последние годы Восточная Сибирь и Дальний Восток, обладая высокой чувствительностью к глобальным изменениям климата, стали ключевыми регионами для изучения прошлой климатической и экологической

изменчивости (Nazarova et al., 2013; Biskaborn et al., 2016). В этом регионе имеется множество озер различного происхождения и морфометрии, которые хранят детальную информацию о климате, ландшафтах и гидрологии с момента их формирования. Удаленность озер от антропогенного воздействия делает их надежными архивами для экологических климатических реконструкций (Kumke et al., 2007; Pestryakova et al., 2012).

В данной работе представлена методика построения температурных реконструкций в пределах голоцена на основании изучения элементного состава озерных осадков.

При выборе объектов исследования особое внимание уделяется глубоким пресноводным озерам, которые обладают высокой скоростью непрерывного осадконакопления. Идеальными объектами являются водоемы с тонкослоистыми осадками (варвами). Кроме того, важным моментом является отсутствие антропогенного воздействия. Наличие региональных метеостанций с длительными рядами инструментальных метеонаблюдений существенно расширяет возможности для корреляции палеоклиматических данных с современными климатическими условиями.

Отбор кернов донных осадков, представленные в данной работе происходил с плавучей платформы с использованием гравитационного пробоотборника UWITEC (http://www.uwitec.at) с прозрачными трубами пробоотборниками диаметром 60 или 90 мм. Преимущество данного пробоотборника заключается в высокой степени сохранности слоев, простоте использования, мобильности и низкой стоимости.

Керны разделялись вдоль оси отбора на две половины. Из одной половины керна готовились дискретные образцы нарезкой с шагом 10 мм, из второй изготавливались твердые образцы для непрерывного РФА-сканирования в синхротронном центре ИЯФ СО РАН по методике (Darin et al., 2013).

После доставки проб в ИГМ СО РАН (Новосибирск), изготавливались твердые препараты путем лиофильной сушки и пропитки эпоксидной смолой по методике (Lamoureux S.F., 1994). Для анализа содержания химических элементов использовались плоскопараллельные образцы 2-миллиметровой толщины с пришлифованной поверхностью, изготовленные из твердых препаратов донных осадков. Из твердых препаратов также были изготовлены оптические шлифы (рис).



Рис. Оптические шлифы

a) фрагмент твердого препарата, пропитанный смесью эпоксидной смолы; b) плоскопараллельная пластинка толщиной 2 мм и c) оптический шлиф (внизу), соответствующий анализируемой поверхности, изготовлены из твердого препарата донного осадка

Определение возраста озерных отложений и последующая оценка скоростей осадконакопления – является важным этапом при изучении донных осадков. Понимание возраста осадка на разных глубинах позволяет провести пересчет глубины керна в возрастную модель, т.е. каждому интервалу модели соответствует определенный возраст. При определении скорости осадконакопления современных осадочных толщ и для подтверждения наличия годовой слоистости, применяется изучение распределения активности изотопов ^{137}Cs и ^{210}Pb, а также метод радиоуглеродного датирования - ^{14}C.

В случае наличия годовой слоистости (варв), подсчет лет может производится напрямую. Слоистость обусловлена неравномерным привносом обломочного материала в разные сезоны года (песчанистые - летом, глинистые - зимой).

В структуре осадка также могут сохраниться следы сейсмической и магматической активности, импактных событий и катастрофических паводков.

Результаты подсчета визуально выделяемых годовых слоев, данные радиоуглеродного датирования и распределения активности 137Cs и 210Pb, а также положение катастрофических слоев в структуре осадка, учитываются при построении возрастной модели «глубина керна-возраст осадка».

Определение элементного состава донных осадков происходило с применением сканирующего микро-РФА на пучках синхротронного излучения в ЦКП “Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения” по методике (Darin et al., 2013). Использование μРФА-СИ при изучении донных осадков позволяет значительно снизить предел обнаружения и определять одновременно до 30 породообразующих и следовых элементов. Сканирование образцов проводилось последовательно от верха керна в глубину разреза.

Размер пучка возбуждающего синхротронного излучения с энергией 21 кэВ на образце составлял 1 мм вдоль оси сканирования и 2.5 мм поперек. Шаг сканирования составлял 1 мм, время измерения в точке — 30 сек. В каждой точке одновременно определялись следующие породообразующие и следовые элементы: K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo. Также контролировалось содержание элементов ниже пределов обнаружения в данных условиях V, Cr, Co, Ge, Se, Pb, Th и U. Расчет содержаний определяемых элементов проводился методом внешнего стандарта по аттестованной методике (Дарьин, Ракшун, 2013).

Дополнительно регистрировался параметр – отношение упруго-неупруго рассеянного на образце излучения (Co/Inc — рентгеновская плотность) — важный для литолого-геохимической характеристики материала донных осадков.

Используя линейную возрастную модель, производится пересчет миллиметровой шкалы глубин в годовую. Интервалы осадочного разреза, в пределах которого наблюдаются аномальные содержания, исключаются из временного ряда, поскольку их элементный состав отличается от остальных участков керна и не связан с климатическими параметрами того времени.

Для поиска взаимосвязи между геохимическими параметрами осадка и погодно-климатическими данными необходим достаточно длинный ряд региональных инструментальных метеонаблюдений. Как правило, набор температурных данных для большинства метеостанций не превышает период последних 100-150 лет. Далее методом многомерной линейной регрессии выявлялось наличие функциональной зависимости временной изменчивости химического состава донных отложений от температурного режима. Источником инструментальных метеоданных служит результат многолетних наблюдений на метеостанциях, расположенных в непосредственной близости от исследуемых объектов.

В результате получены трансферные функции (многопараметрические линейные регрессионные уравнения), позволившие с достаточно высокой точностью

смоделировать среднегодовую температуру на интервале, для которого есть набор инструментально замеренных метеоданных . В случае высокой корреляции между инструментальным и модельным температурными рядами, полученная функция применяется для построения температурной реконструкции на всю длину керна.

Метод сканирующего микро-РФА-СИ позволяет проводить детальные исследования элементного состава отдельных годовых слоев в донных осадках озер с высоким пространственным разрешением. На основе полученных данных могут быть построены возрастные модели «глубина керна – возраст осадка», что позволит проводить количественные сравнения состава осадка с данными инструментальных метеонаблюдений и последующее построение температурных реконструкций на всю глубину опробования керна.

Работы выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН №122041400214-9.

Литература

Величко А.А., Фаустова М.А. Реконструкции последнего позднеплейстоценового оледенения северного полушария (18-20 тыс. лет назад) // Доклады Академии наук СССР. 1989. №309(6). С. 1465-1468.

Дарьин А.В., Ракшун Я.В. Методика выполнения измерений при определении элементного состава образцов горных пород методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 // Системы анализа и обработки данных. 2013. №2(51).

Субетто Д.А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена. 2009. 339 с.

Хотинский Н.А. Голоцен Северной Евразии. Опыт трансконтинентальной корреляции этапов развития растительности и климата. М.: Наука. 1977.

Biskaborn, B.K., Subetto, D.A., Savelieva, L.A., Vakhrameeva, P.S., Hansche, A., Herzschuh, U., Klemm, J., Heinecke, L., Pestryakova, L.A., Meyer, H., Kuhn, G., Diekmann, B. Late Quaternary vegetation and lake system dynamics in northeastern Siberia: implications for seasonal climate variability // Quat. Sci. Rev. 2016.

Brauer A. Annually laminated lake sediments and their paleoclimatic relevance // The Climate in Historical Times. GKSS School of Environmental Research. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 109-127.

Darin A.V., Kalugin I.A., Rakshun Y.V. Scanning X-ray microanalysis of bottom sediments using synchrotron radiation from the BINP VEPP-3 storage ring // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2013. V. 77. P.182–184.

Esper J., Cook E.R., Schweingruber F.H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability // Science. 2002. V. 295. P. 2250-2253.

Kumke T., Ksenofontova M., Pestryakova L., Nazarova L., Hubberten H.-W. Limnological characteristics of lakes in the lowlands of Central Yakutia, Russia // J. Limnol. 2007. V. 66. P. 40-53.

Lamoureux S. F. Embedding unfrozen lake sediments for thin section preparation // Journal of Paleolimnology. 1994. V. 10(2). P. 141-146.

Mangini A., Spotl C., Verdesa P. Reconstruction of temperature in the Central Alps during the past 2000 yr from a $\delta^{18}O$ stalagmite record // Earth and Planetary Science Letters. 2005. V. 235. P. 741–751

Melles M., Svendsen J.I., Fedorov G., Brigham-Grette J., Wagner B. Quaternary environmental and climatic history of the northern high latitudes – recent contributions and

perspectives from lake sediment records // Journal of Quaternary Science. 2022. V. 37. P. 721–728.

Nazarova L., de Hoog V., Hoff U., Diekmann B. Late Holocene climate and environmental changes in Kamchatka inferred from subfossil chironomid record // Quat. Sci. Rev. 2013. V. 67. P. 81–92.

Ojala A.E.K., Francus P., Zolitschka B., Besonen M., Lamoureux S.F. Characteristics of sedimentary varve chronologies—A review // Quaternary Science Review. 2012. V. 43. P. 45–60.

Oppo D., Rosenthal Y., Linsley B. 2,000-year-long temperature and hydrology reconstructions from the Indo-Pacific warm pool // Nature. 2009. V. 460. P. 1113–1116.

Pestryakova L., Herzschuh U., Wetterich S., Ulrich M. Present-day variability and Holocene dynamics of permafrost-affected lakes in central Yakutia (Eastern Siberia) inferred from diatom records // Quaternary Science Reviews. 2012. V. 51. P. 56-70

Wehrli B., Lotter A.F., Schaller T., Sturm M. High-resolution varve studies in Baldeggersee (Switzerland): project overview and limnological background data // Aquatic Science. 1997. V. 59(4). P. 285-294.

Zolitschka B., Francus P., Ojala A.E., Schimmelmann A. Varves in lake sediments–A review // Quaternary Science Reviews, 2015. V. 117. P. 1–41.

A METHOD FOR CONSTRUCTING HIGH-RESOLUTION CLIMATIC PALEORECONSTRUCTIONS BASED ON THE STUDY OF LAKE SEDIMENT ELEMENTAL COMPOSITION

V.S. Novikov, A.V. Darin

This paper examines changes in the elemental composition of lake bottom sediments caused by climatic factors and their potential as paleoarchives. Key attention is paid to deep freshwater lakes with thin-layered sediments, which provide high accuracy of climatic reconstructions. Sampling techniques, sediment age determination, and analytical microstratigraphy using scanning micro-XRF are described. The results allow us to construct time series of geochemical data, linking them with modern climatic conditions and estimating the average annual temperature over long time intervals.

МОНИТОРИНГ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ВОДОЕМЫ ПОСЕЛЕНИЯ СОЛОВЕЦКОЕ

Е.А. Одинцова, Ы. Сабыров, А.А. Плотникова, В.А. Вишневская, Т.А. Ловдина, В.А. Рудакова

Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова

Интенсификация хозяйственной деятельности, туризм и отсутствие общепоселковых очистных сооружений усиливают антропогенную нагрузку на водные объекты Соловков. Работа оценивает динамику антропогенного воздействия на пресные водоемы вблизи поселка Соловецкий и прибрежной линии Белого моря. Исследование включает определение концентраций биогенных элементов, поллютантов (ХПК) и микробиологическую обсемененность (ОЧМ, БГКП). Пятилетний мониторинг выявил в Святом озере стабильный рост ХПК и бактериальной обсемененности, что указывает на сбросы сточных вод. Негативные изменения в состоянии водоемов вблизи поселка Соловецкий вызваны хозяйственными работами, естественными процессами и

увеличением туристического потока, которые усугубляются отсутствием в поселке Соловецкий очистных сооружений.

Количество туристов и паломников на Соловецком архипелаге с каждым годом стремительно растет, что усиливает антропогенную нагрузку на природные водоемы. Отсутствия в поселке Соловецкий очистных сооружений является основной причиной загрязнения природных водных систем, из-за чего сточные воды сбрасываются в водоемы большей частью без очистки или после неполной очистки в септиках. В настоящее время в поселке строятся очистные сооружения, на которые будут заведены все образующиеся сточные воды. Поэтому ежегодно проводимые нами исследования крайне важны для контроля состояния местных водных объектов.

Целью данной работы является оценка динамики изменения уровня загрязнения водоёмов в районе поселения Соловецкое: Питьевого ручья, Святого озера, Банного озера, бухты Благополучия, Кислой губы и прибрежной линии Белого моря.

Точки отбора проб пресной и морской воды выбраны в зависимости от нагрузки, оказываемой на водоемы. В настоящее время хозяйственно-питьевое водоснабжение поселка Соловецкий осуществляется из Питьевого ручья – канала, соединяющего Питьевое и Святое озеро. На Святом озере выбраны точки, вблизи которых располагаются домохозяйства и объекты инфраструктуры поселка. На берегу Банного озера находится баня, а также в водоем попадают очищенные ливневые сточные воды с территории аэродрома. Проведенные учеными ФИЦКИА УрО РАН исследования выявили в летний период 2022 г. в Банном озере интенсивное «цветение» воды (Новикова, 2023).

В губе Кислая обнаружен несанкционированный сброс сточных вод в районе отеля «Соловки», что и стало причиной его ежегодного отбора проб воды. Мыс Ботанический наиболее важная точка, так как показывает качество выносимой в Белое море воды. Более того, в бухту Благополучия сбрасываются неочищенные сточные воды. Кроме того, в районе мыса Буян строятся очистные сооружения и очищенные сточные воды будут сбрасываться в море по глубоководному рассеивающему выпуску, а место сброса должно входить в программу наблюдений за водным объектом.

Забор воды из пресных водоемов осуществлялся в вечернее время (период пиковой нагрузки) для оценки влияния максимального сброса хозяйственно-бытовых стоков. Воду отбирали пробоотборником в соответствии с ГОСТ 31861–2012, за исключением точки в Кислой губе, где методика была скорректирована, по причине малой глубины и высокой заиливания объекта. Ввиду отсутствия возможности проведения арбитражных анализов в полевых условиях пробы воды консервировали путем заморозки и хранили при температуре ниже -20°С.

Химическое потребление кислорода (ХПК) - интегральный показатель качества воды. Анализ проводили фотометрическим методом по ПНД Ф 14.1:2:4.190-2003. В природных и сточных водах фосфор может присутствовать в разных видах, поэтому оценку показателя производили как сумму минерального и органического, фотометрическим методом по ПНДФ 14.1:2.106-97. Содержание общего азота измеряли методом Королева-Вальдеррама через азот нитратный (Руководство …, 2003).

Микробиологический анализ производили, основываясь на методических указаниях (МУК …, 2001). Определялись такие показатели как общее число микроорганизмов (ОЧМ) и наличия бактерий группы кишечной палочки (БГКП). Результаты анализов воды, полученные в ходе исследования, сравнивались с требованиями нормативной документации СанПиН 2.1.5.980–00.

Посёлок Соловецкий является наиболее крупным поселением на архипелаге, где проживает большая часть как местного населения, так и приезжающих на остров

паломников и туристов. Последние размещаются не только в гостиницах и частных домах, но и палаточном лагере, находящемся к северу от поселка. Отсутствие значимых производств и малое количество автотранспорта делают хозяйственно-бытовые отходы главным фактором антропогенной нагрузки на Соловках и являются основным источником загрязнения природных экосистем. Загрязнение водоемов происходит из-за отсутствия общепоселковых и эффективных локальных очистных сооружений.

Нагрузка на водоемы значительно возрастает в летнее время. Постоянно проживающее население на Соловках на 2023 год составляет 794 человека (Численность …, 2023), а туристический поток растет год от года: в 2015 году Соловецкий архипелаг посетило 25 701 человек (Грушенко, 2016), а в 2022 количество туристов и паломников составило 64 874 (В прошлом …, 2023).

Биогенные элементы (азот и фосфор), попадая в водоём в виде различных соединений, становятся питанием для групп микроорганизмов гидролитиков, разлагающих их в доступную для усвоения форму. Вместе с веществами, вымываемыми из почвы и попадающими в водоемы со стоками, биогенные вещества в высоких концентрациях способствуют росту микроорганизмов, которые участвуют в эвтрофикации водоемов.

Показатель “общий азот” нормируется ГН 2.1.5.1315–03: концентрация азота не должна превышать 2 мг/дм^3. За исследуемый период показатель значимо уменьшился (рис. 1а). С 2019 г. показатель общего азота уменьшился практически во всех точках и не превышает ПДК для водоемов рекреационного назначения.

Общий фосфор нормируется СанПиН 1.2.3685–21: максимальная концентрация составляет 1,14 мг/дм^3. Значения этого показателя были стабильны и находились в пределах нормы на протяжении всего периода отбора (рис. 1б). Учитывая, что большая часть фосфора попадает в воду вследствие вымывания из почвы, малые значения показателя соотносятся с низкой минерализацией почв и отсутствием активного земледелия в поселении Соловецкое.

Интегральный показатель ХПК нормируется СанПиН 2.1.3684-21: ПДК составляет для Питьевого ручья в месте водозабора 15 мгO_2/ дм^3, для прочих пресных объектов – 30 мгO_2/дм^3. Ввиду высокого содержания хлоридов в морской воде, измерение ХПК в морской воде (точки М1 – М4) не производится. Значения показателя ХПК представлены на рисунке 2а.

За период мониторинга 2019–2023 гг. наиболее заметные изменения произошли в Святом озере: во всех точках отбора наблюдается рост ХПК более чем в 3,5 раза. Характер загрязнений свидетельствует о регулярных сбросах от почты (6) до гостиницы “Островито Морюшко” (5), включая сброс в Питьевой ручей ниже по течению после аэродрома (3).

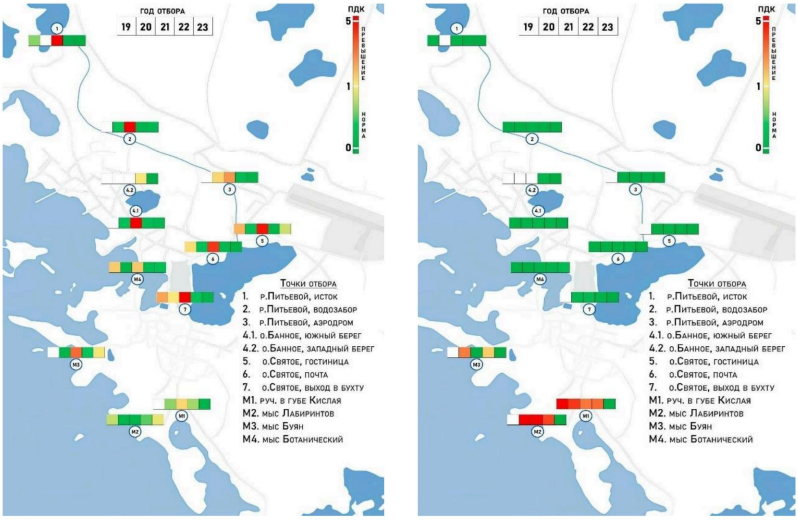
Качество воды в озере Банное (4.1), как ранее наиболее загрязненном, улучшилось в 2022–2023 годах и близко к показателям 2019 года. Это связано с завершением работ на аэродроме и пуском очистных сооружений ливневых сточных вод. Однако до сих пор фиксируется превышение ХПК на западном берегу (4.2), что связано с работой бани.

Сбросы хозяйственно-бытовых стоков, содержащих большое количество биогенных элементов, привносит неспецифическую микрофлору, которая может конкурировать с естественной и вызывать ряд заболеваний.

За период наблюдений уменьшилась бактериальная обсемененность в Питьевом ручье и Святом озере, где большинство проб по величине ОМЧ укладываются в ПДК (рис. 2б). Наиболее высокие значения характерны для Банного озера, бухты Благополучия и Кислого ручья.

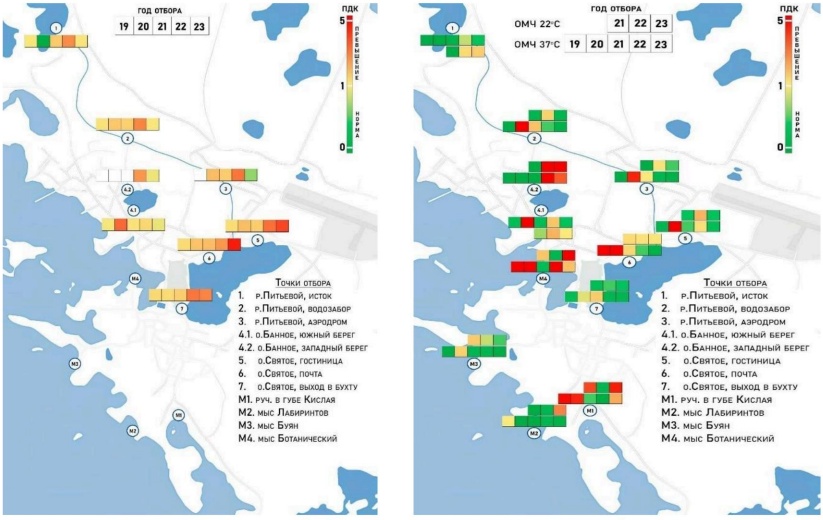
С 2020 г. энтеробактерии, присутствие которых может свидетельствовать о фекальных сбросах, периодически выявлялись во всех объектах водопользования

поселка, включая Питьевой ручей, в котором на протяжении 3-х лет также обнаруживалась кишечная палочка. В настоящее время БГКП сохраняются в Банном, Святом озерах и бухте Благополучия, куда сбрасываются большинство хозяйственно-бытовых сточных вод без очистки.



а б

Рис. 1. Динамика изменения: а – общего азота, б – общего фосфора



а б

Рис. 2. Динамика изменения: а – ХПК; б – ОМЧ

По результатам пятилетнего мониторинга можно констатировать, что неудовлетворительное состояние природных водоемов в районе поселения Соловецкое является следствием сброса неочищенных сточных вод, а также естественными биологическими процессами. Ежегодное повышение ХПК и бактериальной загрязненности во всех точках Святого озера, мысе Ботанический (как точке контроля состояния бухты Благополучия) свидетельствует об увеличении сбрасываемых неочищенных стоков. Несмотря на улучшение ситуации на Банном озере, оно сохраняет статус эвтрофного.

Причиной сложившейся ситуации можно считать отсутствием эффективной системы очистки сточных вод, появление которой не предвидится в ближайшее время. При этом увеличение туристического потока усугубляет ситуацию, создавая повышенную нагрузку на экосистемы в летний сезон. При сохранении этих условий неизбежна эвтрофикация Святого озера и усиление зарастания Банного озера.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания по теме «Комплексная оценка антропогенного воздействия на территорию поселка Соловецкий острова Большой Соловецкий (FSRU-2024-0037)».

Литература

В прошлом году на Соловках побывало более 60 тысяч туристов [Электронный ресурс] // Правда Севера. URL: https://pravdasevera.ru/2023/01/02/63b26b21c8546391ff4c8c02.html (дата обращения: 20.01.2024).

Грушенко Э.Б. Развитие индустрии туризма на Соловецких островах // Наука-2020. 2016. № 5. С. 357-361.

МУК 4.2.1018-01 Санитарно-микробиологический анализ питьевой воды : дата введения 2001-07-01. – Москва, 2001. – 22 с. (с изм. 01.01.2021)

Новикова Ю.В. О состоянии фитопланктона озера Банное (Соловецкий архипелаг) по результатам летней съемки 2023 г. // II Лавёровские чтения Арктика: актуальные проблемы и вызовы / Сборник научных материалов Всероссийской конференции с международным участием. Архангельск: ООО "Типография № 2", 2023. С. 577-579.

Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.

Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282 (дата обращения: 28.01.2025).

MONITORING OF ANTHROPOGENIC IMPACT ON WATER BODIES IN THE SOLOVETSKOE SETTLEMENT

E.E. Odintsova, Y. Saburov, A.A. Plotnikova, V.A. Vishnevskaya, T.I. Lovdina, V.A. Rudakova

The intensification of economic activity, tourism, and the absence of centralized wastewater treatment facilities in Solovki increase the anthropogenic pressure on local water bodies. This study evaluates the dynamics of anthropogenic impact on reservoirs near the Solovetsky settlement and the coastal zone of the White Sea. The research includes determining the concentrations of biogenic elements, pollutants (COD), and microbiological contamination (total microbial count, coliform bacteria). A five-year monitoring period revealed a steady

increase in COD levels and bacterial contamination in Svyatoe Lake, indicating wastewater discharges. Negative changes in the condition of water bodies near the Solovetsky settlement are caused by economic activities, natural processes, and an increase in tourist flow, which are exacerbated by the lack of wastewater treatment facilities in the Solovetsky settlement.

ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОЗЕР ОХРАННОЙ ЗОНЫ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА «ПРИСУРСКИЙ» В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Д.В. Иванов[1], Е.В. Осмелкин[2], И.И. Зиганшин[1]
[1]Институт проблем экологии и недропользования АН РТ
[2]Государственный природный заповедник «Присурский»

Анализируется гидрохимический режим пойменных озер охранной зоны заповедника «Присурский». Установлены типы вод и динамика содержания основных ионов в воде озер.

Гидрохимический состав пойменных озер определяется составом вод атмосферных осадков, поступающих с водосборной поверхности, а также от разливов материнской реки. Оказывают влияние также минеральный состав подстилающих пород и почвенного покрова, характер растительности на водосборе. При утрате прямой связи с рекой и становлением озер как самостоятельных водных объектов большую роль начинают играть внутриводоемные химико-биологические процессы, изменение характера потоков вещества, в том числе накопление донных отложений и вторичное поступление веществ в толщу воды.

Гидрохимический мониторинг пойменных озер в нижнем Присурье на территории охранной зоны заповедника «Присурский» начат в 1999 г. (Иванов и др., 2000). С 2020 г. ведутся исследования состояния одиннадцати модельных водоемов в основные гидрологические сезоны, включая зимнюю межень. Зимний период отражает состояние водоемов при отсутствии влияния внешних факторов, чем представляет особый интерес для установления динамики показателей за продолжительный интервал времени.

Цель исследования – оценка современного статуса и динамики гидрохимических показателей озер в охранной зоне заповедника «Присурский» в зимний период.

Отбор проб производился из поверхностных горизонтов воды озер в феврале–марте 2020–2024 гг. Гидрохимический анализ производился Институте проблем экологии недропользования АН РТ по стандартным методикам. Исследованиями охвачены озера Базарское (пелагическая часть и сильнозаросший мелководный участок – залив Лопата), Башкирское, Старица, Чебак, Лиса, Большой Буймас, Большое Щучье и Малое Щучье.

Воды пойменных озер нижнего Присурья относятся к гидрокабонатно-сульфатно-кальциевому типу (табл.), что соответствует преобладающему в регионе типу вод (Озера …, 1976). Концентрации гидрокарбонатов и хлоридов в большинстве исследованных водных объектов варьируют в довольно узких диапазонах. В озерах Б. Буймас и Башкирское их содержание за двадцатилетний период увеличилось в 1.5-2 раза. Более значимы ежегодные колебания в зимний период концентраций сульфатов, когда даже в пределах одного водного объекта максимальные их значения отличаются от минимальных в 2–6 раз. В наибольшей степени межгодовая изменчивость выражена в

озерах Большое и Малое Щучье, что, возможно, связано с наличием карстовых явлений и процессов в их котловинах (особенно в первом). Здесь современный уровень сульфатов в 1.5–2 раза выше по сравнению с началом 2000-х гг.

Количество растворенного в воде озер кислорода выше показателей, характеризующих начало заморных явлений, что свидетельствует об отсутствии гипоксии. В последний период наибольшая вероятность заморов (<4 мгO_2/л) в озерах Башкирское, Чебак, Лиса и Базарское.

Показатель реакции среды для всех водоемов отмечен стабильным значениями и в целом соответствует показателям для озер зоны смешанных лесов (6.3–9.7 ед. pH) (Китаев, 2007).

По величине ХПК наблюдается кратное повышение значения в сравниваемые периоды от 2 до 5 раз, а для оз. Бол. Буймас в 10 раз. В целом по показателю большая часть объектов в период 2020–2024 гг. относится к водоемам с высокой (15–30 мг/л) и очень высокой окисляемостью (более 30 мг/л), в отличие от 2000 г., когда все объекты исследований относились к группе средней окисляемости (7,5–15 мг/л).

Таблица. Гидрохимическая характеристика озер ГПЗ «Присурский» в зимний период, мг/л

Озера	Годы	pH	O_2	Кальций	Магний	Сульфаты	Хлориды	Гидро-карбонаты
Базарское (Лопата)	2020-2024	7,0-7,8	1,9-8,0	20,7-32,2	4,9-11,2	3,1-17,3	0,7-2,7	67,8-113,0
Базарское	2020-2024	7,1-7,6	1,5-7,0	20,0-26,9	4,6-11,9	4,0-18,6	0,7-4,7	67,8-114,0
Старица	2020-2024	7,0-7,4	2,1-13,8	18,5-28,1	5,0-11,8	10,1-29,4	5,1-8,2	43,3-118,0
	2000	8,3		32,9	2,9	37,0	9,9	119,5
Большое Щучье	2020-2024	6,4-7,5	1,4-9,5	18,2-27,8	5,0-9,4	5,9-36,3	2,8-6,7	55,6-78,7
	2000	7,3		24,1	7,3	60,2	9,9	90,3
Малое Щучье	2020-2024	6,3-7,4	2,7-8,6	19,2-31,3	5,0-11,8	10,3-90,0	2,1-4,0	19,0-96,1
Большой Буймас	2020-2024	6,9-7,7	1,8-10,3	12,3-18,7	5,8-8,9	2,2-15,3	0-4,1	19,0-71,7
	2000	7,8		32,9	1,0	23,4	9,9	131,8
Лиса	2020-2024	6,9-7,7	1,3-5,3	22,7-28,7	6,2-14,9	3,7-19,3	0,7-3,1	18,7-114,0
Чебак	2020-2024	7,0-7,8	1,7-5,6	18,2-26,0	1,9-11,8	5,0-11,8	0,7-3,7	43,4-108,0
	2000	7,6		34,5	1,0	22,2	9,9	136,6
Башкирское	2020-2024	7,0-7,5	1,1-2,1	18,5-28,1	4,7-7,2	0,8-8,6	0,7-5,1	55,6-109,0
	2000	7,3		36,1	2,9	19,8	9,9	148,8

В целом, можно говорить об увеличении органической составляющей в воде в сравниваемый период, о чем свидетельствуют кратные увеличения показателя ХПК и содержания аммония, отражающего анаэробные процессы по разложению органики в подледный период. Это вполне вписывается в наблюдаемую картину гидрологического режима озер в наблюдаемый период. Количество половодий с разливом реки Сура и затоплением поймы, очищающих озера от водных макрофитов резко сократилось, а в период 2020–2024 гг. не наблюдалось совсем. Кроме того, разливы могли бы сопровождаться привносом большого количества влекомых наносов, осаждение которых позволяло бы частично депонировать органические вещества находящиеся в

толще воды и погребать донные отложения, препятствуя вторичному попаданию водную среду продуктов разложения органического вещества, в том числе в подледный период.

Более низкие значения содержания основных анионов и кальция в исследуемый период по сравнению с 2000 г. также свидетельствует о снижении влияния притока минеральных вод и возрастании интенсивности биотических процессов.

Литература

Иванов Д.В., Яковлев В.А., Зиганшин И.И. Предварительные итоги исследования озер охранной зоны ГПЗ «Присурский» и взгляд на организацию лимнологического мониторинга // Роль особо охраняемых природных территорий в сохранении биоразнообразия / Материалы научно-практической конференции. Казань: Форт-Диалог, 2000. С. 104–111.

Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 395 с.

Озера Среднего Поволжья. Л.: Наука, 1976.

HYDROCHEMICAL REGIME OF LAKES IN THE PROTECTION ZONE OF THE STATE NATURE RESERVE "PRISURSKY" IN WINTER

D.V. Ivanov, E.V. Osmelkin, I.I. Ziganshin

The hydrochemical regime of floodplain lakes in the protection zone of the Prisursky Reserve is analyzed. The types of water and the dynamics of the content of the main ions in the water of the lakes are established.

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БРАТСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В РАЗНЫЕ ПО АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКЕ ПЕРИОДЫ

В.И. Полетаева, М.В. Пастухов, Е.А. Цветкова
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

По результатам пространственно-временной динамики концентраций главных ионов и микроэлементов выделены факторы формирования гидрохимического состава и проведена оценка качества вод Братского водохранилища. Показано, что максимальные концентрации главных ионов приурочены к участкам в районе сброса сточных вод Усольской промышленной зоны. Микроэлементный состав вод, в большей степени, подвержен антропогенным преобразованиям вблизи источников поступления и на удалении от них. Концентрации большинства микроэлементов не превышают официально принятые стандарты качества питьевой воды даже в период значительной техногенной эмиссии. Использование региональных фоновых критериев для контроля качества вод показали высокие значения индексов загрязнения.

При переходе речного режима в режим водохранилища неминуемо происходит изменение всех характеристик абиотических компонентов водоема. После зарегулирования реки формируется новая экосистема, в которой природные и антропогенные факторы ее формирования неразрывно связаны между собой. В связи с этим, при изучении геохимического состояния водохранилищ учитывают как природные, так и антропогенные факторы (Viers et al., 2019; Ochoa-Contreras et al., 2021).

Последние могут значительно ухудшать эколого-геохимическую обстановку в период функционирования водоема.

К крупным рекам России, которые значительно изменились после зарегулирования, относится р. Ангара – единственный сток чистейшего оз. Байкал. Из каскада Ангарских ГЭС самым крупным является Братское водохранилище. К главным источникам техногенного поступления элементов в водоем относятся крупные промышленные зоны г. Усолье-Сибирское (предприятия химической, фармацевтической, и др. видов промышленности) и г. Братск (алюминиевый завод, предприятия целлюлозно-бумажной промышленности и т.д.). Активное использование водного потенциала Братского водохранилища определяет цель работы: изучение пространственно-временной динамики гидрохимического состава, выделение факторов его формирования и оценка качества вод.

Фактическим материалом для исследования послужили пробы воды, отобранные по акватории Братского водохранилища на протяжении разных по антропогенной нагрузке периодов. В 2003 г. функционировало самое крупное предприятие г. Усолье-Сибирское – «Усольехимпром», с работой цеха ртутного электролиза которого связано крупномасштабное ртутное загрязнение экосистемы водоема. Этот период пробоотбора рассматривается, как период с наибольшей антропогенной нагрузкой. В 2018 г. предприятие «Усольехимпром» прекратило свою деятельность: этот период рассматривается, как период с меньшей антропогенной нагрузкой. Химический анализ осуществлен в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН (г. Иркутск). Концентрации главных ионов в воде определены с помощью стандартных методов гидрохимического анализа, микроэлементов – методом масс-спектрометрии с индуктивной связанной. Для оценки качества вод проведен расчет индексов загрязнения: CF (Håkanson, 1980), NPI (Benhaddya et al., 2019), PLI (Tomlinson et al., 1980).

В таблице показаны статистические характеристики для компонентов основного ионного состава. Характерной чертой вод русловой части Братского водохранилища является малая минерализация, которая определяется питанием водоема, главной составляющей которого являются олиготрофные, мало изменяющиеся в межгодовой и сезонной динамике, воды оз. Байкал. По сравнению с истоком р. Ангары, состав которого отражает сток всего озера, концентрации главных ионов в воде Братского водохранилища повышены. Увеличение концентраций SO_4^{2-}, Na^+, Cl^- происходит уже в зоне переменного подпора (район г. Усолье-Сибирское), с последующим понижением к г. Братск. Такая природная особенность отмечена на этом участке р. Ангары еще до создания Братского водохранилища (Бочкарев, 1959) и связана с распространением ниже г. Усолье-Сибирское кембрийских отложений. В период исследований значительный вклад в изменение гидрохимического состава этого участка вносит Усольская промышленная зона. В районе сброса сточных вод (20 м ниже выпусков по левому берегу) минерализация достигала 1280 мг/л. Миграция веществ техногенного происхождения, из главных ионов это, в основном Na^+ и Cl^-, от источников загрязнения происходит вдоль линии левого берега.

Также как для главных ионов, на участках непосредственно прилегающих к выпускам сточных вод, концентрации широкого круга микроэлементов значительно повышаются, снижаясь вниз по течению. Рассматривая межгодовую динамику микроэлементного состава вод, в первую очередь необходимо выделить основной загрязнитель водоема – Hg. Прекращение работы предприятия «Усольехимпром» привело к снижению антропогенной нагрузки и уменьшению концентраций токсиканта в воде (рис.). В тоже время, повышенные концентрации Hg в 2018 г. в районе г. Усолье-Сибирское, указывают на продолжающееся поступление токсиканта в водоем.

Таблица. Пределы и средние значения минерализации и главных ионов в воде русловой части Братского водохранилища

Компонент	2003			2018			Исток р. Ангары
	Min	Max	Среднее	Min	Max	Среднее	
HCO_3^-	66,9	85,9	76,6	66,4	83,0	72,3	65,6
Cl^-	<1,0	6,8	3,7	<1,0	4,5	2,9	0,6
SO_4^{2-}	<10	24,0	15,8	<10,0	13,7	11,3	5,2
K^+	1,08	1,30	1,18	0,9	1,1	1,0	0,9
Na^+	3,0	8,2	5,9	2,4	5,1	4,0	3,2
Ca^{2+}	18,7	23,6	21,1	17,6	22,8	19,9	15,3
Mg^{2+}	2,7	4,2	4,2	3,3	4,5	3,9	3,0
TDS	103,0	145,2	127,3	101,2	127,7	115,4	~ 96

В периоды с различной техногенной эмиссией пространственное распределение микроэлементов в водной среде сходно между собой (рис.). Это позволило разделить акваторию водохранилища на три участка. I участок от г. Усолье-Сибирское (15 км) до д. Быково (107 км). В воде этого участка максимальные концентрации большинства микроэлементов приурочены к району поступления сточных вод Усольской промышленной зоны. Помимо этого, выделен десятикилометровый участок (г. Свирск (62 км) – о. Конный (72 км)), в котором наблюдаются повышенные, по сравнению с поверхностными, концентрации в придонных водах. Снижение концентраций микроэлементов в воде по мере удаления от источника загрязнения связано с процессами разбавления и сорбцией элементов на взвешенных частицах. Увеличение микроэлементов в придонной воде на участке в 62-72 км ниже выпусков сточных вод показывает осаждение загрязненной взвеси, ее накопление в донных отложениях и последующее поступление загрязняющих веществ из донных отложений в водную среду.

Нагрузка на участок II Братского водохранилища значительно меньше, в связи с отсутствием на побережье значимых источников загрязнения. В целом, концентрации микроэлементов в воде этого участка соизмеримы с их концентрациями выше по течению от. г. Усолье-Сибирское. В тоже время, в разные по антропогенной нагрузке периоды отмечены локальные превышения концентраций микроэлементов, отражающие природную составляющую (абразия берегов, грунтовые воды и т.д.). Увеличение концентраций микроэлементов в воде III участка связано с влиянием Братской промышленной зоны. В большей степени, поступление элементов происходит с атмосферным переносом и поверхностным стоком. В атмосферном воздухе г. Братск обнаружены значительные концентрации Pb и Cu (Игнатьева и др., 2005), а в снеговой воде – концентрации Al, Zn, Cd, Pb (Янченко, Яскина, 2014).

Сравнение полученных результатов с нормативами, определяющими безопасные концентрации микроэлементов в питьевой воде (СанПиН, 2021), показало, что большинство концентраций исследуемых микроэлементов в воде русловой части Братского водохранилища в 2003 и 2018 гг. значительно ниже рекомендованных значений. Уровни предельно-допустимых концентраций превышают только максимальные концентрации Al и Fe в 2003 г. Рассчитанные индексы загрязнения CF и NPI показывают, что Братское водохранилище не подвергается существенному антропогенному влиянию. Однако, принимая во внимание, что в 2003 г. антропогенное поступление микроэлементов, особенно ртути (Pastukhov et al., 2019), в водоем было значительно, мы допускаем некорректность полученных расчетов. В воде Братского

водохранилища, по сравнению с другими водохранилищами, а также средними данными по химическому составу рек мира, в большинстве случаев содержатся более низкие концентраций микроэлементов даже в период высокой антропогенной нагрузки. В связи с этим, чтобы оценить качество вод Братского водохранилища, за условно фоновые концентрации приняты концентрации микроэлементов в воде истока р. Ангары, полученные по результатам долговременных наблюдений (Poletaeva et al., 2022).

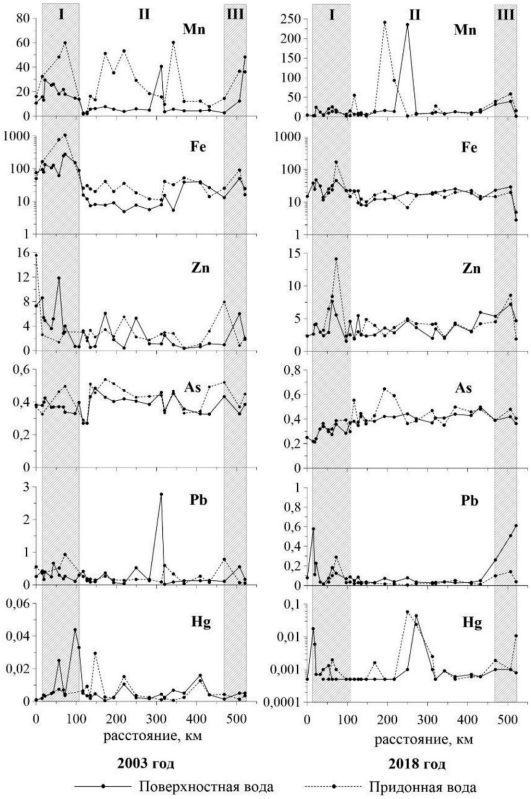


Рис. Концентрации микроэлементов (мкг/л) в воде Братского водохранилища в разные по техногенной нагрузке периоды

Значения CF, рассчитанные с помощью концентрации микроэлементов в воде истока р. Ангары, показали низкое, умеренное, значительное и очень высокое загрязнение вод Братского водохранилища. Очень высокое загрязнение отмечено для Al, Mn, Fe, Cd и Cs в 2003 г., Mn в 2018 г., значительное загрязнение – для Pb и Hg в 2003 г., Al в 2018 г. В течение всего периода наблюдений значение NPI показывает, что образцы воды незагрязненные или слегка загрязненные только по концентрации в них As и U. Сильное загрязнение воды Mn и Pb отмечено во все годы опробования. В период наибольшей техногенной нагрузки (2003 г.) в категорию незагрязненная по рассчитанному индексу PLI вода Братского водохранилища не попадает. 5% образцов

классифицируются как воды, содержащие базовые уровни загрязняющих веществ, 93% – загрязненные, 2% – сильно загрязненные. Уменьшение техногенной нагрузки существенно повлияло на качество вод Братского водохранилища. В 2018 г. 23% образцов классифицируются как воды, содержащие базовые уровни загрязняющих веществ, 76% – загрязненные.

Таким образом, изучение пространственно-временной динамики концентраций главных ионов и микроэлементов Братского водохранилища показало, что на гидрохимический состав водоема значительное воздействие оказывает антропогенная деятельность. Влияние антропогенной эмиссии микроэлементов на химический состав вод прослеживается на расстояние более 50 км вниз по течению от источника загрязнения. При этом, вариации концентраций микроэлементов в поверхностной и придонной воде на участке от г. Свирск до о. Конный отражают аккумуляцию загрязняющих веществ в донных отложениях. Большинство концентраций микроэлементов в воде Братского водохранилища за все периоды исследования значительно ниже разработанных стандартов качества для питьевой воды. Однако, применение региональных фоновых концентраций показало, что антропогенная нагрузка на водоем довольно существенна.

Исследование проведено по государственному заданию в рамках проекта № 0284-2021-0003

Литература

Бочкарев П.Ф. Гидрохимия рек восточной Сибири. Иркутск: Вост. Сиб. изд-во, 1959. 156 с.

Игнатьева Л.П., Воробьева Л.В., Погорелова И.Г., Золотаев Д.А., Потапова М.О. Гигиеническая оценка канцерогенного и неканцерогенного рисков опасности химических веществ атмосферного воздуха г. Братска // Профилактическая и клиническая медицина. 2005. №2. С. 73-76.

СанПиН 2.1.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

Янченко Н.А., Яскина О.Л. Особенности химического состава снежного покрова и атмосферных осадков в городе Братске // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324. №3. С. 27-35.

Benhaddya M.L., Halis Y., Lahcini A. Concentration, Distribution, and Potential Aquatic Risk Assessment of Metals in Water from Chott Merouane (Ramsar Site), Algeria // Archives Environmental Contamination and Toxicology. 2019. V. 77. P. 127-143.

Håkanson L. Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control – A Sedimentological Approach // Water Research. 1980. V. 14, №8. P. 975-1001.

Ochoa-Contreras R., Jara-Marini M.E., Sanchez-Cabeza J.A., Meza-Figueroa D.M., Pérez-Bernal L.H., Ruiz-Fernández A.C. Anthropogenic and climate induced trace element contamination in a water reservoir in northwestern Mexico // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2021. V. 28, №13. P. 16895-16912.

Pastukhov M.V., Poletaeva V.I., Tirskikh E.N. Long-term dynamics of mercury pollution of the Bratsk reservoir bottom sediments, Baikal region, Russia // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 321. 012041.

Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., Dolgikh P.G. Trace Element Compositions and Water Quality Assessment in the Angara River Source (Baikal Region, Russia) // Water. 2022. V. 14. 3564.

Tomlinson D.L., Wilson J.G., Harris C.R., Jeffrey D.W. Problem in the assessment of heavy metals level in estuaries and the formation of a pollution index // Helgoländer Meeresunters. 1980. V. 33. P. 566-575.

Viers J., Carretier S., Auda Y., Pokrovsky O. S., Seyler P., Chabaux F., Regard V., Tolorza V., Herail G. Geochemistry of chilean rivers within the central zone: distinguishing the impact of mining, lithology and physical weathering // Aquatic Geochemistry. 2019. V. 25. P. 27-48.

HYDROCHEMICAL STUDIES OF THE BRATSK RESERVOIR IN DIFFERENT PERIODS OF ANTHROPOGENIC LOAD

V.I. Poletaeva, M.V. Pastukhov, E.A. Tsvetkova

The factors of hydrochemical composition formation were identified and the water quality of the Bratsk Reservoir was assessed based on the results of the spatial-temporal dynamics of main ions and trace element concentrations. It was shown that the maximum concentrations of the main ions are confined to the sites of wastewater discharge of the Usolie-Sibirskoe industrial zone. The trace element composition of waters is, to a greater extent, subject to anthropogenic transformations both near the sources of inflow and at a distance from them. The concentrations of the majority of trace elements do not exceed the officially accepted drinking water quality standards even during the period of significant technogenic emissions. The regional background water quality criteria showed high values of pollution indices.

ПОИСК РЕГИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ КАЧЕСТВА ДЛЯ ВОД АНГАРСКОЙ СИСТЕМЫ

В.И. Полетаева, Г.Б. Хомматлиев, М.В. Пастухов
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

Актуальность изучения пространственно-временной динамики гидрохимического состава истока р. Ангары связана с необходимостью совершенствования региональных критериев оценки качества вод. Исследование основано на результатах мониторинговых работ, проведенных ежемесячно в течение двух лет по створу истока р. Ангары. За период исследований большинство концентраций главных ионов и микроэлементов находится в интервале среднее±1 стандартное отклонение, что определяет высокую степень постоянства гидрохимического состава истока р. Ангары. В качестве фоновых значений для водоемов всей Ангарской системы предложено использовать медианы концентраций элементов в воде истока р. Ангары.

Одной из остро стоящих проблем для населения всего мира является недостаток пресных питьевых вод, связанный как с дефицитом воды в отдельных регионах, так и с загрязнением водных ресурсов. На фоне мировой проблемы недостатка питьевых вод, Иркутская область (Россия) выделяется обилием пресных водных ресурсов. В ее пределах расположен крупнейший на планете водный резервуар, включающей в себя оз. Байкал и р. Ангару – единственный поверхностный сток озера. Несмотря на то, что р. Ангара является главным источником водоснабжения для населения Иркутской области, в настоящее время существует ряд экологических проблем, определяющих трансформацию качественного состава реки. Так, негативные преобразования гидрохимического состава произошли при создании каскада Ангарских водохранилищ.

Значительное влияние определяется и долговременным поступлением загрязняющих веществ со сточными и хозяйственно-бытовыми водами, атмосферным переносом и поверхностным стоком от техногенных источников и т.д. В связи с этим, исследования, направленные на эффективное поддержание качества вод, чрезвычайно актуальны. К таким исследованиям относится проведение непрерывного эколого-геохимического мониторинга, выделяющего долговременные тенденции динамики гидрохимического состава р. Ангары и ее водохранилищ. Помимо этого, возникает существенная необходимость в выделении и принятии на государственном уровне региональных стандартов (фоновых концентраций), позволяющих провести объективную оценку качества вод. В связи с этим, целью настоящего исследования стало: а) определение пространственно-временной динамики концентраций микроэлементов в воде истока р. Ангары, б) выявление природных и антропогенных факторов формирования его гидрохимического состава.

Фактическим материалом для исследования послужили пробы воды, отобранные ежемесячно (20-23 числа) в течение двух лет (2021-2022 г.) по створу истока р. Ангары (правый и левый берег, середина). Химический анализ осуществлен в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН (г. Иркутск). Концентрации главных ионов определены с помощью стандартных методов гидрохимического анализа, микроэлементов – методом масс-спектрометрии с индуктивной связанной.

В период исследований величина pH вод истока р. Ангары изменялась от 7,4 до 8,0 при средней 7,7. Многолетнее изучение (с 1950 г. по настоящее время) гидрохимического состава истока р. Ангары выявило характерную черту его временной динамики, определяемую постоянством основного ионного состава в межгодовом аспекте. Мониторинговые исследования, проводимые с начала XX века, показали, что в воде пелагиали оз. Байкал концентрации главных ионов стабильны как в сезонном, так и межгодовом аспекте и изменяются в пределах точности методов измерения (Khodzher et al., 2017). В воде истока р. Ангары, как в 2021-2022 гг., так и в ранее проведенных работах, в сезонном распределении концентраций главных ионов определена бóльшая вариативность, особенно Cl^- и SO_4^{2-}, чем в озере. Вместе с этим, величина минерализации воды истока реки (~ 95 мг/л) близка к оз. Байкал (~ 96 мг/л, Khodzher et al., 2017), воды имеют гидрокарбонатный кальциевый состав. Такие результаты позволили сделать единый для всех временных период вывод о «наследовании» концентраций главных ионов в водах р. Ангары от вод оз. Байкал.

Гидрохимические исследования всего оз. Байкал показали, что микроэлементы, также как главные ионы, равномерно распределены в воде пелагиали озера (Ветров и др., 2013). Более высокие концентрации Al, Cr, Co, Cu, Zn, Cd, Pb определены при изучении вод его Южной части (Эпов и др., 2000). Микроэлементный состав истока р. Ангары также, как основной ионный состав, также сохраняет черты байкальских вод. Наиболее близкими с водой озера являются средние концентрации As и U, концентрации Al, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Cd, Sn, Cs, Tl, Pb в воде истока реки выше, чем в воде всего озера (Ветров и др., 2013), но сопоставимы с водами его Южной части (Эпов и др., 2000). Одной из причин такого распределения микроэлементов может быть особенность формирования водного баланса Южной части озера. Известно (Глазунов, 1963), что на концентрацию главных ионов в воде этой части и истоке р. Ангары большое влияние оказывают воды притока озера – р. Селенги, которые благодаря мощному селенгинскому течению распространяются вдоль его западного берега и поступают в р. Ангару. Исследованиями установлено, что воды р. Селенга и ее притоков обогащены Fe, Al, Zn, Pb, U и As, во взвешенных наносах за счет природных и антропогенных факторов повышены концентрации As, Cd, Mo, Pb, Zn, Mn, Co (Касимов и др., 2016).

Результаты исследования показали, что концентрации микроэлементов в воде истока р. Ангары имеют сезонные вариации. Так, в период с пониженным уровнем воды выделяется апрель, в котором концентрации Al, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Sn, Cs, Tl, Pb, Th понижены. В марте-апреле на акватории оз. Байкал начинается активное таяние льда, концентрации в котором ниже, чем в речных водах, что оказывает влияние на микроэлементный состав вод истока реки. На гидрохимические характеристики истока р. Ангары оказывают влияние и антропогенные факторы, к которым относится поступление элементов с территории пос. Листвянка с активно развивающейся туристической инфраструктурой. Влияние на увеличение концентраций элементов в истоке р. Ангара, особенно его правобережной части, связано с поверхностным стоком (дождевые и талые воды) и атмосферным переносом с территории поселка, а также субаквальной разгрузкой подземных вод.

Несмотря на выявленную пространственную и временную изменчивость, в период исследований в пределах среднее±1стандартное отклонение (SD) находятся 35 (из 36) образцов по концентрации Cd, 34 образца по концентрации U, 33 образца по концентрации Tl, более 28 образцов по концентрации Al, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sn, Pb и Cs, 25 образцов по концентрации Fe, более 20 образцов по концентрации Mn и Th. Такие показатели определяют высокую степень постоянства микроэлементного состава, также как основного ионного состава, вод истока р. Ангары.

В практике природоохранного законодательства Иркутской области, как и в России в целом, решение о выявлении и ограничении антропогенных нагрузок на окружающую среду принимается на основе сопоставления измеренных концентраций загрязняющих веществ с предельно-допустимыми концентрациями, считающимися безопасными при употреблении природных вод для питьевых целей (ПДКпв) (СанПин 1.2.3685-21). Концентрации всех рассматриваемых элементов в воде истока р. Ангары и большинства концентраций элементов в водохранилищах Ангарского каскада ГЭС даже в период значительной антропогенной нагрузки в десятки, сотни и даже тысячи раз ниже этих нормативов (Цветкова и др., 2024; Poletaeva et al., 2021, Pastukhov et al., 2023). В тоже время, негативные изменения качества вод водоемов р. Ангары определены по результатам биогеохимических исследований, которые показали увеличение элементов загрязнителей в живых организмах не только вблизи техногенных объектов, но и на удалении от них (Пастухов, 2009; Chuparina et al., 2023) Это определяет, что выводы о благополучии гидрохимической обстановки водоемов, основанные на сравнении концентраций элементов в воде с официально принятыми нормативами, с точки зрения экологического риска для р. Ангары и каскада ее водохранилищ весьма некорректны. В связи с этим, встает вопрос о выборе критерия, позволяющего достоверно оценить качество вод р. Ангары и ее водохранилищ. В литературе существует несколько подходов для определения геохимических фоновых концентраций элементов, которые используются в качестве контрольного материала при оценке антропогенного воздействия (Dung et al., 2013). Так, например, геохимическими фоновыми концентрациями могут являться концентрации элементов, полученные в пределах «эталонных створов», которые, в свою очередь, подразделяются на специфические (расположенные выше по течению от источника загрязнения) и региональные (Barbour et al., 1996). Принадлежность р. Ангары и ее водохранилищ к оз. Байкал предопределяет использование в качестве региональных стандартов (фоновых концентраций) концентрации элементов в воде самого озера. При этом, в качестве створа, замыкающего естественные потоки вещества оз. Байкал, может рассматриваться исток р. Ангары. Ранее, принципиальную возможность использования химического состава вод истока р. Ангары, как регионального геохимического фона показало обобщение аналитических данных по содержанию ртути в водных объектах региона (Коваль и др., 2003). Более

объективным является использование медианы концентраций в воде истока р. Ангары, которая в отличие от среднего значения нечувствительна к полученным выделяющимся измеренным значениям, потенциально отражающих антропогенное воздействие (например, поверхностный сток с территории пос. Листвянка или водной транспорт).

Таким образом, систематические исследования вод истока р. Ангары, как индикатора гидрохимического состояния всего оз. Байкал, могут помочь минимизировать и своевременно предотвратить негативные изменения всей Байкало-Ангарской водной системы. Ожидается, что исследование внесет вклад не только в сохранение пресноводной Байкало-Ангарской экосистемы как ключевого источника питьевой воды, но и как уникального объекта природного наследия.

Исследование проведено в рамках Крупного научного проекта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ

Литература

Ветров В.А., Кузнецова А.И., Склярова О.А. Базовые уровни химических элементов в воде озера Байкал // География и природные ресурсы. 2013. №3. С. 41-51.

Глазунов И.В. Гидрохимический режим и химический сток реки Ангары // Гидрохимические исследования озера Байкал. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1963. Т. 3. №23. С. 57-94.

Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л., Пашкина М.П., Романченко А.О., Промахова Е.В. Бассейновый анализ потоков вещества в системе Селенга-Байкал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. №3. С. 67-81.

Коваль П.В., Удодов Ю. Н., Андрулайтис Л. Д., Саньков В. А., Гапон А.Е. Ртуть в воде истока р. Ангары: пятилетний тренд концентрации и возможные причины его вариаций // Доклады Российской академии наук. 2003. Т. 389. №2. С. 293-298.

Пастухов М.В. Экологические аспекты аккумуляции ртути гидробионтами Байкало-Ангарской водной системы: Автореф. дис. … канд. биол. наук. Иркутск, 2009. 20 с.

СанПиН 2.1.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

Цветкова Е.А., Полетаева В.И., Пастухов М.В. Характеристика сточных вод промышленной зоны г. Усолья-Сибирского и их влияние на гидрохимический состав р. Ангары в периоды с разной техногенной нагрузкой // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. №5. С. 39-58.

Эпов В.Н., Эпова Е.Н., Сутурин А.Н. Семенов А.Р. Метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в применении к элементному анализу байкальской воды. часть 2. глубинное распределение элементов // Аналитика и контроль. 2000. Т. 4. С. 347-351.

Barbour M.T., Gerritsen J., Griffith G.E., Frydenborg R., McCarron E., White J.S., Bastian M.L. A Framework for Biological Criteria for Florida Streams Using Benthic Macroinvertebrates // Journal of the North American Benthological Society. 1996. V. 15. P. 185-211.

Chuparina E.V., Poletaeva V.I., Pastukhov M.V. Metals Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn and Pb in Aquatic Plants of Man-made Water Reservoir, Eastern Siberia, Russia: Tracking of Environment Pollution // Pollution. 2023. V. 9. №1. P. 23-38.

Dung T.T.T., Cappuyns V., Swennen R., Phung N. From geochemical background determination to pollution assessment of heavy metals in sediments and soils // Rev. Environ. Sci. Biotechnol. 2013. V. 12. P. 335-353.

Khodzher T.V., Domysheva V.M., Sorokovikova L.M., Sakirko M.V., Tomberg I.V. Current chemical composition of Lake Baikal water // Inland Waters. 2017. V. 7. P. 250-258.

Pastukhov M.V., Poletaeva V.I., Hommatlyyev G.B. Hydrochemical Characteristics and Water Quality Assessment of Irkutsk Reservoir (Baikal Region, Russia) // Water. 2023. V. 15. P. 4142.

Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., Tirskikh E.N. Dynamics of Trace Element Composition of Bratsk Reservoir Water in Different Periods of Anthropogenic Impact (Baikal Region, Russia) // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2021. №80. P. 531-545.

THE SEARCH FOR REGIONAL QUALITY STANDARDS FOR THE ANGARA SYSTEM WATERS

V.I. Poletaeva, G.B. Hommatlyyev, M.V. Pastukhov

The relevance of studying the spatial and temporal dynamics of the Angara River source hydrochemical composition is related to necessity to improve regional assessment criteria of water quality. The study is based on the results of monitoring surveys performed monthly for two years at the Angara River source. During the research period, most of major ions and trace elements concentrations are in the range of mean±1 standard deviation, indicating a high degree of constancy of hydrochemical composition of the Angara River source. The median concentrations of elements in the Angara River source water were proposed to use as background values for water bodies of the whole Angara system.

ОСОБЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА ЧУДЕСНАЯ ЛАМБА (ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАПОВЕДНИК «КИВАЧ»)

М.С. Потахин[1,2], Н.А. Белкина[1], М.С. Богданова[1], Е.В. Гатальская[1], И.В. Морозова[1], Н.А. Мясникова[1], А.В. Орлов[1,3], А.В. Пронина[1]

[1]Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

[2]Петрозаводский государственный университет

[3]Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена

Представлены результаты исследования донных отложений озера Чудесная Ламба. На основе литологического, гранулометрического и геохимического анализа образцов выделено три горизонта в разрезе донных осадков. Они свидетельствуют о последовательной смене седиментационных обстановок в развитии озера (минерагенное – органоминерагенное – органогенное накопление). Первый горизонт представлен минеральными отложениями, накопленными в период существования Онежского приледникового озера. Второй горизонт — осадками, отличающимися значительным градиентом концентраций органического вещества и формировавшимися в период изоляции исследуемого водоема от Онежского озера. Третий горизонт представлен органическими отложениями малого озера, накопившимися в голоцене. Полученные данные о содержании и особенностях накопления органического вещества в донных отложениях озера позволят рассчитать баланс углерода в экосистеме модельного водоема и разработать прогнозные оценки потоков углекислого газа.

Озеро Чудесная Ламба находится на юге Республики Карелия, на территории ФГБУ «Государственный заповедник «Кивач». Оно расположено вблизи автодороги

соединяющей федеральную автотрассу Р-21 «Кола» и экскурсионную зону заповедника, между крупной флювиогляциальной системой на западе и обширной озерно-ледниковой равниной на востоке (Демидов и др., 2006). Площадь озера не превышает 0,7 га, длина – 160 м, наибольшая ширина –50 м. Средняя и наибольшая глубина достигает 4,9 и 8,9 м соответственно. Высота уреза воды около 60 м над уровнем моря. Площадь водосбора достигает 13,8 га. В его ландшафтной структуре преобладают местоположения дренированных равнин на безвалунных песках и озовых грядах с сосновыми кустарничково-лишайниковыми лесами на подзолах, а также олиготрофных торфяников с пушицево-болотнокустарничково-сфагновыми болотами с редкостойной сосной и безлесными на верховых болотных почвах. Следов современного антропогенного воздействия на ландшафты не выявлено.

В рамках работ по программе мониторинга запасов углерода и потоков парниковых газов в водных экосистемах бореальной зоны Европейского Севера России (проект «Российская система климатического мониторинга») в апреле 2024 г. были вскрыты донные отложения озера Чудесная Ламба. Отбор кернов донных отложений осуществлялся торфяным буром (длина пробоотборной части 1 м, ширина 5 см) со льда с наложением для последующей корреляции их в единый разрез. В полевых условиях проводилось первичное литологическое описание образцов, затем керны упаковывались для доставки в институт. В лабораторных условиях проводилось более детальное литостратиграфическое описание разреза, а также отбор образцов для последующего гранулометрического и геохимического анализа.

Дно озера Чудесная Ламба покрыто водным мхом (*Warnstorfia fluitans)*, мощность слоя которого достигает 3 и более метров (рис.). Ниже его — слои донных осадков. Так как в исследовании было сосредоточено внимание на особенностях накопления органического вещества, детально изучался центральный участок разреза, представляющий собой переслаивание гитии с торфом и бурым алевритом (рис., глубины 750-710 см). Выше этого участка расположена подушка из частично разложившегося мха, ниже — слой плотного серого алеврита.

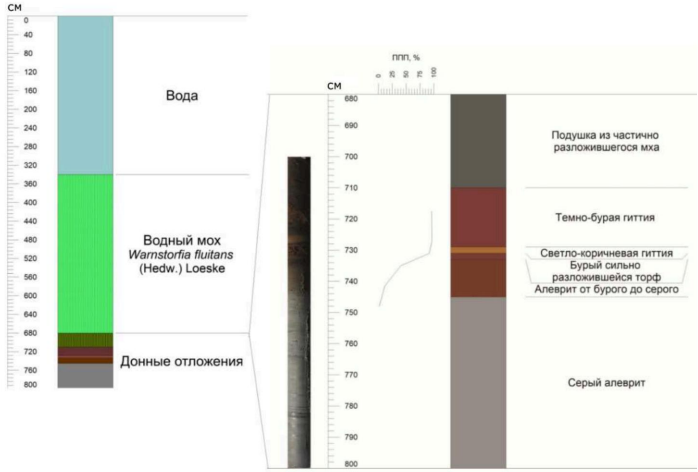


Рис. Разрез донных отложений озера Чудесная Ламба

На основе литостратиграфического описания, гранулометрического и геохимического анализов донных осадков выделены три горизонта, свидетельствующие о разных седиментационных обстановках, реконструирована история осадочного процесса в озере.

Первый горизонт (750-733 см). Осадок представлен серым алевритом, значения ППП наименьшие в нижней части разреза, увеличиваются от 0 до 50 %, тренд на повышение значения сопоставим с плавным переходом цвета алеврита от серого к бурому. Только в этом горизонте присутствуют наиболее тонкие фракции до 1 мкм (коллоиды и илы), их доля изменяется от 7 до 0,5 %. Выше по разрезу происходит увеличение фракции мелкого песка (50-250 мкм), его доля изменяется от 0 до 52 %. Зольность достигает наибольших значений в керне в нижней части (93%), далее плавно уменьшается до 83%. Рассматриваемый состав органических веществ ($C_{орг}$, $N_{орг}$, $P_{общ}$) в этом горизонте также имеет наименьшие значения в нижней части разреза, но при уменьшении глубины происходит плавное увеличение значений: $C_{орг}$ 1-10 %, $N_{орг}$ 0,08-1,9 % и $P_{общ}$ 0,102-0,110 %. Данные отложения можно интерпретировать как осадки, накопленные в период существования Онежского приледникового озера и пра-Онежского озера, уже потерявшего связь с отступающим ледником, но в котором все еще преобладает минеральное осаждение (Демидов, 2006; Палеолимнология …, 2022).

Второй горизонт (733-726 см) представлен в верхней части светло-коричневой гиттией и ниже двумя слоями бурого и желто-коричневого торфа. Результаты анализов подтверждают нестабильное состояние водоема во время образования этой части разреза, наблюдается довольно резкое колебание во всех исследуемых показателях. Происходит быстрое увеличение ППП (от 50 до 96 %). По результатам гранулометрического анализа в горизонте преобладают наиболее крупные в этом разрезе фракции среднего (250-500 мкм) и крупного песка (500-1000 мкм), а также грубообломочных частиц (1000-1500 мкм). Графики значений зольности, $C_{орг}$, $N_{орг}$, $P_{общ}$ на этом участке также достаточно резко изменяются. Выше по разрезу зольность и $P_{общ}$ неуклонно падают (83-2% и 0,11-0,025%), а $C_{орг}$ и $N_{орг}$ возрастают (10-57% и 1,9-2,5%). Эти органоминеральные отложения формировались в период климатических изменений, когда происходило резкое падение уровня Онежского озера и отделение небольших мелких заливов (Демидов, 2006; Палеолимнология …, 2022), одним из которых была котловина озера Чудесная Ламба.

Третий горизонт (726-710 см) сложен серовато-бурой и темно-бурой гиттией. В данной части разреза ППП стабильно высокий (95 %), по гранулометрическому составу преобладают крупная пыль (10-50 мкм) и мелкий песок (50-250 мкм), суммарно их доля в горизонте составляет около 78 %. Зольность неизменно мала (3%), при уменьшении глубины $C_{орг}$ уменьшается (57-47%), $N_{орг}$ незначительно увеличивается (с 2,5-2,9%), $P_{общ}$ также незначительно увеличивается (0,025-00,43%). Данные органогенные отложения представляют собой осадки малого изолированного водоема.

Также была оценена скорость накопления углерода, которая составляет около 1 кг $C_{орг}$ на 1 м^2 дна за 100 лет (Лукина и др., 2024). Таким образом, озеро Чудесная Ламба в условиях гумидного климата как элемент ландшафта выполняет функцию накопителя органического вещества. Полученная информация о содержании и особенностях накопления органического вещества в донных отложениях озера Чудесная Ламба, вместе с использованием балансовой модели потоков органического вещества в трофических цепях, позволят рассчитать баланс углерода в экосистеме модельного водоема и разработать прогнозные оценки потоков углекислого газа с поверхности воды.

Исследование выполнено в рамках проекта «Российская система климатического мониторинга» (ВИП ГЗ) при финансовой поддержке Министерства экономического развития РФ.

Литература

Демидов И.Н., Лукашов А.Д., Ильин В.А. Рельеф заповедника «Кивач» и история геологического развития северо-западного Прионежья в четвертичном периоде // Труды Карельского научного центра РАН. 2006. №10. С. 22-33.

Демидов И.Н. О максимальной стадии развития Онежского приледникового озера, изменении его уровня и гляциоизостатическом поднятии побережий в позднеледниковье // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2006. Вып. 9. С. 171-182.

Лукина Ю.Н., Белкина Н.А., Калинкина Н.М., Богданов С.Р.,Зобков М.Б., Здоровеннов Р.Э., Потахин М.С., Здоровеннова Г.Э., Толстиков А.В., Пальшин Н.И., Бородулина Г.С., Богданова М.С., Мясникова Н.А., Смирнов С.И., Новикова Ю.С., Гатальская Е.В., Морозова И.В., Зобкова М.В., Сластина Ю.Л.,Макарова Е.М., Сярки М.Т., Коновалов Д.С., Теканова Е.В. Разработка системы мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в водных экосистемах Европейского Севера России // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 97-114.

Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям / отв. ред. Д.А. Субетто. Петрозаводск, 2022. 332 с.

BOTTOM SEDIMENTS OF CHUDESNAYA LAMBA LAKE (KIVACH NATURE RESERVE)

M.S. Potakhin, N.A. Belkina, M.S. Bogdanova, E.V. Gatalskaya,
I.V. Morozova, N.A. Myasnikova, A.V. Orlov, A.V. Pronina

The article presents the results of the study of bottom sediments of Chudesnaya Lamba Lake. Based on the lithological, granulometric and geochemical analysis of the samples, three horizons of bottom sediments were identified. The first horizon is represented by mineral deposits accumulated during the existence of the Onego Icel Lake. The second horizon is sediments characterized by a significant gradient of organic matter concentrations and formed during the isolation of the studied reservoir from Onego Lake. The third horizon is represented by organic sediments of a small lake accumulated in the Holocene. The obtained data on the content and features of accumulation of organic matter in the bottom sediments of the lake will allow calculating the carbon balance in the ecosystem of the model reservoir and developing predictive estimates of carbon dioxide flows.

СУТОЧНАЯ ДИНАМИКА ПОТОКОВ CH_4 И CO_2 С ПОВЕРХНОСТИ МЕЛКОВОДНЫХ ГУМИНОВЫХ ОЗЕР ТАЕЖНОЙ ЗОНЫ

С.Д. Прасолов, С.А. Забелина, С.И. Климов
ФИЦ комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН

Исследования суточной динамики потоков CH_4 и CO_2 проведены на двух мелководных гуминовых озерах Архангельской области. В безветренную погоду потоки этих газов характеризуются отсутствием выраженной суточной динамики. Показано, что гуминовое озеро может поглощать углекислый газ из атмосферы. Потоки CO_2 демонстрируют

выраженную зависимость от скорости ветра и конвективного перемешивания, тогда как потоки CH_4 не коррелируют с факторами среды.

Эмиссии парниковых газов (ПГ), таких как метан (CH_4) и углекислый газ (CO_2), находятся в фокусе мировой науки. Пресноводные экосистемы и, в частности, озера играют существенную роль в глобальном цикле углерода и, как следствие, потенциально влияют на климат планеты (Tranvik et al., 2018). Однако, корректные оценки вклада озер в углеродный цикл осложняются пробелами в знаниях о пространственно-временной динамике потоков углеродных газов и факторов, контролирующих их в различных пространственно-временных масштабах.

Исследования временной изменчивости парниковых газов зачастую концентрируются на их сезонной динамике. Отмечается недостаточный объем исследований суточного хода потоков метана (Johnson et al., 2022), а также недостаток исследований потоков метана параллельно с другим газом (например, CO_2) (Baliña et al., 2022). Неопределенность, возникающая из-за неучета суточной динамики потоков, отражается на региональных и глобальных оценках эмиссий парниковых газов из пресноводных экосистем. Несогласованность расчетных моделей в безветренных условиях, типичных для небольших озер таежной зоны, со всех сторон окруженных лесом, также является источником неопределенностей. Существуют лишь единичные исследования потоков ПГ в подобных условиях, однако их результаты противоречивы (Schilder et al., 2016).

В настоящей работе представлены результаты исследования суточной динамики потоков CH_4 и CO_2 с поверхности озер Опогра и Сорожье Архангельской области. Объекты исследования – маломинерализованные, гумифицированные озера малой прозрачности, схожие по гидрохимическим характеристикам и содержанию углерода (Чупакова и др., 2023a, 2023b), но отличающиеся по морфометрии. Озеро Опогра представляет собой очень малое озеро площадью 0,27 км^2 с максимальной глубиной 3,5 м, тогда как Сорожье – озерко, площадью 0,03 км^2 и максимальной глубиной 5,9 м. Оба озера со всех сторон окружены лесом, что обуславливает режим ветра – основного фактора, регулирующего интенсивность диффузионного потока ПГ (Cole, Caraco, 1998).

Измерения потоков выполнялись в трех точках разной глубины: самой глубокой точке озера, в литоральной части и на промежуточной глубине. Потоки измерялись методом плавающих камер с ручным отбором проб на CH_4 и логгерами SenceAir с инфракрасным датчиком концентраций CO_2 (Zabelina et al., 2021). Одновременно с прямым измерением потоков проводился отбор проб воды из поверхностного горизонта для определения концентраций растворенных ПГ на газовом хроматографе.

Работы проводились в августе 2023 года, измерения потоков и отбор проб на каждом озере проводились в течение двух суток каждые 3 часа. Параллельно проведены непрерывные измерения метеорологических и гидрологических параметров в поверхностном горизонте. Метеорологические измерения проводились на двух высотах (1 и 4,5 м) с плавающей платформы, закрепленной в самой глубокой (Сорожье) либо равноудаленной от островов (Опогра) части озер. Измеренные концентрации и скорости ветра использовались для получения расчетных потоков по модели (Cole, Caraco, 1998), наиболее распространенной в исследованиях эмиссий ПГ с поверхности водоемов.

Исследования на озере Сорожье проходили в условиях ясной, практически безветренной погоды: средняя скорость ветра 0,7 м/с. Результаты показали, что слабовыраженная суточная динамика, обратная ходу ветра, прослеживается только в изменении концентраций растворенного метана: повышение в ночные часы и снижение в дневные. Концентрации CO_2 в поверхностном слое варьируют вокруг равновесного с атмосферой значения. Средние значения камерных потоков метана составили 8,6±4,3,

7,7±3,6 и 7,5±4,1 мкмоль/м^2 в час с самой глубокой, промежуточной и литоральной точек соответственно, что укладывается в диапазоны, полученные для озер бореальной зоны (Sieczko et al., 2020). Потоки CO_2 на оз. Сорожье, рассчитанные по ветровой модели составляют -0,03±0,08; 0,01±0,08 и -0,11±0,07 ммоль/м^2 в час. В 50% случаев потоки были отрицательными, что соответствует поглощению CO_2 из атмосферы.

Большая часть измерений на озере Опогра также прошла в условиях тихого ветра (средняя скорость 0,8 м/с), однако к концу вторых суток, при прохождении теплого фронта, измеренные скорости ветра достигали 4,7 м/с в порыве. Ни концентрации, ни потоки обоих газов не демонстрируют выраженной суточной динамики. Камерные потоки CH_4 составляют 5,6±5,3, 4,3±3,4 и 5,1±4,0 мкмоль/ м^2 в час на, соответственно, самой глубокой, промежуточной и литоральной точках. Потоки CO_2 составляют 0,43±0,27 и 0,60±0,30 ммоль/м^2 в час (камерные, глубокая и литоральная точки) и 0,60±0,29 ммоль/м^2 в час (расчетные, промежуточная глубина), что также соотносится с литературными данными для бореальных озер (Rudberg et al., 2021).

Существующие исследования озер умеренного климатического пояса показывают суточную изменчивость в потоках ПГ, связанную с суточными циклами различных физических и биологических факторов (Martinez-Cruz et al., 2020; Rudberg et al., 2021; Sieczko et al., 2020). Однако, наше исследование двух мелководных озер таежной зоны не показало явно выраженной изменчивости потоков. Измеренные потоки не коррелируют с концентрациями растворенных газов в поверхностном слое воды, поскольку во временных масштабах часов-дней изменение концентраций оказывает меньшее влияние на вариацию потоков, чем изменение скорости газообмена (Rudberg et al., 2024).

Камерные измерения CO_2 коррелируют с факторами, считающимися основными движущими силами диффузионного потока с поверхности озер: скоростью ветра и конвективным перемешиванием поверхностного слоя при его охлаждении. Расчетные потоки, как правило, несколько занижены относительно измеренных, однако корреляция между ними также значима.

Значения потоков метана и скорости газообмена, рассчитанной по камерным измерениям, не показывают корреляции с ветром или параметрами поверхностной турбулентности. Это говорит о том, что в условиях слабого ветра потоки этого газа регулируются иными процессами, чья зависимость от условий среды может быть непрямой и требует более детального изучения. В исследуемых озерах наблюдается несоответствие измеренных камерным методом скоростей газообмена для CH_4 и CO_2, что также отмечается в других объектах и объясняется влиянием микропузырьков метана, свободно плавающих в поверхностном слое воды, которые могут формировать поток метана, неотделимый от диффузионного при камерных измерениях, и не зависящий от измеренных концентраций (Baliña et al., 2022).

Исследования суточной динамики, проведенные на мелководных гуминовых озерах таежной зоны, показали, что эти объекты могут являться источниками эмиссий ПГ в атмосферу, но, как в случае с озером Сорожье, и поглощать CO_2. Это, а также тот факт, что более 90% эмиссий углерода с поверхности озер составляет CO_2, делает озера вероятным стоком атмосферного углерода. Выраженное влияние на измеренные потоки метана процессов, не учитываемых в распространенных методах расчетов, подчеркивают важность детального изучения факторов, регулирующих эмиссии этого газа, для снижения неопределенностей в региональных и глобальных оценках.

Исследования проведены в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН ФНИР FUUW-2025-0041 «Биогеохимический цикл углерода и сопряженных элементов в водных экосистемах таежных и тундровых ландшафтов в условиях

меняющейся среды» (2025-2027 гг.) и при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-27-00828, http://rscf.ru/project/22-27-00828/.

Литература

Чупакова А.А., Прасолов С.Д., Морева О.Ю., Прилуцкая Н.С. Биогенные элементы в разнотипных озерах бореальной Зоны // Успехи современного естествознания. 2023. №10. С. 101-106.

Baliña S., Sánchez M.L., del Giorgio P.A. Physical Factors and Microbubble Formation Explain Differences in CH_4 Dynamics Between Shallow Lakes Under Alternative States // Frontiers in Environmental Science. 2022. Т. 10.

Cole J.J., Caraco N.F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF_6 // Limnology and Oceanography. 1998. V. 43. № 4. P. 647-656.

Schilder J., Bastviken D., Hardenbroek M., Van Heiri O. Spatiotemporal patterns in methane flux and gas transfer velocity at low wind speeds: Implications for upscaling studies on small lakes // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2016. V. 121. №6. P. 1456-1467.

Tranvik L.J., Cole J.J., Prairie Y.T. The study of carbon in inland waters – from isolated ecosystems to players in the global carbon cycle // Limnology and Oceanography Letters. 2018. V.3. №3. P. 41-48.

DIURNAL DYNAMICS OF CH_4 AND CO_2 FLUXES FROM THE SURFACE OF SHALLOW HUMIC LAKES IN THE TAIGA ZONE

S.D. Prasolov, S.A. Zabelina, S.I. Klimov

Studies of daily dynamics of CH_4 and CO_2 fluxes were carried out on two shallow humic lakes in the Arkhangelsk region. In the calm weather the fluxes of these gases are characterized by the absence of distinct diurnal dynamics. It is shown that humic lake can absorb carbon dioxide from the atmosphere. CO_2 fluxes show a pronounced dependence on wind speed and convective mixing, while CH_4 fluxes do not correlate with environmental factors.

УГЛЕРОД В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР КАРЕЛО-КОЛЬСКОГО РЕГИОНА

А.В. Пронина, Н.А. Белкина

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Изучены особенности накопления углерода в донных отложениях озер Карело-Кольского региона в период голоцена и позднеледниковья. Выполнен сравнительный анализ разрезов донных отложений шести озер, функционирующих в настоящее время в разных климатических и ландшафтных условиях. Выявлена главная закономерность накопления органического вещества: на протяжении всего периода существования озер (примерно с аллерёда) происходило поступательное увеличение доли углерода в составе осадков. Информация о накоплении углерода в донных отложениях озер в прошлом позволит создавать более точные климатические модели на региональном и глобальном уровнях.

Считается, что одной из причин потепления климата, наблюдаемого в последние десятилетия, является увеличение в атмосфере концентрации парниковых газов (H_2O, CO_2, N_2O, CH_4, O_3, синтетические фторуглеродные соединения и др.). Ведущая роль в этом процессе принадлежит CO_2, посредством которого осуществляется перенос углерода между различными природными сферами планеты. Озерные системы, функционирующие в условиях гумидного климата, рассматриваются как приемники, преобразователи, накопители и экспортеры углерода, полученного наземными экосистемами из атмосферы (Biskaborn, 2016; Pfalz et al., 2023; Белкина, 2024; Лукина и др., 2024). Роль донных отложений континентальных водоемов как накопителя органического вещества в цикле углерода еще недостаточно изучена.

Цикл углерода представляет собой процесс перемещения углерода между различными резервуарами Земли. Он включает два взаимосвязанных круговорота: биологический и геологический. Донные отложения озер занимают пограничное положение в работе этих циклов (Tranvik et al., 2009). В биологическом (быстром) круговороте углерода в водной экосистеме в донные отложения поступают твердые остатки аллохтонного (принесенное с водосбора) и автохтонного (образованное в озере) органического вещества. Процесс его минерализации с участием бентических организмов начинается в поверхностном слое в присутствии кислорода и продолжается уже в анаэробных условиях в более глубоких слоях донных отложений. Растворимые продукты разложения органического вещества возвращаются обратно в воду, нерастворимые трудно разлагаемые – захораниваются в осадках. В геологическом (медленном) круговороте донные отложения постепенно уплотняются и превращаются в осадочные породы, которые способны удерживать в своем составе углерод в геологических масштабах времени. Оценить аккумулирующую способность озер по отношению к потокам углерода на разных этапах развития экосистемы водоема, можно на основе изучения кернов донных отложений.

Карело-Кольский регион, расположенный на северо-западе России, характеризуется высокой озерностью, широкой распространенностью кристаллических пород, и влиянием как морского, так и континентального климата. Низкие температуры воздуха замедляют скорость разложения органического вещества в воде и донных отложениях, что способствует его накоплению. Обильные осадки приводят к увеличению притока органического вещества с водосбора в озера. Преобладание кристаллических пород на водосборах приводит к низкому содержанию минеральных солей в воде, что ограничивает первичную продукцию в озерах. Холмистый рельеф способствует формированию большого количества озер с разной степенью проточности, а преобладание подзолистых почв на водосборах обуславливает высокую кислотность воды и повышенное содержание гуминовых веществ, которые способствуют связыванию и накоплению углерода. Необходимо отметить, что северные водные экосистемы обладают высокой чувствительностью к климатическим изменениям и антропогенному воздействию, эти преобразования фиксируются в трансформации структуры и состава донных отложений водоемов, поэтому изучение озер северо-запада России является перспективным для данного направления исследований (Субетто, 2009).

Цель данного исследования: выявить особенности накопления углерода в донных отложениях озер Карело-Кольского региона в период голоцена и позднеледниковья на основе сравнения литостратиграфии и концентрационного распределения элемента в кернах осадков.

Для выполнения поставленной задачи использовалась палеолимнологическая база данных PaleoLake, которая содержит литостратиграфическую, биостратиграфическую и хроностратиграфическую информацию о разрезах донных отложений озер, расположенных на Восточно-Европейской равнине и в близлежащих

регионах. База включает результаты исследований 287 водоемов, собранные за 70 лет (Syrykh et al., 2021). Палеолимнологические базы данных создаются палеогеографами для реконструкции климатических условий прошлого (температура, осадки, уровень воды в озере и продолжительность ледостава) и прогноза состояния водных экосистем в условиях будущих изменений климата и антропогенного воздействия (Субетто и др., 2017).

В пределах исследуемого региона из базы данных PaleoLake были рассмотрены 210 озер (рис. 1).

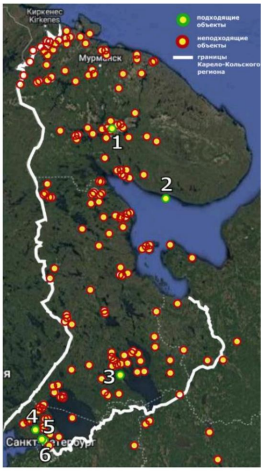


Рис. 1. Палеолимнологическая изученность Карело-Кольского региона, база данных PaleoLake (Syrykh et al., 2021)
1 – оз. Купальное, 2 – оз. Беркут, 3 – оз. Чудесная Ламба, 4 – оз. Вишневское, 5 – оз. Медведевское, 6 – оз. Пасторское

Из них выбраны озера, функционирующие в настоящее время в разных климатических и ландшафтных условиях, для разрезов донных отложений которых есть следующая информация: (1) геохронологическая привязка (радиоуглеродный анализ, кал. л. н. (калиброванных лет назад)); (2) данные по накоплению углерода ($C_{орг}$ – органический углерод или TC – total carbon). К сожалению, несмотря на достаточно высокий уровень изученности донных отложений озер Карело-Кольского региона в сравнении с другими частями Восточно-Европейской равнины и большое количество результатов различных исследований по лито- и биостратиграфии, только пять объектов имеют данные прямого определения углерода на современном аналитическом оборудовании и изотопных исследований возраста осадков. Озера Купальное и Беркут расположены на Кольском полуострове, озера Вишневское, Медведевское и Пасторское – на Карельском перешейке. Озеро Чудесная Ламба изучалось авторами в 2024 году.

Сопоставленные на основе временной шкалы (рис. 2) концентрационные профили углерода в кернах донных отложений этих озер охватывают интервал от 14000 до 0 кал. л. н. Наиболее детально описаны разрезы донных отложений озер Купальное и Беркут, наименее детально – разрезы озер Вишневское и Пасторское. Образцы донных отложений озера Чудесная Ламба еще не были датированы, но кривая помещена в общую схему на основе сопоставления литологического состава донных отложений с другими разрезами в регионе, которые имеют радиоуглеродные датировки.

Главная закономерность накопления углерода в донных отложениях исследованных озер заключается в том, что на протяжении всего периода существования озер (примерно с аллерёда) происходило поступательное увеличение доли углерода в составе осадка. В отложениях озер северной части региона в Хибинах (оз. Купальное) и на Терском берегу Кольского полуострова (оз. Беркут) доля TC варьирует в пределах 10-50%. В разрезе озера Чудесная Ламба, расположенного к западу от Онежского озера (заповедник «Кивач») наблюдается наибольший диапазон $C_{орг}$ от 0 до 60%. В трех озерах, расположенных на Карельском перешейке (Вишневское, Медведевское, Пасторское) в южной части региона значения $C_{орг}$ изменяются от 0-10 до 20-40%. Стоит отметить, что для этих озер концентрационный профиль был построен на основе средних значений для больших промежутков разрезов, что полезно для общего понимания содержания углерода в отложениях, но недостаточно для детального рассмотрения хода накопления углерода.

Вероятно, накопление углерода в составе органического вещества началось при отступании края ледника, предположительно, в аллерёде-пребореале на юге региона и позднее, в пребореале-бореале в центральной и северной частях. Для фиксации временных интервалов начала активного накопления углерода по всему региону необходимы дополнительные исследования разрезов озер, расположенных на меридиональном профиле.

При попытке сопоставления увеличения или уменьшения доли углерода и климатическими событиями (потепления и похолодания) мы не смогли выявить однозначные закономерности. В отдельных случаях мы можем, судя по составленной схеме, предположить, что рост доли углерода в отложениях приходился на периоды потепления: озера Купальное, Медведевское и, частично, оз. Беркут в бореале, Купальное и Беркут в начале атлантического периода и в период потепления в суббореале. Малое количество разрезов с опубликованными данными по накоплению углерода не может показать ясную картину процесса, что выявляет актуальность продолжения работ в этом направлении.

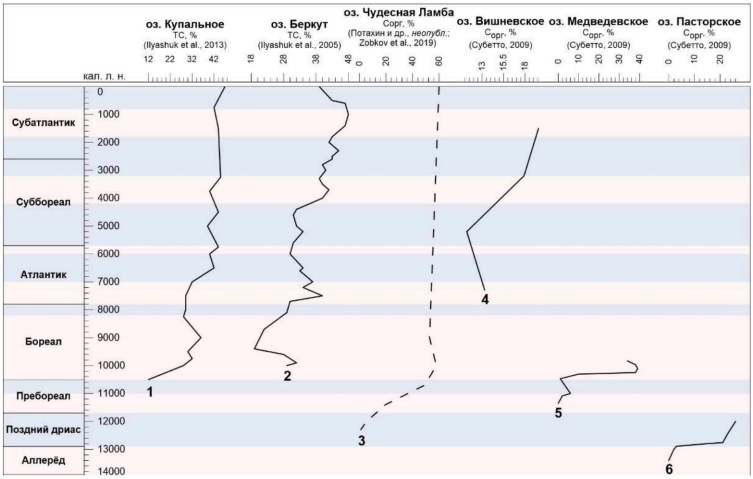


Рис. 2. Общая схема накопления углерода в донных отложениях озер Карело-Кольского региона в голоцене и позднеледниковье. Голубым цветом выделены периоды похолодания, розовым – потепления

Анализ имеющейся информации показал, что для выявления закономерностей накопления углерода в донных отложениях озер Карело-Кольского региона необходимо провести подробные исследования новых разрезов донных отложений и сопоставить косвенные методы определения органического вещества в донных отложениях (ППП, ХПК), используемые ранее, с современными методами анализа углерода, что позволит использовать базы палеогеографической информации, чтобы выяснить, какие природные и антропогенные факторы в наибольшей степени влияют на ход накопления углерода в отложениях озер. Понимание того, как углерод накапливался в различных резервуарах, в том числе и в донных отложениях озер, как одном из звеньев углеродного цикла, позволит создавать более точные климатические модели на региональном и глобальном уровнях.

Исследование выполнено в рамках проекта «Российская система климатического мониторинга» (ВИП ГЗ) при финансовой поддержке Министерства экономического развития РФ.

Литература

Белкина Н.А. Поверхностные донные отложения Карельских озер, особенности формирования и химический состав // Limnology and Freshwater Biology. 2024. № 3. С. 111-129.

Лукина Ю.Н., Белкина Н.А., Калинкина Н.М., Богданов С.Р.,Зобков М.Б., Здоровеннов Р.Э., Потахин М.С., Здоровеннова Г.Э., Толстиков А.В., Пальшин Н.И., Бородулина Г.С., Богданова М.С., Мясникова Н.А., Смирнов С.И., Новикова Ю.С., Гатальская Е.В., Морозова И.В., Зобкова М.В., Сластина Ю.Л., Макарова Е.М., Сярки М.Т., Коновалов Д.С., Теканова Е.В. Разработка системы мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в водных экосистемах Европейского Севера России // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 97-114.

Субетто Д.А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: Изд-во РГПУ им А. И. Герцена, 2009. 339 с.

Biskaborn B.K., Subetto D.A., Savelieva L.A., Vakhrameeva P.S., Hansche A., Herzschuh U., Klemm J., Heinecke L., Pestryakova L.A., Meyer H., Kuhn G., Diekmann B. Late Quaternary vegetation and lake system dynamics in north-eastern Siberia: Implications for seasonal climate variability // Quaternary Science Reviews. 2016. 147. P. 406-421.

Ilyashuk E., Ilyashuk B., Kolka V., Hammarlund D. Holocene climate variability on the Kola Peninsula, Russian Subarctic, based on aquatic invertebrate records from lake sediments. // Quaternary Research. 2013. 79(3). P. 350-361.

Ilyashuk E., Ilyashuk B., Hammarlund D., Larocque I. Holocene climatic and environmental changes inferred from midge records (Diptera: Chironomidae, Chaoboridae, Ceratopogonidae) at Lake Berkut, southern Kola Peninsula, Russia // The Holocene. 2005. 15. P. 897-914.

Pfalz G., Diekmann B., Freytag J., Biskaborn B. Effect of temperature on carbon accumulation in northern lake systems over the past 21,000 years // Frontiers in Earth Science. 2023. 1.

Syrykh L., Subetto D., Nazarova L. Paleolimnological studies on the East European Plain and nearby regions: the PaleoLake Database // J Paleolimnol. 2021. 65. P. 369-375.

Zobkov M., Potakhin M., Subetto D., Tarasov A. Reconstructing Lake Onego evolution during and after the Late Weichselian glaciation with special reference to water volume and area estimations // Journal of Paleolimnology. 2019. V. 62, №1. P. 53-71.

CARBON IN BOTTOM SEDIMENTS OF LAKES IN THE KARELIAN-KOLA REGION

A.V. Pronina, N.A. Belkina

The peculiarities of carbon accumulation in the bottom sediments of lakes in the Karelian-Kola region during the Holocene and late glacial periods were studied. The comparative analysis of bottom sediment sections of six lakes currently functioning in different climatic and landscape conditions was carried out. The main regularity of organic matter accumulation was revealed: throughout the whole period of lakes existence (approximately since the Allerød) there was a progressive increase of carbon share in sediment composition. Information on carbon accumulation in lake bottom sediments in the past will allow creating more accurate climate models at the regional and global levels.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГОРНЫХ ОЗЕР ЦЕНТРАЛЬНОГО СЕГМЕНТА СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

Т.В. Реутова, Ф.Р. Дреева, Н.В. Реутова
Кабардино-Балкарский научный центр РАН

По материалам обследования моренных и карстовых горных озер и питающих их водотоков, в бассейнах рек Баксан, Малка и Теберда проведено сравнение озерных вод по содержанию главных ионов (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, HCO_3^{-}, SO_4^{2-}, Cl^{-}) и ряда микроэлементов (Al, As, Cu, F, Li, Mn, Mo, Sr, Zn). По уровню содержания Ca, Mg, HCO_3^{-}, Sr карстовые озера значительно отличаются от моренных, а по другим (SO_4^{2-}, Cl^{-}, Na^{+}, As, F, Li, Mo) различия в однотипных объектах были более выражены, чем различия между объектами разных типов. Выявлена зависимость концентраций главных ионов от высотного положения близко расположенных моренных озер.

Озера Кавказа несмотря на небольшие размеры, являются популярными объектами туризма и рекреации. Расположенные на относительно небольшой территории, они отличаются как по происхождению, так и природно-климатическими условиями, что приводит к значительным различиям в формировании состава вод этих озер и делает их уникальными объектами исследования. Несмотря на это, изучены озера слабо, для большинства не получены даже основные морфометрические характеристики. Это связано с их труднодоступностью, т. к. большая часть озер Кавказа относится к нивально-гляциальным и находятся на высотах более 2000 м. В то же время, в средне- и низкогорье распространены карстовые озера, которые более доступны и являются частью экскурсионных маршрутов на протяжении многих десятилетий. Это не только заполненные атмосферными осадками или грунтовыми водами карстовые воронки, но и восходящие источники, к которым относится озеро Церик-Кель и небольшой водоем со значительным стоком на берегу реки Черек Балкарский в верхней части с. Бабугент (Кузнецов, 1928; Максимович и др., 2017). Цель исследования – дать сравнительную гидрохимическую характеристику двух наиболее распространенных в центральном сегменте Северного Кавказа групп озер.

В качестве объектов исследования выбраны наиболее известные горные озера Центрального и Западного Кавказа, расположенные в бассейнах рек Кубань и Терек (рис. 1). В группу моренных входят озера Клухор, Туманлы и Каракель (бассейн р. Теберда), Донгуз-Орун и безымянное небольшое остаточное озеро на южном склоне Эльбруса (бассейн р. Баксан). Хотя возникновение озер Каракель, Туманлы и остаточного озера на Эльбрусе связано с деятельностью ледников (Дега и др., 2013), в настоящее время они питаются только поверхностным стоком и родниками, в отличии от озер Клухор и Донгуз-Орун, в которые помимо родников впадают гляциальные потоки. Среди карстовых - группа Голубых озер (Церик-кель, Секретное, Верхнее Большое, безымянное в воронке рядом с Верхними озерами) и провал-колодец на окраине с. Бабугент в бассейне р. Черек, и оз. Шадхурей в бассейне р. Малка. Точное местоположение и некоторые характеристики исследуемых озер, полученные из литературных источников (Дега и др., 2013; Дега, Онищенко, 2014; Ефремов, 1988; Кожаева и др., 2022; Максимович и др., 2017) и с помощью ГИС, приведены в таблице 1. Сведения о глубинах часто не подтверждаются инструментальной съемкой. Большинство исследованных озер являются сточными, однако косвенные признаки свидетельствует о активном водообмене в озерах, не имеющих постоянного поверхностного стока, путем дренажа через подпирающие морены и дамбы.

Пробы отбирали в теплый период года для сточных озер на первых метрах стока,

для бессточных озер из поверхностного слоя в нескольких метрах от берега в относительно глубоких местах, для притоков в устьевой зоне. Результаты определения концентраций ($C_{ср}$) компонентов химического состава, полученные методами капиллярного ионофореза (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, HCO_3^{-}, SO_4^{2-}, Cl^{-}, F^{-}, Li^{+}, Sr^{2+}) и атомно-абсорбционной спектрометрии (Al, As, Cu, Mn, Mo, Zn) представлены в таблице 2.



Рис. 1. Местоположение исследуемых озер

Таблица 1. Исследуемые озера и их краткая характеристика

№		Озера	Координаты, °		Высота, м н.у.м	Площадь, тыс.м^2	Глубина, м	Использование
			С.ш.	В.д.				
1	моренные	Клухор (С)	43,2521	41,8632	2698	177,75	40	Д, РП, Т
2		Туманлы (С)	43,2852	41,7930	1882	20,52	11,5	Д, Р, АП
3		Каракель (БС)	43,4369	41,7434	1335	25,83	9	Д, Р, АП
4		Донгуз-Орун (С)	43,2234	42,4947	2543	67,39	15	Д, АП
5		остаточное оз. (БС)	43,2812	42,4897	3044	0,18	~3	РП, Т
6	карстовые	Б.Шадхурей (БС)	43,7057	43,0778	905	28,36	57	Д, РП
7		Секретное (БС)	43,2264	43,5527	929	16,97	21	Д, АП
8		В. Голубое (С)	43,2282	43,5627	907	86,88	18	Д, Р, АП
9		Воронка верх. (С)	43,2291	43,5739	916	9,80	(?)	РП
10		Церик-Кель (С)	43,2326	43,5387	827	22,85	279	Д, АП
11		Провал в с. Бабугент (С)	43,2632	43,5420	769	0,37	(?)	ЗП

Пояснение: С/БС- сточное/бессточное озеро; Д – достопримечательность; Р – объект рекреации; РП – редко посещаемое; АП – активно посещаемое; ЗП – закрыто для посещения; Т – труднодоступное

Наблюдаются значительные различия между моренными и карстовыми озерами по содержанию главных ионов. Например, концентрации HCO_3^{-} в последних в 10 раз выше, от 2 до 10 раз увеличиваются концентрации Ca^{2+} и Mg^{2+}. Для Na^{+} и SO_4^{2-} имеются отклонения от общей тенденции. Низкие концентрации SO_4^{2-} отмечены в карстовых озерах на возвышенности у подножия Скалистого хребта и р. Ташатамак, а относительно высокие - в оз. Донгуз-Орун и его ледниковых и родниковых притоках. На фоне крайне низкого содержания Na^{+} и Cl^{-} в высокогорных озерах выделяется остаточное озеро на склоне Эльбруса, где концентрации достигают и превышают концентрации присущие карстовым озерам.

Внутри однотипных озер распределение концентраций для разных ионов различно. Прослеживается вертикальная закономерность - повышение концентраций всех главных ионов за исключением Cl^{-} в водах озер Клухор, Туманлы, Каракель расположенных на расстоянии 7 и 17,5 км друг от друга при перепаде высот 1365 м в 2-3 раза при переходе от одного к другому, и оз. Каракель по содержанию HCO_3^{-} , Ca^{2+} и

Mg^{2+}занимает промежуточную позицию между карстовыми и моренными озерами. Все карстовые озера содержали ионы HCO_3^- в приблизительно одинаковых концентрациях на уровне около 200 мг/л, но резко отличались по содержанию остальных главных ионов. Два озера, находящиеся на нижних речных террасах Черека и являющиеся по существу мощными минеральными источниками сульфатно-кальциевого типа с примесью H_2S, содержали в 3-5 раз больше Mg^{2+}, Na^+ и Cl^- по сравнению с озерами, заполнившими карстовые воронки в возвышенной зоне на водоразделе рек Черек и Псыгансу.

Таблица 2. Химический состав озерных и речных вод

№	Озера, притоки	Концентрация микроэлементов, мкг/л								
		Al	As	Cu	F	Li	Mn	Mo	Sr	Zn
1	Клухор	71,1	1,39	6,55	24	0	4,06	0,16	0	26,5
1а	родник прибрежный	28,3	1,81	2,71	17	0	4,88	0,44	0	49,6
1б	склоновый сток	34,4	2,76	2,13	5	0	3,19	0,00	0	55,9
2	Туманлы	50,8	2,28	5,96	50	0	1,97	0,19	17	24,0
3	Каракель	68,1	3,82	5,82	362	1,0	2,17	5,26	38	25,0
3а	ручей приток	18,8	4,01	4,97	405	1,5	2,40	6,60	54	28,2
4	Донгуз-Орун	136,5	2,70	3,83	83	0,3	6,58	0,23	15	28,3
4а	родники береговые	18,7	3,81	2,05	59	0	2,71	0,18	18	23,3
4б	сток с ледника	196,4	3,09	3,35	65	0	14,16	0,40	35	22,2
4в	сток с оз. В.Донгуз-Орун	142,6	-	0,54	114	0	1,49	0,50	0	5,5
5	остаточное на склоне Эльбруса	13,9	12,0	0,21	146	30,6	1,05	2,25	0	4,3
6	Б. Шадхурей	72,4	1,07	2,14	235	4,5	2,11	0,30	700	28,4
7	Секретное	20,7	3,23	2,85	129	0,75	2,58	0,39	530	4,39
8	В. Голубое	23,5	3,29	2,22	110	0	3,08	0,45	453	38,3
9	Воронка	23,7	2,90	4,37	113	0	14,78	0,07	811	24,8
9а	р. Ташатамак	29,2	0,75	6,63	84	0	2,09	0,65	878	57,2
10	Церик-Кель	48,9	0	1,77	504	16,6	2,91	2,55	6591	8,9
11	Провал в с. Бабугент	41,8	1,87	3,30	915	44,5	33,40	1,69	9192	29,7

№	Озера, притоки	Концентрация главных ионов, мг/л						
		Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-
1	Клухор	2,4	0,30	0,47	0,41	12,2	1,5	0,43
1а	родник прибрежный	1,6	0,37	0,51	0,09	14,2	0,7	1,34
1б	склоновый сток	2,5	0,33	0,82	0,26	15,7	1,1	1,08
2	Туманлы	11,4	1,17	1,50	0,49	52,5	3,0	0,53
3	Каракель	23,8	4,30	2,92	1,12	114,6	6,2	2,36
3а	ручей питающий	24,0	4,41	2,64	1,07	137,6	6,3	1,46
4	Донгуз-Орун	6,4	1,61	0,56	0,60	23,8	8,5	0,29
4а	родники береговые	7,2	1,97	0,62	0,59	29,9	13,2	0,51
4б	сток с ледника	6,8	1,88	0,72	0,67	26,0	10,8	0,56
4в	сток с оз. В.Донгуз-Орун	7,3	1,04	0,40	0,23	16,3	7,5	0,19
5	остаточное на склоне Эльбруса	1,5	0,92	8,76	1,11	18,5	6,3	4,64
6	Б. Шадхурей	62,3	18,10	8,36	3,07	171,2	141,8	1,33
7	Секретное	56,0	8,13	2,51	1,50	241,2	2,7	1,98
8	В. Голубое	49,2	7,99	3,59	2,42	210,9	2,8	1,18
9	Воронка	68,4	11,00	2,02	1,39	308,6	5,4	1,00
9а	р. Ташатамак	55,0	6,31	12,12	2,27	245,1	5,2	1,24
10	Церик-Кель	267,2	30,70	8,55	0,89	198,3	673,4	7,26
11	Провал в с. Бабугент	351,7	58,15	15,39	2,76	193,1	1005,8	9,91

Среди микроэлементов распределение Sr в наибольшей степени отражает различия между озерами двух типов по аналогии с Ca^{2+} и Mg^{2+}. Во всех высокогорных объектах Sr либо не был обнаружен, либо его концентрации составляли первые десятки мкг/л, что близко к ПО метода. В карстовых озерах также выделяются две группы объектов. В озерах (№№ 10, 11) с исключительно мощными глубинными источниками

питания концентрации Sr достигли $ПДК_{пит}$ равной 7 мг/л (0,9-1,3 ПДК). Однако и в поверхностных карстовых озерах концентрации на порядок выше, чем в высокогорье.

Высокие концентрации Al в моренных озерах унаследованы от гляциальных талых потоков, наиболее высокие значения в озере Донгуз-Орун, имеющем прямую связь с ледниками, обеспечивающими его основное питание. В озерах этого типа, потерявших непосредственную связь с ледниками концентрации в 2 раза ниже. Среди карстовых озер максимум зарегистрирован в воде бессточного озера Шадхурей и относительно повышенные в озерах Церик-Кель и колодец-провал. В остальных, расположенных под северным склоном Скалистого хр., концентрации были заметно ниже и не отличались от концентрации в р. Ташатамак, формирующейся также на северном склоне Скалистого хребта. Такие же низкие концентрации характерны для родников высокогорий, и в остаточном озере на склоне Эльбруса концентрация минимальна.

Содержание As в общем невысокое. В озерах бассейна р. Гоначхир концентрации составили 1-2 мкг/л, более высокие концентрации около 4 мкг/л в оз. Каракель определяют воды втекающего в него ручья. Примерно такой же уровень концентраций 3-4 мкг/л отмечен в районе оз. Донгуз-Орун (Южное Приэльбрусье), включая озеро, прибрежные родники и сток с ледника Медвежий. Максимальное значение, превысившее $ПДК_{пит}$ (1,2 ПДК), зарегистрировано в небольшом озере на южном склоне Эльбруса. При этом в истоках ручья Чыран-Баши-су подземного происхождения (3100 м н.у.м.), на берегу которого оно находится, концентрации превысили 100 мкг/л (> 10 ПДК). Это связано с влиянием геохимической аномалии в зоне современного вулканизма. В районе развития карста в среднегорье концентрации были на среднем уровне 1-3 мкг/л, а в оз. Церик-Кель As не был обнаружен, возможно, вследствие присутствия в его воде сероводорода.

Содержание Cu ни в одном объекте не превысило кларка речных вод (k), но при сравнении с $ПДК_{рыб.}$ все воды должны быть признаны загрязненными. В озерах бассейна Теберды содержалось 6 ПДК. Столько же в среднегорной р. Ташатамак, но в карстовых озерах, как и в оз. Донгуз-Орун и его притоках, концентрации были ниже (2-4 мкг/л). Минимальные концентрации Cu, а также Mn, наблюдались на склоне Эльбруса. В озере и ручье они не достигали 1 мкг/л.

Концентрации F в большинстве объектов составляли 0,5-1,5k, т.е. в общем соответствовали среднемировому содержанию. Исключение представляли воды оз. Клухор и его притоков с крайне низким содержанием F (0,2k) и повышенные концентрации в оз. Каракель и питающем ручье (4k). В карстовых озерах с выраженными восходящими потоками глубинных вод (№№ 10,11) концентрации повышались до 5-9k, в воде оз. Шадхурей, где также предполагается поступление карстовых вод, концентрация превысила 2k.

Литий редко встречается в поверхностных водах горных территорий Северного Кавказа. В обследованных озерах двух типов и их притоках Li не был обнаружен или присутствовал на уровне ПО (1,5 мкг/л) не в каждой из отобранных в разные годы проб. Значимые концентрации отмечены в 4 озерах. Воды одного из них высокогорного озера на южном склоне Эльбруса и протекающего рядом ручья содержали 30 и 110 мкг/л Li в сопровождении повышенных концентраций As, Mo, Na^+ и Cl^-, что может быть связано с вулканической активностью. Другие три среднегорные карстовые озера содержали 4,5, 16,6 и 44,5 мкг/л Li. Этот ряд концентраций вероятно отражает степень участия глубинных вод в составе озерных.

Концентрации Mo редко достигали 1 мкг/л, более высокие концентрации 2,3-6,6 мкг/л относились к тем же объектам, где были зафиксированы повышенные концентрации As и/или F.

Концентрации Mn варьировали в пределах 1-33 мкг/л, Zn в пределах 4-57 мкг/л. закономерностей в их распределении не прослеживается, возможно, вследствие нестабильности, вызванной вовлеченностью этих элементов в многочисленные процессы (высокой сорбционной способностью, биопотреблением, переменой валентности для Mn).

Моренные озера в приледниковой зоне имеют свои особенности, отличающие их от утративших связь с ледниками. При очень низком общем солесодержании в них повышены концентрации Al, Mn и SO_4^{2-} (Донгуз-Орун) и наблюдается обогащение K^+ относительно Na^+.

Моренные озера, в настоящее время не связанные с ледниками, и озера в карстовых воронках на возвышенности мало отличаются по составу от поверхностных текучих вод в их окрестностях.

Нетипично высокие для пресных вод концентрации некоторых компонентов в одном случае относились к озерам-источникам, активно выщелачивающим горные породы (SO_4^{2-}, Cl^-, F^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Sr^{2+}, Na^+, Li^+), в другом были связаны с локальными геохимическими аномалиями различного генезиса (ассоциации As, F^-, Mo в оз. Каракель и As, Li^+, Mo, Na^+, Cl^- в озере на склоне Эльбруса)

По уровню содержания ряда компонентов (Ca, Mg, HCO_3^-, Sr) карстовые озера значительно отличаются от моренных, по другим (SO_4^{2-}, Cl^-, Na^+) различия в однотипных объектах были более выражены, чем различия между объектами разных типов.

Литература

Дега Н.С., Онищенко В.В. Высокогорные озера - перспективный рекреационной продукт Карачаево-Черкесии // Устойчивое развитие горных территорий. 2014. Т. 6, №1. С. 68-74.

Дега Н.С. Онищенко В.В., Корчагина Н.М. Эколого-географическая характеристика озер в условиях развивающейся туриндустрии Карачаево-Черкесии // География и водные ресурсы. 2013. №2. С. 37-44.

Ефремов Ю.В. Голубое ожерелье Кавказа. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 160 с.

Кожаева Д.К., Казанчев С.Ч., Дышекова В.Ф. Микрофлора грунтов и бентоса озера Шадхурей // Реализация приоритетных программ развития АПК // Сборник научных трудов по итогам X Международной научно-практической конференции, посвященная памяти заслуженного деятеля науки РФ и КБР, профессора Б. Х. Жерукова. Т.1, Ч. I. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова, 2022. С. 193-197.

Кузнецов И.Г. Озеро Церик-кель и другие формы карста в известняках Скалистого хребта на Северном Кавказе // Известия РГО. 1928. Т. 60. Вып. 2. С. 294-296.

Максимович Н.Г., Мещерякова О.Ю., Деменев А.Д. Результаты комплексной экспедиции по исследованию Голубого озера (Церик-Кель) // Пещеры / Сборник научных трудов. Т. Вып. 40. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2017. С. 25-36.

COMPARATIVE HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF MOUNTAIN LAKES IN THE CENTRAL SEGMENT OF THE NORTH CAUCASUS

T.V. Reutova, F.R. Dreeva, N.V. Reutova

Based on the survey of moraine and karst mountain lakes and their feeding streams, lake waters in the basins of the Baksan, Malka and Teberda rivers were compared in terms of the content of major ions (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-) and a number of trace elements (Al, As,

Cu, F, Li, Mn, Mo, Sr, Zn). Karst lakes differ significantly from moraine lakes in terms of Ca, Mg, HCO_3^-, Sr levels, while differences in similar objects (SO_4^{2-}, Cl^-, Na^+, As, F, Li, Mo) were more pronounced than differences between objects of different types. The dependence of the concentrations of the main ions on the altitude position of closely located moraine lakes has been revealed.

ГЕОХИМИЯ СОВРЕМЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ: ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ (ГЕОЛОГИЧЕСКИХ) ФАКТОРОВ, УРБАНИЗАЦИИ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

З.И. Слуковский, В.А. Даувальтер
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

Отложения озер – индикатор состояния водоема и его водосборной площади. Геохимические маркеры позволяют оценить воздействие на озеро природной среды, например, геологии, а также влияние техногенеза. В докладе представлены обобщенные данные изучения большого спектра элементов в современных отложениях озер Мурманской области из различных районов региона. Показано, что в отложениях на севере области формируются урановые и молибденовые геохимические аномалии в отложениях озер, что связано влиянием пород водосбора. В урбанизированной среде, например города Мурманска, в отложениях отмечаются техногенные ассоциации элементов, включающие Pb, Sb, V, Ni и др. Палеолимнологические реконструкции позволили сделать задел для оценки регионального геохимического фона для донных отложений озер Мурманской области.

Озерные отложения являются хорошим маркером состояния водоема и его водосборной площади (Massaferro et al., 2024). Известно, что их можно использовать как для оценки современного состояния озера (Dauvalter et al., 1999; Abril, 2022], так и для ретроспективного анализа, способного выявить различные исторические изменения в водоеме от момента, когда озера еще не существовало, до настоящего дня (Субетто, 2009; Delile et al. 2014). Геохимические исследования озерных отложений позволяют выявлять климатические изменения на водосборе, колебания уровня воды в озере, катастрофические явления в виде падения метеоритов или извержений вулканов, антропогенное воздействие, а также влияние рудных образований горных пород водосборной площади.

Территория Мурманской области с 1990-х годов является плацдармом для эколого-геохимических исследований современных отложений озер. В первую очередь, благодаря работам В.А. Даувальтера (Даувальтер, 2012). Основной акцент в этих работах был сделан на выявление маркерных элементов-загрязнителей, связанных с деятельностью промышленных предприятий Мурманской области. Анализировалось порядка 8-12 элементов, большинство из которых относятся к «классическим» тяжелым металлам (Pb, Ni, Cu, Zn и др.). Цель данной работы – показать геохимические (природные и антропогенные) особенности современных донных отложений озер разных районов Мурманской области, основываясь на анализе в осадках до 40 различных химических элементов, включая, например, U, Mo и редкоземельные элементы (РЗЭ).

В основу исследований легли полевые исследования, включающие отбор проб донных отложений озер, проводимые с 2018 по 2024 годы сотрудниками Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН и их коллегами из других организаций. Отбор донных отложений озер осуществлялся помощи дночерпателя

Экмана-Берджа или ковша Ван-Вина для получения нестратифицированных проб, а также с использованием пробоотборников гравитационного типа: системы Стогхейма и системы Limnos. Последние два прибора позволяют получать стратифицированные ненарушенные колонки донных отложений, которые можно разделять на слои от 0.5 см в зависимости от вида дальнейших работ. Чаще всего колонки делились на слои 1-2 см. Перед вещественным анализом пробы отложений просушивались и измельчались. Концентрации редких элементов (Li, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo,Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, W, Tl, Pb, Bi, Th, U) определялись при помощи масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на приборе XSeries-2 ICP-MS (Thermo Ficher Scientific). Подробная методика описана в этой работе (Шелехова и др., 2020).

Исследование озер и их отложений урбанизированных районов Мурманской области показало единую тенденцию к большому накоплению в верхних слоях донных осадков P, V, Mn, Ni, Cu, Cd, Sn, Sb, РЗЭ, W, Pb, Bi и U по сравнению с кларком, за который приняты концентрации этих элементов в верхней части земной коры (Wedepohl, 1995). Большинство из выделенных элементов относится к элементам-индикаторам воздействия антропогенных факторов на водные объекты городов Мурманской области и их водосборные бассейны. Например, V, Ni, W и ряд других металлов поступают в озера города Мурманска в результате выбросов ТЭЦ, работающей на мазуте. Отложения озер Шуонияур и Комсомольское отличаются крайне высоким содержанием Ni, Cu, Cd, Co в результате работы медно-никелевых заводов.

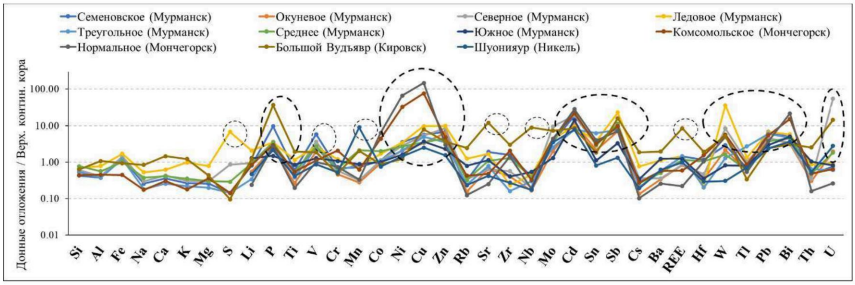


Рис. 1. Содержание главных и редких элементов в отложениях (верхние 10 см) городских озер Республики Карелии по отношению к кларку (среднему составу верхней части земной коры)

Кроме этого, в городских озерах отмечается повышенный уровень накопления в верхних слоях отложений элементов относимых к группе литофильных. Например, городские озера Мурманска и Мончегорска отличаются тем, что в результате поступления пылевых выбросов от разрушения дорог, зданий, пород водосбора осадки обогащаются РЗЭ, щелочными металлами, Th, Ba и Mn. Все это находит отражение в том, какие ассоциации элементов образуются в изученных отложениях. Факторная модель накопления редких элементов в отложениях озер города Мурманска показывает (Рис. 2), что главным фактором является время или палеолимнологический фактор. С ним хорошо коррелирую, как Pb, Cd, Sb, Ni, Cu, считающиеся загрязнителями городской среды, так и литофилы – Th, РЗЭ, Ba, Nb и другие. Концентрации всех указанных элементов увеличиваются в верхних слоях отложений, то есть при уменьшении глубины (она имеет отрицательную корреляцию с этим фактором). Второй фактор, по-видимому, отвечает за специфику редокс-активных элементов (Mn, Tl, U, Mo). Наибольшую

корреляцию с этим фактором имеет U, поступление которого в большей степени контролируется спецификой местных пород, которые имеют рудную минерализацию. Ранее уже сообщалось об урановых аномалиях в отложениях озер севера Мурманской области (Слуковский и др., 2020).

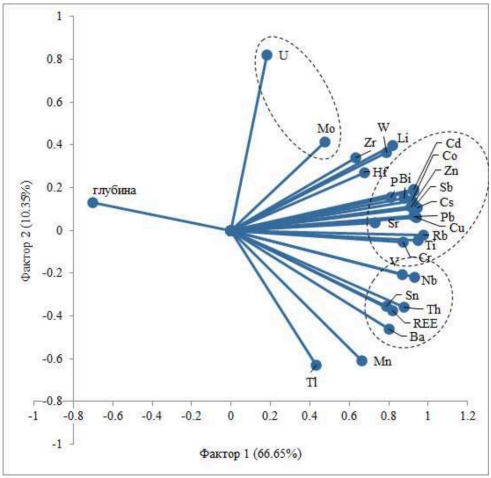


Рис. 2. Факторная модель геохимических особенностей современных отложений озер г. Мурманска

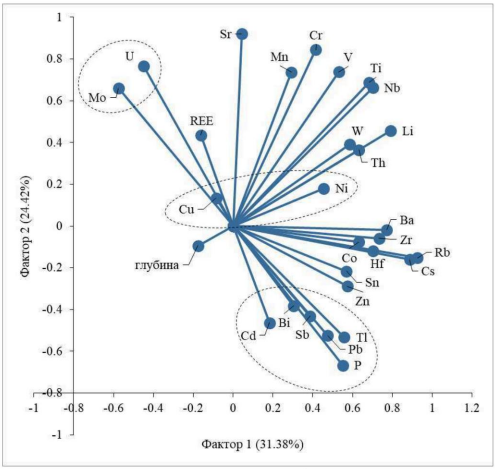


Рис. 3. Факторная модель геохимических особенностей современных отложений фоновых озер северо-запада Мурманской области

На фоновых территориях Мурманской области современные отложения также испытывают антропогенное влияние, однако в гораздо меньшей степени. Основными маркерами техногенного влияния тут являются элементы, являющиеся геохимическими

агентами дальнего атмосферного переноса. Например, из-за сжигания угля на различных предприятиях в атмосферу поступают Pb, Sb, Tl, Cd, Bi (Pacyna, Pacyna, 2001). Эти элементы выделяются в отдельную ассоциацию на факторной модели геохимических особенностей отложений озер, расположенных на полуостровах Рыбачий и Средний и на территориях вблизи них (Рис. 3). Также из-за влияния медно-никелевого производства Мурманской области верхние слои отложений фоновых озер региона обогащаются Ni и Cu. Кроме того, озера города Мурманска и озера на полуостровах Рыбачий и Средний попадают под влияние Лицевского уранового пояса, что находит отражение в особом положении U и связанного с ним Mo в факторной модели, представленной на рисунке 3. При этом, литофильные элементы (РЗЭ, Th, Ba) не накапливаются в верхних слоях отложений фоновых озер, как это происходит на городских территориях. Это говорит о том, что они могут выступать в качестве индикаторов антропогенного влияния только на территориях, где окружающая среда подвергается крайне сильному изменению – где в следствие строительства домов, дорог меняет ландшафт местности, что приводит к увеличению потока этих элементов из исходных образований в водные объекты.

Таким образом, в геохимии современных отложений озер Мурманской области можно проследить, как сильное антропогенное влияние (причем от разных источников загрязнения), так и влияние местных пород, имеющих рудную минерализацию (например, U и Mo). При развитии природоохранных мероприятий, затрагивающих водные объекты, следует учитывать полученные в данной работе данные. Особенно в случае проведения интегральной оценки загрязнения озер по таким параметрам, как геохимия донных отложений.

Литература

Даувальтер В.А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: МГТУ, 2012. 242 с.

Слуковский З.И., Гузева А.В., Даувальтер В.А., Удачин В.Н., Денисов Д.Б. Урановые аномалии в современных донных отложениях озер северной части Мурманской области, Арктика // Геохимия. 2020. Т. 65. №12. С. 1231-1236.

Субетто Д.А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции: монография. СПб: Изд-во РГПУ им. Герцена, 2009. 339 с.

Шелехова Т.С., Слуковский З.И., Лаврова Н.Б. Методы исследования донных отложений озер Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2020. 111 с.

Abril J.M. On the use of 210Pb-based records of sedimentation rates and activity concentrations for tracking past environmental changes // Journal of Environmental Radioactivity. 2022. V. 244-245. P. 1-14.

Dauvalter V., Maiseenko T., Rodyushkin I. Geochemistry of rare earth elements in Imandra Lake, Murmansk Area // Geochemistry International. 1999. V. 37. P. 325-331.

Delile F., Blichert-Toft J., Goiran J.-P., Keay S., Albarède F. Lead in ancient Rome's city waters // Proceed NAS USA. 2014. V. 111. P. 6594-6599.

Massaferro J., Porras M.E., Hassan G.S. Lakes as memories of the territory // Journal of Paleolimnology. 2024.V. 72. P. 77-78.

Pacyna J.M., Pacyna E.G. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide // Environmental Reviews. 2001. V. 9. P. 269-298.

Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. Vol. 59(7). P. 1217-1232.

Работа выполнена в рамках темы гранта РНФ 24-17-20006 «Фоновые озера Арктической зоны Мурманской области: гидрохимия, аномалии тяжелых металлов и

микропластик как новый тип загрязнения водоемов мира». Авторы признательны коллегам из ИППЭС КНЦ РАН Денисову Д.Б., Черепанову А.А., Гузевой А.В. за помощь в отборе проб донных отложений, а также аналитикам из ИГ КарНЦ РАН Эховой М.В., Утициной В.Л. и Парамонову А.С. за качественный химический анализ.

GEOCHEMISTRY OF THE MODERN LAKE SEDIMENT OF MURMANSK REGION: INFLUENCE OF NATURAL (GEOLOGICAL) FACTORS, URBANIZATION AND INDUSTRIAL ENTERPRISES

Z.I. Slukovskii, V.A. Dauvalter

Lake sediments are an indicator of the condition of the water body and its catchment area. Geochemical markers allow for the assessment of the impact on the lake from the natural environment, such as geology, as well as the influence of anthropogenic factors. The report presents generalized data from the study of a wide range of elements in the modern sediments of lakes in the Murmansk region from various areas of the region. It is shown that in the sediments in the northern part of the region, uranium and molybdenum geochemical anomalies are formed, which are associated with the influence of catchment rocks. In urbanized environments, such as the city of Murmansk, technogenic associations of elements are noted in the sediments, including Pb, Sb, V, Ni, and others. Paleolimnological reconstructions have provided a basis for assessing the regional geochemical background for the bottom sediments of lakes in the Murmansk region.

СОВРЕМЕННЫЙ РЕЖИМ ПРИТОКА БИОГЕННЫХ И ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В МОЖАЙСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Д.И. Соколов, О.Н. Ерина, М.А. Терешина
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

По данным гидрохимического мониторинга на главном притоке Можайского водохранилища – р. Москве в 2019-2023 гг. изучены особенности современного режима поступления в водохранилище биогенных и органических веществ. Показано снижение в речных водах среднегодового содержания общего азота в 3-4 раза, минерального фосфора в 2-3 раза, валового фосфора в 1,2-2 раза по сравнению с 1984 г. при сохранении сопоставимых величин ХПК и некотором увеличении цветности воды. Доля зимнего стока биогенных и органических веществ возросла с 10% до 20-35% из-за оттепелей, весеннего – с 40% до 50-60% за счет растянутого половодья, однако в 2020 г. 70% вещественного стока пришлось на аномальные летние паводки.

Характер круговорота химических веществ в водоемах в значительной степени зависит от поступления аллохтонных биогенных (БВ) и органических (ОВ) веществ. Особенно велика роль внешней нагрузки в формировании гидроэкологического состояния и трофического статуса долинных водохранилищ, поскольку приток речных вод составляет основу их водного и вещественного баланса (Богословский, 1974).

Главными биогенными элементами, лимитирующими развитие фитопланктона и вызывающими эвтрофикацию, считаются азот и фосфор. Поступление БВ в водоемы с водосборов происходит со смывом удобрений с сельхозугодий, сточными водами, отходами животноводства и др. К источникам аллохтонных ОВ относятся прежде всего гумусовые вещества, вымываемые из почв, лесной подстилки и т.д., смыв с

сельскохозяйственных водосборов и др. Чрезмерная внешняя нагрузка ОВ на водоемы снижает прозрачность воды, увеличивает потребление кислорода на деструкцию в гиполимнионе и донных отложениях, наряду с продукцией автохтонного ОВ усугубляя негативные последствия эвтрофирования (Даценко, 2007).

Для водохранилищ Москворецкого источника системы водоснабжения г. Москвы эвтрофирование является ключевой проблемой качества воды (Гидроэкологический …, 2014), что делает изучение режима поступления в них БВ и ОВ особенно актуальным. Наиболее изученным в этом отношении является Можайское водохранилище – головной водоем системы, более 2/3 притока в который обеспечивает р. Москва.

Верховья р. Москвы – последний участок, где сохраняется режим водного и вещественного стока, близкий к естественному. Поэтому основная внешняя нагрузка на Можайское водохранилище БВ и ОВ традиционно приходилась на весеннее половодье, когда талые воды характеризовались максимальными концентрациями фосфора, азота и органических веществ (Ерина и др., 2017; Соколов и др., 2017). Однако прежние исследования не учитывают выраженных изменений режима рек европейской территории России, вызванных потеплением климата (Blöschl et al., 2019).

В работе (Ерина и др., 2021) мы уже указывали на возможные последствия внутригодового перераспределения потоков БВ и ОВ для экологического состояния Можайского водохранилища в случае снижения роли половодья и увеличения роли дождевых паводков. В настоящей работе мы продолжаем изучение отклика гидрохимического режима р. Москвы на меняющиеся гидроклиматические и ландшафтные условия по материалам проводимого нами второе десятилетие комплексного мониторинга качества воды р. Москвы выше Можайского водохранилища.

Наблюдения на р. Москве производили в 2019-2023 гг. вблизи действующего гидрологического поста Росгидромета у д. Барсуки (55.6872° с.ш., 35.6020° в.д.). Все полевые и лабораторные работы проводились по единой методике на базе Красновидовской учебно-научной станции МГУ имени М.В. Ломоносова.

Наблюдения выполнялись с временным интервалом от 1 дня до 1 месяца: в период половодья и крупных паводков пробы, как правило, отбирались ежедневно или через день, в периоды устойчивой межени – с большими интервалами. Всего в 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 гг. отобрано соответственно 48, 42, 28, 14, 25 проб.

Содержание валового ($P_{вал}$) и минерального ($P_{мин}$) фосфора определяли фотометрически по методу Морфи-Райли в модификации для морских вод (РД 52.10.738-2010, РД 52.10.739-2010), содержание общего азота ($N_{общ}$) – фотометрически после персульфатного окисления в щелочной среде (Аналитические …, 2017). Химическое потребление кислорода (ХПК) как наиболее полную из косвенных характеристик содержания ОВ определяли титриметрически методом бихроматного окисления (ПНД Ф 14.1:2:3.100-97) в модификации А.П. Остапени (Остапеня, 1965), цветность воды (ЦВ) как показатель содержания окрашенных ОВ – фотометрически (ПНД Ф 14.1:2:4.207-04).

Расходы воды р. Москвы (Q) рассчитаны по ежедневным данным о суммарном притоке воды в Можайское водохранилище, приводимым в гидрологических справках Можайского гидроузла, и соотношению площадей водосбора Можайского водохранилища (1360 км^2) и р. Москвы в створе д. Барсуки (755 км^2). Расчленение гидрографов на фазы водного режима производилось графическим методом.

Рассматриваемые годы существенно различались по объему речного стока и характеру его внутригодового распределения (рис. 1). К весне 2019 г. значительная часть накопленного на водосборе снега испарилась, и половодье на р. Москве было низким (расход воды на пике в начале апреля не превышал 26 м^3/с) и растянутым с конца марта

по конец апреля. В отсутствие крупных паводков 2019 г. стал самым маловодным за рассматриваемый период (табл. 1).

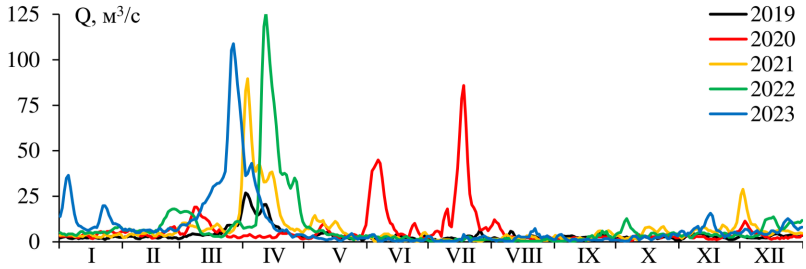


Рис. 1. Расходы воды р. Москвы (Q) в створе д. Барсуки в 2019-2023 гг.

К весне 2020 г. из-за оттепелей на водосборе почти не осталось снега, и повышение стока в начале марта было непродолжительным и крайне низким (расход воды менее 20 м^3/с), с сопоставимым вкладом снегового и дождевого питания. При этом май-июль были аномально дождливыми (в среднем в 2 раза выше нормы, в мае – почти в 4 раза, при этом только за 29-31 мая выпало 2 месячные нормы), что сформировало два выдающихся паводка в июне и июле с расходами воды до 45 и 86 м^3/с соответственно.

Зима 2020/21 г. была холодной и снежной, а половодье с конца марта до конца апреля – высоким и дружным, с расходом на пике в первых числах апреля до 90 м^3/с. По общей продолжительности летне-осенних паводков 2021 г. схож с 2020 г., однако расходы самого крупного из них в первой половине мая составляли менее 15 м^3/с.

Таблица 1. Годовой водный сток (V) и среднегодовые концентрации валового ($P_{вал}$) и минерального ($P_{мин}$) фосфора, общего азота ($N_{общ}$), величин ХПК и цветности воды (ЦВ) р. Москвы в створе д. Барсуки в 1984* и 2019-2023 гг.

Год	V, млн м^3	$P_{вал}$, мкг/л	$P_{мин}$, мкг/л	$N_{общ}$, мг/л	ХПК, мгО/л	ЦВ, град.
*1984**	*162*	*134*	*114*	*4.3*	*20*	*48*
2019	112	69	43	1.0	18	49
2020	197	113	65	1.2	28	108
2021	215	110	66	1.4	18	61
2022	244	110	60	1.3	19	57
2023	259	104	61	1.2	21	64

* по данным балансовых исследований 1984 г. (Ерина и др., 2017; Соколов и др., 2017)

Зимы 2021/22 и 2022/23 гг. отличались самыми частыми оттепелями с повышением расходов до 30 м^3/с и более, но снежными мартами, что обеспечило высокие продолжительные половодья с пиками во второй декаде апреля 2022 г. (126 м^3/с) и конце марта 2023 г. (109 м^3/с). Летне-осенний период этих двух лет был еще

засушливее, чем в 2019 г., однако за счет выраженного половодья по величине годового стока 2022 и 2023 г. стали самыми многоводными за рассматриваемый период.

Внутригодовую и межгодовую изменчивость содержания БВ и ОВ в р. Москве иллюстрирует рисунке 2. Минеральный фосфор по характеру колебаний содержания схож с валовым, а цветность воды – с величиной ХПК. Максимальные концентрации БВ и ОВ приурочены к фазам повышенного стока, но если в 2019 и 2021-23 гг. это половодье, то в 2020 г. – крупные летние паводки, что согласуется с материалами прежних лет (Ерина и др., 2021). Минимальное содержание БВ и ОВ наблюдается в глубокую летнюю межень, обычно в конце лета – начале осени. Обращает на себя внимание повышение содержания фосфора и особенно азота (в меньшей степени – показателей содержания ОВ) в осенне-зимний период, наиболее выраженное в годы с частыми оттепелями.

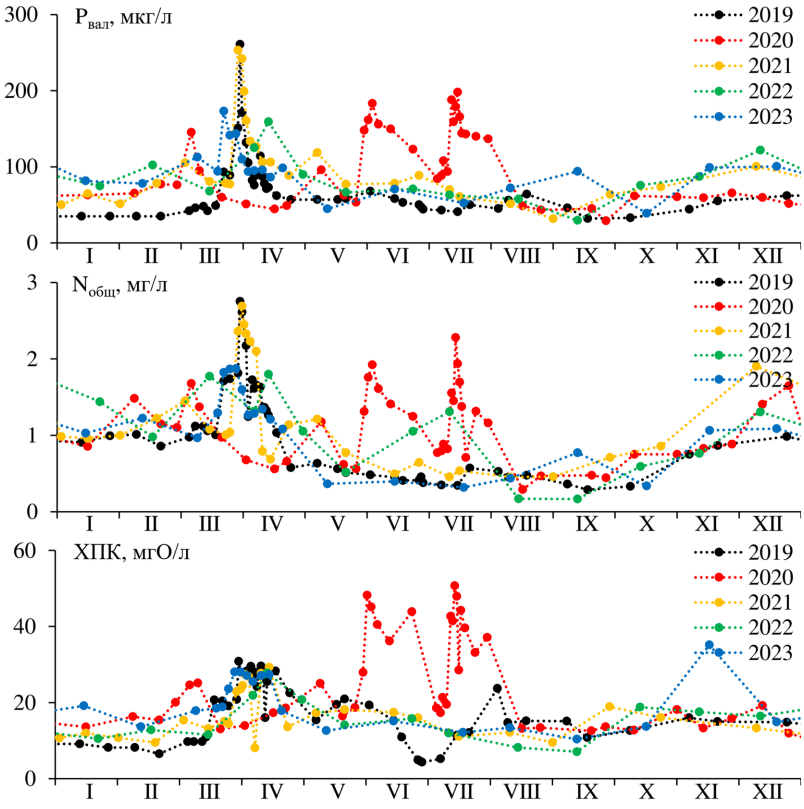


Рис. 2. Сезонная изменчивость концентраций валового фосфора ($Р_{вал}$), общего азота ($N_{общ}$), величин ХПК р. Москвы в створе д. Барсуки в 2019-2023 гг.

В таблицах 1 и 2 для сравнения современного гидрохимического режима р. Москвы с историческим периодом представлены оценки по данным 1984 г. – до

последнего десятилетия это был единственный год за время исследований водосбора Можайского водохранилища, когда мониторинг включал все рассматриваемые в настоящей работе показатели. За 40 лет среднегодовое содержание общего азота в речных водах снизилось в 3-4 раза, минерального и валового фосфора – в 2-3 и 1.2-2 раза при сохранении сопоставимых величин ХПК и увеличении цветности воды на 20%. Вероятно, снижение биогенной нагрузки связано с существенным сокращением сельскохозяйственной деятельности на водосборе в последние десятилетия.

Таблица 2. Внутригодовое распределение стока БВ и ОВ р. Москвы в створе д. Барсуки в 1984* и 2019-2023 гг. (ВП – весеннее половодье, ЛП – летне-осенние паводки, ЛМ – летне-осенняя межень, ЗМ – зимняя межень, ЗО – зимние оттепели)

Год	ВП, %	ЛП, %	ЛМ, %	ЗМ, %	ЗО, %
*1984**	*36-50*	*24-33*	*13-20*	*6-11*	*2-4*
2019	43-50	6-10	14-25	9-16	12-16
2020	7-10	62-76	8-11	3-8	5-10
2021	49-58	11-17	6-9	6-13	13-19
2022	55-71	2-4	6-9	7-15	12-21
2023	52-64	4-7	5-8	11-16	15-21

* по данным балансовых исследований 1984 г. (Ерина и др., 2017; Соколов и др., 2017)

Для рассматриваемых гидрохимических показателей в отличие от минерализации воды характерна прямая связь с расходом речных вод, т.к. именно талый и дождевой сток смывает с водосбора больше всего БВ и ОВ. За счет этого речной сток БВ и ОВ (табл. 2) повторяет внутригодовое распределение водного стока в еще более выраженной форме. Из таблицы видно, что в последние годы отмечается увеличение роли весеннего стока с 40-50% до 50-70%, что, по-видимому, связано с увеличением продолжительности периода половодья с 20-25 до 30-35 дней. Доля летне-осеннего стока, напротив, имеет тенденцию к снижению, за исключением аномально дождливого 2020 г.

Но существеннее всего – в 2.5-6 раз, до 15-20% и более от годового стока – возрос вклад зимних оттепелей в формирование внешней нагрузки БВ и ОВ на Можайское водохранилище. Продолжительность зимних и предвесенних паводков, вызванных оттепелями, возросла с 10 дней и менее до 30-50 дней и более (и зима 2024/25 г. свидетельствует о том, что это не предел наблюдаемых гидроклиматических изменений).

Наблюдения 2019-2023 гг. подтверждают снижение в речных водах среднегодового содержания общего азота в 3-4 раза, минерального фосфора в 2-3 раза, валового фосфора в 1,2-2 раза по сравнению с 1984 г. при сохранении сопоставимых величин ХПК и некотором увеличении цветности воды. Доля зимнего биогенных и органических веществ стока возросла с 10% до 20-35% из-за оттепелей, весеннего – с 40% до 50-60% за счет растянутого половодья, однако в 2020 г. 70% вещественного стока пришлось на аномальные летние паводки.

Результаты получены при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2024-614 от 13.06.2024).

Литература

Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П.А. Лозовика, Н.А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.

Богословский Б.Б. Основы гидрологии суши. Реки, озера, водохранилища. Минск: Издательство БГУ, 1974. 2016 с.

Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) / Под ред. К.К. Эдельштейна. М.: Перо, 2015. 286 с.

Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.

Ерина О.Н., Ефимова Л.Е., Терешина М.А., Соколов Д.И. Межгодовая изменчивость притока фосфора в Можайское водохранилище // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды Международной научно-практической конференции. Т. 2. Качество воды. Геоэкология. Пермь: ПГУ, 2017. С. 72–76.

Ерина О.Н., Терешина М.А., Соколов Д.И., Пуклаков В.В. Фоновое качество воды р. Москва на единственном участке с естественным гидрохимическим режимом // Экологическая химия. 2021. №1. С. 14–21.

Остапеня А.П. Полнота окисления органического вещества водных беспозвоночных методом бихроматного окисления // Доклады АН БССР. 1965. Т. 9. Вып. 4. С. 273–276.

Соколов Д.И., Ерина О.Н., Терешина М.А. Содержание органических веществ в притоках москворецких водохранилищ: возможности оценки при отсутствии данных мониторинга // Инженерные изыскания. 2017. №8. С. 30–43.

CURRENT REGIME OF NUTRIENT AND ORGANIC INFLOW TO THE MOZHAYSK RESERVOIR

D.I. Sokolov, O.N. Erina, M.A. Tereshina

Based on the data of hydrochemical monitoring on the main tributary of the Mozhaysk reservoir – the Moskva River in 2019-2023, the features of the current regime of nutrient and organic matter inflow into the reservoir are studied. It is shown that the average annual content of total nitrogen in river waters decreased 3-4 times, mineral phosphorus 2-3 times, total phosphorus 1.2-2 times compared to 1984, while maintaining comparable values of COD and some increase in water colour. The share of winter nutrient and organic matter runoff increased from 10% to 20-35% due to thaws, spring runoff – from 40% to 50-60% due to extended flooding period, but in 2020 70% of the matter runoff was generated by abnormal summer floods.

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В МЕРОМИКТИЧЕСКИХ ВОДОЕМАХ БЕЛОГО МОРЯ

Ю.Г. Соколовская[1], Е.Д. Краснова[1], Д.А. Воронов[2], С.В. Пацаева[1]
[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
[2]Институт проблем передачи информации РАН имени А.А. Харкевича

Изучены спектральные свойства растворенного органического вещества (РОВ) природной воды из естественных меромиктических водоемов – озер Трехцветное и Еловое. Для проб воды с разных горизонтов измерены спектры поглощения, флуоресценции, рассчитаны зависимости квантового выхода флуоресценции от длины волны возбуждения. Показано, что зависимости максимума полосы испускания или квантового выхода флуоресценции от длины волны возбуждения на всех исследованных глубинах в обоих озерах имеют схожий характер. Однако абсолютная величина квантового выхода флуоресценции различается в разных слоях воды, что обусловлено различием доли ароматических соединений в составе РОВ и связано с гидрохимическими характеристиками воды на разных горизонтах.

Растворенное органическое вещество (РОВ) природной воды играет важную роль в природных биохимических процессах и влияет на функционирование водных экосистем. Окрашенная фракция РОВ эффективно поглощает УФ свет и люминесцирует, от его состава и концентрации зависят оптические свойства природной воды (Глуховец, Гольдин, 2018; Романкевич и др., 2009). В настоящее время для исследования РОВ успешно применяются спектроскопия поглощения света и флуоресцентная спектроскопия. Отдельный интерес для исследования состава и распределения РОВ представляют меромиктические водоемы с устойчивой вертикальной стратификацией, возникающей из-за разной плотности слоев воды. Примером таких водоемов служат прибрежные водоемы, отделившиеся от Белого моря (Краснова, 2021; Краснова, Мардашова, 2020). В меромиктических озерах присутствует верхний аэробный слой воды и нижний слой с более высокой плотностью, который не перемешивается с верхним. Переходная градиентная зона между двумя этими слоями называется хемоклином. Из-за накопления растворенной и взвешенной органики и расхода кислорода на его химическое и бактериальное окисление в придонном слое нередко возникают анаэробные условия. Исследование РОВ в разных слоях прибрежных водоемов, находящихся на разных стадиях изоляции от моря, важно для понимания их эволюции и для разработки методов экологического мониторинга водных экосистем.

Цель данной работы — изучить спектрально-оптические характеристики РОВ в меромиктических водоемах естественного происхождения в Кандалакшском заливе Белого моря. Пробы природной воды отобраны в сентябре 2022 г. с разных горизонтов озер Трехцветное и Еловое. В момент отбора проб в оз. Трехцветное граница аэробной зоны находилась на глубине 2 м, поэтому были выбраны горизонты 0 м, 1.5 м, 1.975 м, 2.000 м, 2.225 и 2.450 м. В оз. Еловое граница аэробной зоны располагалась на глубине 3 м, для исследования были взяты глубины 0 м, и 1.500 м, 2.875 и 3.000 м, 3.100 м и 3.325 м. Для исследования РОВ перед спектральными измерениями пробы воды были профильтрованы через нейлоновые фильтры с диаметром пор 0.22 мкм. Спектры поглощения регистрировали на спектрофотометре Solar PB2201. Спектры флуоресценции измеряли на спектрофлуориметре Solar CM2203 при длинах волн возбуждения λ_{ex} от 250 до 500 нм. Диапазоны длин волн возбуждения и регистрации флуоресценции выбраны, исходя из известной информации о гуминовой и белковой полосах флуоресценции РОВ (Горшкова и др., 2009; Wünsch et al., 2015). Измеренные спектры флуоресценции скорректированы с учетом эффекта внутреннего фильтра. Гидрохимические характеристики образцов воды из оз. Трехцветное и Еловое: соленость, pH, окислительно-восстановительный потенциал (Eh) приведены в работе (Соколовская и др., 2023).

Измеренные спектры поглощения приведены на рисунке 1. Из рисунков видно, что, начиная с 205-210 нм, оптическая плотность D уменьшается с ростом длины волны, при этом около 260-270 нм заметно небольшое «плечо», наличие которого характерно для природной воды (Горшкова и др., 2009) и обусловлено присутствием фенольных групп или ароматических аминокислот в составе РОВ. Других пиков поглощения в образцах не обнаружено.

На рисунке 2 представлены спектры флуоресценции РОВ для некоторых горизонтов при возбуждении длинами волн от 250 до 500 нм.

При возбуждении в УФ диапазоне спектр флуоресценции РОВ состоит из двух перекрывающихся полос: слабой полосы с максимумом в области 300-350 нм (соответствующей белкам или фенольным соединениям), и полосы в видимой области спектра с максимумом 400-450 нм (соответствующей гуминовым веществам). В спектральном отклике РОВ исследованных проб воды также присутствует сигнал комбинационного рассеяния света молекулами воды в виде небольшого пика на

коротких длинах волн, который при увеличении длины волны возбуждения сливается с основной полосой флуоресценции РОВ.

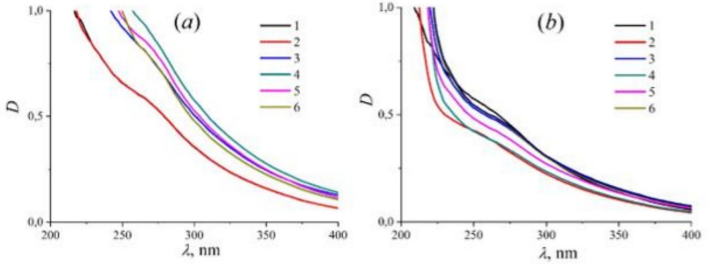


Рис. 1. Спектры поглощения света РОВ в пробах из оз. Трехцветное: горизонты 0 м, 2 – 1.500 м, 3 – 1.975 м, 4 – 2.000 м, 5 – 2.225 м, 6 – 2.450 м (*a*) и из оз. Еловое: горизонты 0 м, 2 – 1.500 м, 3 – 2.875 м, 4 – 3.000 м, 5 – 3.100 м, 6 – 3.300 м (*b*)

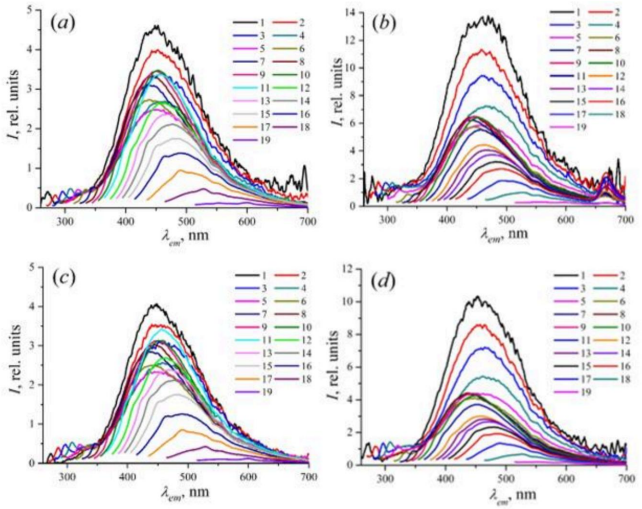


Рис. 2. Спектры флуоресценции РОВ в оз. Трехцветное – горизонты 0 м (a) и 2 м (b); и в оз. Еловое – горизонты 0 м (c) и 3 м (d). Кривые с 1 по 16 соответствуют *λex* 250-400 нм с шагом 10 нм, 17 – 420 нм, 18 – 450 нм, 19 – 500 нм

По полученным спектрам флуоресценции РОВ рассчитана зависимость длины волны, соответствующей максимуму спектра, от длины волны возбуждения (рис. 3).

С увеличением длины волны возбуждения примерно от 280 нм до 310 нм максимум флуоресценции сдвигается коротковолновую область. Это явление получило название «синего сдвига» полосы испускания. Ранее явление «синего сдвига» было отмечено в пробах природных гуминовых веществ морского (Donard et al., 1989), речного (Милюков и др., 2007) и почвенного происхождения (Shubina et al., 2009). Его наличие

свидетельствует о гетерогенности состава флуорофоров природного гуминового вещества.

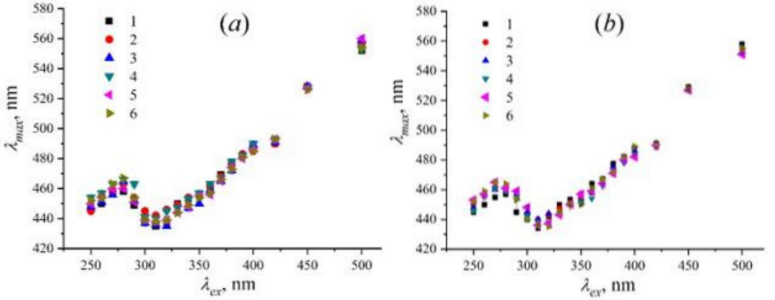


Рис. 3. Зависимости длины волны максимума полосы испускания флуоресценции РОВ λ_{max} от длины волны возбуждения λ_{ex} в оз. Трехцветное (*a*) и Еловое (*b*). Нумерация образцов такая же, как на рисунке 1

В оптической спектроскопии информативной величиной является квантовый выход флуоресценции (КВФ). В случае молекул красителей, а также окрашенной фракции РОВ, КВФ отражает вероятность того, что флуорофор будет излучать свет, возвращаясь в основное состояние после возбуждения светом, и определяется как отношение количества испущенных фотонов к количеству поглощенных фотонов (Lakowicz, 1986). В состав РОВ природной воды входят как соединения, испускающие флуоресценцию в результате поглощения фотона, так и поглощающие свет, но не флуоресцирующие. Поэтому можно сказать, что большая величина КВФ характерна для РОВ с большим содержанием ароматических групп. Отметим, что природа флуоресценции гуминовых соединений и РОВ природной воды еще не до конца выяснена, поэтому для РОВ, являющегося набором различных органических соединений, КВФ корректнее называть кажущимся или эффективным квантовым выходом флуоресценции (Хунджуа и др., 2017; Wünsch et al., 2015).

КВФ рассчитывали по спектрам испускания флуоресценции и спектрам поглощения света с использованием эталонного раствора сульфата хинина с известным КВФ по формуле:

$\Phi = \Phi_{qs} \frac{K}{K_{qs}}$, где Ф – квантовый выход флуоресценции образца, K и K_{qs} – отношения интегральной по спектру интенсивности флуоресценции к оптической плотности на длине волны возбуждения для образца воды и эталонного раствора соответственно, Φ_{qs}=0.546 – квантовый выход флуоресценции хинин-сульфата (Eaton, 1988). На рисунке 4 показаны зависимости КВФ от длины волны возбуждения для РОВ воды из оз. Трехцветное и Еловое.

Для РОВ поверхностной воды в оз. Трехцветное и Еловое характерен КФВ 1.7-1.8% при длине волны возбуждения 340 нм, что типично для РОВ пресной воды с умеренным содержанием гуминовых веществ. Значения КФВ уменьшаются возле верхней границы хемоклина в оз. Трехцветное (1.4-1.5%), но увеличиваются в оз. Еловое (2.4%). Такая разнонаправленная тенденция может объясняться различием гидрохимических характеристик воды и микробного сообщества в этих озерах над хемоклином: в оз. Еловое соленость воды в этой зоне значительно больше, чем в оз. Трехцветное. По мере увеличения глубины в зоне хемоклина в обоих озерах происходит

выравнивание значений КВФ до значений 1.6-1.7%, при этом зависимость КВФ от длины волны возбуждения остается сходной по форме на всех горизонтах, но возрастают значения КВФ при более длинноволновом возбуждении (> 390 нм) по сравнению с возбуждением УФ светом. Эта тенденция особенно заметна в оз. Трехцветное.

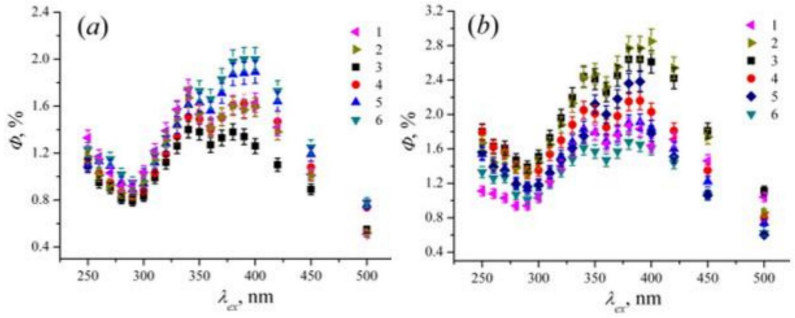


Рис. 4. Зависимости квантового выхода флуоресценции РОВ Ф от длины волны возбуждения для разных горизонтов воды в оз. Трехцветное (a) и Еловое (b). Нумерация образцов такая же, как на рисунке 1.

Схожесть флуорофоров, которые дают гуминовую полосу флуоресценции в спектре испускания РОВ природной воды из разных водоемов и с разных горизонтов, не является удивительным фактом, так как ранее на примере РОВ различного происхождения в пресноводных водоемах (река Суванни в Канаде, Онежское и Водопроводное озера в Карельской части России) было показано, что, независимо от происхождения (речное или озерное РОВ), географического положения и разного молекулярного размера РОВ, в образцах было обнаружено несколько сходных типов флуорофоров гуминового типа, выделенных хроматографически (Trubetskaya 2020).

Таким образом, полученные в данной работе значения КВФ и его зависимость от длины волны возбуждения для РОВ меромиктических водоемов в целом подтверждаются научными публикациями. Новым является сопоставление значений КВФ и его зависимости от длины волны возбуждения на разных горизонтах с различающимися характеристиками воды в стратифицированных водоемах Беломорского побережья и объяснение найденных различий. Исследования подобного рода важны для понимания механизмов формирования оптических свойств РОВ природной воды, изучения условий обитания микробных сообществ внутри водной толщи, а также для понимания эволюции меромиктических водоемов.

Авторы благодарят администрацию Беломорской биологической станции имени Н.А. Перцова МГУ имени М.В.Ломоносова за поддержку экспедиционных работ.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант №24-24-00008).

OPTICAL CHARACTERISTICS OF DISSOLVED ORGANIC MATTER IN MEROMICTIC WATER BODIES OF THE WHITE SEA

Yu.G. Sokolovskaya, E.D. Krasnova, D.A. Voronov, S.V. Patsaeva

The spectral properties of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) were studied in the water of natural meromictic lakes Trekhtzvetnoe and Elovoe. Absorption and fluorescence spectra were measured in water samples from different horizons, and the dependences of the fluorescence quantum yield on the excitation wavelength were calculated. It has been shown that the dependences of the maximum fluorescence emission or fluorescence quantum yield on the excitation wavelength at all studied depths in both lakes are similar. However, the absolute value of the fluorescence quantum yield varies in water layers due to the difference in the proportion of aromatic compounds in the CDOM composition, and is associated with the hydrochemical characteristics of water at different horizons.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИНЕРАЛЬНО-ГЕОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В НЕПРЕРЫВНОМ КЕРНЕ ИЗ ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЫ (ПОЗДНИЙ НЕОПЛЕЙСТОЦЕН - ГОЛОЦЕН)

В.Д. Страховенко[1,2], Д.А. Субетто[2], А.Е. Рыбалко[2,4], В.И. Малов[1,2], Н.А. Белкина[2,3], М.С. Потахин[2,3]

[1]Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
[2]Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена
[3]Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН
[4]ВНИИОкеангеология

В результате проведенного бурения со льда Петрозаводской губы Онежского озера в 2019 г. впервые вскрыт весь разрез надледниковых отложений, включая верхние горизонты донной морены, которая по сейсмоакустическим данным перекрывает поверхность коренных пород, и выше залегающие озерно-ледниковые и озерные отложения. Проведен сравнительный анализ современным комплексом минералого-геохимических методов непрерывного керна донных отложений мощностью 9,86 м (отложения неоплейстоцена и голоцена). Выявлено, что подавляющая часть осадочного материала озерно-ледниковых и озерных отложений представлена агрегатами пелитовой и алевро-пелитовой размерности и сформирована минералами: кварц, полевые шпаты, мусковит, иллит, хлорит, роговая обманка, а в верхней части разреза (голоценовые илы) добавляются минеральные фазы Fe и Mn (гетит, вивианит, сидерит, пиролюзит, родохрозит) и обломки панцирей диатомей (SiO_{2bio}).

Выбор точек для бурения со льда в Петрозаводской губе Онежского озера выполнен по данным сейсмоакустического профилирования, проведенного в 2018 году (Беляев и др., 2021; Рыбалко и др., 2023). Бурение донных отложений выполнено с помощью ударно-канатной системы UWITEC (Австрия) весной 2019 г. Детальное литологическое описание отобранных при бурении кернов донных отложений приведено в серии статей и монографии, опубликованных авторами ранее (Палеолимнология …, 2022; Рыбалко и др., 2023) и сопоставлены с работами других авторов (Бискэ и др., 1971; Семенович, 1973*;* Saarnisto, Saarinen, 2001; Демидов, 2004). Установлено, что разрез отложений снизу вверх включает: (1) верхние горизонты гляциальных отложений (валунный суглинок), которые по сейсмоакустическим данным перекрывают поверхность коренных пород; (2) флювиогляциальные отложения, представленные плотными серыми супесями с большим количеством несортированного грубообломочного материала; (3) толщу лимногляциальных ленточных глин, в которых выделены три литологически разнородные пачки (I пачка бежевого цвета, слоистость субгоризонтальная тонкая, консистенция мягкопластичная; II пачка серых,

мягкопластичных глин с горизонтальной слоистостью; III пачка серых микрослоистых глин); (4) толща раннеголоценовых озерных глинистых осадков сероватых оттенков, в основании которой залегает пачка тонких пепельно-серых гомогенных отложений алевропелит-пелитовой размерности, со стяжениями черных агрегатов (окислов марганца) (Strakhovenko et al., 2020; 2023); (5) толща зеленовато-серых с буроватым оттенком голоценовых илов, отражающих озерную стадию развития Онежского озера (Палеолимнология …, 2022). Цель исследования – на основе установления минерально-геохимических и генетических разностей донных отложений Онежского озера в петрозаводском разрезе последнего гляциоседиментационного цикла выявить основные черты перехода от литогенеза нивального типа к гумидному по мере деградации ледника валдайского оледенения.

Аналитические работы выполнены в центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, г. Новосибирск (атомно-абсорбционный анализ (49 проб), масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) (46 проб), рентгеновская дифрактометрия (XRD) (32 пробы), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) на микроскопе, снабжённом энергетическим спектрометром «OXFORD» (77 проб). Изучены особенности морфологии частиц, текстурные, структурные характеристики минеральных ассоциаций пачек донных отложений: валунный суглинок (2 образца), проксимальные ленточные глины (4 обр.), ленточные глины (35 обр., из них «розовый горизонт» 5 обр.), гомогенные глины (8 обр.), гомогенные илы (11 обр.), окисленные илы (6 обр.), рудные корки (3 обр.). В рамках данной работы расчет литохимических модулей производится по данным рентгено-флуоресцентного анализа (РФА) по формулам: индекс химического выветривания (CIA)=$100\times Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO^*+Na_2O+K_2O)$, где CaO*– содержание оксида кальция, входящего только в состав силикатной матрицы породы (Nesbitt and Young 1982); индекс изменчивости состава (ICV)= $(CaO + K_2O + Na_2O + Fe_2O_3(t) + MgO + MnO + TiO_2)/Al_2O_3$, где $Fe_2O_3(t)$ = общее железо, а CaO включает все источники Ca (Cox et al., 1995).

Проведенное сравнение литологического, геохимического, минералогического составов донных отложений из колонки SP-0002 (Петрозаводская губа) между отдельно выделенными пачками показало, что подавляющая часть осадочного материала озерно-ледниковых и озерных отложений представлена агрегатами пелитовой и алевро-пелитовой размерности и сформирована минералами: кварц, полевые шпаты, мусковит, иллит, хлорит, роговая обманка, а в верхней части разреза (охристые и гомогенные илы) добавляются минеральные фазы Fe и Mn (гетит, вивианит, сидерит, пиролюзит, родохрозит) и обломки панцирей диатомей (SiO_{2bio}). Максимальное количество минеральных фаз Fe и Mn отмечается в верхней части разреза (охристые и гомогенные илы), что хорошо согласуется с геохимическими данными (рис. 1).

Отличия между составом пачек керна заключаются в морфологии зерен, размерности и степени изменения. От подошвы отложений в колонке SP0002 вверх по разрезу количество слоистых силикатов (хлорит, иллит, хлорит-смектит) увеличивается по отношению к кварцу, полевым шпатам, достигая максимума в верхней части ленточных глин, а затем уменьшается в гомогенных илах. Данные по минеральному составу ленточных глин полностью соответствуют расположению фигуративных точек их состава на диаграмме CIA – ICV (рис. 2а) и тройной диаграмме направленности выветривания A–CN–K (рис. 2б). Расположение точек состава флювиогляциальных отложений, гомогенных и охристых илов на диаграмме в интервалах, относящихся в основном к преобразованному осадочному материалу, можно объяснить, либо присутствием большого количества кварца в составе морены, либо присутствием значительного количества тонкочешуйчатого железистого иллита (гомогенные илы), или аморфных агрегатов гидроокислов Fe и Mn (охристых илы) согласно данным СЭМ,

которые по данным XRD фиксируются как рентгеноаморфная фаза. Тренд выветривания точек составов донных отложений A–CN–K колонки SP0002 по мере увеличения интенсивности выветривания от ленточных глин к гомогенным илам соответствует динамике разрушения калиевого полевого шпата, плагиоклаза и биотита. По сравнению с PAAS – эталонным составом выветренных континентальных отложений, точки составов колонки SP0002 явно менее выветрены и попадают в область RPSC (состав неоплейстоценовых глин) и в область состава горных пород Балтийского кристаллического щита (голоценовые илы).

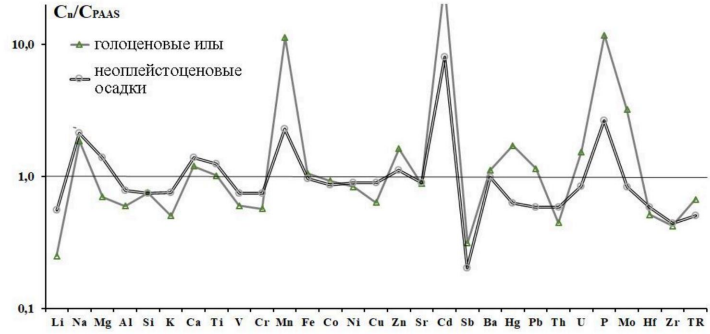


Рис. 1. Усредненные содержания элементов в выделенных пачках керна колонки SP-0002, нормированных на их содержания в PAAS (Taylor, McLennan, 1985)

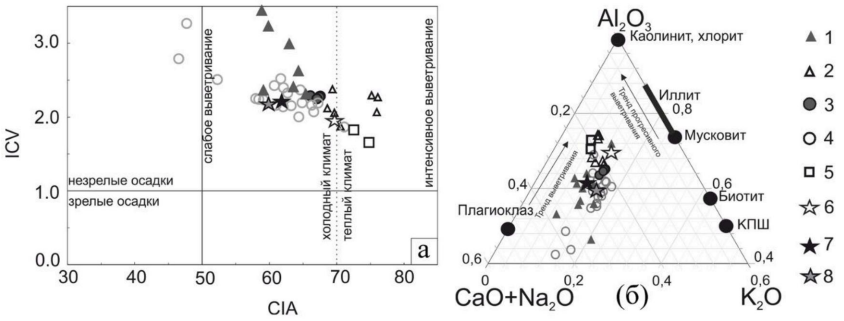


Рис. 2. Распределение фигуративных точек усредненного состава отдельных пачек осадков колонки SP-0002: (а) – на диаграмме CIA – ICV; (б) Распределение фигуративных точек состава отдельных пачек осадков колонки SP-0002 на тройной диаграмме направленности выветривания (Fedo et al., 1995). 1 – окисленный ил LnH; 2 – гомогенный ил + гомогенные глины LnH; 3 – розовый горизонт ленточных глин $lgIII_{os}$; 4 – ленточные глины $lgIII_{os}$; 5 – морена и флювиогляциальные отложения $gIII_{os}$ – $fgIII_{os}$; 6 – PAAS (Taylor, McLennan, 1985); 7 – горные породы Балтийского щита (Ronov, Migdisov, 1996); 8 – *RPSC* (Мигдисов и др.., *1994*)

Изучение геохимического и минерального состава донных отложений колонки SP0002 по выделенным горизонтам показало более высокие абсолютные содержания по

Mn, Fe, Hg, P, Mo, Cd для голоценовых отложений, что можно объяснить переходом к гумидному типу литогенеза. Для гумидного типа литогенеза, в отличии от нивального, характерно то, что осадочный материал образуется не только в результате механического выветривания, но и за счет химического разложения и жизнедеятельности организмов (Страхов, 1993). Уменьшение количества биотита, плагиоклазов, сопровождающиеся значительным ростом железа в составе хлорита, иллита и увеличением концентраций Mn, Fe, Hg, P, Mo, Cd можно объяснить, либо увеличением в общей массе минералов терригенной фракции акцессорных минералов (гематита, ильменита, рутила, монацита, магнетита, эпидота), либо за счет образования аутигенных минералов в процессе диагенеза. Появление в водной толще озера фосфора, запустившего процесс образования вивианита (фосфата железа с изоморфной примесью Mn) в донных отложениях в процессе диагенеза, способствовало накоплению Fe и Mn в гомогенных илах и лишь частичному возвращению их в водную толщу озера. Все эти данные свидетельствуют об увеличении роли химического выветривания, при формировании материала, поступающего при разрушении кристаллических пород. Схожесть спектров для голоценовых и неоплейстоценовых отложений по большинству элементам объясняется тем, что хоть водосборная территория изменилась (Zobkov et al, 2019), поступающий материал сохранил тот же вещественный состав, так как большая часть водосборного бассейна Онежского приледникового озера в неоплейстоцене включала в себя территории, сложенные осадочными породами Русской платформы. В настоящее время основная часть водосбора Петрозаводской губы Онежского озера расположена к северо-западу и к западу от озера и включает в себя территории, сложенные породами Балтийского щита и рыхлыми четвертичными отложениями. Поскольку осадочное вещество в северной части Русской платформы сформирован преимущественно материалом, сносимым с Балтийского щита во время оледенений, смещение водосборной территории на север не повлекло за собой существенного изменения состава сносимого материала, за исключением соотношения слоистых силикатов (мусковит, биотит, иллит, хлорит) между собой и к группе кварц+полевые шпаты.

Анализ петрохимических модулей, характера спектров, расположения фигуративных точек составов на различных диаграммах показал сходство всех характеристик для выделенных пачек донных отложений колонки SP0002: выявляется тренд берущий начало в области слабо измененных, не подвергшейся химической переработке минералов (ленточные глины) с последующим усилением поступления большего количества более разложенных, подвергшихся химической переработке разностей пород/минералов (гомогенные глины и илы), с возвратом снова к поступлению в современное время (охристые илы и часть гомогенных илов) тонкозернистого алюмосиликатного слабо выветрелого материала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00206, https://rscf.ru/project/24-17-00206

Литература

Бискэ Г.С., Лак Г.Ц., Лукашов А.Д., Горюнова Н.Н., Ильин В.А. Строение и история котловины Онежского озера. Петразаводск: Изд-во «Карелия», 1971. 74 с.

Демидов И.Н. Донные отложения и колебания уровня Онежского озера в позднеледниковье // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2004. №7. С. 208–218.

Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 431 с.

Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. 333 с.

Семенович Н. И. Донные отложения Онежского озера. Л: Наука, 1973. 104 с.

Страхов Н.М. Избранные труды. Осадкообразование в современных водоемах. М.: Наука, 1993. 396 с.

Cox R., Lowe D.R., Cullers R.L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. V. 59. №14. P. 2919-2940.

Fedo C.M., Wayne Nesbitt H., Young G. M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. Geology. 1995. V. 23. №10. P. 921-924.

Nesbitt H., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. 1982. V. 299. №5885. P. 715-717.

Ronov A.B., Migdisov A.A. Quantitative regularities of the structure and composition of sedimentary sequences in the East European Platform and Russian Plate: Their Position in the Series of Ancient Platforms of the World // Lithology and Mineral Resources. 1996. V. 15. P. 445–467.

Saarnisto M., Saarinen T. Deglaciation chronology of the Scandinavian Ice Sheet from the Lake Onega Basin to the Salpausselka End Moraines // Global and Planetary Change. 2001. V. 31. P. 387–405.

Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. Oxford: Blackwell Sci. Publ., 1985. 330 p.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE MINERAL AND GEOCHEMICAL COMPOSITION OF THE BOTTOM SEDIMENTS OF LAKE ONEGA IN A LONG SEDIMENT CORE FROM THE PETROZAVODSK BAY (LATE PLEISTOCENE - HOLOCENE).

V.D. Strakhovenko, D.A. Subetto, A.V. Rybalko, V.I. Malov, N.A. Belkina, M.S. Potakhin

As a result of drilling from the ice of the Petrozavodsk Bay of Lake Onega in 2019, the entire section deposits was recovered for the first time, including the upper horizons of the moraine, which, according to seismoacoustic data, overlaps the surface of bedrock, and limno-glacial and lacustrine sediments. A comparative analysis of the modern complex of mineralogical and geochemical methods of continuous core of bottom sediments with a thickness of 9.86 m (the Pleistocene and Holocene) has been carried out. It was revealed that the vast majority of the sedimentary material of limno-glacial and lake bottom sediments is represented by aggregates of clay and silty-clay dimensions and is formed by minerals: quartz, feldspar, muscovite, illite, chlorite, hornblende, and mineral phases Fe and Mn (goethite, vivianite, siderite) are added in the upper part of the section (Holocene silts), pyrolusite, rhodochrosite and fragments of diatom shells ($SiO2_{bio}$).

ЭКОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОЗЁР САЛТАНЫ НЮРБИНСКОГО УЛУСА РС(Я)

Т.П. Трофимова

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

В статье рассматривается современное состояние исследованных озёр, используемых в хозяйственно-питьевом потреблении. Установлено, что качественный и количественный составы растворенных компонентов определяется геохимической структурой водосбора,

окислительно-восстановительной и кислотно-щелочными условиями водной среды. Во временном отрезке зафиксировано увеличение концентраций макрокомпонентных ионов и минерализации воды. Показатели $БПК_5$ и перманганатной окисляемости указывают насыщение толщ воды легкоокисляемыми органическими веществами. Выявлено, что озера имеют II-й и III-й классы качества по ИЗВ. Отмечено увеличение перманганатной окисляемости, минерализации, общей жесткости, индекса загрязненности и понижение класса качества вод по сравнению с 2001 годом.

Республика Саха (Якутия) богата своими поверхностными водными ресурсами – реками и озёрами. На территории республики насчитывается более 723 тыс. озёр с размером больше 1 га. Традиционно для хозяйственно-питьевых нужд населением широко используются озёрные водоисточники. При этом в большинстве сельских населенных пунктов вода из естественного природного источника потребляется даже без предварительной подготовки. Малоподвижные (иногда стоячие) озёрные воды, способны аккумулировать и трансформировать вредные ионы и их соединения. С другой стороны, фотосинтез водорослей, биологические и биохимические процессы, происходящие в толще воды, нередко способствуют диагенезу загрязняющих веществ и самоочищению озёрных питьевых вод.

Исследуемые озёра (Долбони, Аччыгый Эбэ) принадлежат бассейну р. Вилюй и расположены на административной территории Чаппандинского наслега участка Салтаны. Местность Салтаны является излюбленным местом отдыха населения городских жителей Нюрбы, в последнее десятилетие активно застраивается дачными домами, а также с советских времен на территории действует школьный летний лагерь. Цель данного исследования заключается в выявлении современного состояния озёрных вод местности Салтаны – основных источников хозяйственного-питьевого водопотребления. Для этого определены количественные и качественные показатели, выявлена комплексная оценка по индексу загрязненности воды (ИЗВ), проведено сравнение трансформации качества вод.

По региональной ландшафтно-лимногенетической классификации озёр Якутии И.И. Жиркова исследованные озера имеют эрозионно-термокарстовый тип, террасовых равнин. Озёра расположены рядом и имеют удлинённую с юга на север котловину, с небольшим отклонением длинной оси озера с ортогональной ориентировки на диагональный. Склоны озера невысокие, на водосборной площади расположены жилые дома и различные хозяйственные постройки. Морфометрические показатели озёр отражены в таблице 1. Донные осадки оз. Долбони представлены комковатым, слегка маслянистым сапропелевым илом черного цвета, оз. Аччыгый Эбэ – творожисто-комковатым черным илом со слойками глины на отобранных колонках отложений.

Таблица 1. Основные морфометрические параметры озёр

Параметры / Озеро	Долбони	Аччыгый Эбэ
Уровень воды, м Балтийской системы	110,60	111,48
Площадь зеркала воды, $км^2$	1,41	0,45
Площадь водосбора, $км^2$	11,79	9,58
Объем воды, млн. $м^3$	1,269	0,90
Максимальная глубина, м	4,0	3,15
Средняя глубина, м	0,9	2,0
Длина, км	2,716	1,141
Длина береговой линии, км	6,025	3,520
Максимальная ширина, км	0,733	0,614
Средняя ширина, км	0,519	0,394

В ходе гидрохимического исследования изучены органолептические показатели, растворенные газы, биогенные элементы, органические вещества и макрокомпоненты. Кроме того, установлены количественные показатели некоторых тяжелых металлов, таких как медь, свинец, марганец и цинк. Химические анализы воды озер проводились по общепринятым в гидрохимии гостированным методикам. С озера были отобраны поверхностные и придонные пробы воды. Определения физических свойств и газового состава воды проводились непосредственно на месте отбора проб. В лабораторных условиях состав озерных вод изучался химико-аналитическими и спектрально-фотометрическими методами.

В момент исследования газовый режим озёр характеризуется высоким процентом насыщения толщ воды кислородом, малым количеством сероводорода и оптимальным содержанием двуокиси углерода для комфортного протекания процесса фотосинтеза.

Содержание кислорода в толще воды озера Аччыгый Эбэ колеблется от 89,0 до 78,2% по вертикали от поверхности ко дну, при этом различие наблюдается и в распределении водородных ионов (8,25-9,0 pH), активная среда смещена в сильнощелочную сторону. Нагревание толщ воды способствует усилению процесса фотосинтеза, что свою очередь приводит к смещению водородного показателя воды (pH) в щелочную сторону. Концентрация растворенного кислорода в воде озера Долбини низкая (25,54-25,37 % насыщения), при этом зафиксирована достаточное количество свободной двуокиси углерода (55-35,2 мг/л). Величина pH колеблется в пределах 7,75-8,0 по вертикали от поверхности ко дну и показывает установление слабощелочной среды, при наличии свободной CO_2.

Из биогенных элементов изучены минеральные формы азота, фосфора и железа. В озере Аччыгый Эбэ содержание ионов аммонийного азота зафиксировано в пределах ПДК (0,15–0,2 мг/л по вертикали). В озере Долбони отмечено превышение аммония на уровне 2,65ПДК в придонных слоях воды. Присутствие ионов аммония связано в основном с процессами биохимического разложения. Основными источниками поступления ионов аммония в водные объекты являются животноводческие фермы, хозяйственно-бытовые стоки и поверхностный сток сельскохозяйственных угодий. Концентрация ионов нитрита в водах озер незначительна, достигает сотых долей мг/л. Нитритный азот неустойчивое соединение и накапливается при усилении процессов разложения органических веществ в условиях более медленного окисления нитритов в нитраты. Содержание нитратных ионов также колеблется в пределах норматива. Величина минеральной формы фосфора в исследованных водах колеблется от 0,25 до 0,5 мг/л. Концентрация ионов железа (III) минимальны и зафиксированы в размере 0,05-0,08 мг/л.

Кроме того, в работе рассмотрены содержание микроэлементов (F, Mn, Cu, Zn, Pb) в толще воды. Элементный состав проведен в Аналитическом центре Геологического института СО РАН методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Анализ количественных данных (мкг/г) воды показывает, что концентрация в воде изученных тяжелых металлов находятся в пределах предельно-допустимых концентраций. Содержание фторидных ионов также незначительно 0,1-0,14 мг/л при нормативе 1,5 мг/л. Поверхностные воды на территории Якутии характеризуются минимальным количеством ионов фтора, что безусловно отражается на здоровья населения, отмечается высокий уровень заболевания кариесом зубов.

Минеральный состав воды интересен тем, что отражает результат взаимодействия воды как физической фазы и среды жизни с другими фазами: твердой, т.е. береговыми и подстилающими, а также почвообразующими минералами и породами; газообразной и воздушной средой и содержащейся в ней влагой и минеральными веществами.

Концентрация макрокомпонентов исследованных проб находятся в пределах своих нормативов. Вода озерной массы Аччыгый Эбэ определяется как гидрокарбонатно-натриевого типа. Солевой состав озера Долбони имеет более сложное строение – гидрокарбонатно-натриевый тип в донных слоях сменяется хлоридно-натриевым типом. Концентрации макрокомпонентов имеют сезонную изменчивость и составляют общую минерализацию воды. Общая минерализация озера Аччыгый Эбэ колеблется в пределах 798,1-860,57 мг/л, у оз. Долбони в поверхностных слоях достигает 1050,2 мг/л и увеличивается до 1351,88 мг/л, за счет повышения доли хлоридных ионов (527,53 мг/л). По минерализации исследованные озера относятся к пресным водам.

Жесткость исследованных озёр по классификации О.А. Алекина характеризуются как «умеренно-жесткие» воды, магниевого характера. Такой характер жесткости характерно для большинства озёр Вилюйского региона по сравнению с озёрами заречной части Центральной Якутии.

С экологической точки зрения наибольший интерес вызывают окисляемость, биохимическое потребление кислорода и общая минерализация воды.

В воде исследованных озер постоянно присутствуют органические вещества, которые имеют автохтонное происхождение, преимущественно фитопланктонное. Отмечено незначительное превышение ПДК по величине перманганатной окисляемости (5,07-6,76 мгО/л). Это подтверждается показателями $БПК_5$ (от 5,3 до 8,06 мгO_2/л), значение которого является отражением количества легкоокисляющихся органических веществ. Массовое развитие и отмирание (короткий жизненный цикл) фито- и зоопланктонных организмов способствуют повышению показателей окисляемости.

Для анализа изменения качества воды использованы данные Лаборатории озероведения по этим же озерам, проведенные летом 2001 г. Сравнение концентраций главных ионов и минерализации воды озёр Долбони и Аччыгый Эбэ показывает, что минерализация воды в открытый период воды увеличивается (рис. 1А). Увеличение минерализации возможно связано с уменьшением площади зеркала воды озера и связанное с ним засоление воды в течение 22 лет. По отношению общей жесткости также отмечается повышение значения, но при этом сохраняется «средняя» жесткость воды по классификации (рис. 1Б).

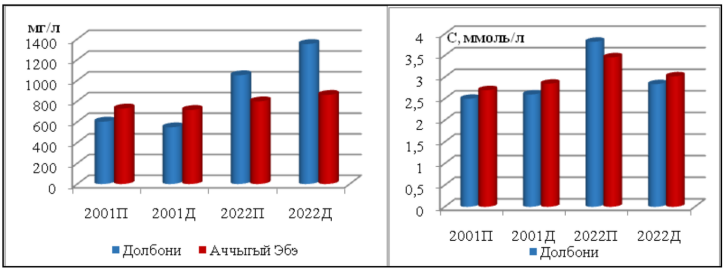


Рис. 1. Временная трансформация: А – общей минерализации; Б – общей жесткости

В данной работе экологическое состояние озёр выявлено по оценке уровня загрязненности воды (РД 52.24.643—2002). Комплексная оценка дает представление о степени загрязненности воды либо о ее качестве, отражает совокупность характеристик состава и свойств воды относительно количественных характеристик для определенного вида водопользования или водопотребления. Из всех разработанных в последнее время оценок наиболее предпочтительной является индекс загрязненности воды (ИЗВ),

который широко используется в системе Управления гидрометеорологической службы РФ. Целый ряд других комплексных оценок, для расчёта которых необходимы большие затраты времени, не дают преимуществ по сравнению с ИЗВ. Упрощенная оценка по показателю ИЗВ позволяет провести сравнение качества различных водных объектов между собой (независимо от присутствия различных загрязняющих веществ), выявить тенденцию качества вод по годам.

Индекс загрязненности воды озера Долбони по данным 2022 г. варьирует в пределах 1,33-1,71 по вертикали от поверхности ко дну, что соответствует «умеренно-загрязненной» и имеет III класс качества; озеро Аччыгый Эбэ – 0,94- 0,88, т.е. «чистая» и II класс качества. При этом в сравнении данными 2001 года зафиксировано увеличение индекса за 20 лет, где величина ИЗВ меньше единицы, озера имели II класс качества, т.е. были «чистыми».

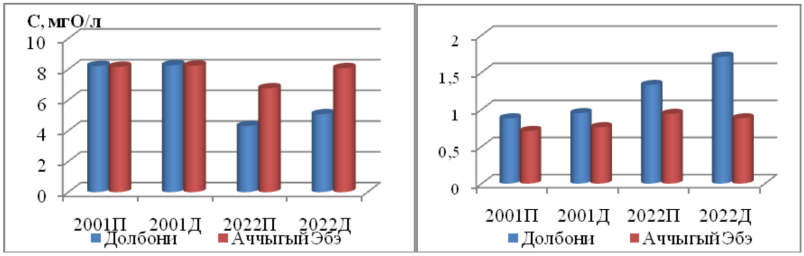


Рис. 2. Временная трансформация: А – перманганатной окисляемости;
Б – индекса загрязненности вод

Проведенные эколого-гидрохимические исследования озёр позволяют сделать следующие выводы:

- озёра обладают достаточными ресурсами, объем воды суммарно достигает примерно 2 млн. $м^3$;
- сравнения гидрохимических показателей за 2001 и 2022 годы показала увеличение количественных данных главных ионов и закономерное повышение минерализации воды;
- отмечено снижение концентраций органического вещества в толще воды во временной трансформации (рис. 2А);
- зафиксировано увеличение индекса загрязненности вод до 1,71 (рис. 2Б) и снижение класса качества вод.

В целом, эколого-гидрохимическое состояние исследованных озёр можно характеризовать как «удовлетворительное», они сохранили способность «самоочищаться» после продолжительного зимнего режима за короткий летний период.

Литература

Жирков И.И. Схема лимногенетической классификации озер Северо-Востока России // Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2014. №34. С. 18-26.

Никаноров А.М. Гидрохимия. Ростов-на-Дону: НОК, 2008. 462 с.

РД 52.24.643—2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям.

ECOLOGICAL AND HYDROCHEMICAL STUDY OF SALTANA LAKES NYURBINSKY ULUS OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

T.P. Trofimova

The article examines the current state of the studied lakes used in household and drinking consumption. It has been established that the qualitative and quantitative composition of dissolved components is determined by the geochemical structure of the catchment, redox and acid-alkaline conditions of the aquatic environment. In the time period, an increase in the concentration of macrocomponent ions and mineralization of water was recorded. Indicators of BPK5 and permanganate oxidizability indicate saturation of water strata with easily oxidizable organic substances. It was revealed that the lakes have II and III quality classes according to IZV. An increase in permanganate oxidizability, mineralization, general hardness, pollution index and a decrease in the class of water quality compared to 2001 were noted.

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ ОЗЕР ПРИКАЗАНСКОГО РАЙОНА МЕТОДОМ НЕЙРОСЕТЕВОГО КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

Ю.А. Тунакова, С.В. Новикова, Е.В. Байбакова
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ

В статье представлены результаты изучения многолетнего ряда наблюдений за химическим составом вод трех озёр различного происхождения, расположенных в пределах г. Казани и его окрестностях. Исследование проведено для выявления особенностей состава вод, с использованием метода нейросетевой кластеризации. Получены значения показателей, определяющих изменчивость состава воды исследуемых озер по кластерам.

Озера Приказанского района характеризуются варьирующим в довольно широких пределах составом и минерализацией, что определяется, в первую очередь, характером (источником) их питания (Мусин, 2019). Количественный учет всех факторов, определяющих химический состав озер остается до сих пор трудной задачей. Но анализ химических показателей позволяет в большей степени особенности химических составов воды озер, что важно при разработке мер по регулированию антропогенного воздействия на них. Однако, в настоящее время, известны различные подходы для выделения особенностей формирования химического состава вод озер, например, (Беляева, 1985; Янин, 2012), но нет единого общепринятого. Озера Республики Татарстан отличаются разнообразием типов вод по гидрохимическому режиму (минерализации, ионному составу и основным свойствам воды). Большинство озер имеет гидрокарбонатные воды, характеризуясь малой и средней минерализацией (0,2-0,5 г/л). Исследования проводились на озерах с отличным происхождением и составом вод: Изумрудное (карьер), Архиерейское, Ковалинское (2014-2021 гг.). Озера Ковалинское (88,2 га) и Архиерейское (60,1 га) относятся к одним из наиболее крупных. Озеро Архиерейское в Лаишевском м.р. является карстовым, глубоководным (22 м) озером.

Пробы отбирались на гидрохимических постах МЭПР РТ, расположение которых регламентировано требованиями мониторинга фонового состояния водных объектов. В пробах воды определялось содержание следующих показателей: алюминий, мг/дм^3, аммоний ион, мг/дм^3; $БПК_5$, мг/дм^3; взвешенные вещества, мг/дм^3; гидрокарбонаты,

мг/дм^3; железо, мг/дм^3; жесткость, общая жесткость (в градусах жесткости); кальций, мг/дм^3; кислород раствор., мгO_2/дм^3; магний, мг/дм^3; марганец, мг/дм^3; медь, мг/дм^3; нефтепродукты, мг/дм^3; никель, мг/дм^3; нитраты, мг/дм^3; нитриты, мг/дм^3; общее содержание ионов (минерализация), мг/дм^3; прозрачность, см; сульфаты, мг/дм^3; температура,^{0}С; фенол, мг/дм^3; фосфат ион, мг/дм^3; ХПК, мг/дм^3; хлориды, мг/дм^3; цинк, мг/дм^3; электропроводность, мкСм/сдм.

Для выделения особенностей химического состава вод использовались методы нейросетевого кластерного анализа. С помощью кластерного анализа можно произвести выборку данных, имеющих, в заданном формате, общие (похожие) свойства. Если данные внутри своего класса должны быть максимально идентичны друг другу, то данные, относящиеся к различным классам, должны быть максимально не похожими друг на друга (Gan, 2007; Thomas, 2018; Bu J., 2020). На начальном этапе имеющиеся наборы измеренных гидрохимических показателей различных водных объектов конкретного водного бассейна кластеризуются, то есть распределяются на более или менее однородные группы. Оценка степени детализации разбиения проводится экспертом (специалистом в данной предметной области). Таким образом, с учетом мнения эксперта определяются классы природных вод с однородными гидрохимическими показателями и с заданной степенью детализации. Как рассматривалось ранее, кластеризация проведена с применением нейронных сетей Кохонена, преимуществом которых является способность к дообучению при поступлении новых данных, и выделение неоднородных групп с заданной степенью точности с применением алгоритма подобного алгоритму k-средних. Кроме того, достоинством данной модели является простота визуализации, что упрощает качественную интерпретацию для экспертов в дальнейшем (Сивоголовко, 2011). В результате разведывательных экспериментов по сравнению точности алгоритмов кластеризации (K-means, иерархическая агломеративная и делительная кластеризация и SOM), точность алгоритма SOM оказалась выше на 11%. Сравнение проводилось по критериям разделяемости (FM-критерий) и плотности (SWC-критерий) кластеризации (Кремлёва и др., 2018).

Разработанный метод нейросетевой кластеризации с нечеткими элементами и экспертным оцениванием для классификации поверхностных вод и выделения региональных пороговых значений гидрохимических показателей состоит из трех вычислительных блоков и двух блоков проверки условий. Первый вычислительный блок представляет собой кластеризующий алгоритм с последующей двумерной визуализацией SOM-картами. В этом блоке осуществляется предварительная обработка входных векторов, производится грубое разбиение значений гидрохимических показателей на группы. Алгоритм может использоваться как самостоятельно, так и в качестве элемента второго вычислительного блока.

Второй блок для вычисления представлен деревом кластеризующих алгоритмов на основе нейросети Кохонена, являющихся последовательными и упорядоченными. Они, по мере необходимости, осуществляют более глубокую детализацию группировок. Этот блок применяется для группировки данных с повышенной точностью.

Третий вычислительный блок является вспомогательным, в нем осуществляется кодирование данных типа «дата-время» для адекватного расчета расстояний между кластеризуемыми векторами, для учета сезонности, он не может использоваться самостоятельно.

Для адекватного расчета расстояний между такими векторами данных был разработан специальный метод кодирования, который позволяет представить каждую отдельную дату в виде четырехмерного вектора. Каждый элемент такого вектора показывает, в какой степени данная дата относится к одному из четырех сезонов. Для

адекватного расчета расстояний между такими векторами данных был разработан специальный метод кодирования, который позволяет представить каждую отдельную дату в виде четырехмерного вектора. Каждый элемент такого вектора указывает, в какой степени указанная дата относится к одному из четырех сезонов.

Блоки проверки условий используются для переключения между вычислительными блоками. В частности, первый условный блок определяет, требуется ли предварительное кодирование, то есть будет ли использован вспомогательный вычислительный блок; второй условный блок определяет необходимость прямой либо последовательной кластеризации, то есть осуществляет переключение между блоками первого и второго типов.

Метод, таким образом, реализует поэтапную группировку данных в зависимости от заданных условий (Тунакова и др. 2023).

Блок прямой нейросетевой кластеризации представляет собой двухслойную самоорганизующуюся нейронную сеть типа «сеть Кохонена». Способ расположения нейронов – двумерная прямоугольная решетка. Обучается по модифицированному алгоритму «победитель получает все» с последовательно уменьшающейся мерой соседства согласно формуле:

$$\Delta w_{i*}^{T} = \eta\Lambda(|i - i^*|)\left(x^{T} - w_{i*}\right), \quad (1)$$

Где Δw_{i*}^{T} – приращение вектора весов нейрона *i**; *i** – нейрон-победитель для входного вектора *x*; w_{i*} – вектор весов нейрона *i**. Нейрон – победитель выбирается из условия, что его вектор весов w_{i*}, находится ближе к данному входному вектору*x*, чем у всех остальных нейронов: $|w_{i*} - x| \le |w_i - x|$ для всех *i*. $|i - i^*|$ – расстояние от произвольного нейрона i до нейрона-победителя; $\Lambda(|i - i^*|)$ – функция соседства. Данная функция равна единице для нейрона –победителя с индексом *i** и уменьшается с расстоянием по закону:

$$\Lambda(a) = \exp\left(\frac{-a^2}{\sigma^2}\right) \quad (2)$$

η – скорость обучения, σ – радиус взаимодействия нейронов (Тунакова и др., 2023).

Блок поэтапной нейросетевой кластеризации осуществляет построение дерева связанных между собой нейросетевых кластеризующих алгоритмов с увеличением степени точности группировки на каждом уровне дерева. Анализ полученных в результате кластеризации групп и их дальнейшая кластеризация (формирование уровней каскада с повышением степени детализации) продолжается до тех пор, пока для всех выделенных групп не будет достигнута приемлемая по мнению эксперта степень однородности.

Псевдо-нечеткое кодирование данных типа «дата-время» представляет собой алгоритм, заменяющий единственное значение даты-времени вектором из четырех значений, каждое из которых выражает степень принадлежности указанной даты к одному из четырех сезонов. В результате кодирования дата *x* представляется вектором (последовательностью) *Y*=(y_1, y_2, y_3 , y_4), где 1-2-3-4 – коды времен года, $y_i = f^{i}(x)$. – степень принадлежности *x* ко времени года i, $f^{i}(x)$ - кодирующая функция для времени года *i*:

$$f^{i}(x) = \exp\left[-\left(\frac{x - m_i}{\sigma_i}\right)^2\right] \quad (3)$$

m_i, – числовое значение типа «дата – время», в наибольшей степени соответствующее времени года i; $\sigma_i = \frac{b_i}{3}$; b_i, - максимальное отклонение даты от значения m_i, при котором дата еще соответствует времени года i.

Таблица. Значения показателей, характеризующих изменчивость состава воды исследуемых озер по кластерам

Озеро	Аммоний ион, мг/дм^3	БПК$_5$, мгO$_2$/дм^3	Взвешенные вещества, мг/дм^3	Гидрокарбонаты, мг/дм^3	Жесткость, °Ж	Кислород раствор, мгO$_2$/дм^3	Минерализация, мг/дм^3
Кластер 0							
Изумрудное	0,19	1,0	36,0	112,0	2,92	9,66	275,0
Изумрудное	0,091	0,0	17,3	126,0	3,07	12,6	309,0
Изумрудное	0,43	0,0	37,0	121,0	3,3	7,07	277,0
Ковалинское	0,236	4,1	107,0	145,0	3,3	8,62	285,0
Архиерейское	0,29	1,35	32,5	127,0	3,4	6,91	284,0
Кластер 1							
Архиерейское	0,169	0,2	20,3	62,6	0,93	0,0	104,0
Архиерейское	0,124	3,42	13,0	67,9	1,4	11,2	107,0
Архиерейское	0,49	4,1	116,0	68,0	1,2	9,9	106,0
Ковалинское	0,096	6,45	12,3	69,7	1,0	10,4	115,0
Архиерейское	9,5	98,0	142,0	91,0	1,12	7,2	131,0
Изумрудное	0,6	5,2	18,0	75,8	1,2	11,5	123,0
Изумрудное	0,2	1,45	10,3	97,0	1,67	9,9	159,0
Кластер 2							
Ковалинское	0,53	0,83	4,8	129,0	2,45	8,7	195,0
Изумрудное	0,0	1,8	27,0	123,0	1,51	9,6	192,0
Ковалинское	0,122	3,42	15,5	117,0	2,59	10,0	198,0
Ковалинское	0,0	0,81	4,5	109,0	2,03	9,6	172,0
Архиерейское	0,31	1,63	13,0	94,0	1,86	9,9	175,0
Архиерейское	0,13	1,34	123,5	107,0	1,84	12,1	175,0
Изумрудное	0,4	2,19	14,8	133,0	1,33	11,4	256,0
Ковалинское	1,3	1,83	5,5	110,0	2,65	8,9	210,0
Архиерейское	0,33	1,54	12,3	100,0	2,39	9,46	226,0
Ковалинское	0,126	1,0	19,3	103,0	2,33	10,0	239,0
Кластер 3							
Изумрудное	0,18	2,8	12,3	33,7	0,69	14,8	56,0
Ковалинское	0,177	3,31	46,0	42,9	0,54	10,6	69,0
Архиерейское	0,154	8,3	21,8	33,7	0,52	11,2	60,0
Ковалинское	0,42	0,93	37,3	60,9	1,04	10,8	49,0
Ковалинское	0,111	2,7	8,0	37,4	0,74	11,5	62,0
Архиерейское	0,4	0,54	44,0	32,0	0,65	6,5	56,0
Архиерейское	0,42	2,37	10,3	32,0	0,61	9,3	53,0
Ковалинское	1,44	5,3	18,0	59,3	1,12	12,3	108,0
Изумрудное	0,119	1,79	13,5	78,9	1,27	7,04	125,0
Ковалинское	0,46	3,26	23,5	77,0	1,1	12,4	124,0
Изумрудное	0,103	0,0	13,3	83,0	1,3	5,81	139,0

Полученные результаты показывают, что исследуемые водные объекты характеризуются неоднородностью химического состава. Совокупный набор данных составил ряд из 153 наблюдения. Из этого перечня были исключены показатели температуры воды, так как они обусловлены сезоном отбора проб и значения концентраций ионов цинка, свинца, никеля и алюминия, в связи с отсутствием их достаточного количества значений, отличных от нуля. Значения остальных показателей были разбиты на 4 кластера с соответствующими выборками. Выделенные кластеры отражают по совокупности показателей особенности химического состава оцениваемых озер и изучить динамику показателей по сезонам. Значения и концентрации некоторых параметров и компонентов состава вод исследуемых озер с разбиением на кластеры показаны в таблице.

Исследование выполнено в рамках реализации темы государственного задания Научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по Соглашению номер № 075-03-2025-335 от «16» января 2025 г., номер темы FZSU–2023–0005, (рег. номер 123030100016-5).

Литература

Мусин Р.Х., Курлянов Н.А. Особенности и природа химического состава вод озёр среднего Поволжья // Озера Евразии: проблемы и пути их решения / Материалы II Международной конференции. Казань, 2019. Т. 2. С. 139–143.

Янин Е.П., Кузьмич В.Н., Иваницкий О.М. Региональная природная неоднородность химического состава вод суши и необходимость ее учета при оценках их экологического состояния и интенсивности техногенного загрязнения // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2012. №6. С. 3–72.

Беляева Т.А., Буяров В.С., Малинина Т.В. Интегральная оценка качества водной среды // Рациональное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды / Труды ЛПИ. 1985. Вып. 8. С. 19–23.

Thomas M., Zhu J., Romagnoli J. Data mining and clustering in chemical process databases for monitoring and knowledge discovery // Journal of Process Control. 2018. V. 67. P. 160–175.

Bu J., Liu W., Pan Z., Ling K. Comparative Study of Hydrochemical Classification Based on Different Hierarchical Cluster Analysis Methods // Int J Environ Res Public Health. 2020. V. 18. P. 17–24.

Кремлёва Э.Ш., Кирпичников А.П., Новикова С.В., Валитова Н.Л.Алгоритм построения модели каскадной нейросетевой фильтрации данных с различной степенью детализации // Вестник Казанского технологического университета. 2018. Т. 21. №8. С. 109–115.

Сивоголовко Е.В. Методы оценки качества чёткой кластеризации // Компьютерные инструменты в образовании. 2011. №4. С. 14–31.

Тунакова Ю.А., Новикова С.В., Валиев В.С., Байбакова Е.В. Использование метода нейросетевой кластеризации для выделения значимых показателей, характеризующих состояние поверхностных водных объектов в РТ // Вестник технологического университета. 2023. Т. 26. №3. С. 72–78.

STUDY OF PECULIARITIES OF CHEMICAL COMPOSITION OF WATER OF LAKES OF PRIKAZANSKY DISTRICT BY NEURAL NETWORK CLUSTER ANALYSIS METHOD

Y.A. Tunakova, S.V. Novikova, E.V. Baibakova

The article presents the results of the study of a long-term series of observations of the chemical composition of the waters of three lakes of different origin, located within the city of Kazan and its vicinity. The study was conducted to identify the peculiarities of water composition, using the method of neural network clustering. The values of indicators determining the variability of water composition of the studied lakes by clusters were obtained.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСТУПЛЕНИЯ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ С ДИФФУЗНЫМ СТОКОМ Р. СЕЛЕНГА В ОЗ. БАЙКАЛ

И.Д. Ульзетуева, Е.Ж. Гармаев, Г.С. Ширапова, А.А. Аюржанаев, Б.В. Содномов
Байкальский институт природопользования СО РАН

Представленные исследования направлены на определение основных антропогенных факторов влияния на загрязнение водосборной территории оз. Байкал, оценку поступления загрязняющих веществ в растворенной форме в пределах Российской Федерации. Рассмотрены основные источники диффузного стока на водосборной территории: промышленные центры, сельское хозяйство, селитебные территории. Для расчета диффузного стока на водосборной территории была использована имитационная почвенно-гидрологическая оценочная масштабируемая модель бассейна реки SWAT. В результате натурных исследований впервые дана обобщенная оценка и анализ поступления загрязняющих веществ, включающих модельные территории (промышленные территории, сельскохозяйственные угодья), созданы геоинформационные базы данных с картографическим представлением полученных результатов.

Серьёзной проблемой, вызванной антропогенными факторами, является снижение качества поверхностных вод в водосборном бассейне озера Байкал. Водные объекты бассейна трансграничной реки Селенги-основного притока оз. Байкал являются важными источниками воды для производственных нужд в промышленности, а также используются для орошения земель, заготовки сена и выпаса скота в сельском хозяйстве (Гармаев, 2010). Основными водопотребителями являются предприятия энергетики, промышленные организации и предприятия жилищно-коммунального хозяйства, которые являются источниками недостаточно эффективно очищенных сточных вод (Ульзетуева и др., 2021). Одной из основных причин, приводящих к загрязнению водных объектов, является активное освоение территорий в водоохранных зонах и их прибрежных защитных полосах. Диффузные источники могут оказывать существенное воздействие, а в некоторых случаях и определяющее влияние на качество воды в поверхностных и подземных водных источниках, при этом суммарный вклад диффузного стока в загрязнение водных объектов может быть значительным, поскольку охватывает большие площади (Данилов-Данильян, 2020).

В Российской части бассейна реки Селенги проживает 84% населения. В крупных промышленных центрах Республики Бурятия и Забайкальского края развито машиностроение, металлообработка, электроэнергетика, лесная, деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность, цветная металлургия, топливная, строительная, легкая и пищевая промышленность, добыча бурого угля и драгоценных металлов. Основные источники загрязнения окружающей среды включают теплоэнергетические комплексы, работающие на буром угле, и промышленные предприятия. Увеличение активности горнодобывающей и

обрабатывающей промышленности привело к изменению количества и качества водных ресурсов бассейна (Эколого-географический …, 2019).

Источниками загрязнения реки Селенга на территории России являются сточные воды, которые содержат широкий спектр различных загрязняющих веществ: соли, тяжелые металлы, биогенные элементы, взвешенные частицы и загрязнители искусственного происхождения.

Биогенные элементы поступают с водосборных площадей при смыве в реки в результате хозяйственной деятельности, последствий лесных пожаров, колебаний водного стока, размещений полигонов ТКО, транспорта, загрязненных подземных вод и почв, эрозионных процессов на реках, выбросов из атмосферы и т.д. Это оказывает значительное влияние на качество воды. Одной из причин поступления биогенных веществ в реку Селенгу является большое количество скота, пасущегося в поймах рек водосборного бассейна. Это приводит к разрушению берегов рек, и, как следствие, снижению количества прибрежной растительности, которая могла бы перерабатывать данные биогенные вещества и снижать их концентрацию в реке.

Исследования качества водных объектов бассейна р. Селенги проводятся центрами гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды, научными институтами обеих стран. Однако эти исследования полностью не отражают и не охватывают степень загрязнения во всем бассейне и не могут спрогнозировать ситуацию в дальнейшем. Например, диффузное загрязнение водных объектов в бассейне р. Селенга в настоящее время не фиксируется и не контролируется водохозяйственными или природоохранными ведомствами. Это связано со сложностью его мониторинга и недостаточной изученностью проблемы. Следовательно, моделирование и прогнозирование геоэкологических ситуаций требует разработки и внедрения новых интегрированных систем динамического моделирования. Одной из таких систем является SWAT (Soil and Water Assessment Tool) — имитационная почвенно-гидрологическая оценочная масштабируемая модель бассейна реки, разработанная Службой сельскохозяйственных исследований (ARS) Департамента сельского хозяйства США (USDA) для определения и оценки влияния хозяйственной деятельности человека на водные ресурсы (Arnold, 1998). Модель SWAT является наиболее эффективным и научно обоснованным инструментом для описания, прогнозов и оценки состояния почвенных и водных параметров в различных бассейновых системах. Принцип действия основывается на математическом моделировании, включающих основные процессы круговорота воды в природе, что позволяет использовать их в управлении водными ресурсами и их рационального использования, а также предсказывать влияние данных методов на сток в масштабе бассейна при управлении земельными ресурсами. Основные компоненты модели SWAT включают различные метеорологические и климатические параметры, гидрологические характеристики бассейнов, физические и химические характеристики почвенного покрова, показатели роста растений и урожайности, наличие азота и фосфора в почвах, бактерий и микроорганизмов, характеристику землепользования района.

ЦМР является важнейшим компонентом модели SWAT и обеспечивает базовый слой для определения периметров водоразделов, сетей ручьев и формирования подбассейнов. В сочетании с дополнительными наборами данных по землепользованию и типам почв ЦМР играет важную роль в создании единиц гидрологического реагирования (HRU). Данные цифровой модели рельефа (ЦМР) были получены из облака геопространственных данных предоставленных NASA Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM), которое использовалось для извлечения топографии и создания водных систем речной сети, 6 бассейнов водостоков и 15 подбассейнов в водосборе реки Селенга.

При помощи SWAT проведены расчёты поступления азота и фосфора с учетом урожайности и биопродуктивности сельскохозяйственных угодий. Расчёт осуществлялся для различных единиц: типы угодий, севообороты, естественные лесонасаждения и так далее. В модели учитывалось движение азота и фосфора в гидрологических единицах реагирования, которое моделируется в зависимости от циклов подпитки за счет внесения ряда неорганических и органических удобрений, вклада бактерий в циклы азота и фосфора. Потери азота и фосфора из почвы оценивались через их поглощение различными культурами и выноса поверхностным (диффузным) стоком в виде растворов или твёрдых частиц.

В пределах рассматриваемой территории водосборного бассейна р. Селенга сельскохозяйственные угодья расположены в 13 административных районах Республики Бурятия. Общая площадь посевных площадей, засеянных сельскохозяйственными культурами, включающими зерновые (пшеница, ячмень, овес), картофель, однолетние травы, овощи открытого грунта, составляет более 88 тыс. га (Посевные …, 2023). Из полученных результатов следует, что наибольшее количество азота и фосфора поступает в природные воды с площадей, засеянных однолетними травами, доля которых составляет 91% и 74 %, соответственно. Из общего количества поступления азота в водные объекты на долю пшеницы приходится 5,6%, овса - 1,3%, ячменя - 0,8%, картофеля - 0,9%. Биогенная нагрузка по фосфору составила 12,7% на пшеницу, 4,1% - на овес, 1,8% - на ячмень, 5,1% - на картофель.

Согласно результатам моделирования модели SWAT, годовое поступление азота и фосфора с водосборной территории составило 647,24 и 1,04 т/год, соответственно. Годовая нагрузка поступления азота и фосфора была самой высокой в подбассейнах рр. Селенга и Хилок. Самое низкое поступление биогенных веществ наблюдалось в бассейне р. Уды.

По итогам имитационного моделирования установлено, что максимальное количество органического азота с диффузным стоком поступало в марте 2020 г в р. Чикой и р. Селенга, а также в р. Селенга в апреле 2022 г. Максимальное поступление органического фосфора отмечалось в марте 2020 г. в р. Чикой и р. Селенга, в остальных реках в апреле, в этот же период было отмечено максимальное поступление ионов аммония. Максимальное поступление нитрат-ионов наблюдалось в апреле 2020 г., с июня по август 2020 г., июль 2021 г. в р. Селенга. Максимальный вынос нитрит-ионов происходил с марта по апрель 2020 г., в августе 2020 г. в р. Селенга. Сравнение объемов поступления загрязняющих веществ, поступающих с диффузным стоком и точечных источников показало, что наибольший вклад в загрязнение водосборной территории вносит сельскохозяйственная деятельность.

Таким образом, интеграция модели SWAT для оценки воздействия землепользования и изменения растительного покрова на загрязнение из неточечных источников позволила оценить поступление азота и фосфора в водосборный бассейн р. Селенги в составе диффузных стоков.

Работа выполнена в рамках государственного задания Байкальского института природопользования СО РАН № 121011990023-1.

Литература

Гармаев Е.Ж., Христофоров А.В. Водные ресурсы рек бассейна озера Байкал: основы их использования и охраны. Новосибирск: ГЕО, 2010. 227 с.

Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения. М.: РАН, 2020. 512 с.

Посевные площади и валовые сборы сельскохозяйственных культур за 2022 год. Статистический бюллетень. Улан-Удэ, 2023. 27 с.

Ульзетуева И.Д., Гомбоев Б.О., Батомункуев В.С., Жамьянов Д.Ц.Д., Молотов В.С. Критические параметры негативного воздействия на экосистему озера Байкал и основные направления улучшения его экологического состояния // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. №10. С. 57-63.

Эколого-географический атлас-монография Селенга-Байкал. М.: Географический факультет МГУ, 2019. 288 с.

Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development // J. American Water Resources Assoc. 1998. 34(1). P. 73-89.

SIMULATION MODELING OF BIOGENIC SUBSTANCES INPUT FROM THE SELENGA RIVER DIFFUSE RUNOFF TO LAKE BAIKAL

E.J. Garmaev, A.A. Ayurzhanaev, I.D. Ulzetueva, G.S. Shirapova, B.V. Sodnomov

The presented research is aimed at determining the main anthropogenic factors of influence on pollution of the Lake Baikal catchment area, estimation of pollutant input in dissolved form within the Russian Federation. The main sources of diffuse runoff in the catchment area are considered: industrial centers, agriculture, and residential areas. To calculate the diffuse runoff in the catchment area was used simulation soil-hydrological assessment scalable SWAT model of the river basin. As a result of field studies for the first time generalized assessment and analysis of pollutant inputs including model territories (industrial areas, agricultural lands) was given, geoinformation databases with cartographic representation of the obtained results were created.

ЭМИССИЯ МЕТАНА ИЗ ВОДОХРАНИЛИЩ РОССИИ: ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Н.Л. Фролова[1], М.Г. Гречушникова[1], И.А. Репина[2], В.М. Степаненко[1]
[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
[2]Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН

В настоящее время среди экспертов нет единого мнения относительно статуса крупных гидроэнергетических объектов по их вкладу в глобальное изменение климата. Рассмотрены результаты, полученные в ходе трехлетних полевых кампаний на 9 водохранилищах России и математического моделирования. Приведены основные характеристики и отличительные особенности исследованных водных объектов, описана методология исследований, включая проведение полевых кампаний, способов определения содержания и эмиссии метана, использованной модели LAKE и создания цифровой модели рельефа дна водохранилищ. Продемонстрировано, что средние национальные коэффициенты выброса метана по результатам измерений меньше, чем рекомендованные МГЭИК.

Гидроэнергетика входит в перечень возобновляемых источников энергии. Тем не менее, в настоящее время среди экспертов нет единого мнения относительно статуса крупных гидроэнергетических объектов по их вкладу в глобальное изменение климата. Затопление наземных экосистем и изменение гидрологического режима рек

способствует росту эмиссии метана в атмосферу с поверхности водохранилищ. При этом метан характеризуется в 25-29 раз большим парниковым воздействием, чем углекислый газ (IPCC, 2021). Метан образуется при анаэробном разложении органического вещества, которое продуцируется непосредственно в экосистеме искусственного водоема (автохтонное органическое вещество) в дополнение к тому органическому веществу, который поступает в воду реки с территории ее естественного водосбора (аллохтонное органическое вещество). Оценок эмиссии метана с водохранилищ мира достаточно много, при этом они сильно различаются между собой – от 2 до 122 Тг/год. Такое существенное различие связано с тем, что используемые для оценок измерения проводились в разное время, разными методами, не учитывалась межсезонная и межгодовая изменчивость, нет единой методики оценки площади водоемов. Инвентаризация мировых данных по эмиссии метана с поверхности водохранилищ проведена большим коллективом авторов в 2016 г. (Deemer et al., 2016). Использовались как данные об измерении потоков метана, так и оценки эмиссии по разным эмпирическим зависимостям. База данных показала, что значение эмиссии метана зависит от многих факторов: возраста водохранилища, проточности, сезона наблюдений, структуры донных отложений, типа поверхности водосбора, антропогенной нагрузки на территорию водосбора, доли пузырькового потока. Годовая эмиссия метана по этим данным составляет 17.7 Тг CH_4 /год, что можно считать на настоящее время наиболее точной оценкой. Но в эту базу практически не входят водохранилища России. *Целью* данного исследования является проведение натурных измерений и математического моделирования баланса метана (CH_4) на крупнейших водохранилищах России. Проблема оценки эмиссии парниковых газов (ПГ) имеет и практический аспект, особенно важный для страны: в настоящее время отсутствует определенность в отношении углеродной нейтральности отечественных ГЭС.

Исследования баланса ПГ проведены на 9 водохранилищах (Колымское, Бурейское, Волгоградское, Богучанское, Зейское, Куйбышевское, Рыбинское, Чиркейское, Саяно-Шушенское) (Репина и др., 2022, Гречушникова и др., 2023). Измерения производились в соответствии с руководством по полевым и расчетным методам определения эмиссии метана Международной ассоциации гидроэнергетиков (International Hydropower Association (IHA)), в сотрудничестве с международной гидрологической программой ЮНЕСКО. Измерения выполнялись по календарным сезонам года (весна, лето, осень, зима) не менее одного раза в каждый сезон за период 2021-2023 гг. Длительность измерительных кампаний варьировала из года в год, но в среднем составляла не менее 5 дней за сезон. Измерения проводились в дневное время с плавсредства методом плавучих камер без экрана от пузырьковой эмиссии. Пробы воздуха из камер отбирались во флаконы с солевым раствором, а потом обрабатывались в лаборатории на хроматографе. Удельные потоки метана рассчитывались по разнице концентраций в камере в конце и начале периода экспозиции без разделения на диффузионную и пузырьковую составляющую.

Для определения пространственно-временной изменчивости удельных потоков и содержания в воде метана на водоемах в различные сезоны выполнялись съемки на опорных станциях, которые назначались таким образом, чтобы наиболее полно охватить различные морфологические участки (районы) водохранилищ, а также мелководья и крупные заливы. Для осреднения использовались данные цифровых моделей рельефа каждого водохранилища. Оценки средних удельных потоков (УП) метана за каждую полевую кампанию на водохранилищах были получены на основе измеренных суммарных потоков на станциях измерений. Потоки в каждой точке измерений были использованы для осреднения по площади всего водоема с учетом разделения водохранилища на квазиоднородные районы, выделенные с учётом рельефа дна и

близости притоков. Измерения потоков метана сопровождались измерением вертикального профиля температуры, электропроводимости, концентраций растворенного метана и кислорода в водной толще, а также метеорологических величин в атмосфере. Горизонты отбора проб воды для последующего анализа на концентрацию растворенных газов выбирались у поверхности, у дна, над слоем скачка температуры, под слоем скачка, в слое скачка. На отдельных водохранилищах проводились оценки химического состава воды.

Отбор проб воды для определения содержания общего углерода и его компонентов (органического общего углерода в растворенном и взвешенном состоянии) в воде водохранилищ производился из приповерхностного и придонного горизонтов на сетке репрезентативных станций на каждом исследуемом водохранилище в банки темного стекла объемом 125 мл в соответствии с требованиями ГОСТ 31861, ГОСТ 31862 и ГОСТ 17.1.5.05. Затем пробы фиксировались с помощью 1-2 мл ортофосфорной кислоты. Содержание общего углерода определялось в фильтрованной и нефильтрованной части пробы на анализаторе Elementar «Vario TOC Select» в сертифицированной почвенно-экологической лаборатории Аграрно-технологического института РУДН при условиях: температура 22^0C, давление 743 мм рт. ст., влажность 70%.

Определения содержания органического вещества в донных отложениях водохранилищ производили методом потерь веса при прокаливании (ГОСТ 23740-2016). Отбор проб донных отложений производили дночерпателем Экмана-Бэрджа, анализ производился для верхнего слоя грунта толщиной не более 10 см.

Для решения задачи определения скорости осаждения органического вещества в водоёмах были произведены постановки седиментационных ловушек в придонном слое с целью определить, как скорость накопления осадка, так и содержание в веществе осажденного органического углерода. Также использовались литературные оценки скорости осадконакопления для конкретных водохранилищ. Для Чиркейского водохранилища измерения удельных потоков метана выполнялись во все сезоны года. Результаты зимних экспедиций по остальным 8 водохранилищам показывают, что зимняя эмиссия метана с их поверхности равна нулю.

С учётом низкого временного разрешения данных измерений, для определения годового баланса парниковых газов из водохранилищ и их поглощающей способности использовалась математическая модель LAKE, разработанная для моделирования гидрологических, термодинамических и биохимических процессов в озерах и водохранилищах (Степаненко и др., 2020). Код модели находится в открытом доступе (https://mathmod.org/lake/).

Специально модифицированная для расчета баланса парниковых газов водохранилищ версия модели LAKE 3.0 была оптимизирована в части параметров уравнений по результатам многочисленных натурных измерений на каждом водохранилище, благодаря чему удалось детально реалистично воспроизвести температурный, кислородный режим водоемов, а также годовой ход УП метана из водохранилищ и суммарную годовую эмиссию. Также была получена оценка годовой эмиссии углекислого газа и скорости седиментации органического вещества в углеродном эквиваленте в донные отложения. Основными входными данными для модели являются метеорологические условия: температура воздуха, атмосферное давление, влажность воздуха, скорость ветра, нисходящие потоки длинноволновой и коротковолновой радиации, осадки. Временные ряды этих величин заимствовались из данных реанализа ERA5. Калибровка модели LAKE 3.0 для корректного воспроизведения потоков метана на границе «вода – атмосфера» производилась в 3 последовательных этапа: калибровка параметров, определяющих температурный режим;

калибровка параметров кислородного режима; калибровка параметров, отвечающих за эмиссию метана.

В таблице представлено сравнение измеренных и рассчитанных потоков за все время полевых кампаний. Приведены средние значения УП метана по данным полевых кампаний, средние значения потока метана в модели за даты полевых кампаний. Таблица показывает хорошее совпадение данных, то есть модель может адекватно воспроизвести годовой ход УП метана, в том числе за период, когда измерения не проводились (рис.).

Таблица. Средние значения УП метана по данным моделирования и полевых измерений

Водохранилище	Средний УП метана по данным наблюдений, мгCH_4 м$^{-2}$ сут$^{-1}$	Средний УП метана по результатам модели за периоды проведения полевых кампаний, мгCH_4 м$^{-2}$ сут$^{-1}$
Рыбинское	66.9	67.9
Куйбышевское	15.0	16.0
Волгоградское	8.56	7.06
Чиркейское	4.04	3.53
Богучанское	1.42	1.66
Зейское	4.91	5.15
Бурейское	4.82	4.99
Колымское	1.47	1.51
Саяно-Шушенское	3.67	3.84

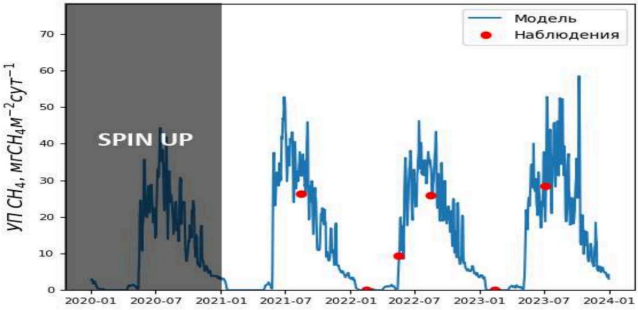


Рис. Годовой ход УП метана по данным наблюдений и моделирования для Куйбышевского водохранилища

Оценки коэффициентов антропогенных выбросов парниковых газов на основе данных натурных наблюдений и моделирования на девяти водохранилищах Российской Федерации, расположенных в различных природно-климатических условиях выполнены в соответствии с методикой и рекомендациями МГЭИК по трем уровням сложности. Согласно МГЭИК для водохранилищ старше 20 лет поток углекислого газа считается сбалансированным, поэтому в результирующих оценках принимается во внимание только эмиссия метана. Осреднённые коэффициенты эмиссии метана с поверхности исследуемых водохранилищ составили 5.6 (±4.3) кг CH_4/га/год для бореальной зоны и 33.2 (±16.8) кг CH_4/га/год для прохладной умеренной влажной зоны. Коэффициенты были рассчитаны за безледный период. Полученный в данной работе коэффициент эмиссии для бореальной зоны близок к диапазону коэффициента по умолчанию МГЭИК (13.6±6.3 кг CH_4/га), коэффициент эмиссии для прохладной умеренной влажной зоны ниже коэффициента по умолчанию (54.0±5.5) в 1.6 раз. По результатам анализа полученных значений эмиссии метана с поверхности водохранилищ по 1 и 2 Уровням

следует, что национальные коэффициенты оказываются в среднем на 62% ниже оценок эмиссии метана с поверхности водохранилищ, рассчитанных по методологии МГЭИК.

Национальные коэффициенты эмиссии, в отличие от коэффициентов МГЭИК 2019, учитывают территориально-географические особенности страны, а также конкретные свойства отдельных водохранилищ, например, особенности функционирования водохранилищ, размеры и глубины, относительное расположение кислородных/бескислородных водозаборов, их трофический статус, осаждение и улавливание углерода, и другие факторы окружающей среды (например, сезонный ледяной покров), что позволяет дать более точные оценки.

По результатам балансовой оценки эмиссий и поглощений парниковых газов (коэффициенты 3 Уровня по МГЭИК) согласно данным измерений и математического моделирования, антропогенная составляющая баланса потоков парниковых газов Рыбинского водохранилища оценена в -0.18 ± 0.28 кг CO_2-экв/м^2/безлёдный сезон, что свидетельствует, что антропогенное воздействие на речную экосистему с высокой вероятностью привело к нетто-поглощению парниковых газов при заполнении водохранилища. Аналогичные результаты получились и для других волжских водохранилищ. Для Сибирских водохранилищ, эмиссия метана с которых значимо меньше, а глубина больше, соответственно и поглощение получается больше.

Если полученные результаты будут подтверждены на других исследованных энергетических водохранилищах, можно будет подтвердить вывод об антропогенном нетто-поглощении парниковых газов на водохранилищах бореальной и/или умеренной зон России. Это, в свою очередь, свидетельствует о возможности отрицательного углеродного следа электроэнергии крупных ГЭС.

Оценки, приведённые в данной работе, носят предварительный характер и требуют дополнительных исследований по накоплению длительных рядов данных и повышения надежности математического моделирования, для подтверждения нетто-поглощения парниковых газов крупными искусственными водными экосистемами. Для уточнения оценок антропогенных потоков ПГ на водохранилищах необходимо продолжить измерения годовых потоков парниковых газов как до строительства плотины (на участке реки до начала водохранилища), так и на самих водохранилищах, а также после плотины ниже по течению реки. Для корректного учета межгодовой изменчивости необходимо уточнить такие параметры за период не менее 10 лет, как эмиссия метана в единицах углерода с площади поверхности в среднем за год по всем изученным водохранилищам; содержания органического углерода в единице объема воды и динамики этого показателя; скорость осаждения органического углерода на единицу площади в год в водохранилищах и в реках, впадающих в них. Это позволит более точно вычленить антропогенное воздействие на изменение потоков ПГ.

Литература

Репина И.А., Терский П.Н., Горин С.Л., Агафонова С.А., Ахмерова Н.Д., Василенко А.Н., Гречушникова М.Г., Фролова Н.Л., Казанцев В.С., Шестеркин В.П. Натурные измерения эмиссии метана на крупнейших водохранилищах России в 2021 г. Начало масштабных исследований // Водные ресурсы. 2022. Т. 49, №6. С. 713–718.

Степаненко В.М., Гречушникова М.Г., Репина И.А. Численное моделирование эмиссии метана из водохранилища // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. Т. 2. С. 76–99.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021.

METHANE EMISSION FROM RUSSIA'S WATER RESERVES: DATA FROM OBSERVATIONS AND MATEMATICAL MODELING

N.L. Frolova, M.G. Grechushnikova, I.A. Repina, V.M. Stepanenko

At present there is no consensus among experts regarding the status of large hydropower facilities in terms of their contribution to global climate change. The paper considers results obtained during three-year field campaigns at 9 reservoirs of Russia and mathematical modeling. The main characteristics and distinctive features of the studied water bodies are given, the methodology of research is described, including field campaigns, methods of determining methane content and emission, LAKE model used and creation of digital model of reservoir bottom relief. It is demonstrated that average national methane emission factors from measurements are less than recommended by IPCC.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА И МИГРАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В СИСТЕМЕ ВАСЮГАНСКОЕ БОЛОТО-РЕКА В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Ю.А. Харанжевская
Сибирский НИИ сельского хозяйства и торфа – филиал СФНЦА РАН
Томский государственный университет

В статье выполнен анализ содержания $C_{орг}$ в болотных и речных водах Васюганского болота в Западной Сибири, проведена оценка выноса углерода с малого заболоченного водосбора. Исследование проводилось в бассейне реки Ключ, правого притока реки Бакчар (бассейн Средней Оби) в 2021-2024 гг. Анализ данных показал, более высокие концентрации $C_{орг}$ в болотных и речных водах отмечались в летний жаркий период (июль-август), тогда как вынос $C_{орг}$ преобладал в апреле-мае в период снеготаяния. Тип растительности и характеристики торфяной залежи оказывают значительное влияние на содержание $C_{орг}$ в водах, а зона контакта болото-лес вносит существенный вклад в общий объем выноса $C_{орг}$ с исследуемой территории.

Западная Сибирь является крупным регионом в северном полушарии с широким распространением болот (Лисс и др., 2001). Болотные экосистемы играют ключевую роль в динамике глобального цикла углерода. Болота аккумулируют углерод в виде торфяных залежей при непосредственном газообмене с атмосферой. Вынос растворенного органического углерода с болт в реки является важным компонентом баланса углерода в Западной Сибири. В последние десятилетия в бореальных водоемах и водотоках по всему миру наблюдаются повышенные концентрации углерода, что связывают с изменением климата и с масштабной деградацией болот (Finér et al., 2021; Song et al., 2025). Для юга Западной Сибири, где хозяйственное использование болот невелико, естественные участки болот могут являться своеобразными природными моделями для оценки влияния изменений климата на содержание растворенного органического углерода в водах болот и рек. Целью данной работы была оценка концентраций и миграции растворенного органического углерода в водах Васюганского болота и водоприемника – малой реки Ключ.

Исследования изменений химического состава вод проводились на небольшом ключевом участке на северо-восточных отрогах Васюганского болота (Бакчарское болото, Стационар «Васюганский», с. Полынянка, Томская область). Отбор проб природных вод проводился одновременно за период апрель-сентябрь 2021-2024 года по

профилю, который включал в себя участки Васюганского болота: осоково-сфагновая топь, сосново-кустарничково-сфагновый болотный микроландшафт с высокой и низкой сосной, заболоченный лес и русло водоприемника – р. Ключ. Определение содержание органического углерода в водах проводилось по методике Тюрина с фотометрическим окончанием в модификации СибНИИСХиТ. Вынос с водосбора площадью 21 км^2 рассчитывался как произведение суммарного объема стока и концентраций $C_{орг}$ в реке Ключ, полученных по результатам лабораторного анализа проб речных вод. Измерения расходов воды выполнены с применением акустического измерителя скорости потока OTT Hydromet (Германия) и/или поверхностными поплавками на временном гидрометрическом посту, организованном в истоках реки Ключ в заболоченнном лесу.

Анализ данных показал, что среднее содержание $C_{орг}$ в пробах болотных вод, отобранных на различных участках Васюганского болота увеличивается в ряду от центральных частей к периферии болотного массива: от осоково-сфагновой топи к низкому и высокому ряму. Так за исследуемый период 2021-2024 гг. среднее содержание $C_{орг}$ в болотных водах осоково-сфагновой топи составило 42,4 мг/л. Содержание $C_{орг}$ в водах низкого ряма достоверно выше и в среднем за исследуемый период составило 54,8 мг/л. Среднее содержание $C_{орг}$ в болотных водах высокого ряма повышается до 66,8 мг/л (рисунок). Сезонный ход концентраций $C_{орг}$ в болотных водах в целом сопоставим, минимальное содержание отмечается в период снеготаяния в апреле-мае, а максимум наблюдается в июле-августе, редко сентябре. Сезонный ход содержания $C_{орг}$ в болотных водах осоково-сфагновой топи отличается тем, что максимум концентраций чаще наблюдается в середине сезона. Следует отметить, что концентрации $C_{орг}$ в болотных водах хорошо согласуются с содержанием углерода в деятельном слое торфяной залежи. Так, согласно проведенным исследованиям, содержание $C_{орг}$ в торфяной залежи осоково-сфагновой топи минимально и в слое 0-100 см варьирует в диапазоне 41,9-44,5 %. В слое 0-100 см низкого ряма содержание повышается до 44,3-45,8 %. В высоком ряме на границе болота содержание в слое 0-100 см составляет 50,9-51,2 %. В целом отмечается тенденция повышения содержания $C_{орг}$ с увеличением степени разложения торфов. Содержание в водах в заболоченном лесу по результатам отбора проб 19.07.2022 году варьирует в диапазоне от 75,3 мг/л до 101,8 мг/л.

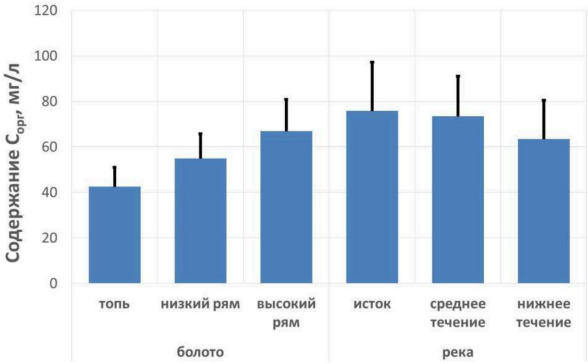


Рис. Среднее содержание Сорг по профилю Васюганское болото-река Ключ за апрель-сентябрь 2021-2024 гг.

Сопоставляя данные по болотным и речным водам, следует отметить, что содержание $C_{орг}$ истоках реки Ключ выше, чем в болоте и в среднем составляет 75,6 мг/л.

В среднем течении р. Ключ (КВ) концентрации $C_{орг}$ снижаются до 73,5 мг/л, а в нижним течении вновь становятся сопоставимы с болотным водами на границе болотного массива (63,3 мг/л). В сезонной динамике отмечается максимум концентрации $C_{орг}$ в августе, редко в июне или сентябре. Вынос $C_{орг}$ с водами р. Ключ в заболоченном лесу преобладает в апреле и составляет 539 кг/км^2 или 11 тонн С, в остальные периоды вынос снижается в 2-5 раза. Общий вынос $C_{орг}$ с речными водами за период апрель-сентябрь 2022 года составил 30 тонн С.

Таким образом, анализ данных показал, более высокие концентрации $C_{орг}$ в болотных и речных водах отмечались в летний жаркий период (июль-август), тогда как вынос $C_{орг}$ преобладал в апреле-мае в период снеготаяния. Исследования позволили отметить, что тип растительности и характеристики торфяной залежи оказывают значительное влияние на содержание $C_{орг}$ в водах, а зона контакта лес-болото и заболоченный лес, примыкающий к исследуемому участку Васюганского болота, вносит существенный вклад в общий объем выноса $C_{орг}$ с исследуемой территории.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-77-10049.

Литература

Song M., Huang J., Zhao D., Mu Y. Trends and drivers of dissolved organic carbon in major Arctic rivers // Ecological Indicators. 2025. V. 170. 113081.

SPATIAL-TEMPORAL DYNAMICS AND RELEASE OF ORGANIC SUBSTANCES IN THE GREAT VASYUGAN MIRE-RIVER SYSTEM UNDER CONDITION OF CLIMATIC CHANGES

Y.A. Kharanzhevskaya

The paper analyzes the DOC content in the mire surface waters and river waters of the Great Vasyugan Mire in Western Siberia, and assesses the DOC removal from a small swampy river basin. The study was conducted in the basin of the Klyuch River, a right tributary of the Bakchar River (the Middle Ob basin) in 2021-2024. Data analysis showed that higher DOC concentrations in mire and river waters were observed during the hot summer period (July-August), while DOC removal prevailed in April-May during the snowmelt period. The type of vegetation and the characteristics of the peat deposit have a significant impact on the DOC content in waters, and the mire-forest contact zone makes a significant contribution to the total removal of DOC from the study area.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛОВ ТРАНСФОРМАЦИИ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ И ИХ АССИМИЛЯЦИИ В ЭКОСИСТЕМЕ ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА

А.А. Цхай[1,2], М.А. Романов[1], В.А. Куприянов[2]

[1]Институт водных и экологических проблем СО РАН

[2]Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова

Разработана модель биогеохимических циклов трансформации питательных веществ в экосистеме водоема на примере Телецкого озера (ТО) для оценки его ассимиляционного потенциала в условиях отсутствия прямых измерений концентраций общего азота и фосфора, вместо чего для предварительных выводов используются соответствующие

расчетные данные, полученные при моделировании. Модельный анализ показал, что у озера практически отсутствует ассимиляционный потенциал по отношению к соединениям фосфора, Воды ТО из-за низкой температуры воды в течение всего года наряду с уникальной чистотой отличаются крайне слабо развитым сообществом гидробионтов. Достаточного ресурса самоочищения – нет, и сравнительно небольшое повышение антропогенного загрязнения может привести к нарушению стабильности в экосистеме ТО.

Актуальной проблемой лимнологии является оценка ассимиляционного потенциала (АП) природных водных объектов - как объема загрязнений, причиняющего минимальный ущерб, и не нарушающего устойчивости экосистемы.

Моделирование проводилось на данных Телецкого озера (ТО), которое находится на юге Западной Сибири (51°31′45″ с. ш., 87°42′53″ в. д.) и входит в пятерку самых глубоких водоемов России. ТО имеет площадь поверхности 223 км^2 и максимальную глубину 325 м (при средней глубине 174 м). Около 70 средних и малых рек впадает в ТО, а площадь его водосбора составляет приблизительно 20 тыс. км^2. Самый крупный (порядка 70% общего поверхностного притока) из притоков ТО - р. Чулышман. Более мелкие (реки Кыга, Кокши и т.д.) учитываются при оценке боковой приточности. Из озера вытекает р. Бия, которая впадает в р. Обь.

Моделирования состояния экосистемы ТО до сих пор не выполнялось. В данной работе моделируются процессы в воде ТО, а также в деятельном слое донных отложений (ДО). В целях упрощения в выполненном исследовании использовалось точечное (нульмерное) приближение. Расчеты по модели выполнялись для периода с 1 января по 31 декабря с шагом по времени равным 0.1 сут.

Общий вид математической модели процессов в водной толще ТО выглядит как

$$\frac{d(C_i \cdot W)}{dt} = W \cdot R_i + Q^p \cdot C_i^p + Q^b \cdot C_i^b - Q_{out} \cdot C_i + J_i \cdot \Omega + G_i \cdot L \qquad (1)$$

где i = *ZON, FN, NH4, NO2, NO3, ND, DON, ZOP, FP, DIP, PD, DOP, O2*; W – объем ТО; t – время; R_i – скорость биогеохимической трансформации соответствующего соединения C_i ; Q^p *и* C^p — расход основного притока ТО - реки Чулышман и концентрации компонентов в ней, Q^b *и* C^b — расход остальной учтенной боковой приточности ТО и концентрации компонентов в ней, Q_{out} — расход стока из ТО (р. Бия), J_i — массовый поток на межфазной поверхности, Ω — площадь зеркала ТО, G_i — диффузная нагрузка с берегов, L — длина ТО.

При этом использованы следующие обозначения: *ZON* – зоопланктонный азот, *гN/м*^{3}; *ZOP* – зоопланктонный фосфор, *гP/м*^{3}; *FN* – фитопланктонный азот, *гN/м*^{3}; *FP* – фитопланктонный фосфор, *гP/м*^{3}; NH_4 – аммонийный азот, *гN/м*^{3}; NO_2 – нитритный азот, *гN/м*^{3}; NO_3 – нитратный азот, *гN/м*^{3}; *ND* – детритный азот, *гN/м*^{3}; *PD* – детритный фосфор, *гP/м*^{3}; *DON* – растворенный органический азот, *гN/м*^{3}; *DOP* – растворенный органический фосфор, *гP/м*^{3}; *DIP* – фосфаты, *гP/м*^{3}; O_2 – растворенный кислород, *гO2/м*^{3}.

Для воспроизведения процессов в деятельном слое донных отложений (ДО) используются следующие уравнения:

$$\frac{dC_{CBN}}{dt} = -\frac{\alpha \cdot J_{ND}}{s \cdot L_1} - k_m^N \cdot C_{CBN}\,; \qquad \frac{dC_{CBP}}{dt} = -\frac{\alpha \cdot J_{PD}}{s \cdot L_1} - k_m^P \cdot C_{CBP}\,;$$

$$s \cdot \frac{dC_{NB}}{dt} = k_m^N \cdot s \cdot C_{CBN} - \frac{K_N \cdot (C_{NB} - C_{NH4}) + V_f^N \cdot C_{NH4}}{L_1} - \frac{dC_{NS}}{dt} \quad (2)$$

$$s \cdot \frac{dC_{PB}}{dt} = k_m^P \cdot s \cdot C_{CBP} - \frac{K_P \cdot (C_{PB} - C_{DIP}) + V_f^P \cdot C_{DIP}}{L_1} - \frac{dC_{PS}}{dt};$$

$$C_{NS} = \gamma_N \times C_{NB}; \qquad C_{PS} = \gamma_P \times C_{PB}.$$

Здесь C_{BN} – органический азот, участвующий в обменных процессах в донных отложениях (ДО), *гN/м*^{3}; C_{BP} – органический фосфор, участвующий в обменных процессах в ДО, *гP/м*^{3}; P_B – интерстициальный фосфор в поровом пространстве ДО, *гP/м*^{3}; N_B – интерстициальный азот в поровом пространстве ДО, *гN/м*^{3}; P_S – фосфор, сорбированный на твердой фазе ДО, *гP/м*^{3}; N_S – азот, сорбированный на твердой фазе ДО, *гN/м*^{3}; C_N – органический азот в пассивных формах в составе ДО, *гN/м*^{3}; C_P - органический фосфор в пассивных формах в составе ДО, *гP/м*^{3}. Кроме того: α – доля осаждающихся веществ, участвующих в обменных процессах; s – удельная пористость ДО; L_1 – толщина деятельного слоя ДО; k_m^N – коэффициент минерализации органического *N* в ДО; k_m^P – коэффициент минерализации органического *P* в ДО; K_N – коэффициент диффузионного переноса *N* в ДО; K_P – коэффициент диффузионного переноса *P* в ДО; V_f^N – скорость фильтрации *N*; V_f^P – скорость фильтрации *P*; γ_N – коэффициент обратимой линейной сорбции *N* на скелете ДО; γ_P – коэффициент обратимой линейной сорбции *P* на скелете ДО.

Полная запись разработанной математической модели, названия, способ вычисления и значения ее параметров представлены в работе (Цхай и др., 2024). Настройка (уточнение значений внутренних параметров) модели и последующие модельные расчеты осуществлены для сценарных условий 2016 г. по среднемноголетним данным, которые представлены в (Цхай, Романов, 2023). При обработке исходной информации для отсева грубых погрешностей использовался статистический критерий «трех сигм».

Неизвестные параметры модели (1-2) определены минимизацией статистического критерия Тейла *Cr* для компонентов водной экосистемы:

$$Cr = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (X_i - Y_i)^2} \Big/ \left(\sqrt{\sum_{i=1}^{n} X_i^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^{n} Y_i^2} \right) \quad (3)$$

где X_i и Y_i – соответственно, расчетные и измеренные величины содержания веществ. Число наблюдений n в данной работе равно 8 - для каждой из четырех модельных переменных ZON, ZOP, FN, FP и равно 14 - для каждой из девяти оставшихся модельных переменных. При полном совпадении расчетных и наблюдаемых значений *Cr* равен нулю, при полном несовпадении — единице [Theil, 1971].

Результаты калибровки показали приемлемое для экологического моделирования соответствие расчетных результатов - данным мониторинговых наблюдений: значения критерия Тейла для всех переменных состояния модели меньше, чем 0.3. Отсюда следует, что основные процессы трансформации соединений азота, фосфора и динамика растворенного в воде кислорода воспроизводятся математической моделью достаточно корректно.

Модельные расчеты потоков веществ приводят к предварительной оценке (табл.) основных составляющих прихода и потерь соединений азота и фосфора в ТО внутри моделируемого периода и суммарно за год.

Таблица 1. Модельная оценка основных составляющих поступлений и потерь азота и фосфора в Телецком озере для сценарных условий

	в тоннах N					
	Вход *N*	1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	Год
	Поступление форм *N* с поверхностной приточностью	363.957	5138.118	1525.762	1053.695	8081.531
	Поступление в воду со дна	0.469	8.105	6.465	2.481	17.520
1	Итого	364.426	5146.223	1532.227	1056.175	8099.051
	Выход *N*	1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	Год
	С рекой Бией	-257.998	-4112.636	-2526.733	-871.332	-7768.699
	Седиментация	-2.802	-3.423	-2.948	-2.617	-11.790
2	Итого	-260.8	-4116.0598	-2529.681	-873.948	-7780.489
3	Невязка (сумма п.1 и п.2) в тоннах азота	103.626	1030.163	-997.454	182.227	318.562
4	Невязка по *N*, в процентах	-40%	-25%	39%	-21%	-4%

	в тоннах P					
	Вход *P*	1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	Год
	Поступление форм *P* с поверхностной приточностью	6.267	67.616	28.242	23.029	125.153
	Поступление в воду со дна	0.002	0.193	0.212	0.333	0.740
5	Итого	6.269	67.809	28.454	23.362	125.894
	Выход *P*	1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	Год
	С рекой Бией	-4.194	-65.747	-39.921	-13.9	-123.763
	Седиментация	-0.051	-0.066	-0.055	-0.041	-0.213
6	Итого	-4.245	-65.813	-39.975	-13.942	-123.976
7	Невязка (сумма п.5 и п.6) в тоннах фосфора	2.024	1.996	-11.522	9.420	1.917
8	Невязка по *P*, в процентах	-48%	-3%	29%	-68%	-2%

Временной период сбора мониторинговых гидрохимических и гидробиологических данных, использованных в данном исследовании - с середины восьмидесятых годов прошлого века до нулевых годов включительно - считается временем, ограниченного антропогенного воздействия на экологическое состояние природных вод, в том числе, ТО. Мнения специалистов сходятся на том, что, по крайней мере, в это время состояние его экосистемы было устойчивым, а биогенная нагрузка на ТО была приближена к природной, практически фоновой. В таком предположении в работе была предпринята попытка оценки допустимой биогенной нагрузки, как не меняющей степень загрязнения вод ТО. А это может трактоваться как случай, когда в экосистеме ТО в течение года ассимилируется объем загрязняющих биогенных веществ, равный поступающему массовому потоку в водный объект за тот же период. Для этого случая могут быть оценены значения концентраций $P_{общ}$ и $N_{общ}$, соответствующие случаю допустимой биогенной нагрузки.

Подобный подход позволил в свое время оценить допустимую биогенную нагрузку на достаточно изученные, по сравнению с ТО, озера Северо-Запада РФ

(например, (Филатов и др., 2015)). В данной работе в отсутствие измеренных концентрации общих азота и фосфора используются результаты их моделирования.

Показатель удерживающей способности озера R_u (б/р величина), характеризующий относительное понижение концентрации общего азота / общего фосфора (здесь и далее: вещества *и)* в последнем по сравнению с его содержанием в приточных водах задается как в (Лозовик и др. 2011)

$$R_u = \frac{\overline{C}_{u-in} - \overline{C}_{u-l}}{\overline{C}_{u-in}} \tag{4}$$

где $\overline{C}_{u-in}$ и $\overline{C}_{u-l}$ - средневзвешенные концентрации вещества *и* в приточных водах и в озере, соответственно.

Коэффициент K_u – показатель скорости трансформации вещества *и (год$^{-1}$)* и суммарная ассимиляция в озере As_u, с размерностью *(г единиц P или N,* соответственно*, в год)*, оцениваются из кинетического уравнения, полученного в работе (Лозовик и др. 2011) как

$$K_u = \frac{R_u}{\tau \cdot (1 - R_u \cdot e^{-1/\tau})}, \qquad \tau = \frac{V_0}{V_{\text{out}}} \tag{6}$$

где τ – временной период водообмена в ТО с размерностью (*год*); V_0 – объем воды в озере в начальный момент, *м^3*; V_{out} – водный сток из озера, *м^3/год*.

$$As_u = K_u \cdot C_u \cdot V_{\text{out}} \cdot (\tau + 1) \tag{7}$$

Расчетная годовая суммарная ассимиляция в ТО составляет всего 3.5 тР и 585 тN в год при общем поступлении в озеро 126 тР и 8100 тN в год. Таким образом, модельный анализ самоочищения для ТО показал, что у озера ассимиляционный потенциал по отношению к соединениям фосфора – практически отсутствует, по отношению к формам азота – невелик, но некоторый запас имеется.

Результаты модельных расчетов свидетельствуют о том, что вода ТО – чистая не за счет достаточной ассимиляции, а ввиду того, что до сих пор была низкая антропогенная нагрузка. В случае других озер повышение антропогенного пресса могло бы сглаживаться за счет утилизации вследствие жизнедеятельности достаточно развитых сообществ гидробионтов. Здесь же достаточного ресурса самоочищения – нет, и сравнительно небольшое повышение антропогенного загрязнения может привести к нарушению устойчивости водной экосистемы. Происходящее на водосборе уникального водоема кратное увеличение интенсивности рекреационной, а по сути антропогенной деятельности, ведет к регрессу состояния водной экосистемы. Необходимы неотложные меры по приведению системы мониторинга Телецкого озера к современному уровню для своевременного выявления неблагоприятных тенденций и реализации адекватных мер по оздоровлению экологической ситуации.

Литература

Лозовик П.А., Рыжаков А.В., Сабылина А.В. Процессы трансформации, кругооборота и образования веществ в природных водах // Труды КарНЦ РАН. 2011. №4. С. 21–28.

Цхай А.А., Романов М.А., Куприянов В.А. Модель ассимиляционного потенциала озерной экосистемы на примере биогенных загрязнений // Компьютерные исследования и моделирование. 2024. Т. 16. №6(71). С. 1447–1465.

Цхай А.А., Романов М.А. Об условиях протекания циклов биогенных элементов в Телецком озере: анализ данных для моделирования // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2023. №4. С. 40–60.

MODELING FOR CYCLES OF TRANSFORMATION FOR BIOGENIC POLLUTANTS AND THEIR ASSIMILATION IN THE ECOSYSTEM OF LAKE TELETSKOYE

A.A. Tskhai, M.A. Romanov, V.A. Kupriianov

A model of biogeochemical cycles for nutrient transformation in the ecosystem of a reservoir has been developed using the example of the Lake Teletskoye to assess its assimilation potential in the absence of direct measurements for total nitrogen and phosphorus concentrations, instead of which the corresponding calculated data obtained during modeling are used for preliminary conclusions. The model analysis showed that the lake has practically no assimilation potential in relation to phosphorus compounds. The waters are characterized by an extremely poorly developed community of aquatic organisms due to the low water temperature throughout the year, along with their unique purity. There is no sufficient resource for self–purification, and a relatively small increase in anthropogenic phosphorus pollution can lead to a disruption of stability in the ecosystem.

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ НА ПРИМЕРЕ ОЗ. БАЙКАЛ

Е.П. Чебыкин, Н.Н. Куликова, Е.В. Лихошвай, А.Н. Сутурин
Лимнологический институт Сибирского отделения РАН

Разработан геохимический метод для оценки степени влияния локальных источников на водные объекты. Метод состоит из двух последовательных вычислительных процедур – расчёте водных вкладов источников на каждом этапе смешения и геохимических вкладов по каждому элементу и их сумме от источника загрязнения. Алгоритмы расчёта водных вкладов источников смешения (сточные, чистые речные и байкальские фоновые воды) реализованы с использованием широкого спектра контрастных консервативных химических элементов и ведутся с учетом возможного неконсервативного поведения химических элементов на физико-химических и биогеохимических барьерах. Предложенный метод может быть использован для сравнения водных объектов и/ или их участков по степени влияния геохимических факторов и расширен на любые загрязняющие вещества.

На побережье Байкала в последние годы активно проявляется экологический кризис: в литоральной зоне бурно развиваются нитчатые водоросли рода Spirogira, гибнут эндемичные байкальские губки, водные лишайники и другие гидробионты (Грачев, 2015; Сутурин и др., 2016; Ханаев и др., 2016). Приуроченность интенсивных кризисных проявлений к местам хозяйственной деятельности человека и развития туристического бизнеса указывает на антропогенное влияние, которое может быть как непосредственной причиной кризиса, так и косвенно влиять на его развитие при неблагоприятных природно-климатических условиях. В связи с этим актуален расширенный и детальный поиск неблагоприятных факторов и оценка степени их влияния на литораль Байкала.

Смешение антропогенных и природных вод (речные притоки) в литорали озера может носить сложных характер, при этом необходимо определить водные вклады каждого источника и их вклады по отдельным компонентам. Для локальных источников наиболее типичны случаи, когда сточные воды канализационных очистных сооружений

(КОС) сбрасываются в речные притоки озера (г. Слюдянка, г. Северобайкальск) или же непосредственно поступают в Байкал вблизи устий речных притоков (г. Байкальск).

Для оценки водных и геохимических вкладов источников в объектах смешения нами был разработан метод, основанный на использовании контрастных консервативных химических элементов, набор которых индивидуален и зависит от геохимического состава конкретных источников (Чебыкин и др., 2024а,б, 2025). Исследование геохимического состава вод проводится с помощью многоэлементного ИСП-МС метода, который позволяет одновременно определять широкий спектр химических элементов в большом диапазоне концентраций (~ 9 порядков, от нг/дм^3 до г/дм^3). Для систем смешения водных объектов Байкальской природной территории (БПТ) данным методом, как правило, удаётся определить 30-40 информативных химических элементов, среди которых всегда найдутся те, по которым можно провести надёжный расчёт водных вкладов источников, а на следующем этапе – рассчитать их геохимические вклады (ГХВ) по отдельным элементам, а также суммарные ГХВ.

Расчёт водных вкладов источников по концентрациям химических элементов является обратной задачей. В зависимости от сложности системы смешения используются различные алгоритмы её решения. Для простых двухкомпонентных систем смешения типа «река-стоки», «река-озеро» или при их последовательном смешении «река-стоки», «загрязнённая река-озеро» можно использовать простые математические выражения, которые решаются аналитическим способом (Чебыкин и др., 2024а):

$$Part_ww_riv = \frac{C_riv - C_riv[up]}{C_ww - C_riv[up]} \quad (1),$$

где *Part_ww_riv* – водный вклад сточных вод (ww) в общем речном стоке (riv); *C_ww*, *C_riv*[*up*], *C_riv*– концентрация химических элементов в сточных водах, в реке выше и ниже сброса сточных вод, соответственно.

При дальнейшем смешении загрязнённых речных вод в устье (riv) с чистыми байкальскими водами (bw) их водные вклады в литорали определяются аналогично (1):

$$Part_riv_lit = \frac{C_lit - C_bw}{C_riv - C_bw} \quad (2)$$

где *C_lit* и *C_bw* – концентрация химических элементов в литорали и в байкальской воде на фоновой станции, соответственно.

Для того чтобы рассчитать водные вклады сточных вод в литорали необходимо перемножить их водный вклад, полученный на предыдущем шаге расчетов по (1) на водный вклад загрязнённых речных вод в литорали, рассчитанный по (2):

$$Part_ww_lit = Part_ww_riv \times Part_riv_lit \quad (3).$$

Для определения вкладов чистых речных вод делаются аналогичные расчёты.

При смешении двух источников достаточно знать концентрацию одного химического элемента во всех исследуемых объектах. Главное, чтобы этот элемент был 1) консервативным – смешивался чисто механически, т.е. не вовлекался бы в процессы, влияющие на его концентрацию каким-либо другим образом и 2) контрастным, т.е. его концентрация в источниках смешения должна быть различной – чем больше источники различаются по концентрации – тем лучше.

Для большей достоверности расчётов водных вкладов, конечно, лучше использовать несколько элементов, удовлетворяющим данным условиям, усредняя полученные результаты (Чебыкин и др., 2024а) и/или же проводя расчёты одновременно по нескольким элементам (Чебыкин и др., 2024б, 2025). Второй способ необходимо использовать в случае одновременного смешения трёх и более источников, например, когда в литораль Байкала поступают речные воды, а в непосредственной близости

сбрасываются сточные воды (Чебыкин и др., 2025). В этом случае решается система уравнений:

$$C_{i_расчет} = Part_riv \times C_i_riv + Part_ww \times C_i_ww + Part_bw \times C_i_bw \quad (4),$$

$$Part_riv + Part_ww + Part_bw = 1 \quad (5),$$

$$Part_riv \geq 0;\ Part_ww \geq 0;\ Part_bw \geq 0 \quad (6),$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{n} \left[\left(\frac{C_{i_расчет} - C_i}{C_i} \right) \times 100 \right]^2} \rightarrow 0 \quad (7),$$

где *Ci_расчет* и *Ci* – расчётная и измеренная концентрация элемента *i* в объекте смешения (в литорали), соответственно; *Ci_riv*, *Ci_ww*, *Ci_bw* – измеренные концентрации элемента *i* в речной, сточной и байкальской (фоновая станция) воде соответственно, а *Part_riv*, *Part_ww*, *Part_bw* – искомые массовые (или объёмные) доли соответствующих вод; Δ – среднеквадратичное расхождение расчётных и измеренных концентраций элементов в объекте смешения (в %).

Решение системы уравнений (4)-(7) является задачей на оптимизацию переменных (долей *Part_riv*, *Part_ww*, *Part_bw*) при поиске глобального минимума по параметру Δ и осуществляется численными методами с помощью модуля «Поиск решения» в ПО Excel.

Очевидно, что геохимические вклады (ГХВ) источников по отдельным компонентам могут быть как больше, так и меньше, чем их водные вклады. Это зависит от степени загрязнённости источников относительно объектов смешения. Например, при последовательном смешении «река-стоки» и «загрязнённая река-озеро» ГХВ сточных вод вычисляется согласно:

$$Part_E_ww_riv = Part_ww_riv \times C_ww / C_riv \quad (8),$$

где *Part_E_ww_riv* – доля элемента сточных вод *E_ww* от общей концентрации элемента *E_riv* в реке после смешения (в устье).

$$Part_E_ww_lit = Part_ww_lit \times C_ww / C_lit \quad (9),$$

где *Part_E_ww_lit* – доля элемента сточных вод *E_ww* от общей концентрации элемента *E_lit* в воде литорали.

Следует заметить, что точный расчёт ГХВ возможен только при учёте всех значимых источников и при условии консервативного смешения элементов. Особенно это актуально в зонах смешения разных типов вод, например в литорали озера, где некоторые элементы могут частично утилизироваться на физико-химических или биогеохимических барьерах или поступать из донных отложений в процессе диагенеза или из других скрытых источников. Т.е. расчёт ГХВ ведётся с учётом возможного неконсервативного поведения элементов по формуле (10), где вместо измеренных концентраций элементов в литорали *C_lit* используются их расчётные значения *C_lit'* на основе полученных ранее водных вкладов.

$$C_lit' = Part_riv_lit \times C_riv + Part_bw_lit \times C_bw \quad (10).$$

По тому же принципу рассчитывается концентрация в более сложных объектах, когда одновременно смешивается более двух источников (Чебыкин и др. 2024б). Данная поправка позволяет найти реальные вклады консервативных элементов от основных источников в объектах смешения до того, как они могли бы утилизироваться из водного тела или, наоборот, поступить из скрытых источников. Таким образом, мы получаем более объективную оценку ГХВ от рассматриваемых источников и, к тому же, имеем возможность провести тест на присутствие скрытых источников поступления элементов, сравнивая расчёты ГХВ с поправкой на консервативное поведение элементов по (10) и без неё (строго по 10). При наличии таких источников и их значимых вкладов по

отдельным элементам, полученные ГХВ от основных источников, естественно, уменьшаются – их можно скорректировать.

Разработан геохимический метод с использованием максимально широкого спектра химических элементов для оценки степени влияния локальных источников на водные объекты, в том числе и со сложным характером смешения (река-стоки-озеро). Предложенный метод может быть использован для сравнения любых водных объектов и/ или их отдельных участков по степени влияния антропогенных и/ или природных геохимических факторов и расширен на любые другие загрязняющие вещества при их совместном определении с химическими элементами. Разработанный метод опробован на трёх участках литорали оз. Байкал, испытывающих наибольшую антропогенную нагрузку от централизованного сброса сточных вод: г. Слюдянка, г. Байкальск, г. Северобайкальск. Определены водные и геохимические вклады сточных вод и основные контуры рассеяния элементов в поверхностных водах литорали. Основные результаты сводятся к следующему:

г. Слюдянка (06.09.2022). Водный вклад сточных вод КОС г. Слюдянки в общий речной сток р. Похабиха составляет 1,75 % – довольно большая величина вследствие небольших размеров самой реки. Водный вклад загрязнённых речных вод в литорали Байкала составляет 55-11 % в прибрежной зоне (~ 1 м от уреза и на удалении до 90 м латерально от устья) и 2-3 % в поверхностной воде в секторе ~ 50 м от уреза напротив устья. Соответствующие водные вклады сточных вод в литорали Байкала составляют 0.97-0.20 % и ~0.04-0,05 %. Геохимический вклад (ГХВ) сточных вод в р. Похабиха был наиболее значим по P (56 %), Cl (43 %), Sb (39 %), Na (36 %), Zr (25 %), K (24 %), Cs (22 %), Ga (20 %), Ni (20 %), As (19 %), Rb (16 %), Br (10 %) и Ti (10 %), в прибрежной зоне Байкала – по P (44-16 %), Cl (35-13 %), Zr (20-7 %), Na (17-3 %), Cs (16-5 %), Ga (16-5 %), K(13-3 %) и Rb (12-4 %), а в секторе 50 м от уреза в озере Байкал уменьшался и составлял по Mn (~ 7-6 %), P (~ 5-4 %) Cl (~ 4-3 %), Zr (~ 2 %), Cs (1,4-1 %), Ga (1,3-1 %) и Rb (~ 1 %). Наибольший суммарный геохимический вклад (СГХВ) сточных вод КОС г. Слюдянки, рассчитанный по 32 информативным элементам, обнаружен в р. Похабиха (440 %), в прибрежной зоне Байкал он составляет 86-263 %, в поверхностной воде в секторе 50 м от уреза – 24-29 %.

г. Байкальск (05.09.2022). Водный вклад сточных вод КОС г. Байкальска в прибрежной воде озера в зоне влияния Пруда-аэратора БЦБК (накопителя сточных вод) составляет 3,4 ± 0,3 %, что указывает на грунтовые протечки (вероятно, из-за нарушения целостности конструкции). Основными источниками формирования прибрежных вод являются байкальская вода (56 ± 4 %) и р. Б. Осиновка (41 ± 4%), устье которой находится в 180 метрах восточнее Пруда-аэратора. В поверхностных водах литорали Байкала над подводной трубой сброса сточных вод и в радиусе 50 м от неё водные вклады сточных вод составляют 0.034-0.19 %, речных вод – 1.7-2.1 %, байкальских вод ~ 98 %. Из исследованных объектов наибольшему геохимическому влиянию сточных вод КОС г. Байкальска подвержена прибрежная вода Байкала напротив Пруда-аэратора – СГХВ сточных вод, рассчитанный как сумма вкладов по 31 информативному химическому элементу, здесь составляет 561 %, что на порядок больше, чем в поверхностной воде над оголовками подводных труб сброса (14-71 %). В прибрежной воде Байкала наиболее значимы ГХВ сточных вод по Mn, Cl, Ga и Ge (69-51 %), рангом ниже следуют B (45 %) и P (39 %), затем Rb (24 %), Na (22 %) и K (24 %), затем Cs, Fe, Li, Ni, Cr, V, Co и Sb (18-10 %). В поверхностной воде озера в зоне влияния подводных труб сброса сточных вод в секторах ~ 145 и ~ 190 м от уреза их ГХВ наиболее значимы по Mn (5.3-23 %) и Ga (3-14%), в меньшей степени по Ge (1.2-6.1 %), Cl (1.1-5.6 %), B (0.57-3.1 %), P (0.42-2.3 %), Rb (0.34-1.8), Cs (0.27-1.5%), Cr (0.23-1.3 %), Si, K (0.23-1.2 %), Fe (0.2-1.1 %) и Na (0.19-1 %).

г. Северобайкальск (13.09.2022). Водный вклад сточных вод КОС г. Северобайкальска в общий речной сток р. Тыя очень мал (~0.04%) вследствие большой водности самой реки. Водный вклад р. Тыя в литорали Байкала составляет 86-8% в прибрежной зоне (~ 1 м от уреза и на удалении до 2.7 км латерально от устья), в поверхностной воде напротив основной протоки – 26-4% в секторе 200-300 м от уреза и менее 0,5% в секторах 500-600 и 800 м от уреза. Соответствующие вклады сточных вод в литорали Байкала составляют 0.036-0.003%, 0.011-0.002% и менее 0.0002% соответственно. Из исследованных объектов наибольшему геохимическому влиянию сточных вод КОС г. Северобайкальска подвергается р. Тыя и прибрежная вода в литорали Байкала в 550 м вправо от устья основной протоки, где водный вклад речных вод максимальный (86 %). В этих объектах СГХВ сточных вод, рассчитанный по 41 информативному химическому элементу, составляет 53 и 35% соответственно. На остальных станциях в литорали Байкала в прибрежной зоне СГХВ небольшой и составляет 2.8-7.5%. В секторе 200-300 м от уреза СГХВ сопоставим с прибрежной зоной и составляет 1.5-8.1%. В секторах 500-600 и 800 м от уреза СГХВ минимальный – 0.07-0.21%. В р. Тыя основным загрязняющим элементом сточных вод является Cl – его ГХВ составляет 29%, высокие вклады также характерны для P (~7%), Na (~4%), Zn (~3%), Sb (1.3%), B (1.2%) и K (1.1%). Наибольшее геохимическое влияние сточных вод в прибрежной зоне проявляется по Cl (16-0.47%) и P (7-0.77%), в меньшей степени по Na (2.4-0,1%) и Zn (2.4-0,33%). В секторе ~ 200-300 м от уреза наибольшее влияние сточных вод проявляется по P (0,38-2,4%) и Cl (0.22-1.8%). В секторах ~ 500-600 м и 800 м от уреза геохимическое влияние сточных вод минимальное – ГХВ сточных вод не превышают 0,1%. Наибольшее влияние сточных вод здесь заметно по Mn (0,006-0.07%), P (0.004-0.04%) и Cl (0.002-0.02%). Таким образом, основное влияние загрязненных вод р. Тыя на прилегающую литораль Байкала ограничено сектором 200-300 м от уреза во фронтальном направлении, и далее, к границам сектора 500-600 м от уреза, сильно падает, однако в прибрежной зоне распространяется за пределы дельты.

Литература

Грачев М.А. Что грозит Байкалу? // В мире науки. 2015. №1. С. 4–15.

Ханаев И.В., Дзюба Е.В., Кравцова Л.С., Грачев М.А. Влияние массового развития зеленых нитчатых водорослей на воспроизводство желтокрылки Cottocomephorus grewingkii (Dybowski, 1874) (Cottidae) в условиях экологического кризиса озера Байкал // Доклады РАН. 2016. Т. 467. №1. С. 119–121.

Сутурин А.Н., Чебыкин Е.П., Мальник В.В., Ханаев И.В., Минаев А.В., Минаев В.В. Роль антропогенных факторов в развитии экологического стресса в литорали оз. Байкал (акватория пос. Листвянка) // География и природные ресурсы. 2016. №6. С. 43–54.

Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н. Геохимический метод оценки влияния загрязненных стоков на водные объекты на примере г. Слюдянка, р. Похабиха и Южного Байкала // Геосферные исследования. 2024. №4. С. 107–136.

Чебыкн Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н. Загрязнение реки Тыя и поверхностных вод литорали оз. Байкал в зоне влияния сточных вод КОС г. Северобайкальска: оценка геохимическим методом // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. №2. С. 82–102.

GEOCHEMICAL METHOD OF ASSESSMENT OF THE DEGREE OF IMPACT OF LOCAL SOURCES ONTO WATER BODIES ILLUSTRATED BY LAKE BAIKAL

E.P. Chebykin, N.N. Kulikova, Ye.V. Likhoshway, A.N. Suturin

A geochemical method for the assessment of the degree of impact of local sources onto water bodies is developed. The method consists of two consequent calculation procedures – calculation of water contributions at each mixing stage and geochemical contributions by each element and their sum from a pollution source. The algorithms of water contribution calculation from mixing sources (waste, clean riverine and Baikalian background waters) are realized using a wide spectrum of contrast conservative chemicals, they are conducted taking into account a probable non-conservative behavior of chemicals at physical-chemical and biogeochemical barriers. The proposed method may be used for comparison of water bodies and/ or their parts by the degree of geochemical factors impact and extended for any pollutants.

СТОЙКИЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ (СОЗ) В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ЮЖНОЙ ЧАСТИ ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ: ИСТОЧНИКИ И ПУТИ ПОСТУПЛЕНИЯ

Г.М. Чуйко, А.Н. Шаров
Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

Исследовано содержание и качественный состав различных групп стойких органических загрязняющих веществ (СОЗ) в донных отложениях 15 озер, расположенных в центральной и южной части Тюменской области и различающихся по морфометрическим и гидрохимическим характеристикам. Показано, что, независимо от различий характеристик и локализации озер, содержание в их донных отложениях исследованных СОЗ (ПХБ, ДДТ, ГХЦГ и гексахлорбензола) находится на фоновых уровнях, а их качественный состав деградирован по сравнению с исходным продуктом. Из этого следует, что СОЗ в эти озера поступают из удаленных источников путем глобального атмосферного переноса. Вместе с тем, для отдельных озер источник поступления ДДТ и ГХЦГ может носить слабо интенсивный локальный характер.

Одна из актуальных экологических проблем современного индустриального общества – глобальное антропогенное загрязнение пресноводных объектов стойкими органическими загрязняющими веществами (СОЗ). Оно приводит к ухудшению качества водных ресурсов, негативно влияет на состояние водных животных и экосистем и представляет угрозу здоровью человека (Цыганков и др., 2015). Известно, что многие СОЗ представляет собой смесь исходного вещества и продуктов его деградации с преобладанием первого. Попав однажды в окружающую среду в виде коммерческого продукта, имеющего относительно постоянный качественный состав, СОЗ могут накапливаться в донных отложениях (ДО) и сохраняться без существенных изменений продолжительное время. Однако при более длительном нахождении во внешней среде коммерческие смеси постепенно подвергаются трансформации, меняя свой спектр в сторону увеличения доли продуктов их деградации. Анализ спектра СОЗ в ДО позволяет оценить пути и источники их поступления в водные объекты на конкретных территориях (Чуйко и др., 2022).

Цель исследования – определить содержание и спектр СОЗ в ДО в некоторых озерах Тюменской области, установить пути и источники их поступления в водоем.

Пробы ДО отбирали в июле 2022 г. с лодки с помощью лота с храпцом на 15 озерах центральной и южной частях Тюменской области (рис.). Грунт из 5-7 подъемов на каждой станции объединяли и использовали для последующего анализа СОЗ. Гидрохимические характеристики озер и содержание хлорофилла *a* определяли с помощью мультипараметрического зонда YSI EXO2 (YSI Inc, USA), площадь акватории – планиметрически в программе Яндекс Карты. Для анализа СОЗ использовали 5 см

верхний слой ДО. После доставки в лабораторию пробы ДО высушивали на воздухе и измельчали в шаровой мельнице. Аликвоты по 5 г отправляли в ФГБУ «НПО «Тайфун» (Обнинск) для количественного и качественного определения СОЗ методом ХМС высокого разрешения.

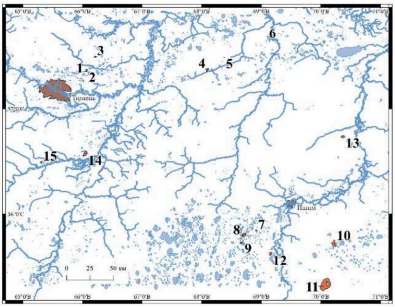


Рис. Карта Тюменской области с указанием локализации исследованных озер (обозначены 1-15), соответствующие им названия представлены в таблице 1

При анализе источников и путей поступления СОЗ в озера использовали методологический подход, изложенный ранее (Чуйко и др., 2022). При этом исходили из того, что при локальном свежем поступлении состав СОЗ в верхнем слое ДО близок к коммерческому препарату, продукты его деградации обнаруживаются в минимальном количестве, а содержание выше фонового уровня.

При поступлении с атмосферными осадками, состав коммерческой смеси существенно трансформирован в сторону увеличения продуктов её деградации из-за долгого циркулирования в окружающей среде, а содержание близко к глобальным фоновым уровням (Чуйко и др., 2022).

Установлено, что исследованные озера Тюменской области заметно различаются по своим характеристикам (табл.1). Большинство из них по классификации П.В. Иванова 1948 года (Китаев, С.П.) как по площади акватории, так и по средней глубине относятся к классу малые (<10 км^2 и 2-4 м) и очень малые (<1 км^2 и <2 м). Исключение составляют оз. Соленое и Сингуль, площадь которых равняется соответственно 82.8 и 11.6 км^2. В зависимости от различных характеристик озера разделяются на типы (Китаев, 2007): по концентрации хлорофилла *a* в воде – олиготрофные болотные (2.6 мкг/л), мезотрофные (3.45-8.99 мг/л), мезо-эвтрофные (11.51 мг/л) и эвтрофные (31.6 – 47.5 мкг/л); по минерализации – ультрапресные (TDS 0.001-0.004 г/л), пресные (TDS 0.1 – 1 г/л) и солоноватые (TDS 1.7-12 г/л).

Содержание растворенного кислорода в воде большинства озер варьирует от 7.2. до 10.4 мг O_2/л; минимальные и максимальные значения соответственно отмечены в оз. Юрминское и Б. Елейское (5.3 и 12.5 мг O_2/л). По величине pH воды большинство озер располагаются в ряду от 7.5 (оз. Юрминское) до 9.9 (оз. Калган); по мутности воды от 0.9 NTU (оз. Кучак) до 55 NTU (оз. Безрыбное).

В ДО всех исследованных озер, как и в других регионах РФ (Лукьянова и др., 2012; Чуйко, Подгорная, 2018; Чуйко и др., 2022), обнаружены преимущественно полихлорированные бифенилы (ПХБ), дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ) и его метаболиты (ДДД, ДДЕ), изомеры гексахлорциклогексана (ГХЦГ) и гексахлорбензол (ГХБ) (Табл.2). По содержанию в ДО этих озер данные группы СОЗ располагаются в ряду ПХБ>ДДТ=ГХЦГ>ГХБ и демонстрируют низкие значения, варьирующие соответственно в диапазонах 3.79-38.48, 0.18-3.56, 0.15-1.46 и 0.03-0.35 нг/г с.м. (сухой массы), что близко к фоновым для РФ уровням (Лукьянова и др., 2012; Чуйко, Подгорная, 2018; Чуйко и др., 2022). Для сравнения, в Рыбинском водохранилище в зоне локального выпуска промышленных сточных вод содержание ПХБ и ДДТ в ДО равняется соответственно 1279.9 и 13.7-27.1 мкг/кг с.м. (Чуйко, Подгорная, 2018). При этом спектр гомологических групп ПХБ соответствует их соотношению в коммерческой смеси Арохлор 1254 или Совол, а в смеси ДДТ и его метаболитов преобладает исходный коммерческий продукт.

Таблица 1. Характеристики исследованных малых озер Тюменской области

Озеро		Координаты	Площадь акватории, км²	Глубина, м	Электропроводность, µS/см	Минерализация, мг/л	Мутность, NTU	pH	O_2 раст., мг/л	Хлорофилл *a*, мкг/л	Трофический статус	Донные отложения*		Географическая зона
№	Название											Тип	Органическое вещество, %	
1	Чертанкуль	57,32°N; 66,04°E	0,23	1	1,7	1	2,62	8,7	10,3	2,64	О	МФ	88,5	ЮТ
2	Кучак	57,35°N; 66,06°E	3,12	4,5	5,2	4	0,91	8,5	10,4	3,95	М	ТИ	58,4	ЮТ
3	Б. Елейское	57,48°N; 66,21°E	1,92	1	152,4	108	2,37	8,7	12,5	8,35	М	МФ	90,5	ЮТ
4	Юрминское	57,37°N; 68,10°E	4,10	1	379,2	254	5,20	8,1	5,3	5,63	М	ТГИ	32,7	ЮТ
5	Ушаково	57,48°N; 68,38°E	0,035	2	3,3	2	3,78	7,6	9,8	3,45	М	ГИ	12,1	ЮТ
6	Малое	57,65°N; 69,11°E	0,19	1	55,5	35	1,64	9,0	10,3	38,22	Э	М	92,0	ЮТ
7	Угрюмое	55,84°N; 68,92°E	1,47	1,7	986,6	661	7,22	7,5	9,5	3,98	М	ПИ	25,9	ЛС
8	Б. Карьково	55,79°N; 68,71°E	8,69	2	4536,6	2947	4,28	8,9	5,4	17,53	Э	ТГИ	39,9	ЛС
9	Бердюжье	55,73°N; 68,68°E	3,62	2	2643,5	1790	1,51	9,3	9,9	8,99	М	ТГИ	37,9	ЛС
10	Травное	55,71°N; 70,25°E	0,39	1	651,8	444	1,94	8,8	9,1	7,01	М	ГИ	15,1	ЛС
11	Соленое	55,36°N; 70,11°E	82,80	3	16399,4	11979	53,44	8,7	7,2	38,6	Э	ГИ	20,8	ЛС
12	Безрыбное	55,60°N; 69,16°E	6,80	3	2357,3	1682	54,97	9,5	9,1	31,56	Э	П	3,3	ЛС
13	Калган	56,73°N; 70,38°E	6,40	2	476,1	312	8,00	9,9	10,3	11,51	М-Э	-	-	ЛС
14	Сингуль	56,59°N; 66,04°E	11,60	4	527,6	332	15,50	9,7	11,1	47,51	Э	ТИ	54,1	ЛС
15	Теренкуль	56,49°N; 65,32°E	2,52	5	723,2	485	9,45	9,3	9,8	37,45	Э	ГИ	18,8	ЛС

Примечание: О – олиготрофное, М – мезотрофное, Э – эвтрофное озера; ЮТ – южная тайга, ЛС – лесостепь; МФ – макрофиты, П – песок, ПИ – песчанистый ил, ТГИ – торфогенный ил, ТИ – торфянистый ил. * данные взяты из (Удоденко и др., 2024).

Таблица 2. Общее содержание отдельных групп СОЗ и их качественный состав в ДО некоторых озер Тюменской области

Озеро		Содержание и качественный состав СОЗ в ДО						
		ПХБ		ДДТ и метаболиты		Изомеры ГХЦГ		ГХБ
№	Название	[С]	СГГ	[С]	К	[С]	К	[С]
1	Чертанкуль	19,13	13:41:39:7:0	0,49	0,96	0,77	0,93	0,08
2	Кучак	38,48	5:37:50:8:0	1,06	0,89	1,46	0,55	0,12
3	Б. Елейское	14,32	4:40:48:8:0	0,41	0,95	0,48	1,29	0,05
4	Юрминское	7,10	8:43:41:8:0	0,27	0,80	1,00	0,54	0,05
5	Ушаково	7,70	12:42:38:8:0	0,51	0,42	0,40	0,67	0,07
6	Малое	21,60	7:38:46:9:0	1,22	0,63	0,68	0,79	0,08
7	Угрюмое	3,79	8:40:42:9:0	0,94	0,22	0,46	1,00	0,03
8	Б. Карьково	13,47	4:40:47:8:0	0,9	0,18	0,56	1,00	0,07
9	Бердюжье	20,72	10:38:45:8:0	3,56	0,11	0,80	0,57	0,25
10	Травное	18,46	6:40:47:7:0	0,88	0,57	0,79	1,39	0,19
11	Соленое	16,06	13:41:32:7:0	0,61	0,61	0,76	0,73	0,35
12	Безрыбное	5,72	8:36:47:9:0	0,18	0,80	0,15	0,88	0,34
13	Калган	14,47	10:39:44:7:0	0,81	0,27	0,63	0,70	0,09
14	Сингуль	21,33	14:39:40:7:0	1,05	0,27	0,62	0,72	0,09
15	Теренкуль	23,10	10:37:45:11:0	2,41	0,19	0,88	0,80	0,14
Araclor1254*			1:16:57:25:1	-	-	-	-	-
Совол*			1:23:53:22:1	-	-	-	-	-

Примечание: [С] – суммарное содержание соответствующей группы СОЗ в ДО, мкг/кг сухой массы (с.м.); СГГ – соотношение содержащих одинаковое число атомов хлора гомологических групп ПХБ (3-, 4-, 5-, 6-, 7-ХБ), %; К – коэффициент, равный соотношению содержания коммерческой формы ДДТ к сумме его метаболитов (К=ДДТ/∑ДДД, ДДЕ) или линдана (γ-ГХЦГ) к сумме остальных изомеров (К=γ-ГХЦГ/∑α-, β-, δ-ГХЦГ). * – представлены данные из работы (Ivanov, Sandell, 1992).

На фоновых участках водохранилища уровень содержания ПХБ, ДДТ и ГХЦГ варьирует соответственно в пределах 23-43, 0.43 и 0.03 нг/г с.м. Спектр гомологических групп ПХБ смещен в сторону низкохлорированных конгенеров, в смеси ДДТ преобладают метаболиты, а в спектре изомеров ГХЦГ линдан (γ -ГХЦГ), являющийся исходным коммерческим продуктом, присутствует в меньшем количестве по сравнению с суммарным содержанием остальных изомеров.

Исследованные озера Тюменской области находятся в зоне, где деятельность человека не связана с широким использованием СОЗ и крупные локальные источники загрязнения окружающей среды отсутствуют. Анализ структуры и содержания СОЗ в ДО озер показывает, что основной путь их поступления – атмосферный перенос из более теплых южных в более холодные северные широты и выпадение там с осадками («глобальная дистилляция» или «эффект кузнечика»). Это следует из близкого к фоновому уровню содержания СОЗ и смещению качественного состава каждой из групп в сторону преобладания продуктов деградации по сравнению с коммерческими продуктами. Вместе с тем, несмотря на низкое содержание в ДО СОЗ, в целом, в озерах Чертанкуль и Б. Елейское для ДДТ и ГХЦГ, а в оз. Угрюмое, Б. Карьково и Травное только для ГХЦГ отмечены значения К≥1, что указывает на слабую деградацию этих СОЗ по сравнению с коммерческими продуктами. А это может свидетельствовать о том, что данные хлорорганические пестициды (ХОП) могли попасть в озера сравнительно недавно при их локальном использовании в небольших масштабах, например, в результате обработки прилегающих к озерам территорий в частном или централизованном порядке. Предварительный анализ полученных данных не выявил

корреляций между содержанием и спектром СОЗ, с одной стороны, и отдельными характеристиками исследованных озер, с другой.

Работа выполнена в рамках плановых бюджетных тем №№ г/р 121050500046-8, 124032500015-7 и при частичной финансовой поддержке Правительства Тюменской области в рамках проекта Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра № 89-ДОН (2).

Литература

Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов / Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2007. 394 с.

Лукьянова О.Н., Бродский Е.С., Чуйко Г.М. Стойкие органические загрязняющие вещества в донных отложениях эстуарных зон трех рек залива Петра Великого (Японское море) // Вестник ТюмГУ. 2012. №12. С. 119–126.

Удоденко Ю.Г., Законнов В.В., Комов В.Т. Ртуть в донных отложениях озер бассейна реки Обь // Биоразнообразие и экология популяций и сообществ водных и околоводных организмов бассейна Средней и Нижней Оби. Волгоград: Перископ-Волга, 2024. С. 41-44.

Цыганков В.Ю., Боярова М.Д., Лукьянова О.Н. Химические и экологические аспекты стойких органических загрязняющих веществ. Владивосток: Мор. гос. ун-т им. адм. Г.И. Невельского, 2015. 119 с.

Чуйко Г.М., Законнов В.В., Бродский Е.С., Шелепчиков А.А. Методический подход к оценке источников и путей поступления стойких органических загрязняющих веществ (СОЗ) в пресноводные объекты // Здоровье населения и среда обитания. 2022. Т. 30. №10. С. 33–39.

Чуйко Г.М., Подгорная В.А. Антропогенное воздействие на экосистему водохранилища. Пространственное распределение органических загрязняющих веществ в экосистеме водохранилища (ретроспективный аналитический обзор) // Структура и функционирование экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века. М.: РАН, 2018. С. 357-370.

Ivanov V., Sandell E. Characterization of polychlorinated biphenyl isomers in Sovol and trichlorodiphenyl formulations by high-resolution gas chromatography with Electron capture detection and high-resolution gas chromatography-mass spectrometry techniques // Environ. Sci. Technol. 1992. V.26 (10). P. 2012–2017.

PERSISTENT ORGANIC COMPOUNDS (POPs) IN BOTTOM SEDIMENTS OF SMALL LAKES IN THE CENTRAL AND SOUTHERN TYUMEN REGION: SOURCES AND ROUTES OF ENTRY

G.M. Chuiko, A.N. Sharov

The content and qualitative composition of various groups of persistent organic pollutants (POPs) in bottom sediments of 15 lakes located in the central and southern parts of the Tyumen region and differing in morphometric and hydrochemical characteristics were studied. It was shown that, regardless of the differences in the characteristics and localization of the lakes, the content of the studied POPs (PCBs, DDT, HCH and hexachlorobenzene) in their bottom sediments is at background levels, and their qualitative composition is degraded compared to the original product. It follows from this that POPs enter these lakes from remote sources through global atmospheric transport. At the same time, for individual lakes the source of DDT and HCH may be of a low-intensity local nature.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ БОБРОВЫХ ПРУДОВ В МАЛЫХ РЕКАХ СЕВЕРА ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

А.Г. Шарифуллин[1], А.В. Гусаров[1], Д.В. Иванов[2]
[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет
[2]Институт проблем экологии и недропользования АН РТ

Проанализированы распределения тяжелых металлов в донных отложениях бобровых прудов малых рек севера Предволжья Республики Татарстан. Анализ полученных результатов позволяет отметить сравнительно равномерное распределение этих металлов вдоль изученных рек. Незначительные изменения выявлены для валовых форм Co, Zn и Cr, а также подвижных форм Cd, Zn и Fe. Верхние и средние участки водотоков отличаются несколько более высокими содержаниями валовых и подвижных форм вышеуказанных элементов в сравнении с нижним течением. Концентрация валовых форм тяжелых металлов достоверно коррелирует с гранулометрическим составом донных отложений и содержанием в них органического вещества. Статистически значимыми факторами в распределении подвижных форм являются расстояние от устья, длина плотин и прудов, а также содержание органического вещества.

В начале прошлого столетия евразийский бобр (*Castor fiber* L.) в Евразии встречался крайне редко из-за хищнического промысла. Для восстановления численности данного животного были предприняты ряд мер, которые включали повсеместный запрет на охоту, организацию специальных заповедников в местах их крупных колоний и искусственное расселение. Данные меры позволили восстановить популяцию бобров, и в настоящее время их численность стабильно увеличивается за счёт саморасселения в незанятые ими водотоки и повышения плотности на ранее освоенных участках. Изучение влияния бобровой деятельности на геохимические характеристики донных отложений малых рек, проводились преимущественно в Северной Америке, а также Северной и Центральной Европе. В России подобные работы начались гораздо позже и весьма малочисленны. При этом весьма мало исследований, в которых проведена пространственная оценка влияния бобровых сооружений малых рек на распределение тяжелых металлов (ТМ). На примере двух рек лесостепной зоны возвышенного востока Русской равнины выполнен анализ распределения ТМ в донных отложениях малых рек, подверженных влиянию бобров.

Исследования проводились в летне-осенний период 2022 года на реках Морквашинка и Морквашка (Верхнеуслонский район Республики Татарстан), которые являются правыми притоками р. Волги. Согласно данным геодезической съемки, общая длина реки Морквашинка составляет 16.6 км, а реки Морквашка – 7.8 км. Для реки Морквашинка характерна асимметрия склонов долины: правый склон почти на всем протяжении крутой и высокий, левый склон – сравнительно более пологий. Долина реки Морквашка относительно симметрична. Бассейны исследуемых рек сложены породами верхней перми, сверху перекрытыми толщей делювиально-солифлюкционных суглинков. В исследуемых речных бассейнах распространены тяжелосуглинистые и глинистые серые лесные остаточно-карбонатные почвы. Донные отложения рек и приводораздельные почвы в целом характеризуются однородным гранулометрическим составом с преобладанием (более 69-75%) фракции физической глины (<0.01 мм).

Для выявления локальных фоновых значений концентраций ТМ в бассейнах исследуемых рек были отобраны образцы верхнего слоя почвы на пяти площадках, расположенных на приводораздельных поверхностях. Образцы донных отложений были

отобраны в приплотинной части 27 прудов с помощью ручного пробоотборника с глубины 0–20 см. Дополнительно в 5 прудах были отобраны образцы в средней части и в зоне выклинивания подпора прудов, в естественном русле без плотин ив приустьевых частях рек. В одном из прудов с помощью бура были отобраны керны донных отложений. На основе изменения окраски и структуры в кернах были выделены аккумулятивные слои, определена их мощность и глубина залегания. Всего в ходе полевых работ было отобрано 86 образцов почв и донных отложений.

Гранулометрический состав анализировался пипеточным методом по ГОСТ 12536-2014. Содержание общего органического вещества в отобранных образцах почв и донных отложений определялось методом сухого озоления при температуре 550 °С по ПНДФ 16.2.2:2.3:3.32–02. Содержание валовых и подвижных форм тяжелых металлов определялось по ПНД Ф 16.2.2:2.3.71–2011. Концентрация металлов в растворе измерялась на атомно-абсорбционном спектрофотометре AAnalyst 400 (Perkin Elmer) в пламени ацетилен-воздух. Образцы почвы обрабатывались растворами: 5М раствором HNO_3 для извлечения валовых форм, ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH=4.8 для извлечения подвижных форм.

Статистическая обработка данных проводилась в программном приложении XLSTAT 2016.02.28451 для Microsoft Excel и OriginPro 10.2.0.196. Определение величины линейной связи осуществлялось с использованием коэффициента корреляции Спирмена. Для определения влияния факторов на распределение ТМ использовался RDA тест (RedundancyAnalysis), анализ избыточности. Предварительно проводилось нормирование данных для снижения размерности признакового пространства. Значимость влияния факторов (предикторов) в RDA оценивалось с использованием теста значимости (PermutationTest) и дисперсионного анализа (ANOVA).

Анализ полученных результатов позволяет отметить равномерное распределение элементов вдоль рек. Незначительные изменения выявлены для валовых форм Co, Zn и Cr, и подвижных форм Cd, Zn и Fe. Верхние и средние участки водотоков отличаются несколько более высокими содержаниями вышеуказанных элементов в сравнении с нижним течением. Полученные результаты демонстрируют высокую степень подвижности таких элементов как Cd, Pb, Co и Mn.

Распределение валовых и подвижных форм ТМ внутри прудов поверхностных донных отложений достаточно равномерное, за исключением Cd и Pb. Так, концентрация Cd увеличивается от начала пруда к приплотинной части, а Pb, наоборот, уменьшается.

По мере увеличения глубины залегания донных отложений наблюдается слабая тенденция уменьшения концентрации металлов в зоне выклинивания подпора, помимо подвижных Cr и Fe. В средней части содержание валовых форм однородно, кроме Pb и Mn, для которых характерна тенденция к увеличению концентрации; схожая картина на данном участке выявлена и для подвижных форм. В приплотинной части отмечается разнонаправленная тенденция: увеличение валовых форм с глубиной и уменьшение подвижных, кроме Cd.

По результатам корреляционного анализа выявлено статистически значимое изменение гранулометрического состава, содержания органического вещества и распределения ТМ с изменением расстояния от устья. Концентрация валовых форм хорошо коррелируют с содержанием глины/песка, а также органического вещества. В распределении подвижных форм большую роль играет органическое вещество и меньшую – морфометрические характеристики плотин и прудов (особенно для Fe, Zn, Cr).

Согласно RDA анализу, наименьшие концентрации валовых форм Cd, Co, Zn характерны для прудов, расположенных в нижнем течении, с малым содержанием органического вещества в отложениях, а Cu, Ni, Cr, Mn, Fe – с высоким содержанием песчаных и низким содержанием глинистых фракций. Однако статистически значимыми

факторами в распределении данных форм являются количество органики (F = 7.02, p = 0.003) и глинистых частиц (F = 11.76, p = 0.001).

Распределение подвижных форм ТМ зависит от морфометрических характеристик прудов и плотин, а также от содержания органического вещества и доли пелитовой фракции. Наибольшие концентрации Ni, Cr и Fe характерны для относительно более длинных прудов с высокими и длинными плотинами и высокой долей пелита в осадках, а Zn – для верховьев рек с отложениями, характеризующимися максимальными показателями накопления органического вещества. Статистически значимое влияние выявлено для следующих факторов: расстояние от устья (F = 10.08, p = 0.004), длина плотин (F = 10.00, p = 0.009) и прудов (F = 18.85, p = 0.001), содержание органического вещества (F = 3.54, p = 0.048).

Установлено, что донные отложения исследуемых рек характеризуются незначительным накоплением валовых форм Fe и Cd. Концентрация таких элементов как Co, Cr, Pb сопоставима, а Cu, Ni, Zn, Mn ниже их содержания в почвах водоразделов.В целом в донных отложениях бобровых прудов концентрации валовых форм ТМ сопоставимы с содержанием их в осадках на участках с естественным руслом. Статистически значимые различия выявленытолько для Pb (p = 0.003), Cu (p = 0.018). Содержание подвижных форм Pb, Co, Ni, Cu, Cr, Mn, Fe в донных отложениях значительно выше (в среднем в 10 раз), концентрация Cd и Zn сопоставима или незначительно выше, чем в почвах приводораздельных территорий. Статистически значимые различия между концентрациями тяжелых металлов в отложениях прудов и естественного русла отсутствуют, за исключением Cd (p< 0.0001) и Pb (p = 0.031).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10087, https://rscf.ru/project/22-77-10087/.

HEAVY METALS DISTRIBUTION PATTERNS IN BOTTOM SEDIMENTS OF BEAVER PONDS IN SMALL RIVERS OF THE NORTH OF THE VOLGA UPLAND

A.G. Sharifullin, A.V. Gusarov, D.V. Ivanov

This study presents the results of distributions of heavy metals in the bottom sediments of beaver ponds of small rivers in the north of the Pre-Volga of the Republic of Tatarstan. Analyzing the obtained results allows us to note a relatively uniform distribution of these metals along the studied rivers. Insignificant changes were revealed for the gross forms of Co, Zn, and Cr, as well as mobile forms of Cd, Zn, and Fe. The upper and middle sections of watercourses are characterized by slightly higher total content and mobile forms of the above elements compared to the lower reaches. Total heavy metals content is significantly correlated with the granulometric composition of bottom sediments and the content of organic matter in them. Statistically significant factors in the distribution of mobile forms are the distance from the mouth, the length of dams and ponds, and the content of organic matter.

ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ОНЕЖСКО-ЛАДОЖСКОГО ПЕРЕШЕЙКА (ПО МИКРОПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ДОННЫХ ОСАДКОВ ОЗЕРА НИЖНЕЕ БАТЫКОЗЕРО)

Т.С. Шелехова, Н.Б. Лаврова
Институт геологии Карельского научного центра РАН

В статье представлены результаты микропалеонтологических анализов и радиоуглеродного датирования донных отложений озера Нижнее Батыкозеро. Результаты исследования свидетельствуют о начале формирования озера в позднеледниковье, нерасчлененные осадки которого характеризуются отсутствием пыльцы и спор и наличием переотложенных морских створок диатомовых водорослей, а также присутствием характерного для приледниковых озер вида *Ellerbeckia arenaria,* указывающего на поступление талых холодных вод и перигляциальных условиях среды. Реконструированы этапы развития озера, изменения растительности в голоцене. Полученные данные показали, что распространение лесных сообществ началось в пребореале.

Комплексное изучение донных отложений с использованием спорово-пыльцевого, диатомового анализов и радиоуглеродных датировок позволяет с достаточно высокой степенью достоверности восстановить историю накопления донных отложений и выполнить реконструкции палеоклиматических условий водосборной территории (эволюции растительного покрова, гидрологических обстановок и климатических событий) с целью прогнозирования их дальнейшего развития. Кроме этого, изучение донных отложений малых озер южной Карелии приобретает особую значимость в связи с детализацией и уточнением схемы озерообразования и условий деградации последнего оледенения в лужскую и невскую (сямозерскую) стадию. Историю растительности голоцена южной части Карелии ранее изучали с помощью пыльцевого анализа торфяных залежей (Елина, 1981; Елина и др., 2000 и др.). Следует отметить, что пыльцевые спектры озерных осадков в отличие от торфяных отложений характеризуются меньшим влиянием локального фактора, что позволяет с большей уверенностью судить о региональных изменениях растительности и климата.

В донных осадках озера Нижнее Батыкозеро (N61°25′51′′;E34°24′35′′) отобрано 62 образца, с интервалами 5 см в нижней части разреза и 10 см с глубины 480 см.

Донные отложения озера Нижнее Батыкозеро представлены следующей стратиграфической последовательностью снизу вверх.

530-525 см – песок тонко- мелкозернистый с редкой примесью мелкого гравия до 3 см в диаметре, еле заметна слоистость осадка. На контакте выделяется тонкий до 1 см прослоек органики черного цвета. Контакт резкий, отличается по составу и цвету.

525-490 см – песок тонко- мелкозернистый светло-серого цвета с еле заметной слоистостью. Контакт резкий четкий, отличается по цвету и составу, в верхней части слоя слегка размытый с «размазанными» прослойками органики.

490-480 см – торф с органикой и куском неразложившейся древесины. Слой слегка уплотнен. Верхний контакт резкий, отличается по плотности, цвету и консистенции осадка.

480-420 см – сапропель с незначительной примесью тонко- мелкозернистого песка темно-оливкового цвета, слабо уплотнен, верхний контакт прослеживается нечетко, постепенный, отличается по цвету и составу. На контакте отмечаются неразложившиеся растительные остатки.

420-380 см – сапропель темно-коричневого цвета, гомогенный с единичными растительными остатками. Верхний контакт отделяется по значительному содержанию волосовидных растительных остатков.

380-300 см – сапропель грязно-оливкового цвета, гомогенный, до гл. 360см с большим количеством плохо разложившихся растительных остатков (от волосовидных до плоских).

300-200 см – сапропель гомогенный, однородный оливкового цвета с растительными остатками.

200-60 см – сапропель гомогенный оливкового цвета с разложившимися растительными остатками

60-0 см – торф светло коричневый, разжиженный, сильно обводненный.

В нижней части разреза в минерогенных отложениях осадки изучены послойно с шагом каждые 5см, в верхней части разреза в сапропелях с примесью песка и гомогенных сапропелях изучены каждые 10 см осадка.

С глубины 490-480 см из слоя торфа с органикой, четко выделяющегося на фоне минерогенной части отложений, взят образец для радиоуглеродной датировки – древесный торф с куском неразложившейся древесины с органикой и растительными остатками.

Результаты радиоуглеродного и калиброванного возрастов донных отложений оз. Нижнее Батыкозеро показали, что данные осадки сформировались 9970±140 ^{14}C лет назад (11520±230 кал.лет. назад) (LU-10676). Датирование донных отложений озера выполнено в лаборатории Санкт-Петербургского университета. Значения календарного возраста приведены на основании калибровочной программы "OxCal 4.3" (калибровочная кривая «IntCal 13») (https://c14.arch.ox.ac.uk).

Диатомовый анализ донных отложений оз. Нижнее Батыкозеро выполнен по 62 образцам. В результате исследований выявлено 283 вида и разновидности диатомовой флоры из 47 родов. Следует отметить, что диатомовый комплекс отложений не отличается высоким разнообразием. Всего выделено 6 диатомовых зон, соответствующих периодам позднеледниковья и голоцена.

Нерасчлененные осадки позднеледниковья характеризуются наличием створок морских диатомовых водорослей, что является признаком перемыва и переотложения ранее накопленных микулинских отложений. Слой торфа, сформировавшийся в пребореальное время (490-480 см), содержит «типично почвенный вид» *Hantzschia amphioxis,* впервые выявленный в осадках данного возраста. Отличительной особенностью диатомовых комплексов донных осадков озера Нижнее Батыкозеро является низкое разнообразие видов на протяжении всех этапов развития водоема с господством форм, предпочитающих низкую минерализацию воды и кислые условия среды, а также наличием редко встречающихся видов *Fragilaria constricta+f. stricta, F constricta f. trinodis*, *F. hungarica.* Кроме этого, важно отметить в отложениях позднеледниковья и пребореала значительное содержание вида *Ellerbeckia arenaria*, указывающего на длительное таяние мертвого льда и поступление в водоем талых холодных вод.

Результаты спорово-пыльцевого анализа показали, что в спектрах по всему разрезу доминирует пыльца деревьев и кустарников – 65-98% от общей суммы пыльцы наземных растений. Наиболее многочисленна пыльца ели, сосны обыкновенной и берез (*Betula* sect. *Albae*). Содержания пыльцы трав и кустарничков наибольшее в нижней части разреза (20-35%), где преобладают полыни, осоковые. Количество спор максимально в нижней части – 40-92%, наименьшие в средней части разреза (0,8-3,0%) и вновь увеличиваются в верхней части (3,5-5,3%). По изменениям в составе спектров и выделяются пять локальных пыльцевых зон (LPAZ)

В нижней части разреза (530-485 см) количество пыльцы и спор недостаточно для вычисления процентного соотношения таксонов. Это могло быть обусловлено высокой скоростью седиментации, а также незначительным поступлением пыльцы в отложения из-за слабо развитого фрагментарного растительного покрова на территории исследования. В незначительном количестве встречена пыльца *Pinus, Betula* sect. *Albae, Ulmus, Tilia,* единичные пыльцевые зерна Poaceae, *Artemisia, Ephedra*. Следует отметить, что в этой части разреза встречаются споры Polypodiaceae, количество которых достигает 1000.

LPAZ 1. Характерно максимальное содержание пыльцы трав и кустарничков (17–35%), и наименьшее – пыльцы деревьев (64–78%). Среди древесных растений преобладает пыльца *Betula* sect. *Albae* (*Betula pubescens* и *B. czerepanovii*). Пыльцы *Pinus* мало (6-10%), пыльца *Picea* встречается спорадически, в количестве менее 1%. Вклад *Betula nana u Salix* больше в нижней части LPAZ 1 и снижается к ее верхней границе. Встречена пыльца *Juniperus*. Среди пыльцы трав преобладает Poaceae (10-14%), Cyperaceae (3-9%), среди споровых – Polypodiaceae (90 % в нижней части палинозоны, 5% в верхней), на втором месте Lycopodiaceae и *Equisetum*. Обилие спор Polypodiaceae отражает узколокальную растительность вблизи от места отбора образцов. Определены споры *Selaginella selaginoides*, *Isoetes*. Палиноспектры были сформированы в пребореальное время, что подтверждается полученной радиоуглеродной датировкой (9970±140 ^{14}C л. н.). Наибольшее распространение в это время имели березовые редколесья, которые впоследствии сменились сосново-березовыми редкостойными лесами.

LPAZ 2 отличается возрастанием вклада пыльцы древесных пород до 97%, в основном за счет Pinus (от 30 до 74%). Сокращается количество пыльцы *Betula* sect. *Albae* (от 60% – до 19%). Появляется пыльца *Ulmus, Alnus*. Уменьшается содержание основных компонентов спектров среди трав и споровых (*Poaceae, Cyperaceae, Polypodiaceae, Equisetum,* Lycopodiaceae). Увеличивается разнообразие и частота встречаемости пыльцы водных растений: *Nymhaea, Nuphar, Sparganium, Typha*. Распространению сосны способствовал сухой климат и снижение уровня грунтовых вод. На территории исследований преобладали сосновые и березово-сосновые леса. На мелководьях водоема началось распространение гидрофитов.

LPAZ 3. Вклад *Picea* постепенно увеличивается до 65%, доля *Betula* sect. *Albae* и *Pinus*, напротив, уменьшается, колеблясь в пределах 50-13% и 49-13% соответственно. Главной особенностью этой палинозоны является постоянное присутствие незначительного количества пыльцы термофильных древесных пород *Tilia*, *Quercus*, *Ulmus*, *Corylus*. Увеличивается значение *Alnus glutinosa* и *Alnus incana*. Зафиксирована пыльца *Carpinus, Frangula alnus, Sorbus, Viburnum, Lonicera, Humulus lupulus,* Grossulariaceae. Появляется *Polygonum amphibium, Menuanthes trifoliata*. Доля спор незначительна. Характер спектров позволяет предположить, что они были сформированы в атлантическое время. Расселение ольхи клейкой и широколиственных пород могло быть обусловлено потеплением и увеличением влажности климата, свойственного атлантическому периоду. Ель начала играть все более существенную роль. Еловые южнотаежные леса занимали местообитания с богатыми, достаточно увлажненными почвами, сосняки произрастали на легких, каменистых и бедных грунтах. К долинам ручьев были приурочены черноольхово-еловые сообщества. В состав лесов входили береза, вяз, липа, в подлеске встречались рябина, калина и др. В прибрежной части озера, формировались болотные палеосообщества.

В LPAZ 4 преобладает пыльца *Picea* (54-41%). Содержание пыльцы *Pinus* меньше, чем в предыдущей палинозоне и колеблется в пределах 10-29%. Количество *Betula* sect. *Albae* составляет 13-29%. Вклад пыльцы термофильных древесных пород (*Tilia, Quercus, Ulmus, Corylus*) уменьшается, что указывает на похолодание. Возрастает участие пыльцы *Betula nana*, *спор* Lycopodiaceae*, Sphagnum.* Согласно данным, на изучаемой территории господствовали еловые леса среднетаежного облика. Участие в них широколиственных древесных пород сокращается, возможно также, что в исследуемые отложения пыльца этих деревьев была занесена ветром. На песчаных равнинах, склонах гряд и холмов произрастали сосновые леса.

LPAZ 5. Характеризуется доминированием пыльцы *Picea* и *Pinus*, некоторым увеличением количества пыльцы *Betula* sect. *Albae.* Особенностью спектров данной

палинозоны является отсутствие пыльцы термофильных древесных пород. Возрастает участие *Betula nana* и Ericales, Juniperus, а также спор Lycopodiaceae (*L. annotinum, L. clavatum, Diphasiastrum complanatum*). Определена пыльца Droseraceae, *Menyanthes trifoliata*. Появляются споры *Selaginella selaginoides*. Похолодание привело к изреживанию сосновых и еловых лесов, в результате чего они приобретают северотаежный облик.

На основании полученных данных сделаны следующие выводы.

1. Нерасчлененные осадки позднеледниковья характеризуются практически отсутствием пыльцы и наличием переотложенных створок морских диатомовых водорослей.

2. Состав диатомовых комплексов изученного водоема отличается набором разнообразных видов диатомовых водорослей, развивающихся в северных олиготрофных водоемах с низкой минерализацией воды и кислых условиях среды.

3. Отличительной особенностью диатомовых комплексов донных осадков озера Нижнее Батыкозеро является низкое разнообразие видов на протяжении всех этапов развития водоема с господством форм, предпочитающих низкую минерализацию воды и кислые условия среды и развивающихся в северных олиготрофных водоемах. Кроме этого – наличие редко встречающихся видов *Fragilaria constricta., F. constricta f. stricta, F constricta f. trinodis*, *F. hungarica.*

4. На основе анализа палинологических данных в соответствие со схемой хронологического разделения позднеледниковья и голоцена Северной Евразии (Хотинский, 1977) и Карелии (Елина, 1981) проведена периодизация СПД. Установлено, что выделенные палинозоны соответствуют периодам голоцена с пребореала до субатлантического периода.

5. Смена растительных группировок представлена в следующем виде: лесотундровые березовые сообщества и северотаежные (редкостойные) березовые и сосново-березовые леса (PB: 10300-9300 л.н.) → среднетаежные сосновые и березово-сосновые (BO: 9300-8000 л.н.) → южнотаежные еловые и сосново-еловые леса с участием термофильных деревьев (AT: 8000-4500 л.н.) → среднетаежные еловые и сосново-еловые леса (SB: 4500-2500 л.н) →среднетаежные еловые и сосново-еловые леса с примесью березы и ольхи серой (SA: 2500 л.н. - настоящее время).

6. О длительном таянии мертвого льда косвенно свидетельствует присутствие в осадках диатомовых створок вида *Ellerbeckia arenaria.*

Работа выполнена в рамках темы НИР Института геологии КарНЦ РАН № ГМЕN-2023-0008

Литература

Елина Г.А. Принципы и методы реконструкции и картирования растительности голоцена. Л.: Наука, 1981. 159 с.

Елина Г.А., Лукашов А.Д., Юрковская Т.К. Позднеледниковье и голоцен восточной Фенноскандии (палеорастительность и палеогеография). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. 242 с.

HOLOCENE ENVIRONMENTAL HISTORY OF THE NORTHERN PART OF THE ONEGA-LADOGA WATERSHED (MICROPALEONTOLOGICAL STUDY OF BOTTOM SEDIMENTS OF LAKE NIZHNY BATYKOZERO)

T.S. Shelekhova, N.B. Lavrova

The article presents the results of micropaleontological analyses and radiocarbon dating of bottom sediments of Lake Nizhny Batykozero. The results of the study indicate the beginning of lake formation in the Late Glacial period, the undifferentiated sediments of which are characterized by the absence of pollen and spores and the presence of redeposited marine valves of diatoms, as well as the presence of the species *Ellerbeckia arenaria*, characteristic of glacial lakes, indicating the influx of meltwater and cold periglacial environmental conditions. The stages of lake development and vegetation changes in the Holocene are reconstructed. The data obtained showed that the spread of forest communities began in the preboreal.

ЭКОСИСТЕМЫ ОЗЕР. ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

ANABAENOPSIS CF. *ARNOLDII* – ВОЗБУДИТЕЛЬ «ЦВЕТЕНИЯ ВОДЫ» В МЕЛКОВОДНОМ ГОРОДСКОМ ВОДОЕМЕ

К.И. Абрамова, Р.П. Токинова, Н.В. Шурмина
Институт проблем экологии и недропользования АН РТ

В планктоне городского мелководного озера Малое Чайковое (г. Казань) обнаружено массовое развитие синезеленой водоросли *Anabaenopsis* cf. *arnoldii.* Уровень «цветения» воды в этот период достигал более 10 мг/л по биомассе. Вклад *A.* cf. *arnoldii* в общую численность и биомассу фитопланктона составил более 80%. Впервые вегетация этого вида в планктоне отмечена по завершении в озере экореабилитационных мер по изъятию донных отложений и наблюдалась на протяжении последующих двух лет. Позднее вид не обнаруживался в пробах фитопланктона. Обсуждается влияние факторов, способствовавших обильному развитию в озере р. *Anabaenopsis,* представители которого имеют преимущественно субтропическое и тропическое распространение.

В рамках проекта по формированию комфортной городской среды в Республике Татарстан с 2015 г. проводится благоустройство общественных пространств, а также экореабилитационные мероприятия на городских водоемах. В 2018 г. созданы фитоочистные сооружения на набережных озера Нижний Кабан, в 2019 г. выполнены дноочистительные работы на озере Комсомольское. Весной – в начале лета 2021 г. на озере Малое Чайковое проведены дноочистительные работы, выполнено укрепление береговой зоны, благоустроена парковая зона с созданием оздоровительно-физкультурного комплекса.

Мировой опыт свидетельствует о необходимости пристального внимания за состоянием водоемов, в которых проводилась очистка дна от накопленных донных отложений. Изучение водоемов, подвергшихся антропогенной трансформации, позволяет расширить знания о сукцессионных и адаптационных процессах гидробиологических сообществ и экосистемы в целом (Рубцова, Алёмов, 2011; Деревенская, 2022; Абрамова и др., 2024; Cabrita, 2014; Jing et al., 2019). Выявленная ранее авторами межгодовая сукцессия фитопланктона в оз. Комсомольское, сопровождающаяся сменой гетеротрофной фазы на автотрофную (Абрамова и др., 2024), способствовала интересу в продолжении подобных исследований и на других водоемах после их благоустройства, в частности, на оз. Малое Чайковое.

Цель данного сообщения – представление результатов изучения состава и структуры фитопланктона оз. Малое Чайковое после дноочистительных мероприятий. Отбор проб проводился из поверхностного слоя воды в летне-осеннюю межень с августа 2021 г. по октябрь 2024 г. Одновременно проведены исследования гидрохимических показателей. Обработка проб и анализ данных проведены согласно общепринятым гидробиологическим методам.

В первые два года наблюдений средне-вегетационный показатель общей биомассы фитопланктона составил 7.1±1.28 мг/л (уровень эвтрофии), максимальные значения биомассы при этом достигали 10.4±1.6 мг/л (август). По прозрачности воды, содержанию фосфатов и общего азота озеро соответствовало эвтрофному типу.

«Цветение» воды было вызвано гетероцистной синезеленой *Anabaenopsis* cf. *arnoldii* (рис. 1). Для водоемов Волжского бассейна «цветение воды», обусловленное данным видом, является довольно необычным явлением. Биомасса вида достигала 9.2 мг/л, численность – 70 млн кл./л. Доля от общей численности составила 65–82%, от биомассы – 70–85%. Пик развития *Anabaenopsis* приходился на август месяц, когда температура воды прогревалась до 25–26°C. Основными сопутствующими видами были зеленые водоросли пор. Chlamydomonales. Триггерным фактором массового развития *Anabaenopsis*, предположительно, послужило изменение гидрологического и физико-химического режима в озере в результате проведенных работ по извлечению донных иловых отложений. Немаловажную роль в этом сыграли и особенности толерантности/чувствительности вида к определенным абиотическим факторам.

Известно, что дноочистительные мероприятия в связи с особенностями применения техники и методами проведения работ могут привести к изменению гидрологических условий, включая снижение уровня воды, нарушение структуры донных отложений и изменение физико-химических свойств воды. Падение уровня воды в процессе удаления донных отложений чаще всего обусловлено увеличением размера озерной котловины; удалением водной растительности, участвующей в удержании воды; изменением формы дна и береговой линии, приводящим к нарушению естественного перераспределения воды (Yan, Li, 2023; Chao et al., 2024; Leira, Cantonati, 2008). Снижение уровня воды летом приводит к повышению концентрации питательных веществ в толще воды и повышению температуры воды на мелководных участках водоемов, что может приводить к усиленному росту синезеленых (Bakker, Hilt, 2016).

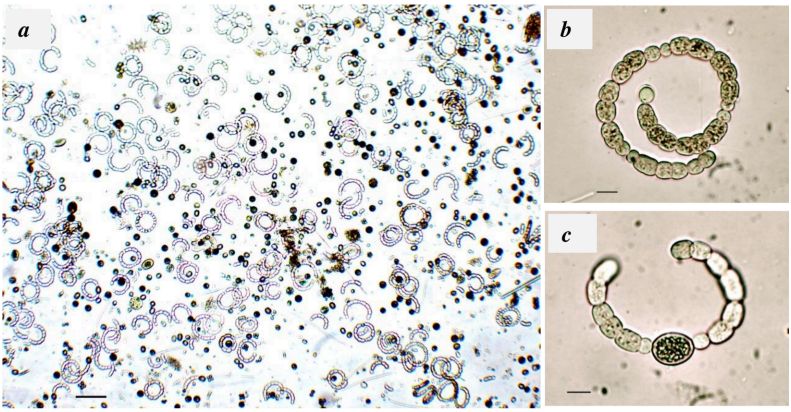


Рис. 1. Массовое развитие *Anabaenopsis* cf. *arnoldii* в оз. Малое Чайковое; август 2021–2022 гг. (*a*). Одиночная гетероциста на конце трихомы (*b*). Интеркалярная эллипсоидная спора трихомы (*c*). Масштаб: ***a*** 150 μm, ***b–c*** 10 μm.

Представители р. *Anabaenopsis* теплолюбивые, обитающие преимущественно в тропических и субтропических водоемах (Krienitz et al., 2013; Santos et al., 2018), предпочитающие пресноводные и солоноватые водоемы с щелочной средой (Ballot et al., 2007). Это обитатели мезотрофных и эвтрофных водоемов, оптимальный рост которых наблюдается при температурах воды свыше 25°C (Komárek, 2005).

По морфофункциональной классификации *A.* cf. *arnoldii* относится к группе H_1-типа, объединяющей диазотрофные виды (способные фиксировать атмосферный азот),

обитающие в мезотрофно-гипертрофных водоемах, толерантные к низкому содержанию азота, чувствительные к перемешиванию и низкому содержанию фосфора. Основным фактором, способствующим цветению *Anabaenopsis*, является высокая концентрация биогенных элементов, особенно фосфора (Ballot et al., 2008; Mayer, 2020). Также развитие *Anabaenopsis* напрямую связано с уровнем воды через изменение минерализации, доступности питательных веществ, прогрева воды (Komarek, 2005).

За четыре года исследований уровень воды в озере изменялся (рис. 2). Наиболее низкие значения отмечались в первые два года наблюдений, в последующие он заметно поднялся. В период массового развития *Anabaenopsis* прозрачность воды в озере составила 0.2–0.4 м. Реакция среды соответствовала щелочному уровню (pH 8.6–8.7). По гидрохимическим показателям отмечено высокое содержание в воде железа (2–3ПДК$_{рх}$), что придавало ей бурый оттенок. Превышение предельно допустимой концентрации БПК$_5$ (3–20ПДК$_{рх}$) указывало на нарушение процессов самоочищения и ухудшения качества воды после экореабилитации. Превышение отмечалось также по фосфатам (2–3ПДК$_{рх}$). Как можно заключить, гидрохимические и гидрологические условия, сложившиеся в озере в период непосредственно после работ по экореабилитации, благоприятствовали развитию *Anabaenopsis*.



Рис. 2. Юго-восточная часть озера Малое Чайковое (*a*), уровень воды в озере в 2022 (*b*) и 2024 гг. (*c*)

В последующие два года (2023–2024 гг.) доминирующий состав синезеленых водорослей значительно изменился. Ранее присутствующий *Anabaenopsis* cf. *arnoldii* выпал из состава планктона. Структуру сообщества формировали безгетероцистные виды S$_1$-типа: *Planktothrix agardhii* и *Pseudanabaena limnetica*. Средне-вегетационное значение общей биомассы фитопланктона соответствовало эвтрофным условиям. Сукцессия в доминирующем составе синезеленых от H$_1$-типа к S$_1$-типу проявляется в межгодовой динамике. Предположительно, перестройка доминирующего комплекса в структуре сообщества связана с изменением физико-химических свойств и гидрологических характеристик озера, в частности, с повышением уровня воды.

Кроме того, исчезновение гетероцистных и появление безгетероцистных форм

синезеленых некоторые исследователи (Сиделев, 2010) связывают с обогащением воды азотом. Нитчатые азотофиксирующие водоросли из экологической группы H_1 наиболее конкурентны, чем виды S_1-типа в условиях низких концентраций азота. По мере увеличения содержания данного элемента в среде, наблюдается замещение видов одной экологической группы на другую.

Таким образом, проведенные дноочистительные работы на оз. Малое Чайковое способствовали изменению условий водной среды. Понижение уровня воды, увеличение содержания фосфатов в воде, прогрев воды до температуры 25–26°С и удаление гидрофитной растительности (роголистник) послужили факторами, спровоцировавшими массовое развитие синезеленых водорослей в озере. В первые два годы в качестве возбудителя «цветения воды» выступал *Anabaenopsis* cf. *arnoldii*, что характеризовало собой фазу развития гетероцистных синезеленых водорослей (2021–2022 гг.). В последующем (2023–2024 гг.) межгодовая сукцессия перешла в фазу с безгетероцистными видами, представленными *Planktothrix agardhii* и *Pseudanabaena limnetica*, более характерными для водоемов Поволжья.

Литература

Абрамова К.И., Токинова Р.П., Иванов Д.В. Сукцессия фитопланктона в озере Комсомольском (г. Казань) после проведения дноочистительных работ // Российский журнал прикладной экологии. 2024. №2. С. 28–41.

Деревенская О.Ю. Сукцессии зоопланктона малых мелководных озер после проведения мероприятий по экореабилитации // Трансформация экосистем. 2022. 5 (2). С. 74–85.

Рубцова С.И., Алёмов С.В. Влияние дноочистительных работ на экологическое состояние портовых акваторий // Морской экологический журнал. 2011. №2. С. 81–87.

Сиделев С.И. Сукцессия фитопланктона высокоэвтрофного озера Неро: Автореф. … канд. биол. наук. Борок. 2010. 27 с.

Bakker E.S., Hilt S. Impact of water-level fluctuations on cyanobacterial blooms: options for management // Aquat. Ecol. 2016. 50. P. 485–498.

Cabrita M.T. Phytoplankton community indicators of changes associated with dredging in the Tagus estuary (Portugal) // Environmental Pollution. 2014. 191. P. 17.

Chao Fusheng, Liang Xin, Wang Xin, Lu Bin. Water level fluctuation rather than eutrophication induced the extinction of submerged plants in Guizhou`s Caohai Lake: implications for lake management // Water. 2024. 16(5). 772. P. 1–13.

Komárek Jiri. Phenotype diversity of the heterocytous cyanoprokaryotic genus Anabaenopsis // Czech Phycology. Olomouc. 2005. 5. P. 1–35.

Krienitz Lothar, Dadheech Pawan K., Kotut Kiplagat. Mass development of the cyanobacteria Anabaenopsis and Cyanospira (Nostocales) in the soda lakes Kenya: Ecological and systematic implicatons // Hydrobiologia. 2013. 703. P. 79–93.

Leira Manel, Cantonati Marco. Effects of water-level fluctuations on lakes: an annotated bibliography. 2008. V. 613. P. 171–184.

Mayer T. Interactions of fish, algae, and abiotic factors in a shallow, tropical pond // Hydrobiologia. 2020. V. 847(127). P. 4145-4160.

Santos Kleber Renan De Souza, Hentschke Guilherme Scotta, Andreote Ana Paula Dini et al. Polyphasic characterization of newly isolated *Anabaenopsis* (Cyanobacteria) strains from tropical Brazil and Mexico // Phytotaxa. 2018. 367 (1). P. 1–12

Yan Jiale, Li Fang Effects of sediment dredging on freshwater system: a comprehensive review // Environmental science and pollution research. 2023. Vol. 30. P. 119612–119626

ANABAENOPSIS CF. *ARNOLDII* - THE CAUSATIVE AGENT OF «WATER BLOOMS» IN A SHALLOW URBAN WATER BODY (KAZAN)

K.I. Abramova, R.P. Tokinova, N.V. Shurmina

Mass development of the blue-green alga *Anabaenopsis* cf. *arnoldi*i was detected in the plankton of the urban shallow lake Maloe Chaikovoi (Kazan). The level of water "blooming" during this period reached more than 10 mg/l in biomass. The contribution of *A.* cf. *arnoldii* to the total abundance and biomass of phytoplankton was more than 80%. For the first time vegetation of this species in plankton was observed after the completion of ecorehabilitation measures in the lake to remove bottom sediments and was observed during the following two years. Later, the species was not detected in phytoplankton samples. The influence of factors contributing to the abundant development of *Anabaenopsis* in the lake, representatives of which have predominantly subtropical and tropical distribution, is discussed.

CARASSIUS GIBELIO (BLOCH, 1782) – КАК ОБЪЕКТ ЛЮБИТЕЛЬСКОГО РЫБОЛОВСТВА В ПОЙМЕННЫХ ОЗЕРАХ ЕЛАБУЖСКИХ ЛУГОВ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «НИЖНЯЯ КАМА»

Д.Ф. Аверьянов[1,3], С.П. Монахов[2,3], Ю.А. Лукьянова[3]

[1]Отдел по рыболовству и сохранению водных биологических ресурсов по Республике Татарстан Камско-Волжского филиала ФГБУ «Главрыбвод»

[2]Институт проблем экологии и недропользования АН РТ

[3]Национальный парк «Нижняя Кама»

Проблема биологических инвазий является одной из ключевых в исследованиях экосистем, претерпевающих деформацию в результате деятельности социума, и ставит вопрос о сохранении самих экосистем. В настоящее время в бассейне Средней Волги, в границах которого располагается национальный парк «Нижняя Кама», насчитывается более двадцати видов рыб-вселенцев, из которых в водоемах самого парка зафиксировано четыре вида, в том числе серебряный карась. Серебряный карась входит в состав особо опасных инвазионных видов России, но при этом является одним из ценных объектов промысла рыболовства, рыбоводства и прикладного декоративного рыборазведения. Действенными путями контроля его численности считаются увеличение доли хищной фауны, употребляющей данный вид в пищу и рыболовство.

Большинство водных экосистем национального парка «Нижняя Кама» являются частью гидрологической сети прирусловой, центральной и притеррасной поймы правобережья нижнего течения реки Камы и расположены в пределах двух территориально разграниченных природных кластеров – Елабужских и Танаевских пойменных лугов, примыкающих к городу Елабуга и селу Танайка, соответственно. Помимо этого, в лесном массиве «Боровецкий лес» расположено два озера суффозионного типа (Технико-экономическое …, 1990).

Водные экосистемы Елабужских лугов включают устьевой участок реки Тоймы – притока первого порядка – р. Камы и старичные водоёмы, представляющие собой остатки бывшего русла р. Камы. Из которых, за период систематических исследований с 2018 по 2024 гг., было обследовано девять озер и участок р. Тоймы.

Сбор материала осуществлялся ставными одностенными нерамными жаберными сетями с ячеёй 18, 22, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 мм длиной по 3 м каждая (всего 10 шт.), с ячеёй 40, 50, 60 мм по 30 м каждая (всего 3 шт.) и мальковой волокушей, длиной 7 м. с

размером ячеи в крыльях – 7,5 мм, в кутке – 3,0 мм. Сети устанавливались с лодки. Заброс волокуши, в зависимости от условий, осуществлялся как с лодки и последующим вытягиванием на берег при помощи веревок, так и прохождением вдоль береговой линии. Видовое определение рыб проводилось по определителю рыб Волжско-Камского края (Кузнецов, 2005).

Статистическая обработка проведена с использованием программы Microsoft Excel. Находились минимальные, максимальные (min-max) и средние значения со стандартной ошибкой (M±m), вычислялся коэффициент упитанности по Фультону ($К_ф$).

При определении понятия «доля» вида в населении использовалась следующая градации: редкий вид – <0,1 %, малочисленный – 0,1-1,0 %, обычный – 1,1-5,0 %, многочисленный – 5,1-10,0 %, доминант – 10,1-50,0 %, супердоминант – >50,0 % в составе улова (Иванчев, Иванчева, 2010).

Всего в озерных системах Елабужских лугов отмечено 20 видов рыб, относящихся к 6 семействам из 4 отрядов (Отчет…, 2019).

Из них три вида – серебряный карась, ротан-головешка и игла-рыба – относятся к чужеродным представителям фауны. При этом серебряный карась и головешка-ротан являются часто встречаемыми, нередко многочисленными и доминирующими в составе рыбного населения отдельных водоемов на протяжении ряда лет, что свидетельствует об успешности прохождения ими всех фаз процесса инвазии. Третий вид, игла-рыба, встречен единичным экземпляром в одном водоеме (оз. Брод) (Аверьянов и др., 2024; Монахов и др., 2021). Серебряный карась и головешка-ротан относятся к наиболее опасным инвазионным видам России (Самые…, 2018).

В новых водоемах серебряный карась способен быстро наращивать численность, существенно перекрывать спектр питания с некоторыми аборигенными видами рыб, стимулировать процесс «цветения воды» и угнетать развитие макрофитов (Рыбы…, 2010; Morgan, Beatty, 2004, 2007).

Между тем серебряный карась является одним из ценных объектов промысла, рыбоводства и прикладного декоративного рыборазведения. Считается, что увеличение доли хищников и любительское рыболовство могут контролировать численность данного вида в отдельных, некрупных и изолированных водоемах (Рыбы…, 2010). В связи с чем, становится актуальным вопрос о размерно-весовых показателях серебряного карася, как объекта любительского и спортивного рыболовства в озерных системах.

В обследованных озерах Елабужских лугов встречаемость серебряного карася составила 100,0%, доля по численности – от 8,3% до 88,2%, что соответствовало по степени градации от «многочисленного» до «супердоминанта» (табл. 1).

В таблице 2 приведены доля по численности, средние и максимальные размерно-весовые показатели, а также значение усредненного коэффициента упитанности по Фультону встреченных видов рыб.

Из данных таблицы 2 следует, что серебряный карась имеет наибольший средний размерный показатель в группе «доминанты – многочисленные» виды рыб и наибольший средний весовой показатель среди всех видов рыб, составляющий 17,43±0,24 см. и 238,52±9,10 гр. соответственно, а по среднему показателю упитанности (3,01±0,01) уступает только обыкновенному карасю (3,62±0,09). Средними размерами серебряный карась уступает обычным видам язю *Leiciscus idus* (21,59±0,40 см.), синцу *Abramis brama* (19,09±0,50 см.) и немногочисленному виду – судаку *Sander lucioperca* (21,38±1,80 см.); максимальными размерами – судаку (34,0 см.) и редкому виду – сазану *Cyprinus carpio* (55,0 см.); по максимальной навеске – сазану (2000,0 гр.).

Таблица 1. Доля (по числу пойманных экземпляров) и встречаемость серебряного карася в составе рыбного населения водоемов Елабужских лугов Национального парка «Нижняя Кама»

Озера	Площадь, га	*Carassius gibelio*, %	Статус	Число видов рыб в водоеме (хищных)
Брод	17,8	13,8	доминант	16 (5)
Спасские Вилы	4,0	88,2	супердоминант	6 (1)
Рыбацкие Вилы	9,5	4,8	обычный	7 (2)
Большое	24,4	82,9	супердоминант	6 (2)
Грязнуха	6,1	8,3	доминант	3 (1)
Спасское	5,0	16,2	доминант	6 (2)
Ситовое	2,0	77,2	супердоминант	3 (1)
Окунёвое	2,9	26,9	доминант	6 (1)
Запесочье	35,4	8,6	многочисленный	11 (3)

Таблица 2. Доля (% по численности), средние и максимальные размерно-весовые показатели, средний коэффициент упитанности встреченных видов рыб в общем улове обследованных озер Елабужских лугов Национального парка «Нижняя Кама»

Виды рыб	Показатели					
	Доля, %	M±m, см	M_{max}, см	M±m, г.	M_{max}, г.	$K_ф$
Отряд Карпообразные – Cypriniformes						
Семейство Карповые – Cyprinidae						
Carassius carassius	5,7	14,42±0,14	17,0	105,88±2,07	162,0	3,62±0,09
Carassius gibelio	23,7	17,43±0,24	32,0	238,52±9,10	1300,0	3,01±0,01
*Cyprinus carpio**	0,03	–	55,0	–	2000,0	1,20
Abramis brama	2,0	15,48±0,58	25,0	92,86±13,94	330,0	1,76±0,03
Ballerus ballerus	1,1	19,09±0,50	27,0	101,50±9,28	286,0	1,35±0,01
Blicca bjoerkna	2,6	11,40±0,19	19,0	32,73±2,22	153,0	2,11±0,03
Alburnus alburnus	+	–	–	–	–	–
Leucaspius delineatus	1,8	4,96±0,07	7,0	1,65±0,08	4,0	1,34±0,03
*Aspius aspius**	0,03	–	21,0	–	133,0	1,44
Leuciscus idus	2,0	21,59±0,40	27,0	230,59±14,20	446,0	2,12±0,02
Leuciscus leuciscus	+	–	–	–	–	–
Ruthilus ruthilus	18,4	12,98±0,05	16,0	48,38±0,48	78,0	1,95±0,01
Scardinius erythrophthalmus	9,0	15,35±0,16	22,0	87,09±2,92	231,0	2,17±0,01
*Tinca tinca**	0,03	–	25,0	–	370,0	2,37
Семейство вьюновые – Cobitidae						
Cobitis taenia	+	–	–	–	–	–
Отряд Щукообразные – Esociformes						
Семейство Щуковые – Esocidae						
*Esox lucius**	+	–	–	–	–	–
Отряд Колюшкообразные – Gasterosteiformes						
Семейство Игловые – Syngnathidae						
Syngnathus abaster	+	–	–	–	–	–
Отряд Окунеобразные – Perciformes						
Семейство Окуневые – Percidae						
Perca fluviatilis	8,9	15,57±0,16	22,0	74,33±2,59	217,0	1,80±0,01
Sander lucioperca	0,4	21,38±1,80	34,0	150,77±43,18	437,0	1,19±0,02
Семейство Головёшковые – Odontobutidae						
Perccottus glenii	24,2	12,55±0,13	21,0	61,21±1,41	256,0	2,52±0,01

* – «0,03%» – встречены в единичном экземпляре; «+» – встречены только неполовозрелые особи в составе уловов мальковой волокуши.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие заключения:

1. За период исследований 2018-2024 гг. на территории Елабужских лугов обследовано девять озерных систем, в которых отмечено 20 видов рыб, относящихся к 6 семействам из 4 отрядов;

2. Три вида из 20 выявленных относятся к представителям чужеродной ихтиофауны, это: серебряный карась *Carassius gibelio*, головешка-ротан *Perccottus glenii* и малая игла-рыба *Syngnathus abaster*;

3. Серебряный карась является многочисленным и доминирующим видом в составе рыбного населения на протяжении ряда лет, что свидетельствует об успешности прохождения им всех фаз процесса инвазии;

4. Серебряный карась имеет наибольший средний размерный показатель в группе доминантных и многочисленных видов рыб, включая хищных видов рыб – головешку-ротана и речного окуня, и наибольший средний весовой показатель среди всех видов рыб, а по среднему показателю упитанности уступает только обыкновенному карасю;

5. Средними размерами серебряный карась уступает обычным видам, язю *Leiciscus idus*, синцу *Abramis ballerus* (19,09±0,50 см) и, немногочисленному виду, судаку *Sander lucioperca*; максимальными размерами – судаку и, редкому виду, – сазану *Cyprinus carpio*; по максимальной навеске – сазану (2000,0 гр.);

6. В составе рыбного населения озерных систем, расположенных на территории Елабужских лугов национального парка «Нижняя Кама», серебряный карась является самым перспективным объектом любительского и спортивного рыболовства.

Литература

Аверьянов Д.Ф., Монахов С.П., Лукьянова Ю.А. Чужеродные (инвазионные) представители ихтиофауны в водоемах национального парка «Нижняя Кама» // Труды Мордовского государственного природного заповедника имени П.Г. Смидовича. 2024. Вып. 35. С. 96-111.

Иванчев В.П., Иванчева Е.Ю. Круглоротые и рыбы Рязанской области и прилежащих территорий. Рязань: НП «Голос губернии», 2010. 292 с.

Кузнецов В.А. Рыбы Волжско-Камского края. Казань: Изд-во «Kazan-Казань», 2005. 208 с.

Монахов С.П., Аверьянов Д.Ф., Аськеев О.В., Аськеев И.В., Аськеев А.О. Население рыб озер национального парка «Нижняя Кама» и влияние факторов среды на их распределение // Труды Мордовского государственного природного заповедника имени П.Г. Смидовича. 2021. Вып. 29. С. 333-343.

Отчет о НИР по теме «биоразнообразие ихтиофауны водоёмов Национального парка «Нижняя Кама», организация мониторинга рыбного населения» (озёра Брод, Спасские Вилы, Рыбацкие Вилы, Большое, Грязнуха, Спасское, Ситовое, Окунёвое, Запесочье). ФГБУ «НП «Нижняя Кама». Фонды ФГБУ НП «Нижняя Кама». 2019, 37 с.

Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пищевая промышленность, 1966. 376 с.

Рыбы в заповедниках России. М.: Т-во научных изданий КМК. 2010. 627 с.

Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100). М.: Т-во научных изданий КМК, 2018. 688 с.

Технико-экономическое обоснование организации ГПНП «Нижняя Кама» Татарской АССР. – Т. 1. Пояснительная записка / Всесоюзный государственный проектно-изыскательский институт «Союзгипролесхоз» (Саратовский филиал). – Саратов, 1990. 304 с.

Morgan D., Beatty S. Fish fauna of the Vasse River and the colonisation by feral goldfish (*Carassius auratus*). Report to Fishcare WA and Geocatch, 2004. 35 p.

Morgan D.L., Beatty S.J. Feral Goldfish (*Carassius auratus*) in Western Australia: a case study from the Vasse River // Journal of the Royal Society of Western Australia. 2007. 90(3). P. 151-156.

CARASSIUS GIBELIO (BLOCH, 1782) – AS AN OBJECT OF AMATEUR FISHING IN THE FLOODPLAIN LAKES OF ELABUGA MEADOWS OF NATIONAL PARK «NIZHNYAYA KAMA»

D.F. Averyanov, S.P. Monakhov, Y.A. Lukyanova

The problem of biological invasions is one of the key ones in the research of ecosystems undergoing deformation as a result of the activity of society, and raises the question of the preservation of ecosystems themselves. Currently, there are more than twenty species of invading fish in the Middle Volga basin, within the boundaries of which the Nizhny Kama National Park is located, of which four species have been recorded in the reservoirs of the park itself, including the gibel. The gibel is one of the most dangerous invasive species in Russia, but it is also one of the valuable objects of fishing, fish farming and applied decorative fish farming. An increase in the proportion of predatory fauna that consume this species for food and fishing is considered effective ways to control its numbers.

ЗООПЛАНКТОН И ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРНО-РЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ВУОКСЫ

Д.Г. Алешина[1], Т.А. Петрова[2], М.С. Трифонова[2]
[1]Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии
[2]Институт озероведения РАН

Гидрохимический состав воды и структура сообщества зоопланктона р. Вуоксы не претерпела существенных изменений на протяжении длительного времени. Водоток имеет низкую природную концентрацию химических элементов в воде и в основном малую амплитуду внутригодовых колебаний. Большая вариабельность характеристик зоопланктонного сообщества озерно-речной системы объясняется гидрологическим разнообразием отдельных участков Вуоксы. Вселенец *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) был обнаружен в зоопланктонных пробах на станциях в центральной части и в нижнем течении озерно-речной системы Вуокса.

Озерно-речная система Вуоксы является протокой, соединяющей оз. Сайма в Финляндии и западную часть Ладожского озера. Река Вуокса – один из главных притоков, который поставляет 24% от общего поступления в озеро поверхностных вод. Перед впадением в Ладогу водоток разделяется на два рукава: северный рукав (ст. Приозерск) и южный – р. Бурная (ст. Лосево). Водосбор сложен преимущественно кристаллическими породами Балтийского щита, перекрытых четвертичными отложениями. Преобладают здесь подзолистые почвы. Вуокса - самая зарегулированная река из всех притоков Ладожского озера. Все это обусловливает низкую природную концентрацию химических элементов в их воде и в основном малую амплитуду внутригодовых колебаний (Расплетина и др., 2006).

Отбор зоопланктонных проб и проб воды на химический анализ проводили одновременно на станциях в нижнем течении (ст. Приозерск и ст. Лосево) в теплый период (с мая по ноябрь) в 2011-2016 гг. Дополнительно в августе 2013 г. нами было

установлено 7 станций для исследования зоопланктона от Лесогорской ГЭС до устья (рис. 1). Обработку проб зоопланктона и гидрохимический анализ проводили в лаборатории по стандартным методикам.



Рис. 1. Схема станций отбора проб

Вуокса, как и другие притоки Ладожского озера в основном отличается низкой минерализацией воды. На ст. Лосево в 2011 г. она изменялась в пределах 42 – 51 г/л, в 2012-2016 гг. - в пределах 29-49 г/л, на ст. Приозерск величина минерализации составляла 35 – 53 г/л. Река Бурная часто переходит в смешанный катионный класс в течение года, ее отличный от большей части притоков Ладожского озера ионный состав обусловлен как природными (метаморфические породы водосбора, обогащенные сульфидами тяжелых металлов), так и антропогенными фактами (сульфаты и ионы натрия поступают со сточными водами целлюлозно-бумажных предприятий, а хлориды и ионы натрия – с хозяйственно-бытовыми стоками). По содержанию основных анионов воды р. Вуокса относятся к переходному гидрокарбонатно-сульфатному типу, по содержанию катионов также к смешанному типу, преобладающими являются Ca^{2+} и Na^{+}. Средние концентрации основных ионов, в период наблюдений 1985–1993 гг. были повышенными относительно периода 1959–1962 гг. (Raspletina, Ulyanova, 1997) В период наблюдений 2013–2016 гг. в воде р. Вуокса абсолютное содержание хлоридов и сульфатов существенно понизилось, содержание $Na^{+}+K^{+}$ уменьшилось до уровня 1959–1961 гг. и ниже. Эти результаты могут косвенно свидетельствовать об относительном уменьшении антропогенного воздействия на озерно-речную систему р. Вуоксы. (Гусева, Петрова, 2017).

За период 2011-2016 гг. величина pH в воде р. Бурной изменялась от 6.64 до 7.91, в воде р. Вуокса – от 6.64 до 8.05. Максимальные величины, вероятно, были связаны с фотосинтетической деятельностью фитопланктона. За период 2013–2016 гг. среднегодовые значения водородного показателя для р. Бурная понижались. В силу природных условий вода р. Вуокса характеризуется небольшим содержанием фосфора, концентрации обычно не превышают 50-60 мкг Р $л^{-1}$, а чаще бывают ниже 30-40 мкг Р $л^{-1}$ (Расплетина и др. 2006). На протяжении 2011-2016 гг. содержание общего фосфора оставалось в пределах многолетних значений, составляло 11-68 мкг Р $л^{-1}$ в воде ст. Приозерск и 20-37 мкг Р $л^{-1}$ в ст. Лосево, практически никогда не превышало максимальные, а чаще всего колебалось около нижнего предела значений.

Концентрация общего азота в воде притоков во много раз превышает содержание общего фосфора, в воде зарегулированных рек она мало отличается от содержания в воде большинства остальных притоков. Межгодовые и сезонные изменения обычно невелики. В р. Бурная концентрации изменялись в пределах 400-680 мкг N $л^{-1}$, в р. Вуокса – от 540-

830 мкг N $л^{-1}$ что соответствовало диапазону значений, полученных в 2001-2005 гг. (Расплетина и др. 2006).

Исследование зоопланктона озерно-речной системы Вуоксы выявило его сходство с такими большими и глубокими озерами как Ладожское и Онежское, другими озерами Крайнего Севера. Сравнение с литературными данными показало, что планктический комплекс был сходен и с оз. Сайма (Rahkola-Sorsa, 2008). Сообщество зоопланктона было образовано в основном *E. gracilis*, *L. macrurus*, *M. leuckarti, D. cristata*, *E. (E.) coregoni*, *E. (E.) longispina, K. longispina, A. priodonta*, *A. herriki* как и в 1973-1975 гг. (Иванова, 1976; Кутикова, 1976).

Среднее значение численности зоопланктона озерно-речной системы Вуокса от истока до устья в августе 2013 г. составило 3230±780 экз./$м^3$, биомассы - 0,076±0,027 г/$м^3$. Самые низкие показатели количественного развития были отмечены на ст. Лосево (1250 экз./$м^3$ и 0,001 г/$м^3$), максимальные – на выходе из оз. Суходольского - в протоке р. Тайпале перед впадением основной массы воды озерно-речной систему Вуокса в Ладогу (6220 экз./$м^3$ и 0,165 г/$м^3$) (рис. 2).

Сравнение полученных показателей с литературными данными показало, что в июне 2016 г. в литоральной зоне оз. Сайма количественное развитие составляло на порядок больше – 131000–400600 экз./$м^3$, биомасса 3,7–12,4 г/$м^3$ (Дудакова и др., 2017). В августе 2013 г. в Ладожском озере на станциях напротив места впадения основного южного рукава Вуоксы численность зоопланктона составляла 135000 экз./$м^3$, а биомасса 1,6 г/$м^3$ (Суслопарова и др., 2015), что значительно больше полученных нами показателей.

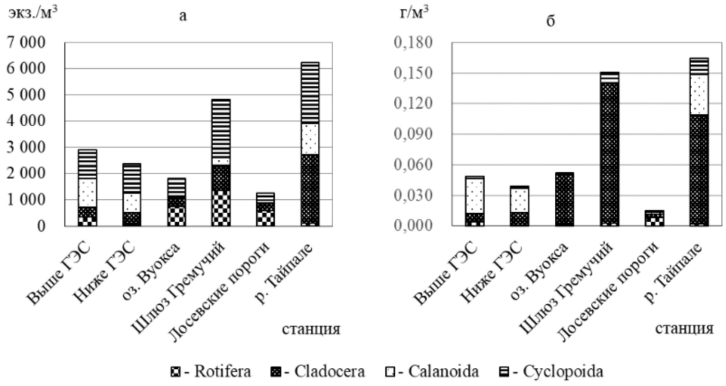


Рис. 2. Численность (а) и биомасса (б) групп зоопланктона р. Вуокса в 2013 г.

При сравнении ст. Выше ГЭС и ст. Ниже ГЭС в районе п. Лесогорский было отмечено снижение общей численности и биомассы на 20 % в результате разрушения мелких коловраток. Наиболее часто встречались поврежденные *K. longispina*. Их численность изменялась от 340 экз./$м^3$ до 50 экз./$м^3$, а биомасса – от 0,004 г/$м^3$ до 0,001 г/$м^3$. Исследования 1989–1990 гг. показывало доходящее до 38 % разрушения зоопланктеров (Макарцева, 2004). На станциях в верхнем течении существенных отличий по количественным характеристикам и соотношению ракообразных не наблюдалось. Доля мертвых, деформированных особей и пустых створок Cladocera после прохождения через турбины Лесогорской ГЭС повышалась незначительно и доходила в среднем до 50%. Возможно, что высокий уровень мертвых зоопланктонных

организмов на станциях Выше и Ниже ГЭС связан с воздействием каменистых перекатов, тремя плотинами гидроэлектростанций и Светогорского целюлозо-бумажного комбината выше по течению. На станциях преобладали устойчивые к механическим воздействиям веслоногие, по численности - Cyclopoida, по биомассе – Calanoida, аналогично 1991–1994 гг. (Макарцева, 2004).

В расширенной до озера средней части Вуоксы на участке до п. Барышево (ст. Шлюз Гремучий) основу численности составляли также циклопы, поэтому, восстановление планктонного сообщества вероятно происходит только на этом участке реки (Макарцева, 2004). На озере Вуокса перед каменистым участком Лосевских порогов (ст. Лосево) происходило резкое уменьшение доли ракообразных и преобладание коловраток рода *Asplanchna.* В протоке из оз. Суходольского в Ладожское озеро – реке Тайпале в количественном соотношении доминировала группа Cladocera, состоящая в основном из *D. (D.) galeata.* Это отличалось от зоопланктонного сообщества участка Ладожского озера, принимающего воды озерно-речной системы, где в августе 2013 г. по количественному соотношению преобладали коловратки (Суслопарова и др., 2015).

В 2011–2016 гг. ст. Приозерск (северный рукав Вуоксы) как и ранее (Макарцева, 2004) наблюдался один весенний пик развития зоопланктонного сообщества. В начале июня 2013 и 2016 гг. были отмечены самые высокие значения численности (9190 экз./м^3 и 15730 экз./м^3) и биомассы (0,200 г/м^3 и 0,181 г/м^3) соответственно. В октябре были самые низкие количественные показатели. В весенне-летний период зоопланктон по численности характеризовался как ротаторный, по биомассе как ротаторно-кладоцерный, как и в 1994 г. (Макарцева, 2004). Осенью в количественном соотношении преобладали представители Calanoida. В южном рукаве Вуоксы (ст. Лосево) максимальные количественные показатели были отмечены в мае и июле 2014 года, численность составила 54820 и 102660 экз./м^3, биомасса – 0,266 г/м^3 и 1,173 г/м^3 соответственно. Это было максимальным значением и среди зоопланктонных сообществ нижнего течения других притоков Ладожского озера за период нашего исследования в 2011-2016 гг. (Kurashov et al.). Весной зоопланктон можно было охарактеризовать как ротаторный, в летний – кладоцерный, осенью – кладоцерно-копеподный со значительной долей представителей группы Calanoida.

В 2013 г. вселенец *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) был обнаружен в зоопланктонных пробах на 4 станциях - в центральной части озерно-речной системы (ст. оз. Вуокса, Шлюз Гремучий) и в нижнем течении (ст. Приозерск и Лосево) (Алешина, Курашов, 2013). На станциях в нижнем течении коловратка встречалась многократно в 2011-2016 гг.

В период исследования качество воды на станциях в нижнем течении было достаточно хорошим, индекс сапробности на ст. Лосево составил 1,17±0,07, на ст. Приозерск 1,24±0,11, индекс Шеннона 2,12±0,11 и 2,14±0,11 соответственно.

Таким образом, гидрохимический состав воды и сообщество планктонных коловраток и ракообразных озерно-речной системы Вуоксы не сильно изменяются с течением времени. Качество воды остается достаточно хорошим несмотря на активное хозяйственное использование в виде промышленных предприятий и гидроэлектростанций в верхнем течении. Озерно-речная система Вуоксы, как один из главных поставщиков воды в Ладожское озеро, нуждается в постоянном мониторинге.

Литература

Алешина Д.Г., Курашов Е.А. Характеристика зоопланктонного сообщества озерно-речной системы Вуокса // Биология внутренних вод: Материалы XV Школы-конференции молодых ученых. Кострома: ООО «Костромской печатный дом», 2013. С. 90–95.

Гусева М.А., Петрова Т.Н. Межгодовая и сезонная динамика основных гидрохимических показателей в устье реки Вуоксы // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы 1-й Международной конференции. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 341–347.

Дудакова Д.С., Родионова Н.В., Арвола Л., Дудаков М.О. Литораль южной части озера Сайма (Финляндия): различия биотопов, уровня антропогенной нагрузки, их влияние на развитие бентоса и зоопланктона // Региональная экология. 2017. № 4. С. 20–31.

Иванова М.Б. Влияние загрязнения на планктонных ракообразных и возможности их использования для определения степени загрязнения воды // Методы биологического анализа пресных вод / Тр. Зоолог. инст. АН СССР. Л., 1976. С. 68–80.

Кутикова Л.А. Коловратки речного планктона как показатели качества воды // Методы биологического анализа пресных вод / Тр. Зоолог. инст. АН СССР. Л.: Зоол. ин-т, 1976. С. 80–90.

Макарцева Е.С. Состав и продуктивность зоопланктона Вуокса // Состояние биоценозов озерно-речной системы Вуоксы. СПб.: НИИ химии СПбГУ. 2004. С. 87–97.

Расплетина Г.Ф., Кулиш Т.П., Петрова Т.Н. Гидрохимическая характеристика рек – притоков Ладожского озера и р. Невы // Оценка экологического состояния рек бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям и структуре гидробиоценозов / Под ред. Трифоновой И.С. СПб.: Изд-во «Лема». 2006. С.11 – 35.

Суслопарова О.Н., Огородникова В.А., Зуев Ю.А., Тамуленис А.Ю. Оценка состояния зоопланктона и зообентоса Ладожского озера, как кормовой базы рыб в многолетнем аспекте (2000–2014 гг.) // Функционирование и динамика водных экосистем в условиях климатических изменений и антропогенных воздействий. Материалы 5-й Международной конференции, посвященной памяти выдающегося гидробиолога Г.Г. Винберга. СПб.: «ЛЕМА», 2015. С. 262–263.

Kurashov E.A., Aleshina D.G., Guseva M.A., Petrova T.N., Krylova J.V. The role of environmental factors in the formation of zooplankton in tributaries of Lake Ladoga (Russia) // Applied ecology and environmental research. 2017. №15. P. 1511–1540.

Rahkola-Sorsa M. The structure of zooplankton communities in large boreal lakes, and assessment of zooplankton methodology // University of Joensuu, PhD Dissertation in Biology. 2008. 117 p.

Raspletina G. F., Ulyanova D. S. Hydrochemical characteristics of River Vuoksi // Proceeeding of the Second International Lake Ladoga Symposium 1996. Joensuu, 1997. P. 40–47.

ZOOPLANKTON AND HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE VUOKSA LAKE-RIVER SYSTEM

D.G. Aleshina, T.N. Petrova, M.S. Trifonova

The hydrochemical composition of the water and the structure of the zooplankton community of the Vuoksi River have not undergone significant changes for a long time. The watercourse has a low natural concentration of chemical elements in the water and mainly a small amplitude of interannual fluctuations. The large variability in the characteristics of the zooplankton community of the lake-river system is explained by the hydrological diversity of individual sections of the Vuoksa. The alien Kellicottia bostoniensis (Rousselet, 1908) was discovered in zooplankton samples at stations in the central part and in the lower reaches of the Vuoksa lake-river system.

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОЗЕРА ЗАТОН В ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ БИОРЕСУРСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А.Ю. Асанов
Приволжский научный центр аквакультуры и водных биоресурсов,
Пензенский государственный аграрный университет

Приводятся результаты биоресурсных исследований на пойменном озере Затон реки Хопер в Бековском районе Пензенской области. Величина общей рыбопродукции составила 447 кг/га, что находится на уровне сравниваемых водохранилищ региона. Это связано с массовым развитием сине-зеленых водорослей и высшей водной растительности. О неудовлетворительном состоянии озера свидетельствует и состав ихтиофауны, состоящий из двух видов рыб. Полученные результаты исследований позволяют разработать пути реабилитации водоема и проведения реконструкции ихтиофауны с учетом планирования использования озера властями региона.

В Пензенской области насчитывается около 240 озер общей площадью 1700 га. Из них два озера относятся к озёрам средней величины, остальные к малым с площадью зеркала менее 100 га. 80% из них являются пойменными (Ивушкин и др., 1993). Озеро Затон – пойменное озеро реки Хопер, площадью 29,2 га. Водоем расположен в живописном месте. С северной стороны озера расположен жилой сектор пгт Бековo, с южной стороны – реликтовая дубовая роща. Региональными властями планируется озеро Затон использовать в рекреационных целях для культурного отдыха жителей и гостей пгт Бековo, включая осуществление любительского лова рыбы.

Целью работы является оценка экологического состояния озера Затон по результатам биоресурсных исследований и расчет его рыбопродукции.

Биоресурсные исследования на оз. Затон проводились по договорам в 2014 и 2017 гг. при оценке ущерба, наносимого водным биоресурсам от расчистки озера (ООО институт «Приволжстройпроект») и разработке рыбоводно –биологического обоснования по зарыблению (Минсельхоз Пензенской области). Исследования проводились по общепринятым методикам, многократно изложенным в наших работах (Козлов, Иванова, 2013; Асанов, 2023; Асанов 2024; Asanov и др., 2021).

Озеро Затон имеет вытянутую форму. Его максимальная длина – 1,65 км, ширина – до 200 м, общая площадь – 29,2 га, средняя глубина до расчистки – 1,4 м, после расчистки, в прибрежье –2 м, глубина по фарватеру более 6 м, средняя около – 3,5 м (2, 3). Озеро Затон является старицей реки Хопер, образованной в результате меандрирования реки. По условию питания озеро Затон относится к нейтральным. По морфологической и гидрологической характеристикам – к мелководным сточным озерам.

Оценка базовой рыбопродукции. Зоопланктон. Всего в пробах обнаружено 21 вид зоопланктонных организмов, из которых 19 видов принадлежит группе коловраток, 2 вида к ветвистоусым рачкам. По численности доминируют коловратки *Brachionus calyciflorus, Euchlanis dilatata* и *Filinia longiseta,* веслоногий рачок *Mesocyclops leuckarti* и науплиусы. По биомассе доминантами являются коловратки *Asplanchna priodonta, Brachionus calyciflorus*, *B. quadridentatus* и *Rotaria sp*., веслоногие рачок *Mesocyclops leuckarti,* а так же науплиусы (табл. 1).

Средние значения численности и биомассы в озере Затон составили 217,41 тыс.экз./м^3 и 722,46 мг/м^3 (0,72 г/м^3) соответственно.

Макрозообентос. Всего в пробах обнаружено 19 видов организмов макрозобентоса, относящихся к разным таксономическим группам: Olygochaeta – 1 вид, Mollusca – 9, Ephemeroptera – 1, Chironomidae – 7, Ceratopogonidae – 1 вид.

Таблица 1. Численность и биомасса организмов зоопланктона в озере Затон

Таксоны	Численность, тыс. экз./м^3	Биомасса, мг/м^3
Rotifera (коловратки)		
Asplanchna priodonta (Gosse, 1850)	1,67	32,78
Brachionus angularis (Gosse, 1850)	4,44	2,32
B. calyciflorus (Pallas, 1766)	23,87	53,58
B. quadridentatus (Hermann, 1783)	9,99	33,17
Cephalodella gibba (Ehrenberg, 1830)	1,11	0,89
Euchlanis dilatata (Ehrenberg, 1830)	14,99	26,20
E. lucksiana (Hauer, 1930)	0,56	1,11
Filinia longiseta (Ehrenberg, 1834)	59,18	29,53
Keratella cochlearis (Gosse 1851)	9,99	1,55
K. c. tecta Gosse (1851)	2,22	0,45
K. quadrata (Müller, 1786)	7,22	6,11
Lecane luna (Müller, 1776)	4,44	2,29
L. bulla (Gosse, 1851)	4,44	1,74
Platyias quadricornis (Ehrenberg, 1832)	0,56	1,99
Polyarthra major (Burckhardt, 1900)	0,56	0,56
Rotaria sp.	6,11	61,05
Trichocerca pusilla (Layterborn, 1898)	0,56	0,07
Trichotria pocillum (Müller, 1776)	1,11	0,65
T. tenuior (Gosse, 1886)	0,56	0,10
Copepoda (веслоногие ракообразные)		
Mesocyclops leuckarti (Claus, 1857)	18,87	377,40
Науплиусы	44,96	89,91
Сумма	217,41	722,46

По численности доминируют один вид олигохет семейства Lumbriculidae, три вида брюхоногих моллюсков (*Lymnaea auricularia, L. stagnalis, Planorbarius corneus*), три вида хирономид (*Chironomus plumosus, C. Behningi, Parachironomus varus*), один вид мокрецов (*Clinohelea unimaculata)*. По биомассе доминантами являются четыре вида брюхоногих моллюсков (*Lymnaea auricularia*, *L. stagnalis, Planorbarius corneus, Planorbis planorbis*) и два вида хирономид (*Chironomus plumosus, C. behningi*) (табл.2).

Значения численности и биомассы зоопланктона озера Затон составили 1388,8 экз./м^2 и 72,38 г/м^2, соответственно, из них на «мягкий» бентос приходится – 7,44 г/м^2, на моллюсков – 64,64 г/м^2.

Оценка потенциальной рыбопродукции. Макрофиты. Для озера Затон, как пойменного водоема характерно зарастание высшей водной растительностью. Жесткой растительностью – рогоз (*Typha latifolia*), камыш (*Scirpus lacustris*), рдесты (*Potamogeton latifollia s.l., Potamogeton angustifolia s.*); мягкой погруженной растительностью – роголистник (*Ceratophyllum demersum*), элодея (*Elodea canadensis*); плавающей растительностью – лягушачий водокрас (*Hydrócharis mórsus-ránae*), ряска (*Lemna minor*). Ширина зоны зарастаемости вдоль береговой линии составляет 3–7 м.

Биомасса жесткой растительности оценивается на уровне – 3100 г/м^2, мягкой погруженной – 6000 г/м^2, плавающей – 200 г/м^2. Общая площадь зарастания – 18500 м^2. Соответственно общая биомасса макрофитов оценивается на уровне – 172050 кг.

Таблица 2. Численность и биомасса организмов зообентоса в оз. Затон

Таксоны	Численность, экз./ м^2	Биомасса, г/ м^2
Подкласс Oligochaeta (олигохеты) (малощетинковые черви)		
Lumbriculidae	69,44	0,96
Тип Mollusca Класс Gastropoda (брюхоногие моллюски)		
Anisus contortus (Linnaeus, 1758)	34,72	0,16
Bithynia tentaculata (Linne, 1758)	17,36	0,52
Choanomphalus rossmaessleri (Auerswald, 1852)	17,36	0,02
Lymnaea auricularia (Linnaeus, 1758)	138,88	11,42
L. corvus (Gmelin, 1791)	52,08	2,26
L. stagnalis (Linnaeus, 1758)	86,80	40,97
Oxyloma elegans (Risso, 1826)	52,08	0,09
Planorbarius corneus (Linnaeus, 1758)	104,16	6,42
Planorbis planorbis (Linnaeus, 1758)	69,44	2,78
Отряд Diptera (двукрылые) Семейство Chironomidae (хирономиды)		
Chironomus behningi (Goetghebuer, 1928)	104,16	2,43
Chironomus plumosus (Linnatbs, 1758)	243,04	3,13
Endochironomus albipennis (Meigen, 1830)	17,36	0,17
Glyptotendipes sp.	34,72	0,10
Paratanytarsus quintuplex (Kieffer, 1922)	17,36	0,01
Parachironomus varus (Goetghebuer, 1921)	225,68	0,14
Tanypus sp.	17,36	0,01
Отряд Diptera Семейство (Ceratopogonidae) Мокрецы		
Clinohelea unimaculata (Macquart, 1826)	69,44	0,69
Отряд Ephemeroptera (поденки)		
Caenis undosa (Tiensuu, 1939)	17,36	0,10
Сумма	1388,8	72,38

Фитопланктон. Фитопланктон в озере Затон представлен тремя типами водорослей: синезеленые – 5, диатомовые – 2, зеленые – 3 вида (табл. 1). Синезелёные: *Anabaena flos-aquae, A. variabilis, Aphanizomenon flos-aquae, Merismopedia glauca, Microcystis aeruginosa;* диатомовые – *Navicula sp., Synedra ulna*; зеленые – *Chlorella vulgaris, Closterium sp., Tetracoccus botryoides.* По численности и биомассе значительно преобладает *Anabaena variabilis.* Среднее значение биомассы фитопланктона в исследуемом озере составляет – 9,8 г/м^3.

По показателям биомасс основных компонентов кормовой базы произведена оценка продукционных возможностей озера Затон (табл. 3).

Рыбопродукция озера по компонентам кормовой базы составила 9,7 т или 332 кг/га.

Ихтиофауна. По устным сообщениям местных жителей ранее в озере Затон встречались: щука *Esox lucius* L., линь *Tinca tinca* L, сазан *Cyprinus carpio* L, окунь *Perca fluviatilis* L, плотва *Rutilus rutilus* L. и вселенные в ограниченных количествах в конце прошлого века карп и растительноядные рыбы (herbivorous fishes).

По результатам исследовательского лова в озере Затон выявлено обитание двух видов рыб: карась серебряный *Carassius gibelio* Bloch и верховка *Leucaspius delineates*

Heckel et Kner. Средняя длина карася – 6,7 см, масса – 11,4 г, возраст – 2+, численность – 1,18 экз./м^2, биомасса – 10,8 г/м^2. Средняя длина верховки – 4,8 см, масса – 1,9 г, возраст – 1+, численность – 0,33 экз./м^2, биомасса – 0,62 г/м^2. В целом численность представителей ихтиофауны составила – 1,51 экз./м^2, биомасса – 11,42 экз./м^2

Таблица 3. Сводная таблица показателей, коэффициентов и результаты расчета рыбопродукции озера Затон

Коэффициенты, показатели	Компоненты кормовой базы				
	зоопланктон	Бентос «мягкий»	бентос, моллюски	макрофиты	фитопланктон
B, г/м^2	0,72	7,74	64,61	9300,0	9,8
P/B	20,0	6,0	3,0	1,1	100,0
S, м^3/ м^2	292000	292000	292000	18500	292000
K_E	7	6	30	50	40
K_3	70	80	40	15	70
N, кг	441,5	2109,4	1006,2	1135,5	5007,8
N, кг/га	15,1	72,2	34,5	38,9	171,5

Рыбопродукция. Показания общей рыбопродукции озера Затон в сравнении с различными типами водохранилищ (Каморы, Городское, Надежда) и реками (Сура, Труёв) Пензенской области показаны на рис. (Асанов, 2023; Асанов 2024; Asanov et al.., 2021).

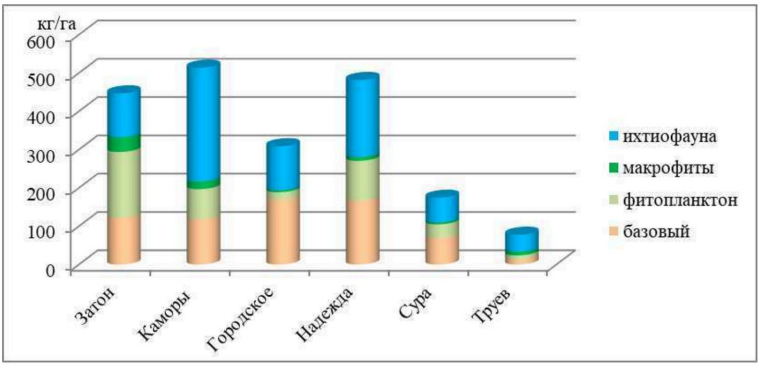


Рис. Биомасса и состав общей рыбопродукции ряда водных объектов региона

По базовой рыбопродукции – зоопланктону и зообентосу озеро Затон имеет высокие показатели, несколько уступая водохранилищам различного типа. При этом, в зоопланктоне отсутствуют ветвистоусые ракообразные, а в зообентосе двустворчатые моллюски. Биомасса показателей потенциальной продукции – макрофиты и фитопланктон значительно превышает все сравниваемые водные объекты. В составе ихтиофауны присутствуют лишь виды, выживающие в неблагоприятных условиях. И в целом биомасса общей рыбопродукции, 446 кг/га, очень высока в сравнении с приведенными водными объектами. Подобные показатели свидетельствуют о недопустимой степени эвтрофикации озера, которое в отличие от водохранилищ нельзя сработать для увеличения проточности и экологического оздоровления. Расчистка озера в 2015–2016 гг. не решила вопросов с «цветением» воды и зарастаемостью. Для борьбы с водорослями в 2018 и 2019 гг. было произведено зарыбление озера растительноядными

видами рыб. Объем рыбопосадочного материала рассчитывался по приведенным в статье показателям рыбопродукции. Полученные результаты и в дальнейшем помогут в моделировании управленческих решений по реабилитации и использованию озера Затон.

Литература

Асанов А.Ю. Оценка рыбопродукции водохранилища Камора в Пензенской области // Сурский вестник. 2023. 1 (21). С. 3-9.

Асанов А.Ю. Рыбохозяйственное значение руслового водоподъемного водохранилища прудового типа на малых водотоках Приволжья на примере р. Труев. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2024. № 1. С. 39–49.

Ивушкин А.С., Крышов К.К., Кантеев К.К. Водорегулирующие сооружения. Справочник. Пенза: «Пензенская Правда», 1993. 270 с.

Козлов В.И., Иванова Ю.С. Эколого-рыбохозяйственная оценка озера Сенеж // Рыбное хозяйство. 2013. № 1. С. 18-25.

Asanov A.Y., Galiullin A.A., Kalinichev E.A. Biological resources of water bod ies in the Volga region, formed by water retaining structures as exemplified by the Gorodskoye water reservoir in Penza region / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, volume 953: Volga Region Farmland 2021 (VRF 2021), Penza, 16th-18th November 2021. Penza: IOP Publishing Ltd, 2022. P. 012028.

ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATE OF LAKE ZATON IN THE PENZA REGION BASED ON THE RESULTS OF BIORESOURCE RESEARCH

A.Yu. Asanov

The results of studies of biological resources on the floodplain lake of the Khoper River in the Bekovsky district of the Penza region are presented. The total bio-productivity was 447 kg/ha, which corresponds to the artificial waters in the region. This is due to the massive development of blue-green algae and higher aquatic vegetation. The composition of the ichthyofauna, consisting of two fish species, also indicates an unsatisfactory condition of the lake. The obtained research results make it possible to develop ways to rehabilitate the reservoir and reconstruct the ichthyofauna, taking into account the planning of the lake's use by regional authorities.

НАСЕЛЕНИЕ РЫБ МАЛЫХ ОЗЕР РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

А.О. Аськеев, О.В. Аськеев, И.В. Аськеев, С.П. Монахов, Н.М. Яныбаев
Институт проблем экологии и недропользования АН РТ

Вероятность обнаружения, численность и экологические предпочтения рыб изучались в озерах площадью не больше 10 га на территории Республики Татарстан. Влияние экологических факторов на виды и сообщества рыб анализировалось с помощью методов регрессии. Всего отловлено 22 вида, что составляет 68.1% от видового богатства рыб всех озер РТ. Площадь, долгота и субстрат дна озер были основными экологическими переменными, влияющими на общее количество видов рыб, величину индекса разнообразия Шеннона и вероятность обнаружения отдельных видов рыб.

Озера покрывают около 2% поверхности Земли и являются крупнейшими запасами жидкой пресной воды на нашей планете. В это же время озера, а особенно малые в силу своих аккумулятивных особенностей, являются очень хрупкими экосистемами, воздействие человека очень быстро приводит их к депрессивному состоянию. Большинство озер испытывают интенсивное антропогенное воздействие, что приводит, в частности, к эвтрофикации (Moss et al., 2011), заилению и как следствии к массовым заморам в них. Кроме того, изменение климата может иметь дополнительные эффекты на озера и их рыбные сообщества (Jeppesen et al., 2014). Климат на территории Татарстана в последние 30 с лишним лет меняется в сторону сильного потепления (Askeyev et al., 2022, 2023a), поэтому озера нуждаются в особенно тщательном многолетнем мониторинге. Во многих европейских странах проводятся интенсивные исследования в озерах рыбных сообществ и переменных окружающей среды (Монахов и др., 2017; Zick et al., 2006; Emmrich et al., 2014; Brucet et al., 2018; Trochine et al., 2018; Mehner et al., 2021; Askeyev et al., 2023b). Но следует сказать, что, к сожалению, малым озерам по их площади уделяется не достаточно внимания. Поэтому в основное внимание нами было сосредоточено на ихтиофауне малых (менее 10 га) озер Республики Татарстан. Основными целями исследования были: (1) описание сообществ рыб в малых озерах на крайнем востоке Европейского континента, (2) выявление факторов окружающей среды, влияющих на распределение и встречаемость видов рыб в озерах.

Республика Татарстан (РТ) расположена на окраине Русской равнины на севере Среднего Поволжья, в месте слияния рек Волги и Камы, включает две природные зоны — лесную и лесостепную. Сбор ихтиологического материала проводился в течение последних тринадцати лет (2012-2024) в озерах и прудах на территории РТ. В матрицу данных было включено 67 водных объектов. Водоемы в которых отсутствовала ихтиофауна и с площадью более 10 гектаров не включилась в это исследование. Отлов в водоемах проводился различными методами: в литоральной зоне на глубинах от 0,4 до 1,3 м использовалась мальковая волокуша длиной 8 м и максимальной высотой 1,5 м, с ячеёй в крыльях 5 мм, в кутке 2,5 мм; в геоморфологически сложных и захламлённых (со множеством коряг или в зарослях рогоза, тростника и с другой жёсткой водной растительностью) местах применялся ихтиологический сачок с площадью створа 0,15 м^2. Пелагиаль и бенталь в крупных по морфологическому размеру озёрах на глубинах от 1,6 м до 12 м облавливались двумя 30-метровыми универсальными ставными жаберными сетями (состоящими из шести 5-метровых отрезков различной ячеи (10; 16; 28; 36; 40; 45 мм и 35; 40; 45; 50; 55; 60 мм)), высотой 1,8 метра. Для каждой точки отлова было вычислено: видовое богатство и индекс биологического разнообразия Шеннона – H'. Также были вычислены вероятность обнаружения и процентная доля по численности каждого отдельного вида. Для оценки относительного обилия вида в уловах принято следующее деление их по значимости: редкий вид–0.1–1%, малочисленный–1.1–5.0%, обычный– 5.1–10.0%, доминант– 10.1–50%, супердоминант– >50% от общей численности в уловах. Для описания структуры населения рыб приведены данные об экотопических гильдиях (доли по численности) (Noble, Cowx, 2002). В качестве основных переменных, влияющих на распределения рыб в озерах было выбрано семь переменных: высота над уровнем моря, площадь озера, средняя глубина, степень залесенности берегов в %, преобладающий субстрат дна, географическая широта и долгота. Характер и сила взаимосвязей между общим числом видов рыб, и индексом Шеннона и семью переменными окружающей среды были исследованы с использованием обобщенных линейных моделей с нормальной структурой ошибок. Наиболее подходящие модели были выбраны на основе самых низких значений информационного критерия Акаике (AIC). Характер и сила взаимосвязей между встречаемостью 12 видов рыб (в этот анализ включались виды, которые были отмечены

в 5 и более озерах) и семью переменными окружающей среды были исследованы с использованием бинарных логистических регрессий с переменными окружающей среды в качестве предикторов. Для оценки точности моделей мы использовали площадь под кривой ROC (AUC), которая указывает на прогностическую эффективность, выраженную в виде индекса в диапазоне от 0,5 до 1 (Swets, 1988), где точность модели считается следующим образом: 0.90–1,00 отлично; 0.80–0.90 хорошо; 0.70–0.80 удовлетворительно; 0.60–0.70 плохо; и 0.50–0.60 неудовлетворительно. Для обработки данных использовались следующие прикладные статистические программы: Minitab 19 и Past 4.12.

Всего за период исследования было отловлено 22 видов рыб (табл. 1), что составляет 62.9% от наблюдаемого в озерах РТ (Askeyev et al., 2023b), в частности в малых озерах отсутствуют крупные хищники такие как судак и жерех. Число видов на разных участках варьировало от 1 до 10 (в среднем 3.1±0.2), что значительно меньше, чем для всех озер Республики Татарстан (Askeyev et al., 2023b). Величина индекса Шеннона изменялась на исследованных участках от 0 до 2.02 (в среднем 0.62±0.07), что ниже, чем среднее значение для озер Республики Татарстан (Askeyev et al., 2023b). Мы видим, что видовое богатство рыб возрастает в больших по размеру озерах на территории Татарстана. Подобная закономерность описана так же для озер Австрии (Zick et al. 2006) и Германии (Mehner et al. 2005). Большее число видов рыб в крупных озерах связано с большим разнообразием местообитаний по сравнению с малыми (Mehner et al. 2005) и меньшим числом заморов.

Таблица 1. Видовой состав рыб малых озер РТ

Вид рыб	Вероятность обнаружения видов, %	Доля участия видов в население рыб по численности, %
Обыкновенная щука - *Esox lucius*	13.2	0.7
Обыкновенный пескарь - *Gobio gobio*	11.8	1.1
Уклейка - *Alburnus alburnus*	3.9	0.2
Верховка - *Leucaspius delineatus*	34.2	33.5
Лещ - *Abramis brama*	1.3	0.09
Обыкновенный елец - *Leuciscus leuciscus*	1.3	0.01
Язь - *Leuciscus idus*	3.9	0.1
Плотва - *Rutilus rutilus*	14.5	2.7
Красноперка - *Scardinius erythrophthalmus*	5.3	0.7
Золотой карась - *Carassius carassius*	43.4	13.2
Серебряный карась - *Carassius gibelio*	61.8	31.3
Линь - *Tinca tinca*	10.5	0.6
Сазан - *Cyprinus carpio*	15.8	0.2
Белый амур - *Ctenopharyngodon idella*	1.3	0.01
Белый толстолобик - *Hypophthalmichthys molitrix*	2.6	0.02
Обыкновенный горчак - *Rhodeus sericeus*	1.3	1.3
Речной гольян - *Phoxinus phoxinus*	3.9	0.2
Усатый голец - *Barbatula barbatula*	9.2	0.5
Сибирская щиповка - *Cobitis melanoleuca*	1.3	0.01
Речной окунь - *Perca fluviatilis*	21.1	4.2
Обыкновенный ёрш - *Gymnocephalus cernuus*	1.3	0.05
Ротан - *Perccottus glenii*	50	9.3

В малых озерах РТ только два вида, а именно, серебряный карась и ротан, имели вероятность обнаружения 50% и более (табл.1). По сравнению со всеми озерами РТ (Askeyev et al., 2023b), подавляющие число видов рыб, имеют меньшую вероятность обнаружения в малых озерах, за исключением ротана и золотого карася. По численности в малых озерах к доминантам относятся: верховка, серебряный карась, и золотой карась.

Вместе их доля в населении рыб составляет 78%. К числу обычных видов относятся ротан. Все остальные виды рыб относятся к малочисленным и редким, в том числе и вид, занесенный в Красную Книгу РТ,- обыкновенный горчак. Сравнивая вероятность обнаружения отдельных видов рыб с аналогичными показателями в озерах в западных частях Европейского субконтинента, можно сказать, что они сильно отличаются. Так, например, встречаемость доминирующих в малых озерах РТ видов серебренного карася, ротана и верховки значительно выше, чем в озерах в западных регионах Европы; а вероятность обнаружения щуки, окуня, ерша и плотвы значительно ниже (Mehner et al., 2005; Heino et al., 2010; Emmrich et al., 2014).

По экотопическим группам среди населения рыб в малых озерах преобладали представители лимнофилов, вместе их доля достигла 58.63% от общей численности. Доля представителей группы эвритопов несколько ниже и составляет 39.54%, доля видов реофильного комплекса незначительна и равняется 1.83%. Данное распределения по экотопическим группам сильно контрастирует с крупными озерами РТ (Аськеев и др., 2012), в которых доминируют представителей эвритопов. Вероятной причиной отличия являются заморные явления в большинстве малых озёр, которые элиминируют представителей гильдий эвритопов и тем более реофилов, которые крайне чувствительны к содержанию кислорода в воде.

Три из семи факторов среды оказывали достоверное влияние на общее число видов рыб и величину индекса Шеннона в озерах (табл. 2). Видовое богатство и величина Индекса Шеннона возрастает в больших по площади, с более «жесткими» субстратами дна озерах, расположенных на востоке Татарстана. Даже в малых озерах площадь водоема играет так же очень значимую роль в определении видового богатства населения рыб.

Таблица 2. Коэффициенты регрессионных моделей между числом видов рыб, величиной индекса Шеннона и переменными окружающей среды в малых озерах РТ

Переменные	Константа	Долгота	Субстрат	Площадь	R^2	AIC
Видовое богатство	-24.4	1.0	1.8	0.4	0.43	284.25
Индекс Шеннона	-1.7	0.3	0.4	0.2	0.41	93.09

Таблица 3. Коэффициенты регрессионных моделей между встречаемостью 12 видов рыб и переменными окружающей среды в малых озерах РТ

Виды	Константа	Долгота	Широта	Высота	Площадь	Глубина	Лесистость	Субстрат	AUC
Щука	3.2	–	–	-0.4	0.9	1.4	–	2.1	0.950
Пескарь	4.9	0.5	–	0.3	–	–	–	2.4	0.902
Верховка	0.6	–	–	–	–	-0.6	–	–	0.623
Плотва	3.1	1.7	–	-0.3	0.6	–	–	2.1	0.802
Красноперка	-1.5	0.5	–	–	–	0.8	–	–	0.982
Золотой карась	0.6	–	–	–	-0.3	–	–	–	0.702
Серебряный карась	6.4	1.9	–	–	–	–	-0.3	2.9	0.877
Линь	3.1	1.1	–	–	1.0	–	–	1.9	0.777
Сазан	-1.7	–	–	–	0.4	–	-0.2	–	0.747
Голец	3.4	0.9	–	0.3	–	–	–	2.6	0.916
Окунь	3.3	–	2.4	–	1.2	2.3	–	–	0.903
Ротан	1.9	–	-2.2	-0.2	–	-0.4	–	–	0.758

Вероятность обнаружения 12 наиболее распространенных видов рыб имела статистически значимые связи с одними или несколькими переменными окружающей среды. Окончательные модели имели удовлетворительную предсказательную силу (AUC), и варьировали от 0.623 до 0.982, 5 моделей были классифицированы как отличные (табл. 3).

6 видов рыб были тесно и положительно связаны с долготой и субстратом дна, предпочитая малые озера с «жесткими» субстратами на востоке Татарстана. 6 видов рыб были достоверно связаны с площадью водоемов, все кроме 1 положительно. 5 видов имели тесные взаимодействия с высотой и глубиной озер, а 2 с широтой и залесенностью. Таким образом мы видим, что предпочтения отдельных видов рыб в озерах определяются целой совокупностью и комбинацией факторов окружающей среды.

Литература

Аськеев О.В., Аськеев И.В., Аськеев А.О., Монахов С.П., Галимова Д.Н. Ихтиофауна озерной системы Кабан города Казани // Георесурсы. 2012. №7(49). С.42-47.

Красная Книга Республики Татарстан. Казань: Изд-во «Идел-Пресс», 2025.

Монахов С.П., Аськеев О.В., Аськеев И.В., Аськеев А.О. Население рыб водоёмов озёрного типа по отношению к факторам окружающей среды в Республике Татарстан // Российский журнал прикладной экологии. 2017. №1(9). С. 22-31.

Askeyev O., Askeyev A., Askeyev I., Sparks T. Extreme temperatures help in identifying thresholds in phenological responses // Global ecology and biogeography. 2022. V.31(2). P. 321-331.

Askeyev A., Askeyev O., Askeyev I., Sparks T. The role of climate change and food supply on winter populations of seed-eating birds // European Journal of Ecology. 2023a. V. 9(1). P. 58-69.

Askeyev O., Monakhov S., Askeyev I., Askeyev A., Sparks T.H. Fish assemblages in lakes along environmental gradients at the eastern edge of Europe // Environmental Biology of Fishes. 2023b. V.106. P.1265–1276.

Brucet S., Arranz I., Mehner T., Argillier C., Beklioğlu M., Benejam L., Jeppesen E. Size diversity and species diversity relationships in fish assemblages of Western Palearctic lakes // Ecography. 2018. V. 41(7). P. 1064–1076.

Emmrich M., Pedron S., Brucet S., Winfield I., Jeppesen E., Volta P., Mehner T. Geographical patterns in the body size structure of European lake fish assemblages along abiotic and biotic gradients // J. Biogeogr. 2014. V.41(12). P. 2221-2233.

Heino J., Erős T., Kotanen J., Rask M. Describing Lake fish communities: Do presence–absence and biomass data show similar spatial and environmental relationships? // Boreal Environ. Res. 2010. V.15. P. 69–80.

Jeppesen E., Meerhoff M., Davidson T., Trolle D., Sondergaard M., Lauridsen T., Nielsen A. Climate change impacts on lakes: an integrated ecological perspective based on a multi-faceted approach, with special focus on shallow lakes // J. Limnol. 2014. V. 73. P. 88–111.

Mehner T., Diekmann M., Brämick U., Lemcke R. Composition of fish communities in German lakes as related to lake morphology, trophic state, shore structure and human use intensity // Freshw. Biol. 2005. V. 50(1). P. 70-85.

Mehner T., Argillier C., Hesthagen T., Holmgren K., Jeppesen E., Kelly F., Brucet S. Model ‐ based decomposition of environmental, spatial and species ‐ interaction effects on the community structure of common fish species in 772 European lakes // Glob. Ecol. Biogeogr. 2021. V. 30 (8). P. 1558-1571.

Moss B., Kosten S., Meerhoff M., Battarbee R., Jeppesen E., Mazzeo N., Scheffer M. Allied attack: climate change and eutrophication // Inland waters. 2011. V. 1(2). P. 101–105.

Noble R., Cowx I. Development of river- type classification system (D1), complication and harmonisation of fish species classification (D2), final report. Development, Evaluation & Implementation of a Standardised Fish-based Assessment Method for the Ecological Status of European Rivers - A Contribution to the Water Framework Directive (FAME). 2002. 51 p.

Swets J. Measuring the accuracy of diagnostic systems // Science. 1988. V. 240. P. 1285–1293.

Trochine C., Brucet S., Argillier C., Arranz I., Beklioglu M. M., Benejam L., Mehner T. Non-native fish occurrence and biomass in 1943 Western Palearctic lakes and reservoirs and their abiotic and biotic correlates // Ecosystems. 2018. V. 21(3). P. 395–409.

Zick D., Gassner H., Filzmoser P., Wanzenböck J., Pamminger - Lahnsteiner, B., Tischler, G. Changes in the fish species composition of all Austrian lakes> 50 ha during the last 150 years // Fisheries Management and Ecology. 2006. V. 13(2). P. 103-111.

FISH ASSEMBLAGES OF SMALL LAKES OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN

A.O. Askeyev, O.V. Askeyev, I.V. Askeyev, S.P. Monakhov, N.M. Yanybaev

We studied the probability of occurrences, abundance and ecological preferences of fish in lakes with an area of no more than 10 hectares in the Republic of Tatarstan. The influence of ecological factors on fish species and communities was analyzed using regression methods. A total of 22 species were caught, which is 68.1% of the species richness of fish in all lakes of the Republic of Tatarstan. The area, longitude and substrate of the lake bottom were the main ecological changes affecting the total number of fish species, the value of the Shannon diversity index and the probability of occurrences of individual fish species.

РАЗНООБРАЗИЕ И СТРУКТУРА ПЛАНКТОННЫХ СООБЩЕСТВ (ФИТО- И ЗООПЛАНКТОН) ТРАНСГРАНИЧНЫХ РЕК (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ)

Е.Ю. Афонина, Н.А. Ташлыкова

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН

В работе представлены результаты исследований фито- и зоопланктона трансграничных рек Ульдза и Ималка (Забайкальский край), проведенных в 2020–2022 г. Видовое богатство планктона р. Ульдза определяли 123 таксона рангом ниже рода фитопланктона и 105 – зоопланктона, в протоках Борохолой – 6 и 13 и Уточи – 30 и 15 таксонов, в р. Ималка – 37 и 25, соответственно. Диатомовые водоросли *Nitzschia acicularis* и *Ulnaria ulna* и копеподитные стадии Cyclopoida встречались во всех водотоках и во все даты исследований. Количественные показатели гидробионтов варьировали в широких пределах. Основу планктонных сообществ формировали диатомовые, зеленые и синезеленые водоросли и коловратки и ювенильные стадии веслоногих ракообразных.

Речные экосистемы, в силу особенностей гидрологии и различной протяженности рек, оказываются более сложно организованными и слабо изученными по сравнению с лентическими системами. Изучение лотических систем, занимающих значительные территории, является необходимым для практики и для создания общей теории функционирования экологических систем (Богатов, 1995). Планктонные сообщества (фито- и зоопланктон) играют значительную роль в состоянии, функционировании и оценке качества вод (Алимов, 2010; Крылов, 2005) и являются одним из важнейших компонентов экологического мониторинга водных экосистем, в том числе и речных. Цель

настоящей работы – изучение видового разнообразия и структуры организмов планктона в трансграничных реках Ульдза и Ималка (Забайкальский край).

Ульдза – уникальная река Центральной Азии, не соединяется ни с каким из океанских бассейнов. Водоток берет начало на восточных отрогах хребта Хэнтэй, протекает по степной равнине северо-восточной части МНР (в междуречье рек Онон и Керулен) и впадает в оз. Дуро-Нур. После озера в низовьях река разделяется на два рукава, из которых первый впадает в оз. Барун-Торей с образованием обширной дельты на территории РФ, а второй, получивший название р. Тэлийн-Гол, – в оз. Хух-Нур на территории МНР (Кирилюк и др., 2012). Отличительной особенностью реки является чрезвычайно высокая вариация годового стока (Кирилюк и др., 2021). Длина реки составляет 425 км. В России находится устьевая часть реки длиной 16 км. Площадь бассейна 26900 км^2 (в пределах РФ – 1450 км^2).

Барахолой – это небольшой рукав дельты р. Ульдза, длиной 13 км, имеет слабо разработанное русло. Сток наблюдается только во влажные климатические периоды. В сухой период водоток теряется в песках, в 9 км к от с. Соловьевск.

Протока Уточи (200–300 м длиной и 40–100 м шириной) в многоводные периоды обеспечивает сообщение между озерами Барун-Торей и Зун-Торей, принося из первого во второе воду р. Улдза.

Река Ималка берет начало на склонах хребта Эрмана, образуется от слияния рек Нижняя Ималка и Верхняя Ималка. Протекает по территории Монголии и России, где находятся верховье и устье реки. В оз. Барун-Торей впадает с юго-запада. Общая протяженность реки – 156 км, общая площадь водосбора – 1480 км^2, на территории РФ – 60 км и 640 км^2, соответственно.

Русла рек Ульдза и Ималка были сухими на протяжении нескольких лет (с 2003 г.). В отличие от р. Ималка, р. Ульдза не пересыхала на всем протяжении, оставаясь важнейшей водной артерией монгольских степей, но до оз. Барун-Торея река не дотекала, окончательно пересыхая в нескольких километрах от дельты. В сентябре 2020 г. река Ульдза принесла в оз. Барун-Торей паводковую воду, собранную преимущественно главным левым притоком – р. Дучийн-Гол. В октябре, наполнив основное русло и мелкие старицы дельты, вода по руслу правого рукава дельты –Барахолой – проникла через северную протоку Уточи в озеро Зун-Торей. В р. Ималка сток отмечали летом 2021 г. (Обязов и др., 2021).

Обследования р. Ульдза (у с. Соловьевск) проводились в 2020–2021 и 2021–2022 гг. (сентябрь, октябрь, апрель, май, июль, август), р. Ималка (у с. Красная Ималка) в апреле, августе, сентябре 2021 г., в Борохолой – в октябре 2020 г., в Уточи – в сентябре 2021.

Отбор проб фитопланктона производился зачерпыванием приповерхностного слоя воды в емкость, зоопланктона – процеживанием воды через гидробиологический сачок (диаметр входного отверстия 38 см, размер ячеи 0,074 мм). Лабораторная обработка фиксированных 4%-м раствором формальдегида образцов проводилась по стандартной количественно-весовой методике (Киселев, 1969; Садчиков, 2003). Биомасса фитопланктона определялась по объему отдельных клеток или колоний водорослей, при этом удельный вес принимался равным единице. Объемы водорослей приравнивали к объемам соответствующих геометрических фигур (Садчиков, 2003). Данные по биомассе зоопланктона получали путем определения индивидуального веса организмов с учетом их размера (Балушкина, Винберг, 1979; Ruttner-Kolisko, 1977).

Общий список видового состава фитопланктона обследованных водотоков включал 134 таксона рангом ниже рода из 8 отделов (Chlorophyta – 35% от общего списка, Bacillariophyta – 37%, Cyanophyta – 13%, Chrysophyta – 3%, Cryptophyta и Dinophyta – по 1%, Charophyta – 8% и Euglenophyta (3%). Разнообразие зоопланктона определяли 116 таксонов (Rotifera – 55%, Cladocera – 30% и Copepoda – 15%). Среди альгофлоры

наибольшей видовой насыщенностью обладали диатомовые (*Cymbella* (6 видов), *Gomphonema* (5 видов), *Fragilaria* и *Ulnaria* (по 3 таксона)), зеленые (*Monoraphidium* (5 видов) и *Scenedesmus* (5 видов)) и харовые водоросли (*Closterium* (6 таксонов)). Среди фауны беспозвоночных высоким видовым богатством отличались коловратки семейств Brachionidae (12 видов и разновидностей), Lecanidae (8 видов) и Euchlanidae (6), кладоцеры семейств Chydoridae (17 видов) и Daphniidae (10), копеподы семейства Cyclopidae (14 видов). Водоросли *Nitzschia acicularis* и *Ulnaria ulna* и копеподитные стадии Cyclopoida встречались во всех водотоках и во все даты исследований. Чуть меньшей частотой встречаемости обладали виды фитопланктона *Fragilaria radians*, *Lindavia comta*, *Cosmarium* sp., *Chlamydomonas globose*, *Monoraphidium contortum*, *M. komarkovae*, *M. minutum*, *Oocystis lacustris*, зоопланктона – *Chydorus sphaericus, Pleuroxus aduncus* и науплии Copepoda. Большинство видов (50% от общего списка видов) отнесены к редким или случайным.

Фитопланктон р. Улдза включал 123 вида. По числу видов преобладали Bacillariophyta (44 таксона) и Chlorophyta (43). Видовое разнообразие, численность и биомасса в разные периоды исследований существенно не различались (ANOVA, $p > 0,05$). Видовое богатство в 2020–2021 гг. определяли в среднем (mean±SD) 19±8 видов, в 2021–2022 гг. – 17±12 видов. Значения общей численности и биомассы соответствовали 57,95±30,19 тыс. кл./л и 100,69±64,35 мг/м^3 в 2020–2021 гг. и 88,67±78,91 тыс. кл./л и 79,28±48,08 мг/м3 в 2021–2022 гг. Индекс Шеннона варьировал в пределах 2,34–3,65 в 2020–2021 гг. и 1,66–2,91 в 2021–2022 гг., индекс Пиелоу – 0,78–0,98 и 0,65–0,93, соответственно.

В составе зоопланктона отмечено 105 видов/таксонов, в том числе 61 таксон коловраток, 31 – кладоцер и 13 – копепод. Общее число видов/таксонов в 2020–2021 гг. (34±21) статистически достоверно (ANOVA, $p < 0,05$) больше, чем в 2021–2022 гг. (13±4). Численность и биомасса беспозвоночных варьировали в широких пределах и были выше в 2020–2021 гг. (11,11±12,73 тыс. экз./м^3 и 82,85±86,70 мг/м^3), чем в 2021–2022 гг. (2,27 2,26 тыс. экз./м^3 и 50,03±68,61 мг/м^3), но недостоверно (ANOVA, $p > 0,05$). Индексы Шеннона и Пиелоу варьировали в пределах 2,24–3,98 и 0,78–0,98 соответственно в 2020–2021 гг. и 1,89–3,45 и 0,61–0,91 в 2021–2022 гг.

В притоке Борохолой фитопланктон был представлен 2 видами диатомовых и 4 – зеленых водорослей. Численность и биомасса были низкими и составляли 4,48 тыс. кл./л и 16,22 мг/м^3. Преобладали *Monoraphidium*, *Nitzschia acicularis* и *Ulnaria ulna*.

В зоопланктоне обнаружено 13 видов зоопланктона с общей численностью 8,10 тыс. экз./м^3 и биомассой 210,43 мг/м^3. Доминировали коловратки (*Cephalodella*, *Proales*, *Epiphanes*).

В протоке Уточи зарегистрировано 30 видов фитопланктона. Общая численность составляла 96,80 тыс. кл./л, общая биомасса – 68,85 мг/м^3. Превалировали крупные одноклеточные диатомовые водоросли (*Ulnaria ulna*, *Fragilaria radians*, *Nitzschia* sp.) и нитчатые цианобактерии (*Anabaena minima* и виды рода *Oscillatoria*).

В зоопланктон найдено 15 видов. Количественные показатели соответствовали 105,17 тыс. экз./м^3 и 40318 мг/м^3. Основу численности и биомассы определяли крупные ветвистоусые ракообразные (*Daphnia curvirostris*, *Simocephalus vetulus*, *Ceriodaphnia quadrangula*, *Scapholeberis mucronata*).

Разнообразие альгофлоры р. Ималка слагалось из 37 таксонов водорослей из 6 отделов (Cyanobacteria – 2 таксона, Bacillariophyta – 17, Charophyta – 1 таксон, Chlorophyta – 12, Chrysophyta – 4 и Euglenophyta – 1 таксон). Общая численность и биомасса значительно варьировали (от 56,00 до 315,00 тыс. кл./л и от 15,66 до 347,05 мг/м^3). В апреле массовыми были диатомеи (*Fragilaria crotonensis*) и хризофиты (*Dinobryon divergens*), в августе – зеленые водоросли (*Monoraphidium* и *Scenedesmus*), в

сентябре – диатомовые водоросли (*Ulnaria ulna*, *Nitzschia acicularis*).

В планктофауне отмечено 25 видов (Rotifera – 8, Cladocera – 11, Copepoda – 6). Значения численности изменялись от 0,16 до 8,60 тыс. экз./м^3, биомасса – от 1,45 до 152,69 мг/м^3. Весной основу численности формировали Copepoda в стадии науплий, летом – младшевозрастные стадии Cyclopoida и коловратки (*Filinia longiseta* и *Euchlanis dilatata*), осенью – Cladocera (*Chydorus sphaericus*, *Pleuroxus aduncus*).

Таким образом, в годы возобновления и увеличения речного стока планктонные сообщества р. Ульдза характеризовались высоким видовым разнообразием. Основу фитопланктона определяли диатомовые, зеленые и синезеленые водоросли, зоопланктона – коловратки и ювенильные стадии веслоногих ракообразных. Видовой состав и количественные характеристики планктонной флоры и фауны р. Ималка значительно меньше, чем в р. Ульдза.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ИПРЭК СО РАН № 121032200070-2.

Литература

Алимов А.Ф. Изменения структуры сообществ животных при эвтрофировании и загрязнении водных экосистем // Доклады РАН. 2010. Т. 433, № 2. С. 1-4.

Балушкина Е.Б., Винберг Г.Г. Зависимость между массой и длиной тела у планктонных животных // Общие основы изучения водных экосистем. Л.: Наука, 1979. С. 169-172.

Богатов В. В. Комбинированная концепция функционирования речных экосистем // Вестник ДВО РАН, 1995. № 3. С. 51-61.

Киселев И.А. Планктон морей и континентальных водоемов. Л.: Наука, 1969. Т. 1. 658 с.

Кирилюк В.Е. Ткачук Т.Е., Кирилюк О.К. Влияние изменений климата на местообитания и биоту в Даурии // Проблема адаптации к изменению климата в бассейне рек Даурии: экологические и водохозяйственные аспекты. Чита: Экспресс-издательство, 2012. С. 46-62.

Кирилюк В.Е., Обязов В.А., Шаликовский А.В., Курганович К.А., Босов М.А., Никитина О.И., Горошко О.А. Предварительная оценка влияния на экосистему Торейских озер плотины, строящейся на трансграничной реке Ульдза в Монголии // Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана / Сб. материалов Всероссийской науч.-практ. конф. Новочеркасск: Лик, 2021. С. 185-191.

Крылов А.В. Зоопланктон равнинных малых рек. М.: Наука, 2005. 263 с.

Обязов В.А., Кирилюк В.Е., Кирилюк А.В. Торейские озера как индикатор многолетних изменений увлажненности Юго-Восточного Забайкалья и Северо-Восточной Монголии // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2021. Т. 3. Вып. 3. С. 204-232.

Садчиков А.П. Методы изучения пресноводного фитопланктона. М.: Университет и школа, 2003. 157 с.

Ruttner-Kolisko A. Suggestions for biomass calculation of plankton rotifers // Archiv für Hydrobiologie Beihefte Ergebnisse der Limnologie. 1977. Bd. 8. P. 71-76.

DIVERSITY AND STRUCTURE OF PLANKTONIC COMMUNITIES (PHYTOPLANKTON AND ZOOPLANKTON) OF TRANSBOUNDARY RIVERS (ZABAYKALSKY KRAI)

E.Yu. Afonina, N.A. Tashlykova

The results of phytoplankton and zooplankton studies in the transboundary rivers Uldza and Imalka (Zabaykalsky Krai), conducted in 2020-2022 are presented. The plankton species richness in the Uldza River was determined by 123 taxa ranked below the genus of phytoplankton and 105 zooplankton species/taxa and 37 taxa and 25 taxa respectively in the Imalka River, while 6 phytoplankton taxa and 13 zooplankton taxa in the Borokholoi branch and 30 taxa and 15 taxa respectively in the Utochi channel. The diatoms *Nitzschia acicularis* and *Ulnaria ulna* and the copepodite stages of Cyclopoida were found in all watercourses and at all sampling dates. The quantitative parameters of the aquatic organisms varied widely. The basis of planktonic communities was formed by diatoms, green and blue-green algae and rotifers and juvenile stages of copepods.

ОСОБЕННОСТИ МАКРОЗООБЕНТОСА РЕК ЮЖНОЙ ЧАСТИ ОНЕЖСКО-ЛАДОЖСКОГО ВОДОРАЗДЕЛА В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

И.А. Барышев
Институт биологии КарНЦ РАН

Территория водораздела между Онежским и Ладожским озерами имеет большое влияние на формирование состава вод рек, впадающих в эти водоемы. Экологическое состояние можно характеризовать как хорошее, однако требующее внимания. Видовой состав, численность, биомасса и соотношение трофических групп макрозообентоса водотоков этой территории были определены на основе анализа летних сборов 2011–2023 гг. Показано, что видовой состав не уступает близлежащим территориям Северо-Запада России. Средние по рекам показатели обилия довольно близки к таковым в северных частях водосборов Ладожского и Онежского озер. Преобладание коллекторов-собирателей в трофической структуре в целом свойственно для макрозообентоса рек Восточной Фенноскандии, однако сравнительно малая доля коллекторов-фильтраторов отражает преимущественно равнинный характер водотоков.

Разветвленная речная сеть бассейнов Ладожского и Онежского озер имеет огромную суммарную протяженность и тесную связь с ландшафтом. Изменения количества осадков, площади лесов и уровня антропогенной нагрузки сказываются на составе речных вод и оказывают большое влияние на направление и интенсивность трансформации озер (Birawat et al., 2021; Sharov et al., 2014). Одно из важнейших направлений оценки состояния рек и мониторинга заключается в изучении речных экосистем, состояние которых напрямую зависит от поступающих с территории водосбора веществ и имеет большое биоиндикационное значение (Биоиндикация экологического состояния…, 2007; Водные ресурсы России…, 2008).

Настоящая работа направлена на определение современного состояния макрозообентоса (одного их основных компонентов речных сообществ) в водотоках южной части Онежско-Ладожского водораздела, расположенного на южной границе природной страны Фенноскандия, отличающейся каменистыми ландшафтами (рис. 1).

Обследованы реки Олонка (длина 87 км, расход воды 35.0 м^3/с); Шелтозерка (11 км, 0.8 м^3/с); Ивина (44 км, 29.5 м^3/с) с притоками Шапша и Таржеполка; Важинка (123 км, 32.5 м^3/с) с притоком Мужала; Усланка (7 км, 2.2 м^3/с) с притоком Кирьга; Янега (33 км, 3.1 м^3/с); Оять (226 км, 55.0 м^3/с) с притоками Тянукса, Тукша и Курба; Паша (242 км, 70.0 м^3/с) с притоками Капша, Явосьма и Чога; Воронежка (41 км, 3.8 м^3/с). Олонка

и Важинка впадают в Ладожское озеро, Шелтозерка в Онежское озеро, остальные – в р. Свирь, соединяющую эти два озера.

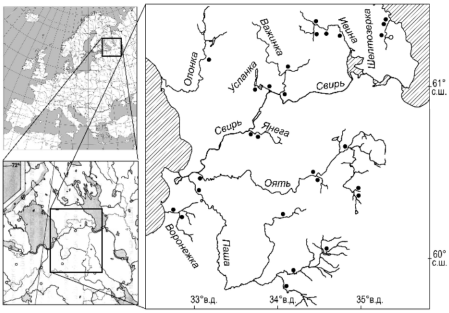


Рис. 1. Карта-схема расположения станций отбора проб (отмечены точками) в 2011–2023 гг.

Материал собирали во вторую половину лета. На каменистых грунтах применяли рамку “Surber” с размером ячеи 250 мкм и площадью 0.04 м^2. Мягкие грунты при глубине более 0.8 м облавливали дночерпателем ДАК-250 (площадь 0.25 м^2) по два подъема на пробу, а на мелких участках – ситом, захватывая грунт с площади 0.04 м^2 (Комулайнен и др., 1989). Всего собрано и обработано 76 проб макрозообентоса с 27 станций в период с 2011 по 2023 гг. Единичные особи крупных двустворчатых моллюсков не брали в расчет при оценке биомассы макрозообентоса, поскольку их количественный учет требует использования орудий лова большей площади захвата. Для анализа трофической структуры использован метод функциональных групп по питанию, выделены группы: измельчители; коллекторы-фильтраторы; коллекторы-собиратели; хищники; соскребатели (Cummins et al., 2005).

В составе макрозообентоса рек Оленецкого перешейка выявлено 207 видов и таксонов надвидового ранга. Из крупных таксонов наиболее представлены Chironomidae – 66 видов, Trichoptera – 31, Ephemeroptera – 26, Oligochaeta – 15, Coleoptera – 12, Gastropoda – 8, Plecoptera – 7. Встречены следующие виды и надвидовые таксоны: Nematoda g. spp., Oligochaeta: *Aeolosoma tenebrarum, Bothrioneurum vejdovskyanum, Cognettia glandulosa, Eiseniella tetraedra,* Enchytraeidae g. sp., *Lamprodrilus isoporus, Limnodrilus hoffmeisteri, Lumbriculus variegatus, Nais simplex, Ophidonais serpentine, Rhyacodrilus coccineus, Spirosperma ferox, Stylodrilus heringianus, Tubifex* sp., *Uncinais uncinata*; Hirudinea: *Erpobdella octoculata, Helobdella stagnalis, Glossiphonia complanata*; Bivalvia: *Anodonta cygnea*, *Euglesa* sp., *Pisidium* sp., *Sphaerium westerlundi, Unio tumidus*; Gastropoda: *Ampullaceana balthica, Ancylus fluviatilis, Bathyomphalus crassus, Cincinna* sp., *Gyraulus* sp., *Lymnaea stagnalis*, *Planorbarius corneus*; Malacostraca: *Asellus aquaticus*; Hydracarina: *Limnochares aquatica*; Ephemeroptera: *Baetis fuscatus, B. rhodani, B. vernus, Baetis* sp., *Brachycercus harrisella, Caenis horaria, C. macrura, C. rivulorum, Centroptilum luteolum, Cloeon dipterum, Ephemera danica, E. lineata, E. vulgata, Kageronia fuscogrisea, Habrophlebia lauta, Habrophlebia* sp., *Heptagenia dalecarlica, H. sulphurea, Nigrobaetis digitatus, N. niger, Paraleptophlebia cincta, P. submarginata, Potamanthus luteus, Procloeon bifidum, Serratella ignita*; Hemiptera: *Aphelocheirus aestivalis*, *Notonecta* sp.; Plecoptera: *Diura bicaudata, Isoperla difformis, I. grammatica, Leuctra fusca, Leuctra* sp., *Nemoura* sp., *Taeniopteryx nebulosa*; Megaloptera: *Sialis fuliginosa, S. sordida*; Trichoptera: *Agapetus ochripes, Agraylea multipunctata, Arctopsyche ladogensis, Athripsodes aterrimus, Athripsodes* sp., *Brachycentrus subnubilus, Ceraclea* sp., *Ceratopsyche newae, C. silfvenii, Cheumatopsyche lepida, Chimarra marginata, Cyrnus trimaculatus, Glossosoma* sp., *Goera pilosa, Halesus* sp., *Hydropsyche borealis, H. pellucidula, H. siltalai, Hydroptila* sp., *Ithytrichia lamellaris, Lepidostoma hirtum, Micrasema setiferum, Molanna angustata, Neureclipsis bimaculata, Oxyethira* sp., *Polycentropus flavomaculatus, Potamophylax latipennis, Psychomyia pusilla, Rhyacophila nubila, Sericostoma personatum, Stenophylax sequax*; Coleoptera: *Agabus* sp., *Brychius elevatus*, *Elmis aenea, E. maugetii*, *Halipus* sp.,

Hydraena gracilis, *Hydrophilus* sp., *Hygrotus quinquelineatus*, *Limnius volckmari*, *Riolus nitens*, *Orectochilus villosus, Oulimnius tuberculatus, Cordulegaster boltonii, Gomphus vulgatissimus, Onychogomphus forcipatus*; Simuliidae (Diptera): *Simulium equinum, Simulium polare, Simulium* sp.; Chironomidae (Diptera): *Ablabesmyia* sp., *Chironomus plumosus*, *C. anthracinus*, *Cladotanytarsus mancus*, *Cladotanytarsus* sp., *Clinotanypus* sp., *Constempellina brevicosta*, *Cricotopus bicinctus*, *Cricotopus* sp., *Cryptochironomus* gr. *defectus*, *C. obreptans*, *Demicryptochironomus* sp., *Dicrotendipes* sp., *Endochironomus* sp., *Eukiefferiella claripennis*, *Eukiefferiella* sp., *Harnischia curtilamellata*, *Heterotrissocladius marcidus*, *Microtendipes pedellus*, *Monodiamesa bathyphila*, *Nanocladius balticus*, *Nanocladius* sp., *Nilotanypus* gr. sp., *Odontomesa fulva*, *Orthocladius clarkei*, *Orthocladius dentifer*, *Orthocladius* sp., *Pagastiella orophila*, *Parachironomus varus*, *Parakiefferiella bathophila*, *Parakiefferiella triquetra*, *Parakiefferiella* sp., *Paralauterborniella* sp., *Paramerina* sp., *Paratanytarsus* sp., *Paratendipes* sp., *Phaenospectra* sp., *Polypedilum nubeculosum*, *Polypedilum pedestre*, *Polypedilum scalaenum*, *Potthastia longimana*, *Procladius* sp., *Psectrocladius bisetus*, *Psectrocladius flavus*, *Psectrocladius simulans*, *Psectrocladius* sp., *Rheocricotopus* sp., *Rheotanipus glabricollis*, *Rheotanytarsus* sp., *Saetheria* sp., *Sergentia coracina*, *Stempellina subglabripennis*, *Stictochironomus crassiforceps*, *Stilocladius* sp., *Symposiocladius* sp., *Synorthocladius semivirens*, *Synorthocladius* sp., *Tanypus* sp., *Tanytarsus* sp., *Thienemanniella clavicornis*, *Thienemanniella* sp., *Tribelos intextus*, *Tvetenia* sp.; Ceratopogonidae (Diptera): Ceratopogonidae g. sp.; Tabanidae (Diptera): *Crysops* sp.; Limoniidae (Diptera): *Antocha* sp., *Eloeophila* sp., *Hexatoma* sp., *Phylidorea* sp.; Athericidae (Diptera): *Atherix ibis*; Pediciidae (Diptera): *Dicranota bimaculata*, *Pedicia* sp.; Empididae (Diptera): *Hemerodromia* sp.; Ptychopteridae (Diptera): *Ptychoptera* sp.; Tipulidae (Diptera): *Tipula* sp.

В трофической структуре макрозообентоса рек Оленецкого перешейка по численности преобладают коллекторы-собиратели и измельчители; по биомассе – коллекторы-собиратели, коллекторы-фильтраторы и хищники (табл. 1).

Таблица 1. Соотношение беспозвоночных основных трофических групп в макрозообентосе рек Онежско-Ладожского водораздела в 2011–2023 гг. Над чертой представлена доля по численности, под чертой по биомассе

Трофическая группа	Олонка	Шелтозерка	Ивина	Важинка	Усланка	Янега	Оять	Паша	Воронежка	Средее
Хищники, %	5.2 1.0	9.6 21.1	5.3 27.1	14.5 15.0	13 33.9	9.7 34.0	27.1 38.5	16.5 15.6	15.6 14.6	12.9 22.3
Измельчители, %	15.1 1.8	12.5 2.4	41.2 9.8	35.4 17.3	29.6 5.5	38.0 17.3	14.8 7.8	38.8 17.4	27.5 13.9	28.1 10.4
Соскребатели, %	8.2 2.6	4.8 6.9	4.0 8.6	2.5 1.5	4.7 0.8	1.9 0.7	1.2 3.2	0.2 0.1	0 0	3.1 2.7
Коллекторы-фильтраторы, %	45.2 82.7	43.9 56.2	26.9 35.1	5.3 10.9	4.8 10.9	8.2 8.3	14.6 15.5	1.9 4.3	5.1 18.8	17.3 27.0
Коллекторы-собиратели, %	26.5 12.2	29.3 13.4	22.6 19.4	42.4 55.3	47.9 49.0	42.2 39.8	42.2 35.1	42.6 62.7	51.8 52.8	38.6 37.7

В макрозообентосе пороговых участков рек по численности доминируют (более 15%) представители родов *Rheotanytarsus*, *Nilotanypus* и *Cladotanytarsus*. По биомассе ни один таксон не набирает в среднем более 15%. Плесовые участки отличаются доминированием по численности хирономид рода *Procladius*. Основа биомассы плесов складывается доминирующим ручейником *Stenophylax sequax*. Численность макрозообентоса обследованных порогов составила в среднем 6.0 тыс.экз./м^2, биомасса

18.2 г/м^2. Плесовые участки отличаются меньшим обилием – 1.5 тыс.экз./м^2 и 2.2 г/м^2. Средние значения численности и биомассы крупных таксонов макрозообентоса в реках обследованной территории представлены в таблице 2.

Таблица 2. Средняя численность и биомасса крупных таксонов макрозообентоса в реках Онежско-Ладожского водораздела в 2011–2023 гг. Над чертой средняя численность, тыс. экз./м^2, под чертой – биомасса, г/м^2

Таксон	Олонка	Шелтозерка	Ивина	Важинка	Усланка	Янега	Оять	Паша	Воронежка
Nematoda	0.03 0.03	0.08 0.03	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0.02 0.01
Oligochaeta	0.08 0.62	0.25 0.71	0.1 0.13	0.04 0.11	0.13 0.47	0.14 0.51	0.2 0.28	0.08 0.10	0.18 0.35
Hirudinea	0 0	0.01 0.10	0.01 0.03	0.01 0.01	0.04 0.05	0 0	0 0	0 0	0.04 0.21
Bivalvia	1.88 5.58	0.04 0.06	0.17 0.40	0.08 0.13	0.02 0.04	0 0	0.04 0.22	0.03 0.27	0.39 1.14
Gastropoda	0.08 5.38	0.09 0.43	0.01 0.39	0.08 1.72	0.13 0.27	0 0	0 0	0 0.02	0.05 0.14
Malacostraca	0.01 0.06	0.02 0.04	0 0	0 0	0.01 0.01	0 0	0 0	0 0	0 0
Hydracarina	0 0	0 0	0 0	0.05 0.05	0.01 0.01	0.01 0.01	0.01 0.01	0.01 0.01	0 0
Ephemeroptera	0.25 0.48	0.24 0.53	0.17 0.54	0.48 1.10	0.30 0.60	0.09 0.13	0.27 0.68	0.59 1.54	0.24 0.28
Hemiptera	0.23 2.17	0 0	0.03 0.61	0.01 0.03	0.05 0.18	0 0	0.01 0.01	0.03 0.62	0.10 1.71
Plecoptera	0.73 1.34	0.11 3.08	0.04 0.04	0.13 0.24	0.13 0.25	0.04 0.04	0.04 0.04	0.18 0.18	0.23 0.32
Odonata	0.15 1.37	0 0	0.03 0.79	0.01 1.77	0.01 1.33	0 0	0.01 0.11	0.01 0.94	0.04 3.28
Trichoptera	1.23 5.93	2.01 15.99	0.07 0.14	0.97 9.29	0.93 4.22	0.05 0.52	0.06 0.33	0.05 0.45	0.13 0.68
Megaloptera	0 0	0.02 0.10	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0.07	0.01 0.02
Coleoptera	0.19 0.22	0.58 0.59	0.15 0.11	0.53 0.53	0.11 0.12	0.04 0.03	0.16 0.10	0.34 0.29	0.24 0.33
Simuliidae	0.49 0.54	0.02 0.04	0 0	0.02 0.02	0.93 2.05	0.02 0.01	0 0	0 0	0.02 0.01
Chironomidae	0.45 0.30	0.45 0.15	0.98 0.42	0.47 0.22	16.03 4.58	1.49 0.95	0.96 0.41	1.39 0.71	7.49 6.09
Прочие Diptera	0.79 22.10	0.31 0.56	0.04 0.21	0.05 1.33	0.28 9.76	0.08 0.83	0.07 0.44	0.25 2.05	0.05 0.13
Всего	6.55 46.10	4.24 22.42	1.82 3.85	2.9 16.55	19.09 23.92	1.96 3.05	1.87 2.66	3.02 7.31	9.37 14.83

Исследование показало, что видовой состав макрозообентоса рек этой территории отличается довольно богатым видовым составом, по сравнению с таковым в более северных (басс. Белого моря) – за счет появления новых видов, и в расположенных южнее (басс. Рыбинского водохр.) – за счет разнообразия биотопов (Барышев, 2023; Перова, 2016; Чертопруд М.В., Песков К.В., 2007) Средние значения численности и биомассы макрозообентоса в целом довольно близки к таковым в северных частях водосборов Ладожского и Онежского озер, однако значительно варьируют от реки к

реке. По всей видимости, это является следствием разнообразия гидрологических условий в реках и ограниченностью собранного в настоящее время материала. Доля коллекторов-фильтратов низка по сравнению с порожистыми реками северных частей водосборов Онежского и Ладожского озер, что отражает более равнинный характер обследованных водотоков (Барышев, 2023). Выраженного антропогенного влияния на структуру речных донных сообществ не просматривается.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы ИБ КарНЦ РАН FMEN-2022-0007.

Литература

Барышев И.А. Макрозообентос рек Восточной Фенноскандии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2023. 334 с.

Биоиндикация экологического состояния равнинных рек / под ред. О. В. Бухарина, Г.С. Розенберга. М.: Наука, 2007. 403 с.

Водные ресурсы России и их использование. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.

Перова С.Н. Структура макрозообентоса устьевой области притока Рыбинского водохранилища // Труды ИБВВ РАН. 2016. Вып. 74. № 77. С. 113–124.

Чертопруд М.В., Песков К.В. Биогеография реофильного макробентоса Юго-Восточной Европы // Журнал общей биологии. 2007. Т. 68. № 1. С. 52–63.

Birawat K.K., Hymavathi T., Nachiyar C., Mayaja M., Srinivasa N.A. Impact of urbanisation on lakes – A study of Bengaluru lakes through water quality index (WQI) and overall index of pollution (OIP) // Environmental Monitoring and Assessment. 2021. V. 193. Iss. 7. P. 350–389.

Cummins K.W., Merritt R.W., Andrade P.C. The use of invertebrate functional groups to characterize ecosystem attributes in selected streams and rivers in south Brazil // Studies on Neotropical Fauna and Environment. 2005. V. 40. Iss. 1. P. 69–89.

Sharov A.N., Berezina N.A., Nazarova L.E., Poliakova T.N., Chekryzheva T.A. Links between biota and climate-related variables in the Baltic region using Lake Onega as an example // Oceanologia. 2014. Vol. 56. Iss. 2. P. 291–306.

FEATURES OF MACROZOOBENTHOS OF RIVERS IN THE SOUTHERN PART OF THE ONEGA-LADOGA WATERSHED UNDER CONDITIONS OF ANTHROPOGENIC IMPACT

I.A. Baryshev

The watershed area between Lake Onega and Lake Ladoga has a significant impact on the composition of the rivers flowing into these bodies of water. The species composition, abundance, biomass and ratio of trophic groups of macrozoobenthos in the watercourses of this area were identified based on the analysis of summer collections from 2011 to 2023. It was shown that the species composition is not inferior to the nearby territories of North-West Russia. The average abundance indicators for the rivers are quite close to those in the northern parts of the Ladoga and Onega lakes catchments. The predominance of collectors-gatherers in the trophic structure is generally characteristic of the macrozoobenthos of the rivers of Eastern Fennoscandia, but the relatively small proportion of filter-collectors reflects the calm flow of the watercourses.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О СОВРЕМЕННОМ СОСТОЯНИИ ФЛОРЫ МАКРОФИТОВ МАЛЫХ ОЗЁР ЯРОСЛАВСКОЙ ОБЛАСТИ

Е.А. Беляков[1,2], Э.В. Гарин[1]
[1]Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН
[2]Череповецкий государственный университет

Исследован растительный покров 18 разных по происхождению малых озёр на территории Ярославской обл. Установлено, что совокупная флора сосудистых растений озёр включает в себя 140 видов из 3 отделов, 23 порядков, 37 семейств и 73 родов. Отмечено, что различия между видовым составом локальных флор озёр связаны с разнообразием биотопов (естественных и антропогенно нарушенных) и степенью антропогенной нагрузки. Показано, что за более чем столетний период наблюдений за озёрами, повышение степени эвтрофикации привело к исчезновению в ряде водоёмов редких видов, являющихся индикаторами олиготрофных вод.

Ярославское Поволжье не относится к числу озёрных районов, и на конец XX века здесь насчитывалось около 83 озёр (крупнейшие из них – Плещеево (Переславль-Залесский м.о.) и Неро (Ростовский р-н)), хотя в геологически недавнее время их было значительно больше (Новский, 1970). По происхождению озёра региона представлены ледниковыми (формирование которых в древние геологические эпохи было обусловлено не только обилием талых вод, но и затруднённостью их стока) и пойменными (в том числе реликтовыми). Последние получили распространение в пойме р. Волги (Фортунатов, Московский, 1970; Новский, 1970). Большинство озёр приурочены к бассейнам рек (Плещеевской и Клязьменской Нерли, Ити, Юхоти) и сложным по своей морфологии котловинам (Рюмнико-Осоевской, Солодихинского болота и левобережной поймы Волги) (Кузьмичёв и др., 1990). В период с начала 40-х годов XX в. озёра Молого-Шекснинской низины были затоплены Рыбинским водохранилищем. В 1960-е годы ещё ряд водоёмов, располагающихся на юго-западе области, исчезли в результате антропогенной деятельности человека. Так, например, для оптимизации процессов добычи и сушки штабелей торфа было принято решение понизить уровень озер Рюмниково-Осоевской котловины (оз. Чачино, Годеново и Осоево) на 1,1 м (а в некоторых случаях и до 2 м) с целью понижения уровня грунтовых вод (Фортунатов, Московский, 1970). В результате работ и бес того мелководные озера (глубиной до 2 м) были окончательно спущены либо превратились в незначительные остаточные, полностью заросшие водоемы. Некоторые озёра, и без того, располагающиеся в сильно заболоченных низинах из-за своей мелководности подверглись эвтрофикации и сильно заросли (Семерной, 2017), также полностью исчезнув либо став труднодоступными для изучения с лодки. Так, например, уже в 1955 г. площадь зарастания оз. Золотушного (Некрасовский р-н) достигала 70% (Фортунатов, Московский, 1970). В настоящее время оно практически полностью заросло. Торфоразработки вблизи оз. Яхробольское привели к исчезновению оз. Большое и Малое Козловские, а по северо-восточному берегу оз. Согожское исчез целый ряд остаточных водоёмов (Переделицкие водоёмы), ранее располагавшиеся среди переувлажнённых лугов и болот (Фортунатов, Московский, 1970). Повышение уровня воды в озёрах Искробольское, Великое, Согожское и Кухольное привело к объединению их в единый водоём. Таким образом, с середины XX века число озёр на территории региона сократилось – приблизительно до 50 (Список озёр…, 2025).

Первые сведения о флоре озёр Ярославского Поволжья были представлены А.Ф. Флёровым в 1902 г. (Флёров, 1902). Эти сведения касались немногочисленных видов

водных растений, встреченных им в оз. Плещеево. Активные работы на озёрах проводились с 1962 по 1977 г. (Монаков, Экзерцев, 1970; Лисицына, 1979; Лисицына Экзерцев, 1984 и др.). В 1985 г. изучение растительного покрова озёр Ярославского Поволжья было продолжено (Кузьмичёв и др., 1990). С 1998 по 1999 особенно детально исследовались техногенно трансформированные озёра Костромской низины, находящиеся на первой и второй (надпойменной) террасе р. Волги (Некрасовский р-н) (Крылова, Кузьмичёв, 2000). Флора оз. Вашутинского, Заозерья, Рюмниково и Чашницкого (Ростовский и Переславль-Залесский р-ны) вновь были обследованы в 2021 г. (Ляшенко и др., 2002). Затем в течение почти двух десятилетий ботанические исследования малых озёр Ярославской области не проводились.

Начиная с 2018 г. и по настоящее время на озёрах региона нами продолжены исследования растительного покрова и его динамики. В 2018 г. изучены шесть озёр ледникового происхождения – Рюмниково, Чашница, Заозерье, Ловецкое (Ростовский р-н), Вашутино (Переславль-Залесский м.о.) (Беляков и др., 2020) и Дуниловское (Большесельское с.п.). В 2023 г. получены данные по 12 озёрам левобережья р. Волги в Некрасовском р-не (оз. Костромские разливы, Шачебольское, Согожское, Великое, Искробольское, Яхробольское, Кухло, Новое и Старое Куреевское, Беловское, Бачаг и Круглое).

Растительный покров озёр изучали согласно общепринятым в гидроботанике методам (Катанская, 1981; Папченков, 2001). Сбор материала производили маршрутным методом с использованием вёсельной лодки и путём пешего обхода водоёма по берегу. При проведении работ учитывали видовой состав флоры сосудистых растений озёр, отмечали глубину произрастания растений, характер грунта. Латинские названия таксонов приводятся в соответствии со сводкой GBIF. Таксономический, экологический и экобиоморфологический анализ флоры выполнен в соответствии с рекомендациями В.Г. Папченкова (2001).

Флористические списки 18 исследованных нами озёр включают 140 видов сосудистых растений из 3 отделов, 23 порядков, 37 семейств и 73 родов.

Согласно нашим данным, к наиболее бедным по числу видов относятся озёра, располагающиеся в сильно заболоченных низинах (оз. Дунилово – 29 видов, Ловецкое – 31 вид), а также озёра Некрасовской поймы (оз. Новое и Старое Куреевские, Бачаг – 27, 36 и 35 видов, соответственно), характеризующиеся высокими обрывистыми берегами. Наиболее богатыми по числу видов оказались озёра ледникового происхождения – олиготрофное оз. Рюмники, эвтрофное оз. Вашутино и мезотрофное оз. Чашницы (80, 72 и 70 видов). Среди озёр Некрасовского р-на по видовому богатству выделяется реликтовое пойменное оз. Костромские разливы (68 видов), которое, как и большинство других озёр этого района, является остатками большого послеледникового озера, возникшего в Ярославско-Костромской низине. По-видимому, наибольшее флористическое разнообразие этих водоёмов, по сравнению с другими, связано с наибольшим многообразием биотопов (естественных и антропогенно нарушенных).

Ведущими порядками в объединённой флоре и флоре отдельных озёр являются порядки Poales Small (49 видов), Alismatales R. Br. ex Bercht. et J. Presl (19 видов) и Caryophyllales Juss. ex Bercht. et J. Presl (9 видов). При этом, в большинстве озёр преобладают именно первые два. Ведущими семействами в общей флоре озёр являются Poaceae Barnhart (19 видов), Cyperaceae Juss. (16 видов) и Potamogetonaceae Bercht. et J. Presl (9 видов). В некоторых водоёмах в состав ведущих семейств также входят сем. Polygonaceae Juss (оз. Согожское и Кухло), Asteraceae Bercht. et J. Presl (оз. Кухло), Araceae Juss (оз. Кухло, Беловское и Ловецкое) и Primulaceae Batsch ex Borkh. (оз. Бачаг). В оз. Заозерье, в качестве одного из ведущих семейств выступает Typhaceae Juss. (4 вида), в оз. Дунилово – Cyperaceae Juss. (4 вида). По числу видов ведущими родами в

объединённой флоре озёр выступают *Carex* L. (10 видов), *Potamogeton* L. (8 видов) и *Juncus* L. (7 видов). Во флоре большинства озёр (за исключением оз. Заозерье, Чашницы, Рюмники, Дунилово и Ловецкое) род *Potamogeton* входит в состав ведущих. Род *Carex* играет одну из ведущих ролей в оз. Шачебольское, Великое, Новое и старое Куреевское, Круглое, Заозерье, Чашницы и Рюмники. Род *Bidens* L. играет ведущую роль в оз. Костромские разливы, Согожское, Великое, Искробольское, Кухло и Яхробольское.

Анализ географической структуры флоры озёр показал, что в зональном отношении преобладают плюризональные виды (110 таксонов видового ранка). Значительный вклад вносят бореальный (16 видов) и бореально-неморальный (10 видов) элементы. В региональном отношении традиционно преобладают голарктический и евразиатский элементы (55 и 47 видов, соответственно). В эколого-ценотическом отношении ведущее положение в объединённой флоре исследованных озер традиционно занимают гигрофиты (56 видов), гидрофиты (30 видов) и гигрогелофиты (26 видов).

Полученные нами данные, в целом, согласуются с материалами обследования озёр в 1985 г., по результатам которых общее число видов составило 149 (Кузьмичёв и др., 1990). Из них 43 вида на исследованных водоёмах нами не были обнаружены. Отметим, что в объединённом флористическом списке озёр А.И. Кузьмичёвым с соавторами (1990) также отмечено преобладание первых трёх семейств (Poaceae, Cyperaceae и Potamogetonaceae). Эти же семейства доминируют и во флоре большинства исследованных нами озёр, что также сочетается со значительной фитоценотической ролью большинства видов этих семейств в растительном покрове водоёмов. Отметим, что в данной работе (Кузьмичёв и др., 1990) учитывается два вида полушников, в то время как анализ имеющихся гербарных сборов, свидетельствует об отсутствии *Isoëtes lacustris* L. в регионе (Гарин, 2015). Отсутствие в наших списках ряда видов водных, прибрежно-водных (таких как, например, *Potamogeton praelongus* Wulfen., *Schoenoplectus tabernaemontani* (C.C. Gmel.) Palla, *Hippuris vulgaris* L., *Carex riparia* Curtis) и береговых (например, *Beckmannia eruciformis* (L.) Host) растений обусловлено не полных охватом озёр Ростовского и Переславль-Залесского р-нов. Ряд видов, указанных в прежних списках, не являются типично водными или прибрежно-водными, как, например, *Elytrigia repens* (L.) Desv. ex Nevski, или однолетний сорный (нередко попадающийся по берегам водоёмов) адвентивный злак *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. (Кузьмичёв и др., 1990). Некоторые виды в последнее время не отмечались в озёрах. К таким, например, относится *Caulinia flexilis* Willd., ранее указываемая для оз. Вашутино (до 1976 г. включительно) и Плещеево (до начала XX века) (Флёров, 1902; Кузьмичёв и др., 1990)). Существуют данные о том, что А. Ф. Флёров (1902) ещё в вначале XX века отмечал *Subularia aquatica* L. для оз. Савельевское, где уже в 1985 г. вид не был обнаружен. По-видимому, на исчезновение этих видов растений (как и на исчезновение *Isoëtes echinospora* Durieu из флоры оз. Чашницкое и Вашутинское) могло произойти в период с 1965–1972 по 1985 гг. (Беляков и др., 2020), по-видимому, связано с увеличением статуса трофности этих водоёмов (Ляшенко и др., 2002; Фортунатов, Московский, 1970; Беляков и др., 2020). Из-за повышения уровня трофности оз. Вашутино (эвтрофное) и Чашницы (мезотрофное) под угрозой исчезновения находится *Sparganium gramineum* Georgi., где он в 2024 году ещё наблюдался нами в виде небольшой куртины (не более 1 м в диаметре), в оз. Вашутино под угрозой исчезновения находится *Nuphar pumila* (Timm) DC. (Беляков и др., 2020; данные 2024 г.). Наиболее сильным изменениям трофического статуса подверглось оз. Заозерье. Последнее было вызвано антропогенным нарушением его растительного покрова в результате попадания в водоём органических стоков с двух животноводческих ферм, ранее располагавшихся на берегах озера (Фортунатов и Московский, 1970). Согласно оценке трофического статуса (по фитопланктону) этот водоём является мезотрофным, однако летом

наблюдается обильное цветение воды (Беляков и др., 2020). По-видимому, это послужило фактором появления здесь гибрида *Sparganium* × *longifolium* Turcz. ex Ledeb., сначала растущего совместно с двумя родительскими видами – *S. gramineum* Georgi и *S. emersum* Rehm. (Беляков и др., 2020). Дальнейшие наблюдением за состоянием популяции *S. gramineum* показали, что к 2023 г. этот вид не выдержал конкуренции с *S.* × *longifolium* и исчез.

В исследованных озёрах отмечено 9 чужеродных видов. Среди них практически повсеместно встречаются *Elodea canadensis* Michx., *Bidens frondosa* L., *Epilobium adenocaulon* Hausskn. При этом *E. pseudorubescens* A. K. Skvortsov обнаружен по берегам оз. Великое и Согожское, *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. – по берегам оз. Согожское и Костромские разливы, *Juncus tenuis* Willd. – по берегам оз. Беловское и Вашутино, *Rumex stenophyllus* Ledeb. – по берегу оз. Круглое. *Zizania aquatica* L. отмечена только в оз. Костромские разливы, в то время как *Z. latifolia* (Griseb.) Hance ex F. Muell. – в оз. Костромские разливы и Рюмники. В настоящее время указанные виды достаточно широко распространены по всей средней полосе Европейской части России (Лисицына и др., 2009; Флора…, 2014).

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Структура, функционирование и разнообразие первичных продуцентов континентальных вод» (№ 124032100076-2).

Литература

Беляков Е.А., Сахарова Е.Г., Соколова А.С. Современное состояние и динамика флоры некоторых малых озёр Ярославской области // Трансформация экосистем. 2020. Т. 3, №4. С. 95–121.

Гарин Э.В. Сосудистые споровые растения флоры Ярославской области // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2015. Вып. 71 (74). С. 48–59.

Катанская В.М. Высшая водная растительность континентальных водоёмов СССР. Методы изучения. Л.: Наука, 1981. 187 с.

Крылова Е.Г. Флора пойменных озёр Верхней Волги (Ярославская обл.) // Биология внутренних вод. 2003. № 3. С. 14–23.

Крылова Е.Г., Кузьмичёв А.И. Структура и сукцессии растительности озёр Некрасовской поймы // Гидрофильный компонент в сравнительной флористике / Под ред. А.И. Кузьмичёва. Рыбинск: Рыбинский Дом печати, 2004. С. 132–182.

Крылова Е.Г., Кузьмичёв А.И. Структура и сукцессии растительности озёр Некрасовской поймы // Биология внутренних вод. 2000. № 1. С. 13–19.

Кузьмичёв А.И., Экзерцев В.А., Лисицына Л.И., Довбня И.В., Трусов Б.А., Краснова А.Н., Артёменко В.И., Лапиров А.Г., Ляшенко Г.Ф. Флора и растительность озёр Ярославской области // Флора и продуктивность пелагических и литоральных фитоценозов водоёмов бассейна Волги / Под ред. В.А. Экзерцева. Ленинград: Наука, 1990. С. 50–94.

Лисицына Л.И. Флора водоёмов Верхнего Поволжья // Флора и растительность водоёмов бассейна Верхней Волги. Труды Института биологии внутренних вод АН СССР. 1979. Вып. 42(45). С. 109–136.

Лисицына Л.И., Папченков В.Г., Артёменко В.И. Флора водоёмов Волжского бассейна. Определитель сосудистых растений. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2009. 219 с.

Лисицына Л.И., Экзерцев В.А. О редких видах водных и прибрежно-водных растений водоёмов волжского бассейна // Состояние и перспективы исследования флоры средней полосы Европейской части СССР / Матер. совещ. М: МОИП, 1984. С. 42–43.

Ляшенко Г.Ф., Лазарева В.И., Ляшенко О.А. Динамика высшей водной растительности и планктона в малых озёрах бассейна Верхней Волги // Динамика разнообразия гидробионтов во внутренних водоёмах России. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2002. С. 34–57.

Монаков Э.В., Экзерцев В.А. Сообщества прибрежных и водных растений озера Неро и их фауна // Озёра Ярославской области и перспективы их хозяйственного использования. Ярославль: Типография № 2 Росглавполиграфпрома, 1970. С. 304–318.

Новский В.А. Геологическая история озёр Ярославского Поволжья // Озёра Ярославской области и перспективы их хозяйственного использования /. Ярославль: Типография № 2 Росглавполиграфпрома, 1970. С. 208–234.

Папченков В.Г. Растительный покров водоёмов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль: Изд-во ЦМП МУБиНТ, 2001. 214 с.

Семерной В.П. Зообентос водоёмов Некрасовской поймы Ярославской области // Экология и рациональное природопользование / Мат. всерос. науч.-практ. конф. Ярославль, 2017. С. 141–145.

Список озёр Ярославской области (Электронный ресурс). URL: https://verum.wiki/wiki/Список_озер_Ярославской_области. (дата обращения: 24.01.2025).

Флёров А.Ф. Ботанико-географические очерки. III. Ростовский край // Землеведение. 1903. Т. 10, вып. 2–3. С. 193–218.

Флора средней полосы европейской части России. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2014.

Фортунатов М.А., Московский Б.Д. Озёра Ярославской области. Кадастровые описание и краткие лимнологические характеристики // Озёра Ярославской области и перспективы их хозяйственного использования / Под ред. А.Б. Дитмара. Ярославль: Типография № 2 Росглавполиграфпрома, 1970. С. 3–177.

GBIF. Глобальный информационный фонд по биоразнообразию (Электронный ресурс). URL: https://www.gbif.org/ (дата обращения: 10.01.2025).

PRELIMINARY DATA ON THE CURRENT STATE OF THE MACROPHYTE FLORA OF SMALL LAKES IN THE YAROSLAVL OBLAST

E.A. Belyakov, E.V. Garin

The vegetation cover of 18 small lakes of different origin located in the Yaroslavl oblast has been studied. It has been established that the total flora of vascular plants of lakes includes 140 species from 3 divisions, 23 orders, 37 families and 73 genera. The differences between the species composition of local lake flora are related to the diversity of biotopes (natural and anthropogenic) and the degree of anthropogenic stress. It is shown that over a period of more than a century of observations of lakes, it was noted that an increase in the degree of eutrophication led to the disappearance of rare species in a number of reservoirs, which are indicators of oligotrophic waters.

ДИНАМИКА ПИЩЕВЫХ ЦЕПЕЙ В СВЕТЛОВОДНОМ И ТЕМНОВОДНОМ СУБАРКТИЧЕСКИХ ОЗЕРАХ В ЗИМНИЙ И РАННЕВЕСЕННИЙ ПЕРИОДЫ

Н.А. Березина[1], А.Н. Шаров[2], А.А. Максимов[1]
[1]Зоологический институт РАН
[2]Институт биологии внутренних вод им И.Д. Папанина РАН

Период замерзания озер имеет решающее значение для биологических процессов. Зимой пищевые цепи могут претерпевать трансформации из-за формирования бескислородных условий и перераспределения продуцентов, беспозвоночных и рыб под льдом. Изучены пищевые цепи в двух озерах зимой и ранней весной с использованием соотношения изотопов углерода и азота. Было обнаружено, что сезонные изменения потоков углерода в ледовый период озер являются результатом изменений уровней поступления органического вещества от фитопланктона и бактерий, приводящих к сдвигам в биотических взаимодействиях и трофической позиции консументов. Метаболизм зимних пищевых цепей в озерах определяется не первичной продукцией фитопланктона, а другими источниками энергии, происходящими от бактерий и гетеротрофных организмов.

Период ледостава на озёрах привлекает всё большее внимание исследователей из-за высокой значимости биологических процессов и экологических явлений в этот период. Подледные пищевые цепи в высокоширотных озерах плохо изучены, в то же время они могут подвергаться трансформациям именно зимой из-за расширения бескислородной зоны под ледовым покровом, миграции гетеротрофных микроорганизмов, планктона и рыб в зону с лучшими кислородными условиями. Зимние условия на озёрах неблагоприятны для фотосинтеза водорослей из-за слабого освещения подо льдом и снежным покровом. Метаболизм зимних пищевых цепей в озерах определяется не только уровнем первичной продукции, но и вкладом других, часто неучтённых источников энергии, поступающих от микробных петель, в которых активно участвуют бактерии и гетеротрофные организмы. Связи между микробными и классическими пищевыми цепями в сезонно покрытых льдом озерах остаются неясными.

Используя соотношения изотопов углерода ($\delta^{13}C$) и азота ($\delta^{15}N$) в потенциальных продуцентах и тканях потребителей (от травоядных/детритоядных до хищников высшего порядка), мы исследовали структуру пищевых сетей в двух типах малых озер: светловодном и темноводном субарктических озерах в зимний и ранневесенний периоды. Предполагалось определение того, какой первичный пищевой ресурс вносит больший вклад как источник энергии в эти пищевые сети озер подо льдом.

Озеро 1 (Кривое, 0.5 км^2, максимальная глубина 30 м, 66.3435 с.ш., 33.6375 в.д.) и озеро 2 (Круглое, 0.1 км^2, максимальная глубина 4 м, 66.3429 с.ш., 33.6119 в.д.) расположены на берегу Кандалакшского залива (Белое море) в северной части Карелии, недалеко от Полярного круга. Хотя озера находятся в одном географическом положении и климатической зоне (субарктической), они различаются по морфологии, цвету воды, термическому режиму, доступным питательным веществам и структуре пищевой сети. Литоральная зона в озере 1, имеющая глубину 0-3 м, составляет 20% от общей площади. Озеро 2 также характеризуется низкой трофностью и демонстрирует дистрофный тип озера. Прозрачность воды в озере 1 была в 5-6 раз выше, чем в озере 2, которое имело коричневый цвет воды из-за высокого содержания гуминовых и органических веществ.

Сезон открытой воды на обоих озерах длится с середины мая до начала июня и заканчивается в конце ноября (последняя декада); в остальное время они покрыты льдом. Озеро 2 обычно замерзает и вскрывается примерно на 1-2 недели раньше озера 1. После образования ледяного покрова температура воды на дне озер составляла около 3-4°C, а на поверхности около 1-2°C, и оставалась относительно постоянной с осени до весны. В ледовый период концентрация кислорода у дна снижалась, что приводило к дефициту кислорода (<2 мл/л) и даже отсутствию кислорода в глубоких частях обоих озер. После таяния льда (в мае) придонные воды озер быстро обогащались кислородом.

Подледный фитопланктон в изученных озерах был достаточно развит и представлен в основном видами золотистых и криптофитовых водорослей, способных к

гетеротрофному питанию (бактериями), а также представителями диатомовых водорослей и цианобактерий, которые, как известно, могут использовать растворенные в воде органические соединения. В частности, в фитопланктонных сообществах обоих озер доминировали цианобактерии *Dolichospermum lemmermannii* (Nostocales), *Coelosphaerium kuetzingianum* (Coelosphaeriaceae), *Merismopedia warmingiana* и *Phormidium* sp., а также холодноводная диатомовая водоросль *Aulacoseira subarctica* (Bacillariophyta), зеленая колониальная микроводоросль *Botryococcus braunii* и несколько видов криптофитовых (*Komma, Cryptomonas*) и золотистых водорослей (*Dinobryon, Uroglena*). Золотистые водоросли родов *Dinobryon* и *Uroglena* типичны для гумифицированных вод слабокислых озер (Hoef-Emden, Archibald, 2017), они были характерными видами в изученном темноводном озере. Вместе с криптомонадами эти водоросли составляли важную часть планктона изученных озер в ранневесенний период, являясь основной пищей для зоопланктона (Sanders, Porter, 1988). Известно, что золотистые водоросли способны выделять органические соединения (углеводы, ферменты и витамины) в отсутствии фотосинтеза (Hoef-Emden, Archibald, 2017). Водоросли *B. braunii* с эпибионтными бактериями могут быть важными источниками углерода, поскольку способны к синтезу водорослевых углеводородов и полигидроксиалканоатов, т.е. «зеленых» биопластиков микробного происхождения (Жила и др., 2024). Представители *Flavobacterium, Corynebacterium, Azotobacter* и *Pseudomonas* обычно ассоциированы с *B. braunii*, обитая на поверхности ее колонии (Chirac et al., 1985). Внеклеточные метаболиты этой водоросли служат питательными компонентами для бактерий, в то время как питательные вещества, синтезируемые бактериями, потребляются водорослью. Большинство из этих обитающих в изученных озерах видов фитопланктона являются миксотрофными организмами, то есть способными удовлетворять свои потребности в углероде, азоте и фосфоре за счет поглощения бактерий.

Колонии *Nostoc* spp. (от 0.5 до 2 см в диаметре), широко распространённые на дне обоих изученных озер, могут быть важными источниками питательных веществ. Известно, что они представляют собой среду для формирования специфического бактериального сообщества внутри колоний (Aguilar et al., 2019). Бактериальные таксоны, ассоциированные с *Nostoc* spp.на дне олиготрофных озер, были общими с таксонами, обнаруженными в других ассоциациях цианобактерий, например, у *Microcystis* (Shi et al., 2009).

Органическое вещество аллохтонного происхождения происходит из гумуса, выделяемого с болотного водосбора озер и поступающего в оба озера в основном в период открытой воды (лето и осень). Перенос этих веществ с водосбора в озерные экосистемы такого типа проходит через сложные микробные пищевые сети, а углерод из метана попадает в озерные сети за счет деятельности метаноокисляющих бактерий, присутствующих как в донных отложениях, так и в пелагических зонах внутри водоема. Значительные количества углерода из метана продуцируются в анаэробных донных отложениях озер — такие условия создаются при зимней гипоксии. Из-за сильного изотопного фракционирования в процессе метаногенеза величины $\delta^{13}C$ в такой пищевой цепи оказываются низкими (от –110 до –50‰, Summons et al., 1994), что позволяет отличать углерод метана от углерода, происходящего из других источников.

Одним из путей, по которым углерод, полученный из метана, может попасть в водные пищевые сети, является прямое потребление метанотрофов. Величины $\delta^{13}C$ зоопланктона в изученных озерах были значимо ниже в подледный период (–38‰ в гумифицированном озере и –36‰ в светловодном озере) по сравнению с летним периодом (–33‰ и –32‰ соответственно), что указывает на существенный вклад бактериального углерода в пищевые цепи озер в подледный период.

Однако выявлено лишь умеренное обеднение стабильного изотопа углерода в зоопланктоне и других трофических звеньях обоих изученных озер, что не подтверждает прямых взаимодействий между зоопланктоном (рачками Cladocera и Copepoda) и метаноокисляющими бактериями. Вероятно, в изученный период имели место множественные непрямые каскадные трофические взаимодействия зоопланктона (и других потребителей) с метанотрофами через промежуточных потребителей углерода, происходящего от метана (гетеротрофных жгутиконосцев и простейших). Альтернативным объяснением умеренного обеднения величин $\delta^{13}C$ в пищевых цепях озер может быть наличие симбиотических отношений между беспозвоночными и различными эпибионтными бактериями, простейшими и миксотрофными водорослями, которые, в свою очередь, могут потреблять метанокисляющих бактерий (Qi et al., 2009).

В период открытой воды трофические сети озер основаны на продукции фототрофов и аэробных гетеротрофов, однако в периоды, когда озеро покрывается льдом и снегом, преобладает восстановительный метаболический путь (Vigneron et al., 2019). В это время органическое вещество, в связи с отсутствием фотосинтеза, почти не расходуется фитопланктоном, но накапливается в озерной воде в виде биологически доступных молекул. С увеличением освещенности (ранней весной) это накопленное органическое вещество способствует быстрому развитию фитопланктона. Повышение величин $\delta^{13}C$ зоопланктона обоих озер весной указывает на то, что фотосинтезирующие водоросли фитопланктона становятся более важными источниками энергии для зоопланктона, чем бактерии и другие гетеротрофные организмы.

В светловодном озере были обнаружены две отдельные пищевые цепи с источниками углерода, происходящими из разных зон: пелагической и литоральной. В отличие от него, в темноводном (гумифицированном) озере все потребители получали углерод из одного источника, формирующегося в глубоководной части озера. Значительные сезонные различия в величинах $\delta^{15}N$ и высокий уровень всеядности были выявлены у хищных животных и потребителей со смешанным характером питания. В частности, значительное снижение трофической позиции рыб (в обоих озерах обитал речной окунь) в зимний период и ее повышение весной (и далее летом) отмечено в обоих озерах. Эти рыбы характеризовались высоким уровнем всеядности в обоих озерах. Однако они имели более широкий и разнообразный спектр питания в глубоком светловодном озере, но их трофическая позиция (по величинам $\delta^{15}N$) была значимо ниже, чем в мелководном гумифицированном озере.

В заключении отметим, что сезонные изменения потоков углерода через пищевые цепи в ледовый период озер являются результатом изменений в количестве поступающего органического вещества от фитопланктона и бактерий, что приводит к сдвигам биотических взаимодействий всех потребителей и их позиций в трофической сети. Исследование вносит вклад в понимание потоков энергии и связей между пищевыми цепями в озерах в подледный период. Понимание организации трофических иерархий и выявление связей между сезонными состояниями озерных экосистем важно для прогнозирования реакций экосистем на глобальные изменения климата.

Литература

Жила Н.О., Прудникова С.В., Дегерменджи А.Г., Волова Т.Г. Зеленая колониальная водоросль Botryococcus - продуцент ценных метаболитов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2024. Т. 17, №3. С. 278-286.

Aguilar P., Dorador C., Vila I., Sommaruga R. Bacterial communities associated with spherical *Nostoc macrocolonies* // Frontiers in Microbiology. 2019 V. 10. 483.

Chirac C., Casadevall E., Largeau C., Metzger P. Bacterial influence upon growth and hydrocarbon production of the green alga *Botryococcus braunii* // Journal of Phycology. 1985. V. 21 (3). P. 380-387.

Hoef-Emden K., Archibald J. M. Phylum Cryptophyta (Cryptomonads) // Handbook of the Protists. 2nd ed. Cham: Springer International Publishing, 2017. P. 851-891.

Jones S.E., Lennon J.T. Evidence for limited microbial transfer of methane in a planktonic food web// Aquatic Microbial Ecology. 2009. V. 58. P. 45-53.

Qi W., Nong G., Preston J.F., Ben-Ami F., Ebert D. Comparative metagenomics of *Daphnia* symbionts // BMC Genomics. 2009. V. 10. 172.

Sanders R.W., Porter K.G. Phagotrophic Phytoflagellates // Advances in Microbial Ecology. V. 10. Boston, MA.: Springer, 1988.

Shi L., Cai Y., Yang H., Xing P., Li P., Kong L., Kong F. Phylogenetic diversity and specificity of bacteria associated with *Microcystis aeruginosa* and other cyanobacteria // Journal of Environmental Sciences 2009. V. 21. P. 1581-1590.

Summons R.E., Jahnke L.L., Roksandic Z. Carbon isotopic fractionation in lipids from methanotrophic bacteria — relevance for interpretation of the geochemical record of biomarkers // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1994. V. 58. P. 2853-2863.

Vigneron A., Lovejoy C., Cruaud P., Kalenitchenko D., Culley A., Vincent W. F. Contrasting winter versus summer microbial communities and metabolic functions in a permafrost thaw lake// Frontiers in Microbiology. 2019. V. 10. P. 1–13.

STRUCTURE OF FOOD WEBS IN LIGHT-WATER AND DARK-WATER SUBARCTIC LAKES IN WINTER AND EARLY SPRING PERIOD

N.A. Berezina, A.N. Sharov, A.A. Maximov

The ice-covered period of lakes is critical to biological processes. During the winter, food webs can change due to the formation of anoxic conditions and the redistribution of producers, invertebrates, and fish beneath the ice. Carbon and nitrogen isotope ratios were used to study the food webs in two lakes during the winter and early spring. It was discovered that seasonal changes in carbon fluxes during lakes' freezing periods are caused by changes in the levels of organic matter input from phytoplankton and bacteria, resulting in shifts in biotic interactions and consumer trophic positions. The metabolism of winter food webs in lakes is determined by energy sources derived from bacteria and heterotrophic organisms rather than primary phytoplankton production.

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЦЕЛЯХ АКВАКУЛЬТУРЫ МАЛЫХ ОЗЕР СРЕДНЕТАЕЖНЫХ ЛАНДШАФТОВ ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Н.Л. Болотова, О.Г. Лопичева, И.А. Мухин, С.Ю. Арашин
Вологодский государственный университет

Обсуждаются перспективы использования малых озер для развития аквакультуры, учитывая их многочисленность, разнообразие и ландшафтную обусловленность лимнологических характеристик. Модельными объектами для выявления лимитирующих факторов рыборазведения послужили два озера среднетаежных ландшафтов в центральной части Вологодской области. Алгоритм исследования в рамках системы «водосбор-озеро» включал анализ происхождения озер, особенностей ландшафта, гидротопографические, гидрологические, гидрохимические,

гидробиологические и ихтиологические исследования. Рассмотрена антропогенная нагрузка, выявлен комплекс экологических рисков при сукцессиях небольших мелководных озер в сторону нежелательных процессов, препятствующих реализации технологий аквакультуры. Применение ландшафтно-экосистемного подхода позволяет полученные результаты исследований аппроксимировать на другие озера среднетаежных ландшафтов при планировании рыбоводных мероприятий и связанных с дополнительным воздействием на водные экосистемы.

Наблюдаемое снижение рыбных ресурсов в пресноводных водоемах обусловливает особый интерес к развитию аквакультуры как компенсационному пути обеспечения населения доступной рыбопродукцией. Эта стратегия рыбоводства, реализуется в рамках федеральных и региональных программ, включая и Вологодскую область. При развитии разных направлений аквакультуры основное внимание уделяется технологиям садкового и пастбищного выращивания рыб. Предполагается, что заметную роль в расширении числа используемых водных объектов могут сыграть малые озера региона, как многочисленные и разнообразные по своим характеристикам. Однако, развитие аквакультуры требует оценки экологических рисков, что связано с мелководностью большинства малых таежных озер, которые быстро трансформируются под антропогенным влиянием. Поэтому рыбоводство как дополнительное воздействие на экосистемы требует оценки их состояния, учета ландшафтной обусловленности лимногенеза для прогноза развития нежелательных процессов. Исходным этапом для анализа перспектив использования малых озер в целях аквакультуры служит обоснованность выбора, учитывая их разнотипность и расположение в разных ландшафтах. Тем более, что сложный генезис территории, подвергшейся неоднократному оледенению, привел к формированию 33 ландшафтов в пределах Вологодской области, половина которых относится к среднетаежной провинции (Природа …, 2007). Последнее определило приуроченность района наших исследований к среднетаёжным ландшафтам.

Направленность исследований основывалась на теоретическом положении о ландшафтной обусловленности лимногенеза озер (Жаков, 1984). Это дает возможность типизации малых озер и выбора модельных объектов для аппроксимации результатов их изучения на другие озера ландшафта. Объектами исследования послужили расположенные в Прикубенском моренном равнинном средневысотном среднетаежном ландшафте два озера: Лесное и Сохтинское, которые планировались использовать для выращивания рыб. Следует отметить характерные черты данного ландшафта, приуроченного к краевым зонам последнего оледенения. Это невысокий показатель озерности 0,4% с преобладанием малых мелководных водоемов с небольшими водосборными бассейнами среди заболоченных низких равнин. Зональный гумидно-фульвокислотный тип лимногенеза направлен в сторону дистрофикации и формирования типичных окунево-плотвичных ихтиоценозов (Озерные…, 1981).

Данные об особенностях ландшафта позволили выделить ключевые показатели исследований модельных озер, отражающие экологические риски для планируемого рыборазведения. Было уточнено географическое положение озер, дана характеристика местности, выявлены источники антропогенной нагрузки, описаны берега. Измерены и вычислены морфометрические параметры обоих озер согласно общепринятых гидрологических методик с использованием картографических данных, космических снимков сервисов Google и Bing, проведена батиметрическая съемка.

Установлены физико-химические свойства воды по 25 параметрам для выявления ключевых показателей, вызывающих ухудшение ее качества. Выявлено состояние донных отложений. Определена степень зарастания озер, видовой состав макрофитов.

Для оценки уровня развития кормовой базы озер и состояния рыбного населения проводили сбор и обработку гидробиологических проб и ихтиологического материала в соответствии со стандартными методиками. Определен таксономический состав, доминирующие виды, количественные показатели фито-зоопланктона и зообентоса. Основной задачей исследований экосистем модельных объектов озер Лесное и Сохтинское было выявление лимитирующих факторов для использования этих водоемов в целях садкового и пастбищного выращивания рыб.

Озеро Лесное находится в удаленной от населенных пунктов заболоченной местности с площадью водосбора 27,3 км^2. Водоохранная зона используется в целях рекреации и любительского лова с применением моторных лодок. Низкие берега окружены лесами и болотами и для рыбохозяйственного освоения водоема требуется экономически невыгодное строительство дороги в труднодоступной местности. Сохтинское озеро находится в освоенной местности с развитой дорожной инфраструктурой, на его высоких берегах расположены деревни. Трансформация водосбора сельскохозяйственными угодьями и лесопромышленной отраслью внесла свой негативный вклад в изменение качества озерной воды. Доступность водоема определяет его активное использование для рекреации и любительского лова, что создает предпосылки конфликта природопользователей при организации рыборазведения.

Исследованные озера можно рассматривать как озерно-речную систему: из озера Лесного вытекает речка Сохта длиной 10 км, в верховьях которой сформировалась озеро Сохтинское. Эти гидрологически связанные озера относятся к подбассейну реки Кубена, так как р. Сохта впадает в реку Уфтюгу – приток Кубены, принадлежащей к бассейну Северной Двины. Разное происхождение озер отражается в резком отличии морфометрических показателей и влияет на формирование их сообществ. Лесное озеро относится к остаточным послеледниковым водоемам, имеет овальную форму. Озеро Сохтинское, представляя расширение реки Сохты, отличается вытянутой формой, характеризуется как подпрудное провального происхождения, учитывая наличие карста в речном ложе и воронку с глубиной 14,5 м. Незначительная площадь Сохтинского озера 5,9 га создает проблему рентабельности применения технологии пастбищного рыбоводства. Озеро Лесное имеет площадь 210 га, но жилую зону для рыб уменьшает обширная сплавина (12,5 % от площади озера). В остальной части водоема жилая зона ограничивается глубинами 0,5–1,3 м до слоя жидкого ила метровой толщины, что также исключает облов неводами при пастбищной технологии выращивания рыб. Применение садковой аквакультуры связано с размещением рыбоводной инфраструктуры при определенной глубине и конфигурации дна. Поэтому мелководность обоих озер является препятствием для установки садков, т. к. требуемая глубина должна быть не меньше 3 м, а оптимальная – не менее 5 м (Экологический …, 2013). В оз. Лесном основная площадь акватории имеет глубины менее 2-х метров. В Сохтинском озере при средней глубине – 3,26 м мелководные участки составляют 79 % его площади, а глубоководный участок занимает всего 11 % площади акватории.

Лимитирующим фактором для выращивания рыб является интенсивное илообразование, которое в Лесном озере связано с поступлением аллохтонного органического вещества с низких заболоченных берегов и с притоком вытекающей из болота р. Черной. В Сохтинском озере наблюдается формирование наилка на разных грунтах, но основным очагом накопления илов служит воронковидный глубокий участок. Заилению Лесного озера способствует замедленный водообмен, так как обеспечение проточности связано только с болотным ручьем и стоком в малую реку Сохту. В Сохтинском озере, несмотря на расположение в самой реке проточность также незначительна при интенсивном зарастании верховьев р. Сохты, а также из-за

сооруженных рыбаками запруд. В условиях заиления мелководных озер и тесной зависимости от погодных условий, неблагоприятным фактором для выращивания рыб служит повышение мутности воды при ветровом перемешивании. Даже в безветренную погоду выявлено превышение показателей мутности (3 ЕМФ), низкая прозрачность (1,2 м) и значительное содержание взвешенных веществ в воде. Этому способствует слабая укрытость озерных котловин, что отражают рассчитанные коэффициенты относительной глубины, особенно низкие в Лесном озере (0,01) по сравнению с Сохтинским (0,083). Коэффициент открытости зеркала, который обеспечивает интенсивный контакт вод озера с атмосферой в период открытой воды в Лесном озере (0,809) гораздо выше оз. Сохтинского (0,307).

Заиление озер отражает их высокое органическое загрязнение, в результате показатели цветности воды выше 1,8 ПДК для рыбохозяйственных водоемов, а величины химического потребления кислорода превышают норму в 2,2 (оз. Лесное) и 1,6 раза (оз. Сохтинское). Происходит ухудшение кислородного режима и возникает угроза заморов рыб. Преобладающий в Лесном озере цвет ила от коричневого к черно-серому свидетельствует о высоком уровне гумификации водоема. В Сохтинском озере подобные илы также обнаружены в нескольких биотопах. На протекание анаэробных процессов в донных отложениях указывает гнилостный запах проб. К опасным явлениям относится наличие участков ила с запахом сероводорода, даже незначительные концентрации которого губительны для рыб. С заболоченностью водосборов связаны низкие значения показатели pH донных отложений (4,1- 4,2), отражающие потенциальную уязвимость малых среднетаежных озер к закислению. При этом сохраняется нейтральная реакция воды (pH около 7), что характеризует достаточную устойчивость экосистем к закислению благодаря буферной емкости вод гидрокарбонатного класса кальциевой группы. В воде отмечено высокие содержание гидрокарбонатов (до 75 мг/дм^3) по соотношению к содержанию хлоридов и сульфатов (менее 10 мг/дм^3).

Заиление озер стимулирует ухудшение кислородного режима как основного лимитирующего фактора для осуществления рыбоводных мероприятий. Содержание кислорода даже в период открытой воды в условиях контакта с атмосферным воздухом не превышало в поверхностном слое 6,2 мг/л. Причем в Сохтинском озере содержание кислорода на глубине 4 м в центре озера снижалось до 4,9 мг/л. Угрозой для пастбищного рыбоводства служит большая вероятность заморных ситуаций в подледный период, возникновение которых подтвердилось опросом рыбаков-любителей.

Накопление трудно разлагающихся гуминовых органических веществ сопровождается аноксидными процессами в условиях летнего прогревания толщи воды. Так, температура воды в период сбора проб в августе достигала 21,2^{0}С. Прогрессирование аккумуляционных процессов определяется свойствами ила как тонкодисперсного материала с высокой гигроскопической влажностью (оз. Лесное – до 78%; Сохтинское –до 75%), а также присутствием тяжелых металлов. Неблагоприятным процессом токсического ухудшения качества среды обитания рыб является обнаружение в воде тяжелых металлов. Присутствие в воде озер марганца, железа и меди, возможно связано с их высоким фоновым содержанием в почвах водосбора, а свинца и цинка – с аэротехногенным переносом, учитывая удаленность от центров промышленных выбросов. Выявлено также опасное загрязнение озер нефтепродуктами и поверхностно-активными веществами, содержание которых в оз. Лесном превышает норму в 2 раза. Вероятно, это последствия активного использования рыбаками лодочных моторов.

Задаче увеличения рыбопродуктивности озер за счет технологий аквакультуры препятствует эвтрофирование, создающее спектр лимитирующих факторов, включая зарастание, заиление озер, «цветение» воды, что сопровождается ухудшением кислородного режима. Специфика процесса эвтрофирования связана с дистрофикацией

озер болотными водами и антропогенный нагрузкой. В удаленном оз. Лесном антропогенное эвтрофирование не выражено, показатели $БПК_5$ и общего фосфора не превышают нормы. В то же время уязвимость малого лесного озера к природному эвтрофированию определяется поступлением аллохтонной органики болотного происхождения, нитрификация которой приводит к избытку нитритов. Их содержание в воде в 8 раз больше, чем в Сохтинском озере и достигает порога ПДК для рыбохозяйственных водоемов. В Сохтинском озере, расположенном в освоенном водосборе, более высокое значение $БПК_5$ как показателя поступления органики антропогенного происхождения. Однако содержание фосфора и азота в воде не превышало норму из-за активного потребления при интенсивном развитии макрофитов. Воздушно-водные растения как продуценты автохтонного органического вещества служат индикаторами эвтрофного статуса данных озер. Состав и распространение макрофитов отличается в рассматриваемых озерах, зависит от строения ложа, характера грунтов, закисления донных отложений. В Лесном озере при заболачивании и большой толщине илового слоя преобладает хвощ приречный, с пятнами кубышки желтой у берегов и доминированием тростника обыкновенного в обширной сплавине. В Сохтинском озере при фрагментарно-поясном типе зарастания к донным отложения детрита с наилком приурочены смешанные ассоциации из ежеголовника плавучего, урути колосистой, кубышки желтой и рдеста.

Развитие озер по макрофитному пути снижает количественные показатели фитопланктона, что соответствует его меньшей биомассе в более заросшем озере Лесном (3,1 мг/л) по сравнению Сохтинским озером (5,9 мг/л). Однако мелководность озер при прогревании водной толщи летом способствует вспышкам развития фитопланктона, вызывающих цветение воды, что сопровождается дефицитом кислорода и гибелью рыб. Опасно присутствие в составе фитопланктона видов из рода *Microcystis,* выделяющих токсины, учитывая популярность любительского лова среди местных жителей. Состояние фитопланктонного сообщества отражается на количественных показателях зоопланктона, средняя биомасса которого в Лесном озере составляет 0,9 г/ $м^3$, а в Сохтинском – 1,1 $г/м^3$. Поэтому озера классифицируются как малокормные, что служит лимитирующим фактором для пастбищного выкрашивания рыб. Таксономический состав зоопланктона в Сохтинском и Лесном озерах представлен 22–26 видами, соответственно. Малокормность озер также определяется низким уровнем развития зообентоса в неблагоприятных условиях илов, включая анаэробные процессы. Средняя биомасса бентоса в Лесном озере составила 0,1 $г/м^2$, наряду с отсутствием донных организмов на ряде участков. В Сохтинском озере при меньшем заилении дна биомасса зообентоса выше – 2,8 $г/м^2$, доминируют олигохеты и личинки насекомых.

Таким образом кормовые условия озер не соответствуют вселению новых видов, что подтверждается состоянием рыбного населения с доминированием тугорослых популяций окуня и плотвы. В большем по площади Лесном озере еще обитает щука, и присутствие крупного хищника препятствует применению технологии пастбищного рыбоводства, основанного на интродукции мелких рыб мирных видов.

При планировании использования малых озер в целях аквакультуры следует учитывать ландшафтную обусловленность их лимногенеза. Это подтвердили исследования озер, расположенных в среднетаежном ландшафте, характерными чертами которого являются формирование небольших мелководных водоемов в низменной заболоченной местности. Сукцессия таких озер направлена в сторону процессов гумифицирования, эвтрофирования, переходящим в дистрофикацию за счет поступления болотных вод. Модельными объектами послужили озера Лесное и Сохтинское, которые несмотря на разное происхождение, резкое отличие по морфологическим параметрам, разную степень антропогенного воздействия,

характеризуются общей направленностью лимнологических процессов, создающих комплекс лимитирующих факторов для технологий садкового и пастбищного выращивания рыб. В условиях мелководности происходит интенсификация нежелательных процессов заболачивания, зарастания, заиления, цветения воды, закисления грунтов, ухудшения газового режима. Отличия выраженности этих явлений в исследованных озерах в основном связаны с их площадью, конфигурацией, строением ложа, качеством и толщиной илистых отложений. Лимитирующим фактором для пастбищного рыбоводства является малокормность озер. Аквакультура как дополнительное воздействие на экосистемы требует учета антропогенной нагрузки и выявления экологических и социально-экономических рисков.

Литература

Жаков Л.А. Формирование и структура рыбного населения озер Северо-Запада СССР. М.: Наука, 1984. 144 с.

Озерные ресурсы Вологодской области. Вологда: ВГПИ, 1981. 151 с.

Природа Вологодской области. Вологда: Вологжанин, 2007. 434 с.

Экологический справочник для рыбоводной промышленности Северо-Запада России. Nykypaino, Helsinki, 2013. 109 с.

ON THE QUESTION OF USING SMALL LAKES OF MIDDLE-TAIGA LANDSCAPES OF THE VOLOGDA REGION FOR AQUACULTURE

N. L. Bolotova, O. G. Lopicheva, I. A. Mukhin, S. Yu. Arashin

The article discusses the prospects for using small lakes for aquaculture development, considering their large number, diversity, and landscape determinacy of limnological characteristics. Two lakes of middle-taiga landscapes in the central part of the Vologda Region served as model objects for identifying limiting factors of fish farming. The methodological algorithm within the framework of the «catchment-lake» system included an analysis of the origin of the lakes, landscape features, hydrotopographic, hydrological, hydrochemical, hydrobiological and ichthyological studies. The anthropogenic load is considered, a complex of ecological risks is revealed during successions of small shallow lakes towards undesirable processes that impede the implementation of aquaculture technologies. The use of the landscape-ecosystem approach allows the obtained research results to be approximated to other lakes of middle taiga landscapes when planning fish-breeding activities associated with additional impact on aquatic ecosystems.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ПЛАНКТОНА ОЗЕРА БАЙКАЛ В ПОДЛЁДНЫЙ ПЕРИОД

Н.А. Бондаренко[1], Н.Г. Шевелёва[1], О.Г. Пенькова[2]
[1]Лимнологический институт СО РАН
[2]Иркутский государственный университет

При исследовании структуры и продукционных характеристик (численность, биомасса) зоо- и фитопланктона прибрежной зоны и пелагиали южной котловины озера Байкал в подледные периоды 2023-2024 гг. была отмечена пространственно-временная неоднородность в развитии сообществ. Видовое богатство и численность планктона были выше на прибрежных станциях. Значительная часть видов и в фито-, и в зоопланктоне относились к криофильному байкальскому комплексу и эндемикам озера.

Изучение планктона озера Байкал было начато в 1916 г. Байкальской комиссией при Императорской Академии наук, основные закономерности его функционирования известны уже с начала и середины прошлого века (Антипова, 1974; Афанасьева, 1977; Вотинцев и др., 1975; Кожов, 1962; Мейер, 1930; Поповская, 1991; Яснитский, 1930; Яшнов, 2022; и др.). Выяснено, что особенностью байкальского фитопланктона являлась его мощная вегетация подо льдом, заканчивающаяся в конце мая-начале июня. Уровень этой вегетации резко отличался по годам, определял годовую величину первичной продукции в озере и влиял на развитие зоопланктона (Вотинцев и др., 1975; Кожов, 1962; Кожова, Бейм, 1993). Наиболее хорошо и систематически были изучены глубоководные открытые районы озера, участки прибрежно-соровой зоны не изучались регулярно.

Глобальные климатические колебания и интенсификация антропогенного влияния привели к структурным перестройкам в водных экосистемах, в том числе и в биоте оз. Байкал (Bondarenko et al., 2023; Izmest'eva et al., 2016; Sheveleva, Penkova, 2020; Timoshkin et al., 2016; и др.). Цель работы – анализ динамики и пространственного распределения подледного фито- и зоопланктона оз. Байкал в современный период по материалам 2023-2024 гг.

В подлёдный период (февраль–март) исследования проводили на 4-х станциях, расположенных в южной котловине озера, из них 3 прибрежные: 1 в заливе Лиственничный и 2 в бухте Большие Коты. Глубоководная станция была расположена в 7 км от поселка Листвянка над глубиной ~1400 м. Толщина льда на станциях составляла от 80 см до 120 см. Лед был покрыт неровным слоем снега, местами без снега.

На прибрежных станциях пробы фитопланктона отбирали в поверхностном слое воды 0–1 м, в пелагиали по горизонтам 0, 5, 10, 15, 25 м. Образцы объемом 1000 мл фиксировали раствором Утермеля, концентрировали методом седиментации. Концентрат просматривали в тройной повторности в камере Нажотта объемом 0.1 мл в световом микроскопе «Peraval». При увеличении микроскопа ×720 учитывали и идентифицировали сетные формы и нанопланктон. Биомассу водорослей определяли с учетом индивидуальных объемов их клеток (Макарова, Пичкилы, 1970).

При исследовании зоопланктона планктонной сетью Джеди (диаметр входного отверстия 37.5 см, размер ячеи 110 мкм) облавливали верхний 0–15 м на прибрежных станциях и 0–50-метровый слой в пелагической части. Камеральную обработку проводили по стандартной методике, для расчета биомассы использовали индивидуальные массы байкальских организмов (Кожова, Мельник, 1978).

При статистической обработке экспериментальных выборок использовали стандартные компьютерные программы, вычисляли средние значения выборок со стандартной ошибкой.

Фитопланктон. В составе подледного фитопланктона в 2023-2024 гг. выделено 27 видов и разновидностей водорослей из 7 отделов: 1 гаптофитовый, 4 криптофитовых, 7 динофитовых, 3 золотистых, 7 диатомовых и 5 зеленых.

В 2023 г. в феврале в бухте Большие Коты фитопланктон и по количеству видов (7 видов) и по биомассе (179 мг/м^3) был беден. К марту уровень развития сообщества резко увеличился за счет интенсивной вегетации эндемичных динофитовых *Gymnodinium baicalense* и *G. baicalense* var. *minor*, зеленой *Koliella longiseta*, а также диатомовых *Nitzschia graciliformis* и *Ulnaria acus.* Биомасса составила 1.1 г/м^3. К концу месяца произошла смена доминантов: в подледном слое (0–20 см) высокой численности, 72.4 тыс.кл./л, достигала диатомовая байкальского комплекса *Aulacoseira baicalensis*, ранее считавшаяся эндемиком озера. Это ледовая водоросль, развитие которой начинается в интерстициальной ледовой воде, позже она выходит в планктон.

В 2024 г. в феврале фитопланктон был представлен 6 видами, с резким доминированием *G. baicalense* и *G. baicalense* var. *minor.* Биомасса за счет развития крупных форм была высокой, до 13.2 г/м^3 (рис. 1). Достаточно высокой оставалась биомасса и в марте (рис. 1), но произошла смена доминантов. Здесь высокой численности

достигала золотистая водоросль *Mallomonas vannigera*, 600–610 тыс.кл./л. Развитие этого вида почти закончилось к концу месяца, доминантом, как и в пелагиали, стала диатомея *N.graciliformis.*

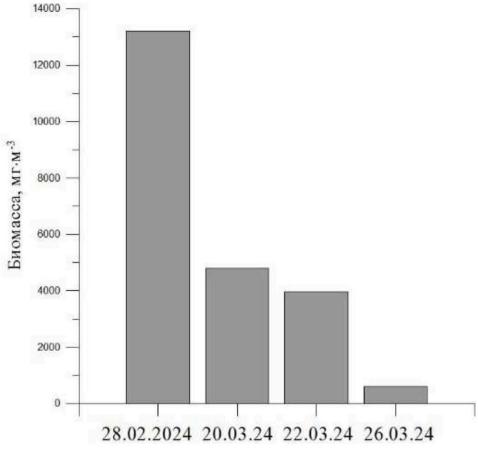


Рис. 1. Динамика биомассы фитопланктона в литорали

В пелагиали в феврале фитопланктон беден и количественно, и качественно. Представлен развивающимися в незначительном количестве динофитовыми *G. baicalense* var. *minor*, диатомовыми *U. acus* и *N. graciliformis*, а также зеленой *K. longiseta*. К середине марта уровень развития фитопланктона увеличился, в первую очередь, за счет вегетации диатомовых *U. acus* (52.7–187.1 тыс.кл./л в слое 0–25 м) и *N. graciliformis* (204.2–421.8 тыс.кл./л). Численность *K. longiseta* также увеличилась до 99.9–256.4 тыс.кл./л. Необычным для подледного планктона было присутствие в пелагиали динофитовой *Ceratium hirundinella*. Это теплолюбивый вид, развитие которого приурочено в Байкале к моментам максимального прогрева воды в августе–сентябре (Поповская, 1991). Максимальная биомасса зарегистрирована на глубине 25 м (рис. 2). Как правило, ранее максимальные величины приходились на верхний слой воды, 0–5 м (Поповская, 1991).

Подледный зоопланктон, как в литоральной зоне, так и в пелагиали, был богат в видовом и количественном отношении. В 2023 г. в пелагиали зарегистрировано 7 видов коловраток и один вид ракообразных. Основу сообщества составляла популяция епишуры (95%), на долю коловраток приходилось 5%, среди коловраток лидировал эндемик озера *Notholca grandis* (53%), из круглогодичных форм в структурообразующее ядро входила *Kellicottia longispina* (21%). В литорали зоопланктон на 98% был представлен также епишурой, в основном ее науплиальными стадиями. Состав коловраток представляли эндемики *N. grandis* (50%), *Synchaeta rufina* (25), *N. intermedia* (12%) и круглогодичная *K. longispina* (12%). Численность зоопланктона в заливе была 22.5 тыс.экз/м^3, в пелагиали в 4 раза меньше.

В 2024 г. в пелагиали, как и в 2023 г., основу (98 %) составляла популяция епишуры, отмечено присутствие единичных экземпляров науплиев циклопа. Коловратки представлены круглогодичными видами *Filinia terminalis, Kellicottia longispina, Keratella quadrata, K. cochlearis* и криофильными эндемиками *N. grandis, N. intermedia, S. pachypoda, S. rufina*. Эндемики составляли 80 % общей численности коловраток, среди них наиболее многочисленной была *N. grandis* 58%. В литорали основа количественных показателей (93% общей численности) приходилась также на популяцию епишуры. Из ракообразных здесь зарегистрированы единичные особи *Bosmina longirostris*. Состав коловраток насчитывал 5 видов, как и в пелагиали, в литоральной зоне в группе коловраток по численности лидировала *N. grandis* (72%). В отличие от пелагиали в доминантное ядро входила *K. cochlearis* (20%). Общая численность зоопланктона в литорали была 20 тыс.экз/м^3, в пелагиали 13 тыс.экз/м^3. В оба года наблюдений численность зоопланктона в литоральной зоне была примерно одинаковой. Однако его

биомасса в 2023 г. оказалась выше по сравнению с 2024 г., 85 и 64 мг/м^3, соответственно, в силу того что сообщество на 98 % состояло из младших возрастных стадий епишуры. В 2024 г. доля епишуры в биомассе составила только 70%. Биомасса зоопланктона в пелагиали в 2024 г. превышала таковую предыдущего года, 84 и 60 мг/м^3 соответственно, поскольку популяция эпишуры была представлена всеми возрастными стадиями.

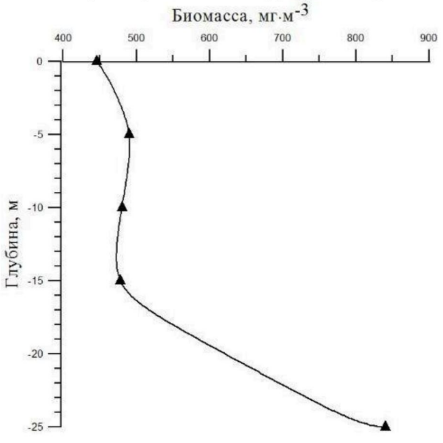


Рис. 2. Вертикальное распределение фитопланктона в пелагиали, март 2024

И.К. Ривьер (2016) писала, что рассмотрение "вегетационного периода" только в течение безледного времени не соответствует действительному состоянию планктонной подсистемы. Как следует из предшествующих исследований и нашего, в Байкале подледное развитие планктона начинается уже во второй половине февраля. Температура воды в поверхностном слое в это время достигает 0.1–0.3°C, прозрачность 20–25 м. В течение зимы при минимуме света и, как следствие, минимальной активности водорослей накапливаются биогены. В январе–феврале в трофогенном слое воды отмечается максимум биогенных элементов (нитратный азот, фосфатный фосфор, кремний). Концентрация азота достигает в это время 85–95, фосфора 10–11мг/м^3, а кремния 1.3–1.5 мг/л (Вотинцев и др., 1975). По мнению М.М. Кожова (1962), толчком и необходимым условием начала роста планктонных водорослей является увеличение освещенности подледных слоев воды.

В подледный период 2023–2024 гг. планктон был богат и качественно, и количественно, и специфичен по составу. Отмечены временная и пространственная неоднородность его развития. Вегетация начиналась во второй половине февраля, максимальную биомассу создавали эндемики Байкала – динофитовые. В марте в прибрежной зоне интенсивно развивались разные виды, от широко распространенных до бореальных и эндемиков. Состав пелагического фитопланктона был более однороден: доминантами в оба года являлись диатомовые как криофильного байкальского комплекса, так и широко распространенные виды, а также зеленая *K. longiseta.* Большинство из них – ледовые водоросли, развитие которых начинается в интерстициальной ледовой воде, затем они выходят в планктон. Максимальные биомассы отмечены в прибрежной зоне в феврале при доминировании крупных форм динофитовых, в 15.7 раза больше биомассы пелагиали. Массовая вегетация эндемичных динофитовых была свойственна фитопланктону Байкала и в прошлом столетии (Антипова, 1974), отличием современного периода является присутствие несвойственных подледному периоду теплолюбивых видов водорослей.

Как и в фитопланктоне, в подлёдном зоопланктоне преобладали крупные формы, основу его численности (95–98%) составила епишура, эндемик Байкала. Также наблюдались два комплекса коловраток, круглогодичный и эндемичный криофильный. Циклопы и ветвистоусые ракообразные были единичны. Обычно *Bosmina longirostris* появляется в прибрежной зоне Байкала в теплое время года, максимальное развитие приходится на октябрь, но единичные находки в подледном планктоне отмечены и ранее

(Кожов, 1962). Численность зоопланктона в оба года была больше в литоральном планктоне, биомасса выше в пелагиали в 2024 г.

Работа выполнена в рамках госзадания Лимнологического института СО РАН 0279-2021-0007.

Литература

Антипова Н.Л. Межгодовые изменения в фитопланктоне Байкала в районе Больших Котов за период 1960–1970 гг. // Продуктивность Байкала и антропогенные изменения его природы. Иркутск: Изд-во Иркутск. ун-та, 1974. С. 75-84.

Афанасьева Э.Л. Биология байкальской эпишуры. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 144 с.

Кожов М.М. Биология озера Байкал. М: Изд-во АН СССР, 1962. 314 с.

Кожова О.М., Мельник Н.Г. Инструкция по обработке проб планктона счеитным методом. Иркутск, 1978. 52 с.

Кожова О.М., Бейм А.М. Экологический мониторинг Байкала. М.: Экология, 1993. 352 с.

Макарова И.В., Пичкилы Л.О. К некоторым вопросам методики вычисления биомассы фитопланктона // Ботанический журн. 1970. Т. 55, № 10. С. 1488–1494.

Мейер К.И. Введение во флору водорослей оз. Байкал // Бюлл. МОИП. 1930. Т. 39, № 3-4. С. 179-392.

Поповская Г.И. Фитопланктон Байкала и его многолетние изменения (1958-1990 гг.): Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Новосибирск, 1991. 32 с.

Ривьер И.К. Особенности планктоценозов озер в разные экологические периоды (подледный и открытой воды) // Труды ИБВВ РАН. Вып. 74 (77. С. 59-75.)

Яснитский В.Н. Результаты наблюдений над планктоном Байкала в районе Биологической станции за 1926 - 1928 гг. // Изв. Биол. - географ. ин-та при Иркутском гос. ун-те. 1930. Т.4, вып. 3-4. С. 191-234.

Яшнов В.А. Планктон озера Байкал по материалам Байкальской экспедиции зоологического музея Московского университета 1917 г. // Русск. Гидробиол. журн. 1922. Т. 1, № 8. С. 225–241.

Bondarenko N.A., Tomberg I.V., Pen'kova O.G., Sheveleva N.G. Structural changes of phyto- and zooplankton caused by the climate shifts and anthropogenic pressure, Lake Baikal, Russia. Inland Waters Biology 2023. 16, №6. P. 955–966.

Izmest'eva L.R., Moore M.V., Hampton S.E. et al. Lake-wide physical and biological trends associated with warming in Lake Baikal // J. Great Lakes Res. 2016. V. 42. P. 6. https://doi.org/10.1016/j.glr.2015.11.006

Sheveleva N.G., Penkova O.G. Long-therm dynamics of the zooplankton community in the southern part of the Maloye More Strait (Lake Baikal) // Limnol. and Freshwater Biol. 2020. № 4. P. 746.

Timoshkin, O.A., Samsonov, D.P., Yamamuro, M. et al. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? // J. Great Lakes Res. 2016. V. 42. P. 487.

SPATIAL AND TEMPORAL HETEROGENEITY OF LAKE BAIKAL PLANKTON DURING THE UNDER-ICE PERIOD

N.A. Bondarenko, N.G. Sheveleva, A.Ye. Poberezhnaya, O.G. Pen'kova

The structure and production characteristics (abundance, biomass) of zoo- and phytoplankton of the coastal and pelagic zones in the southern basin of Lake Baikal during the under-ice periods, 2023 and 2024, their developmental spatial and temporal heterogeneity were studied. Species diversity and quantitative parameters were higher at the near-shore stations. A significant part of the species in both phyto- and zooplankton were Baikalian endemics and representatives of the cryophilic Baikal complex.

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПРЕОДОЛЕНИЯ ИММУННОЙ ЗАЩИТЫ ХОЗЯИНА КАК ФАКТОР ИНВАЗИВНОГО УСПЕХА ООМИЦЕТ SAPROLEGNIA PARASITICA В ОЗЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Е.В. Борвинская[1], М.А. Пасивкина[2], А.А. Воробьева[2], И.В. Суховская[3], С. Курпе[4], Э.Р. Зулькарнеев[2]

[1]Иркутский государственный университета

[2]Московский НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Г.Н. Габричевского» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека

[3] Институт биологии КарНЦ РАН

[4] Биоинформатическая компания Free Power, Ереван, Армения

Исследование посвящено молекулярным механизмам, обеспечивающим успех *Saprolegnia parasitica* как универсального паразита рыб и других гидробионтов. Показано, что паразит эффективно подавляет клеточный иммунный ответ, тогда как гуморальный иммунитет частично распознает патоген, но не формирует полноценной защиты. Работа подчеркивает необходимость углубленных исследований взаимодействия паразита и хозяина для разработки современных подходов и эффективных методов борьбы с инфекцией, особенно в аквакультуре, с целью предотвращения распространения вирулентных штаммов *S. parasitica* и сохранения биоразнообразия пресноводных экосистем.

Паразитические оомицеты *Saprolegnia* spp. входят в порядок Saprolegniales - обособленную кладу микроорганизмов, в ходе эволюции специализировавшихся одновременно на сапротрофном питании и на паразитизме. Как сапрофиты Saprolegniales играют важную роль в пресноводных экосистемах, перерабатывая органические вещества и поддерживая круговорот углерода в водоемах. Однако их паразитическая активность может существенно влиять на биоразнообразие гидробионтов, особенно рыб и других обитателей пресноводных экосистем. Оценить влияние вирулентных форм на пресноводные экосистемы сложно, однако считается, что *Saprolegnia sp.* как патоген существенно влияет на регулирование численности природных популяций (Matthews, 2019).

В последнее время важным фактором распространения особо опасных форм *Saprolegnia sp.* является аквакультура, поскольку рыбоводческие хозяйства выступают резервуаром инфекции, а перемещение посадочного материала способствует обмену штаммами между уже сложившимися естественными экосистемами. Кроме того, химические средства борьбы с паразитом могут быть опасны для окружающей среды (Kumar et al., 2020). В целом, очаги сапролегниоза на рыбоводческих фермах наносят значительный экономический ущерб (van West, 2006) и увеличивают риски для сохранения биоразнообразия озер.

Хотя *Saprolegnia* sp. являются факультативными паразитами, в этом роли они

чрезвычайно успешны. Инфекции подвержен широчайший круг гидробионтов: практически все виды пресноводных рыб, а также амфибии, водные насекомые и даже губки (Дзюба et al., 2020). Особенно уязвимы личинки и икра рыб, тогда как во взрослом возрасте чаще поражаются ослабленные или травмированные особи.

Несмотря на повсеместное распространение и экологическую значимость для пресноводных экосистем, механизмы, обеспечивающие широкую экологическую адаптивность *Saprolegnia* sp. и их способность успешного инфицировать разнообразных гидробионтов, остаются недостаточно изученными. Биохимические исследования показали, что некоторые виды *Saprolegnia* sp. могут эффективно уклоняться от иммунитета хозяина за счет синтеза гормоноподобных веществ, которые подавляют активацию иммунных клеток (Belmonte et al., 2014). Молекулярный анализ также выявил в арсенале паразита специфические белки, которые способны непосредственно проникать в клетки хозяина и влиять на них (Van West et al., 2010)

В свою очередь, со стороны рыб также описаны механизмы защиты от инфекции. Так, установлено, что клетки рыб при контакте с *Saprolegnia* выделяют сигнальные воспалительные молекулы и вещества, ингибирующие рост микроорганизма (de Bruijn et al., 2012; Wang et al., 2025). При этом эпителиальные клетки рыб больше полагаются на гуморальный иммунный ответ, выделяя антимикробные пептиды, а иммунные клетки могут распознавать и непосредственно поглощать гифы *Saprolegnia parasitica* (de Bruijn et al., 2012). Тем не менее, даже при наличии ряда защитных механизмов, их эффективность на уровне целого организма часто оказывается недостаточной для противостояния паразитарной инвазии.

Дальнейшие углубленные исследования взаимодействия паразита и хозяина на молекулярном, клеточном и организменном уровне крайне важны для разработки современных подходов и эффективных методов борьбы с инфекцией, в частности, на объектах аквакультуры. Целью нашего исследования было изучить воздействие сапролегниозной инфекции на физиологические и молекулярные показатели иммунной системы больных рыб, а также установить эффективность врожденного иммунного ответа рыб против этого паразита. В рамках исследования мы оценили иммуносупрессивное действие *S. parasitica* на клеточный и гуморальный компоненты иммунитета радужной форели при естественном заражении на форелевом хозяйстве, оценили антимикробную активность плазмы крови здоровой форели в отношении роста паразита и проанализировали белки форели, которые могут быть вовлечены в распознавание антигенов паразита.

Сбор образцов форели, пораженной сапролегниозом, проводили в 2022 году на форелевом хозяйстве на Ладожском озере. Отбирали рыб (1+, средний вес 800 г) с обильными обрастаниями гиф на теле и жабрах. Форель подвергали эвтаназии в эмульсии гвоздичного масла, отбирали кровь для гематологического анализа, взвешивали и вскрывали. В качестве контроля из того же садка брали особей без внешних признаков заболевания. Оценку уровня экспрессии цитокинов в селезенке и кишечнике форели осуществляли методом ПЦР в режиме реального времени. Уровень транскриптов генов вычисляли относительно экспрессии белков домашнего хозяйства бета-актина по параметру $\Delta\Delta$Ct.

Для идентификации возбудителя заболевания в кусочках гифов, собранных с поверхности кожи рыб, секвенировали участок гена ITS по методу Сэнгера (White et al., 1990). Подтверждение видовой принадлежности проводили с помощью реакции количественной ПЦР с праймерами специфичными для *S. parasitica* (Ghosh et al., 2021).

Для оценки выживаемости микроорганизма в плазме крови форели *S. parasitica* (штамм BRMF 1802) выращивали в лабораторных условиях на картофельно-глюкозном агаре. Для проведения теста на выживаемость 1 см^2 колонии с гифами вырезали из агара

и переносили в чистую пробирку с 1 мл плазмы форели или PBS так, чтобы гифы были полностью погружены в жидкость. Кровь для эксперимента отобрали от четырех условно здоровых рыб (1142 ± 312 г). После 2х часовой инкубации образцы с гифами переносили на чашку Петри с агаром и наблюдали скорость роста колонии в течение 24 часов. В качестве контроля использовали образцы с гифами, обработанные буфером PBS. Три образца *S. parasitica*, обработанных плазмы форели, и три образца *S. parasitica,* обработанных буфером PBS, затем были многократно отмыты в буфере PBS методом осаждения-ресуспендирования. Далее состав белков пробы был исследован методом ВЭЖХ-МС/МС.

У больной форели, выловленной на форелевом хозяйстве, были зафиксированы изъязвление кожных покровов (в отдельных случаях утрата глаз и плавников), некроз и гиперплазия печени и кровоизлияния в кишечнике. По сравнению со здоровыми рыбами, у них был больше относительный размер печени, но не отличался размер лимфоидного органа селезенки. С измерениями размера селезенки согласуются результаты обсчета гемограммы, согласно которым по соотношению циркулирующих популяций лейкоцитов, рыбы с поражениями тканей вызванными *S. parasitica*, также не отличались от здоровых рыб.

Для проверки предположения о системной иммуносупрессии у рыб, пораженных *S. parasitica*, нами был проведен анализ экспрессии про- и противовоспалительных цитокинов в селезенке рыб. Цитокины это сигнальные молекулы, которые выбрасывают иммунные клетки, когда обнаруживают захватчика или повреждение ткани и которые привлекают в место воспаления другие иммунные клетки. Молекулярный анализ также подтвердил, что несмотря на обширные поражения тканей, уровень цитокинов в организме больной рыбы не повышается.

Полученные результаты наглядно показывают, что с точки зрения клеточного иммунитета больная и здоровая рыба не отличаются между собой. То есть в естественных условиях паразитические оомицеты способны оставаться «невидимыми» для иммунной защиты, что, вероятно, способствует беспрепятственному распространению паразита в организме. Считается, что механизм подавления ответа иммунных клеток заключается в выбросе *Saprolegnia* sp. простагландинов, которые обладают мощным противовоспалительным действием (Belmonte et al., 2014). Поэтому хотя углеводы клеточной стенки паразитических оомицет распознаются лейкоцитами рыб (de Bruijn et al., 2012), но дальнейшая активация клеток эффективно подавляется. Данный механизм универсален для подавления клеточного звена иммунитета позвоночных (Oyesola et al., 2021; Luo et al., 2024), что объясняет способность *Saprolegnia* sp. поражать разнообразные виды рыб и амфибий и дает этим микроорганизмам высокий инвазивный потенциал.

При этом в селезенке больных рыб мы обнаружили дефицит ряда белков аппарата сплайсинга РНК, что также может привести к нарушению регуляции созревания стволовых клеток крови в Т- и В-клетки и клетки-киллеры (Yang t al., 2021). Можно даже предположить, что именно сплайсисома является метаболической мишенью биологически активных веществ, выделяемых *S. parasitica* и позволяющих паразиту добиться эффективного обезвреживания лейкоцитов.

При этом признаки иммунного ответа у больных рыб отсутствовали не полностью. Так увеличенный размер печени может быть как следствием токсического отравления из-за массированного распада тканей, так и признаком активации синтеза антимикробных пептидов и других факторов регуляции иммунитета. Также, заметное повышение цитокина *il1b* и противовоспалительного фактора *tgfb* было отмечено нами локально в заднем кишечнике больных рыб. Функциональный анализ белков в селезенке больных рыб выявил повышенное обилие протеолитических и лизосомальных ферментов,

которые могут указывать на активацию отдельных звеньев иммунитета, таких как запуск дегрануляции нейтрофилов и усиление Т-и В- клеточного иммунитета через сигнальный путь NF-kB и рецепторы лектина С-типа.

Независимо от клеточного, неклеточное звено иммунитета также может бороться с инфекцией. Неклеточный или гуморальный иммунитет представлен различными белками во внутренних средах организма, которые при контакте с чужеродным агентом распознают его, прикрепляются, и либо сами непосредственно разрушают патоген, либо помечают его для других атакующих белков.

Для проверки наличия в плазме форели таких факторов с антимикробной активностью, мы инкубировали *S. parasitica in vitro* в плазме здоровых, не иммунизированных рыб. В результате мы не обнаружили признаков задержки роста оомицет после контакта с кровью рыб, что указывает на отсутствие у форели врожденных факторов иммунитета, эффективных против *S. parasitica.*

При более глубоком анализе белков рыб, прикрепившихся к поверхности оомицет, мы тем не менее обнаружили среди них белки свертывания крови, включая фибриноген, участвующие в распознавании и мечении чужеродных клеток (опсонизации). Также был обнаружен внеклеточный гистон, который помечает чужеродные клетки для нейтрофилов. Согласно биоинформатическому анализу 46 из белков плазмы форели с высокой адгезией к клеткам *S. parasitica* имели в своей структуре антимикробные пептиды, из них к белкам с ранее описанной антимикробной активностью можно отнести внеклеточный гистон Н4, фибрин, одну изоформу иммуноглобулина и два лектина.

Таким образом, мы показали, что гуморальный неклеточный иммунитет все-таки распознает и помечает антигены *Saprolegnia* sp. как чужеродные. Однако в дальнейшем на поверхности клеток не происходит сборка мембран-атакующего комплекса, а в крови неиммунизированной форели отсутствует достаточное количество белков с антимикробными по отношению к *Saprolegnia parasirica* свойствами. Затем in vivo мы наблюдали эффективное угнетение клеточного иммунитета уже во время развития инфекции.

Вероятно, предварительная иммунизация рыб могла бы способствовать выработке достаточного количества специфических антител, которые могли бы разрушить или по крайней мере блокировать патоген. При этом, если при естественном инфицировании основыне звенья передачи сигнала жестко подавлены *Saprolegnia parasirica*, то своевременная вакцинация, вероятно, могла бы позволить сформировать у рыб эффективный адаптивный иммунитет (Beckmann et al., 2020).

Литература

Дзюба Е.В., Кондратов И.Г., Майкова О.О., Небесных И.А., Ханаев И.В., Деникина Н.Н. Водные плесени порядка Saprolegniales (Oomycota) в ассоциации с байкальскими видами рыб и губок // Известия РАН. Серия биологическая. 2020. №5. С. 526-533.

Beckmann M.J., Saraiva M., McLaggan D., Pottinger T.G., van West P. Saprolegnia infection after vaccination in Atlantic salmon is associated with differential expression of stress and immune genes in the host // Fish Shellfish Immunol. 2020. V. 106. P. 1095-1105.

Belmonte R., Wang T., Duncan G.J., Skaar I., Mélida H., Bulone V., Secombes C.J. Role of Pathogen-Derived Cell Wall Carbohydrates and Prostaglandin E2 in Immune Response and Suppression of Fish Immunity by the Oomycete Saprolegniaparasitica // Infection and Immunity. 2014. V. 83. №1. P. 454–454.

de Bruijn I, Belmonte R., Anderson V.L., Saraiva M., Wang T., van West P., Secombes C.J. Immune gene expression in trout cell lines infected with the fish pathogenic oomycete Saprolegnia parasitica. // Dev. Comp. Immunol. 2012. V. 38. №1. P. 44-54.

Ghosh S., Straus D.L., Good C., Phuntumart V. Development and comparison of loop-mediated isothermal amplification with quantitative PCR for the specific detection of Saprolegnia spp. // PLoS One. 2021. V. 16. №12. e0250808.

Kumar S, Mandal RS, Bulone V, Srivastava V. Identification of Growth Inhibitors of the Fish Pathogen Saprolegnia parasitica Using in silico Subtractive Proteomics, Computational Modeling, and Biochemical Validation // Front. Microbiol. 2020. V. 11. 571093.

Luo M., He N., Xu Q., Wen Z., Wang Z., Zhao J., Liu Y. Roles of prostaglandins in immunosuppression // Clin. Immunol. 2024. V. 265. 110298.

Matthews E. Environmental factors impacting Saprolegnia infections in wild fish stocks. PhD Thesis. 2019. Cardiff University.

Oyesola O.O., Tait Wojno E.D. Prostaglandin regulation of type 2 inflammation: From basic biology to therapeutic interventions // Eur. J. Immunol. 2021. V. 51. №10. P. 2399-2416.

Van West P., De Bruijn I., Minor K.L., Phillips A.J., Robertson E.J., Wawra S., Bain J., Anderson V.L., Secombes C.J. The putative RxLR effector protein SpHtp1 from the fish pathogenic oomycete Saprolegnia parasitica is translocated into fish cells, FEMS // Microbiology Letters. 2010. V. 310. №2. P. 127–137

van West P. Saprolegnia parasitica, an oomycete pathogen with a fishy appetite: new challenges for an old problem // Mycologist. 2006. V. 20. P. 99–104

Wang Y., Gao X., Wang T., Zhang Y., Hu K. Effects of Saprolegnia parasitica on pathological damage and metabolism of Epithelioma papulosum cyprini cell // Developmental & Comparative Immunology. 2025. V. 162. P. 105311

White T.J., Bruns T., Lee S., Taylor J. Amplification and Direct Sequencing of Fungal Ribosomal RNA Genes for Phylogenetics // PCR Protocols. San Diego, CA: Academic Press, 1990 P. 315–322.

Yang H., Beutler B., Zhang D. Emerging roles of spliceosome in cancer and immunity // Protein & Cell. 2022. V. 13. 8. P. 559-579.

MOLECULAR MECHANISMS FOR OVERCOMING HOST IMMUNITY AS A FACTOR IN THE INVASION OF SAPROLEGNIA PARASITICA IN LAKE ECOSYSTEMS

E.V. Borvinskaya, M.A. Pasivkina, A.A. Vorobeva, I.V. Sukhovskaya, S.R. Kurpe, E.R Zulkarneev

The study focuses on the molecular mechanisms that ensure the success of *Saprolegnia parasitica* as a universal parasite of fish and other hydrobionts. It shows that the parasite effectively suppresses the cellular immune response, while humoral immunity partially recognises the pathogen but does not provide complete protection. The work highlights the need for in-depth studies of parasite-host interactions to develop modern approaches and effective methods of infection control, especially in aquaculture, to prevent the spread of virulent strains of *S. parasitica* and to preserve the biodiversity of freshwater ecosystems.

ИНФУЗОРИИ ВОДОЕМОВ РАИФСКОГО УЧАСТКА ВОЛЖСКО-КАМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА В 2019, 2022 ГГ.

С.В. Быкова
Институт экологии Волжского бассейна РАН

Представлены результаты исследования инфузорий светловодного и темноводных заповедных водоемов южной границы зоны тайги и широколиственных лесов (ВКГПБЗ). Сообщества инфузорий, несмотря на территориальную близость водоемов, довольно своеобразны (сходство видового состава в основном менее 40%). Выявлено более 180 видов инфузорий. Гетерогенность вертикального распределения инфузорий во всех исследованных стратифицированных водоемах выражается в формировании резкого максимума в районе границы аэробной и анаэробной зон. «Визитной карточкой» гумозных озер (в частности, «болотных окон» с менее окрашенной водой) является массовое развитие миксотрофных инфузорий, часто с монодоминированием какого-либо одного вида.

Первые исследования инфузорий в водоемах Раифского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника (ВКГПБЗ) были проведены в 2006-2007 гг. (Быкова, Жариков, 2016). Были получены данные о видовом разнообразии и особенностях развития их сообщества в толще глубоководной части с учетом распределения их в столбе воды по разным горизонтам и в зарослевых биотопах. Конечно, интерес представляет в первую очередь ключевой объект заповедника – оз. Раифское и многочисленные, характерные для широколиственно-хвойной зоны гумозные озера. После более чем десятилетнего перерыва исследования инфузорий были продолжены. И к хорошо изученным в ВКЗ в течение десятилетий гумозным озерам прибавился новый водоем (оз. Моховое), ранее не входивший в программу мониторинговых исследований сотрудниками заповедника. Именно данный водоем явился «кладезем» интересных и даже новых для региона видов инфузорий (Быкова, 23). Цель данной работы – оценка современного состояния видового разнообразия инфузорий и характеристика сообществ инфузорий как основы для выявления в дальнейшем происходящих в них изменений.

Исследования инфузорий заповедных водоемов проводили с 2 по 10 июля 2019 г. и с 13 по 16 июля 2022 г. в различных биотопах: пелагической части водоемов на станциях с максимальной глубиной, в зарослевой части, в сплавине, в протоках и небольших заливчиках. Шаг отбора проб при исследовании вертикального отбора в глубоководной части озер варьировал от 10 см (в области резких градиентов абиотических факторов) до 1 м; объем проб - от 50 до 300 мл в зависимости от концентрированности пробы.

Абиотические условия для развития гидробионтов в водоемах подробно описаны во многих работах*:* (Унковская и др., 2002; Унковская, Тарасов, 2016; Уманская и др., 2024 г.). Основная часть выбранных нами озер – с глубинами 5-7 м, оз. Илантово – мелководно (3 м), а озера Раифское и Долгое – глубоководны (12-16 м). За исключением оз. Раифское, все являются полигумозными, мало минерализованными, с низкой прозрачностью. Летняя стратификация четко выражена во всех, за исключением мелководного оз. Илантово, где температура постепенно снижается ко дну. В гиполимнионе всех озерах формируются анаэробные условия (Уманская и др., 2024) и в некоторых накапливаются восстановленные неорганические соединения, например, железа в оз. Линево (сидеротрофный тип аноксии) (Горбунов, Уманская, 2018). Граница аэробной и анаэробной зон (0мгО/л) располагалась в оз. Раифское на горизонте 3,5 м, в оз. Линево - на 2,5 м, а в озерах Карасиха, Моховое, Гнилое – в верхних слоях столба воды: от 1м до 1,5 м. Таким образом, анаэробная зона занимает бóльший объем толщи воды, что способствует развитию специфических сообществ.

Всего было выявлено более 180 видов инфузорий. Сходство видового состава невелико: в основном, менее 40%. Более 50%-е сходство отмечалось для сообществ одного и того же озера в разные годы: для Линево данный показатель – 52%, для

Мохового – 57%. Тем не менее, и эти значения относительно невелики, что свидетельствует, не столь о недостаточной выборке, сколь о значительном скрытом потенциальном разнообразии. Среди всех озер более сходен состав инфузорий озер Моховое и Карасиха (коэффициент Серенсена -51%), что демонстрирует и дендрограмма различий (рис. 1а). В целом, сообщества инфузорий группируются в три кластера: гумозные озера с менее окрашенной водой (Моховое-Карасиха-Долгое), с более окрашенной (Линево-Гнилое-Илантово) и светловодное оз. Раифское. Однако, по показателям численности сообщества инфузорий, близкими оказались сообщества инфузорий из озер Раифское и Линево (рис. 2б), что удивительно, поскольку эти озера сильно отличаются друг от друга (в первую очередь, цветностью и содержанием железа). Ординация методом PCA выявила обособленность их от остальных озер, являющихся по сути «болотными окнами» (возможно, гипотетический фактор 2). Сообщества, формирующиеся в зарослях макрофитов, обосабливаются от пелагических сообществ по вектору фактора 1 (рис. 1б).

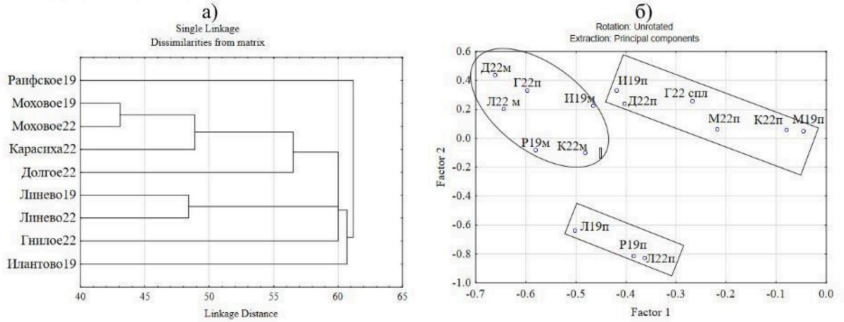


Рис. 1. Дендрограмма сходства видового состава инфузорий пелагической части водоемов (а), ординация сообществ инфузорий в разных экотопах озер ВКЗ (б).
Озера: Р19 - Раифское, Л19, Л22 – Линево, М19, М22 – Моховое, К22 – Карасиха, Г22 – Гнилое, И19 – Илантово, Д22 – Долгое; биотопы: п – пелагиаль, м – макрофиты, спл – сплавина

В светловодном оз. Раифское в эпилимнионе развивались характерные для пресных водоемов аэрофильные виды: *Rimostrombidium lacustris*, *Tintinnopsis cylindrata*, *Codonella cratera*, *Limnostrombidium pelagicum*; а в анаэробном гиполимнионе – скутикоцилиаты и другие мелкие неидентифицированные инфузории. Интегральные показатели видового богатства и разнообразия (число видов и индекс Шеннона) невелики (табл. 2). В гумозных озерах с менее окрашенной водой (озера Моховое, Карасиха, Долгое) в состав доминантов входят в основном миксотрофные инфузории, но с разным видовым составом в разных озерах (табл. 1). В более «темноводных» озерах: Гнилое и Линево преимущественное развитие получили скутикоцилиаты, эпибиоты родов *Epistylis* и *Vorticella* и сапропелевая фауна (табл. 1). В целом, в первой группе водоемов видовое богатство (40-53 видов) и разнообразие (Hn = 2,05-3,84) выше, в отличие от сообществ второй группы гумозных водоемов (20-36 видов и Hn = 1,05=3,14) (табл. 2).

Максимальные значения численности и биомассы зарегистрированы в оз. Моховое (табл. 2), характеризующемся наименьшей цветностью среди темноводных озер и большей минерализацией (Унковская, Тарасов, 2016). Уникальность всего комплекса видов инфузорий в нем заключается не только в значительной величине максимума численности – 753,7 млн экз./м^3, но и в том, что он образован в основном

Pseudoblepharisma tenue var. *viride* (Kahl, 1926) – видом, считающимся редким и минорным в других водоемах. Кроме того, довольно значительны межгодовые различия: численность и биомасса в среднем на порядок была выше в 2019 г.

Таблица 1. Основные виды, входящие в доминантный комплекс сообществ инфузорий, в разных биотопах и слоях водной толщи озер ВКГПБЗ в 2022 г.

Виды	Биотоп / Озеро	Пелагиаль			Макрофиты
		аэробная	оксиклин	анаэробная	
Caenomorpha lata Kahl, 1927	Г	-	+++	+++	-
C. medusula Perty, 1852	Г	-	+++	+++	-
Caenomorpha spp.	Г	-	-	+++	-
Codonella cratera (Leidy, 1887)	М	+++	+	++	- / -
Coleps hirtus viridis Ehrenberg, 1831	М	+++	+	-	- / -
	К	++	+	++	+++^{р} / -
Cyclidium glaucoma (O.F.Mull., 1773)	Л	+++	+++	+++	- / -
Cyclidium spp.	Л	++	-	++	+++^{к} / -
	Г	-	+++	++	+^{с}
Dexiotricha granulosa (Kent, 1881)	Л	-	++	+++	- / -
Dexiotricha sp.	К	-	+++	+++	- / -
	Д	-	+++	+++	- / -
Disematostoma butschlii Lauteborn, 1894	Д	+++	+++	+++	- / -
Epistylis spp. (эпизои)	Л	-	+	+++	+++^{к} / +++^{э}
Furgasonia trichocystis	Г	-	-	-	+++ ^{с}
Halteria grandinella (O.F. Muller, 1773)	К	+++	++	++	+++^{р} / -
	Д	+++	++	++	+++^{м} / +++^{э}
	Л	++	-	++	+++^{к} / +^{э}
	Г	+++	+++	-	+++ ^{с}
Halteria sp.	Д	+	+++	-	++^{м} / +^{э}
Histiobalantium natans Clap.& Lachm., 1858	М	++	+++	+	- / -
	К	+++	+++	+++	- / -
Holophrya ovum (Ehrenberg, 1831)	М	-	++	+++	- / -
Holophrya sp. (мелк.)	Д	+++	++	+++	+^{м} / -
	Г	-	+++	+	-
Metopus sp.	М	-	-	+++	- / -
Pelagohalteria viridis (Fromentel, 1876)	М	+++	+	-	- / -
	К	+++	+	-	++^{р} / -
Pelagostrobilidium sp.	Г	+++	++	-	-
Pelagostrombidium mirabile (Penard,1916)	Д	+++	-	-	++^{м} / ++^{э}
	Л	+++	-	++	+++^{к} / -
	Г	+++	-	-	-
Pelagothrix plancticola Foissner et al., 1995	К	++	+++	+++	- / -
Pseudoblepharisma tenue* var. *viride (Kahl, 1926)	М	+	+++	+++	- / -
Rimostrombidium velox (Faure-Fremiet, 1924)	Д	+++	+	-	- / ++^{э}
	К	+++	-	+	-
Strombidinopsis setigera	Г	-	-	-	+++ ^{с}
Urotricha spp. (17-25 мкм)	Д	+	+	-	++^{м} / +++^{э}
Urotricha spp. (30-45 мкм)	Д	++	+	-	+++^{м} / +++^{э}
Мелкие сапропелевые виды (*Cirranter mobilis, Ludio parvulus*)	Л	-	-	+++	- / -
Эпибионты *(Epistylis, Vorticella)*	Г	+++	-	-	+^{с}

Примечание. Озера: М – Моховое, Д – Долгое, К – Карасиха, Л – Линево, Г – Гнилое; макрофиты: р – рдест, к – кубышка, э – элодея, м – мох; с – сплавина; статус вида: +++ – >10% численности, ++ – 1% - 10% численности, + – <1%, «-» – отсутствие вида. Жирным шрифтом выделены миксотрофные виды

Обнаружение ряда не регистрировавшихся видов в данном регионе – *Lacrymaria* cf. *sapropelica* Kahl, 1927, *Trichospira inversa* (Claparède & Lachmann, 1858), из семейства Spathidiidae связано, вероятнее всего не с эндемизмом данных видов, а с малой изученностью подобных ненарушенных местообитаний.

Минимальные показатели количественного развития зарегистрированы в оз. Гнилое (с наиболее окрашенной водой), при том, что на некоторых горизонтах численность настолько мала, что приходилось увеличивать объем проб. В зарослевых экотопах сообщества инфузорий, как правило, более многочисленны. Лишь в сообществе планктона, формирующихся в зарослях кубышки, численность сравнима и даже ниже, чем в приповерхностных слоях пелагиали, при том, что за счет развития более крупных видов, биомасса выше (табл. 2).

Таблица 2. Количественные характеристики сообществ свободноживущих инфузорий водоемов ВКГПБЗ

Водоем	Год	Экотоп	Численность, тыс. экз. /м^3	Биомасса, мг /м^3	Число видов	Индекс Шеннона
долина р. Сумка						
Раифское	2019	инт. (пов.-дно)	1964 / 22200*	16.5 / 70.5	31**	1.95**
		0 м	1080	33.9		
		рогоз узколист	960	25.2	24	3.09
		рдест пронзен	360	13.3		
		кубышка	290	8.9		
Илантово	2019	инт. (пов.-дно)	2462 / 3075	56.8 / 62.7	20	2.93
		осока	1394	48.1	31	3.37
Гнилое	2022	инт. (пов.-дно)	264 / 1390	11.2 / 63.5	27	3.14
		инт. (0-0.5 м)	1360	47.0		
		у сплавины	5220	1701.5	28	3.43
долина р. Сер-Булак						
Линево	2019	инт. (пов.-дно)	3787 / 25620	34.8 / 244.9	36	2.89
	2022	инт. (пов.-дно)	3699 /32910	18.1 / 141.4	26	1.05
		0 м	570	19.2		
		кубышка	432	26.93	6	1.71
		элодея	2580	34.89		
Моховое	2019	инт. (пов.-дно)	121634 / 753700	16211.6 / 99049. 6	49	2.05
	2022	инт. (пов.-дно)	12461 / 85100	1067.9 / 10001.1	53	3.68
Долгое	2022	инт. (пов.-дно)	1095	43.0	40	3.84
		0 м	2190	137.9		
		мох	11310	150.3	24	2.30
		элодея	8520	80.6		
Карасиха	2022	инт. (пов.-дно)	1462 / 9020	120.2 / 793.3	42	2.82
		инт. (0-0.5 м)	305	3.20		
		рдест тонколист.	7560	79.2	22	2.38

Примечание. * – в числителе – среднее значение в столбе воды, в знаменателе – максимальное; ** – интегральный показатель

Все исследованные стратифицированные озера характеризуются практически синхронным изменением численности и биомассы инфузорий с глубиной с формированием резких и узких максимумов, наподобие «бактериальных пластин», в области границы кислородной и бескислородной зон. Максимальные пики численности и биомассы инфузорий в толще воды на порядок (в 22, 10 и 18 раз в озерах Карасиха, Моховое и Линево, соответственно) выше таковых показателей в близлежащих 10-ти сантиметровых слоях выше и ниже пика. В озерах Линево, Гнилое и Карасиха максимумы лежат над границей аэробной и анаэробной зон, в отличие от оз. Моховое, где максимальное развитие зарегистрировано ниже этой границы. В оз. Гнилое

численность и биомасса формируют 2 пика: подповерхностный – в аэробной зоне и глубинный – в анаэробной зоне.

Таким образом, исследование биоразнообразия инфузорий в 7 водоемах, расположенных на южной границе «таежной и широколиственно-хвойной лесной широтно-зональной области» позволило выявить на современном этапе более 180 видов инфузорий. Максимальное видовое богатство и разнообразие, показатели численности и биомассы зарегистрированы в «болотных окнах» с менее окрашенной водой, в которых преобладающей стратегией выживания в сообществе инфузорий являлась миксотрофия при сильно различающемся видовом составе самих миксотрофов-доминантов.

Литература

Быкова С.В. Видовое богатство инфузорий малого заболачивающегося водоема: общие проблемы сохранения их биоразнообразия // Известия Самарского научного центра РАН. 2023. Т. 25. №. 5 (115). С. 11-20.

Быкова С.В., Жариков В.В. Свободноживущие инфузории водоемов Волжско-Камского заповедника // Тр. Волж.-Камск. гос. природ. биосф. зап-ка. Казань: Фолиант, 2016. Вып. 7. С. 72-90.

Горбунов М. Ю., Уманская М. В. Аноксигенные фототрофные бактерии в разнотипных водоемах Волжского бассейна // Материалы междунар. конференции «Экологические проблемы бассейнов крупных рек». ИЭВБ РАН, 2018. №. 6. С. 75-77.

Уманская М.В., Краснова Е.С., Горбунов М.Ю. Экологическое состояние стратифицированных гумозных озер Волжско-Камского государственного биосферного заповедника // LXXVII Герценовские чтения. География: развитие науки и образования / Мат-лы междунар. научно-практ. конф. СПб, 2024. С. 333-337.

Унковская У.Н., Тарасов О.Ю. Гидрохимический режим водоемов и водотоков Раифского участка Волжско-Камского заповедника и его охранной зоны // Тр. Волж.-Камск. гос. природ. биосф. зап-ка. Казань: Фолиант, 2016. Вып. 7. С. 9-40.

Унковская Е.Н., Мингазова Н.М., Павлова Л. Р. Гидрологическая и гидрохимическаяхарактеристика водоемов Раифы // Тр. Волж.-Камск. гос. зап-ка. Казань, 2002. Вып. 5. С. 9-36.

CILIATES OF RESERVOIRS FROM VOLGA-KAMA STATE NATURAL BIOSPHERE RESERVE IN 2019 AND 2022

S.V. Bykova

The results of a study of ciliates of light-water and dark-water protected reservoirs of the southern border of the taiga zone and broad-leaved forests were presented. Ciliate communities, despite their territorial proximity were quite peculiar (similarity coefficients are generally less than 40%). More than 180 species of ciliates have been identified. The heterogeneity of the vertical distribution of ciliates in all the studied stratified reservoirs was the formation of a sharp maximum near the boundaries of the aerobic and anaerobic zones. The "visit card" of humous lakes (in particular, the "swamp windows" with less colored water) was the massive development of mixotrophic ciliates, frequently with monodominance of any one species.

К ПРОБЛЕМЕ СОХРАНЕНИЯ ИХТИОФАУНЫ КАСПИЙСКОГО МОРЯ – САМОГО КРУПНОГО БЕССТОЧНОГО ОЗЕРА ЗЕМЛИ.

Е.Д. Васильева[1], Б.А. Лёвин[2]
[1] Московский государственный университет
[2]Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН

Широкий градиент изменчивых абиотических факторов способствовал возникновению значительного экологического и таксономического разнообразия ихтиофауны Каспия, характеризующейся высокой степенью эндемизма. Разработка стратегии охраны этого уникального биоразнообразия нуждается в максимально точных представлениях о его реальной структуре. Современные данные убедительно свидетельствуют о том, что таксономическое разнообразие рыб Каспия является заметно недооцененным (приводятся примеры для двух родов сем. Gobiidae) и нуждается в проведении целенаправленных исследований на основе современных методов.

Каспийское море, не имеющее в настоящее время естественной связи с Мировым океаном, является, по географическому определению, самым крупным озером Земного шара (Зонн, 1999). Это - глубоководный водоём с сильно развитой шельфовой зоной: глубины до 100 м занимают около 62% всей площади. Северная часть моря, наименьшая по площади водной поверхности (27% площади всего Каспия) и самая мелководная (средняя глубина 4.4 м), целиком расположена на шельфе. Сложный рельеф дна и наибольшие глубины (максимальная – 1025 м, средняя – 344 м) характерны для Южного Каспия при его площади - 38% от площади всего Каспия (Богуцкая и др., 2013; Болгов и др., 2007).

Физические параметры Каспийского моря подвержены значительным изменениям в связи с историческими и современными колебаниями уровня, обусловленными как естественными причинами, так и антропогенными воздействиями, приводящими к варьированиям конфигурации береговой линии и геоморфологии отдельных участков прибрежной зоны, осушению заливов, исчезновению и появлению новых островов. Колебания уровня сильно влияют также и на процессы в устьях рек, вызывая перестройки гидрографической сети (Михайлов, Михайлова, 2010).

Солёность в поверхностном слое Каспийского моря варьирует в диапазоне от 0.2–0.3 до 13.0–13.5‰, испытывает пространственно-временные изменения, степень которых неодинакова в разных районах моря и меняется от сезона к сезону. Наиболее выражен градиент солёности в Северном Каспии (от 0 до 3–4‰ вблизи дельты Волги до 12–12.5‰ на границе со Средним Каспием), где также выражена межсезонная изменчивость солёности, тогда как в Среднем и Южном Каспии наблюдается однородность показателей по вертикали в течение всего года. Среднегодовая температура воды повышается в Каспии с севера на юг в среднем на 0.8°С на каждый градус широты; зимой значительны широтные различия (от 0° у ледовой кромки до 11°С в центральной южной части моря), летом различия сглаживаются (25-26°С в северной части моря и 27-28°С – в южной). Летом на малых глубинах Северного Каспия наблюдается гомотермия по всей толще вод, а в глубоких Среднем и Южном Каспии значительны различия между поверхностными (+25°С) и придонными (+6°С) водами (Добровольский, Залогин, 1982).

Широкий градиент изменчивых абиотических факторов обеспечивает формирование в Каспии разнообразных биотопов и, соответственно, значительное экологическое и таксономическое разнообразие ихтиофауны, характеризующейся высокой степенью эндемизма. В последней специальной сводке по рыбам бассейна

Каспийского моря (включая бассейны рек до верховий и связанные с ними озёра) в составе аборигенной фауны указываются 162 вида и подвида рыб, 100 из которых (62%) считаются эндемиками (Богуцкая и др., 2013). Эти цифры свидетельствуют о высоком вкладе фауны Каспия в общий пул мирового биоразнообразия и необходимости разработки серьезных мероприятий по охране этой ихтиофауны. Тем более, что целый ряд каспийских видов являются важными и ценными объектами промысла.

Однако любая разработка стратегии охраны биоразнообразия в качестве базисной исходной составляющей нуждается в максимально точных представлениях о реальной структуре этого биоразнообразия, биологических связях объектов, биотопических предпочтениях, пищевых цепях и проч. К сожалению, следует отметить, что ихтиофауна Каспийского моря с этой точки зрения до сих пор остается слабо изученной и практически неохваченной современными методами исследований. В результате целый ряд номинальных видов рассматриваются в качестве таксонов со спорным статусом. К их числу относятся даже некоторые осетровые (Acipenseridae) - уникальные и высоко ценные в рыбохозяйственном отношении рыбы, на протяжении многовековой истории служившие объектами самых разнообразных исследований.

Очевидно, что к настоящему времени недооцененным является таксономическое разнообразие каспийских бычковых рыб (Gobiidae) – второго по численности видов семейства в Каспии, включающего, по мнению Богуцкой с соавторами (Богуцкая и др. 2013) 34 вида (не считая форм дискуссионного статуса) 12 родов. Подавляющее большинство видов бычковых ведут придонный образ жизни, некоторые из них встречаются лишь на больших глубинах, как, например, редкий глубоководный вид *Anatirostrum profundorum* (Berg, 1927), впервые обнаруженный в Южном Каспии на глубине 294 м, или глубоководный бычок *Neogobius bathybius* (Kessler, 1877), описанный по экземпляру, выловленному южнее Баку на глубине около 194 м (Берг, 1949). На значительных глубинах (до 100 – 200 м) встречаются и некоторые виды рода *Benthophilus*, многие из которых известны по единичным экземплярам. В этой связи можно ожидать, что исследования глубин Каспийского моря могут привести к обнаружению новых, еще не известных видов бычков. Однако и признанные в настоящее время виды, описанные на основе морфологических исследований единичных особей, нуждаются в современном анализе с использованием новых методов с целью выявления внутривидовой изменчивости признаков, подтверждения таксономического статуса и определения ареалов.

О перспективности современных ревизий, базирующихся на использовании как морфологического, так и генетического анализа, свидетельствует ряд примеров из многолетней практики изучения каспийских бычков. Так, к сожалению, до сих пор принимается ошибочное заключение о конспецифичности (Богуцкая и др., 2013; Fricke et al., 2025) каспийского бычка головача *Ponticola gorlap* (Iljin, 1949) описанному из вод Каспия у Мангышлака бычку Ильина *P. iljini* (Vasil'eva et Vasil'ev, 1996). Проведенные исследования внешней морфологии, формы отолитов, структуры кариотипа и изменчивости митохондриального гена цитохрома *b* (Васильева и др., 2016) убедительно показали, что группа из трёх ранее не различавшихся видов, включающая также черноморского *P. kessleri* (Günther, 1861), образует три независимые филетические линии внутри клады *Ponticola* (Рис. 1). Это подтверждает самостоятельный видовой статус каждого из трёх видов, которые чётко дифференцируются по числу хромосом (2n=29–30 у *P. kessleri*, 2n=43–46 у *P. gorlap* и 2n=38–44 у *P. iljini*) и по наличию маркёрных субметацентрических хромосом в кариотипе *P. iljini*. Помимо этого бычок Ильина отличается от остальных двух видов тем, что у него на темени, затылке и на верхних частях жаберных крышек только циклоидная чешуя, тогда как у *P. kessleri* обычно имеется ктеноидная чешуя на темени (28.6–100%), на затылке (над жаберной

крышкой) (85.7–100%) и на верхних частях жаберных крышек (57.1–100%), а у *P. gorlap* в отдельных популяциях встречаются особи, с ктеноидными чешуями на затылке перед спинным плавником (Васильева и др., 2016).

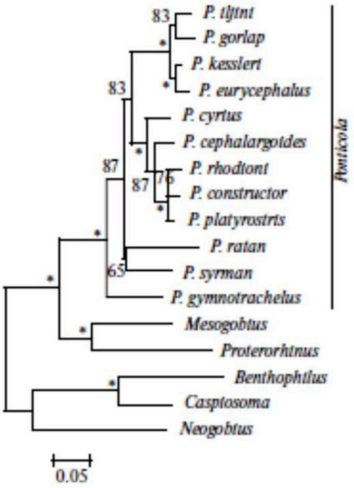


Рис. 1. Филогенетические отношения ряда видов бычков Черноморско-Каспийского бассейна по данным анализа последовательностей гена *cyt b* мтДНК (1098 п.н.) методом наибольшего правдоподобия (ML). Индекс бутстреп-поддержки дан рядом с узлами ветвления; на шкале представлена генетическая дистанция (Васильева и др., 2016)

Таким образом, таксономическое разнообразие каспийских бычков по видам рода *Ponticola* было недооценено в прошлых работах. Как показывают наши исследования последних лет, недооценено таксономическое разнообразие и у бычков-цуциков (род *Proterorhinus*), которые, как полагали ранее (Богуцкая и др., 2013), представлены в Каспии лишь одним видом – *P. nasalis* (De Filippi, 1863).

Изменчивость морфологических признаков в разных популяциях каспийских бычков-цуциков была изучена нами на основе коллекций Зоологического музея Московского университета и Зоологического института РАН, Санкт-Петербург, и собственных сборов, включающих ваучерные экземпляры для ДНК анализа. Набор изученных признаков и методика анализа описаны ранее (Vasil'eva, 2024). Выделение ДНК, амплификацию области субъединицы I цитохром *c*-оксидазы мтДНК (COI), ПЦР, секвенирование и последующий филогенетический анализ проводили в соответствии с принятыми протоколами (Geiger et al., 2014; Ivanova et al., 2007; Kalyaanamoorthy et al., 2017; Lanfear et al., 2016; Xiang et al., 2023). Видовые диагнозы были разработаны на основе сравнительного анализа особей из разных филетических линий.

В результате проведенных исследований подтвержден видовой статус малоглазого каспийского бычка цуцика *P. blennioides* (Kessler, 1877), сводимого в синонимы *P. nasalis* (Богуцкая и др., 2013; Fricke et al., 2025). Этот вид отличается от всех других представителей рода маленькими глазами, горизонтальный диаметр которых обычно составляет менее 20% длины головы, часто почти равен или даже меньше межглазничного расстояния. *Proterorhinus blennioides* обнаруживает высокий уровень генетической дивергенции от остальных каспийских бычков-цуциков, являясь сестринским таксоном черноморского вида *P. marmoratus* (Pallas, 1814) (рис. 2). По нашим данным, распространен этот вид в водах западного и юго-западного Каспия вдоль 400 км береговой линии между Баку и водно-болотными угодьями Энзели в Иране.

Таким образом, для реальной оценки таксономического разнообразия ихтиофауны Каспийского моря требуются дальнейшие исследования с применением современных методов анализа. Существенным дополнением для документирования видового разнообразия и ихтиологического мониторинга может стать применение метабаркодинга проб природной ДНК, содержащейся в воде (Miya, 2022). Этот метод

хорошо работает при наличии баз референсных последовательностей ДНК и позволяет за короткий промежуток охватить большое число станций, что затруднительно при применении стандартных методик и обследовании глубинных биотопов.

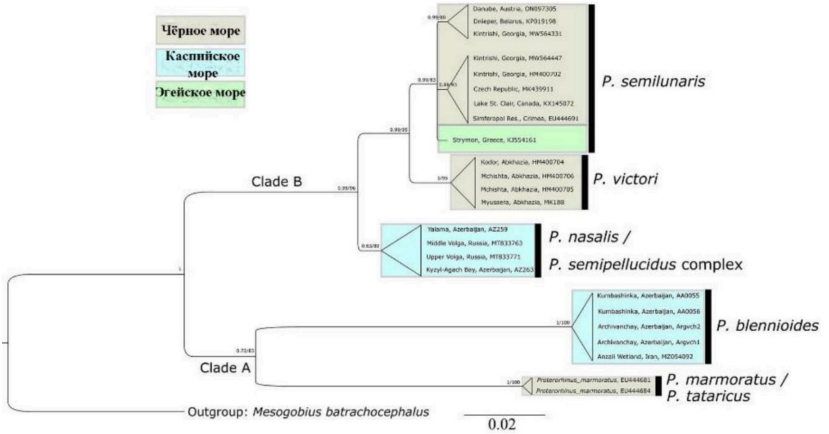


Рис. 2. Филогенетическое дерево, построенное по уникальным гаплотипам COI мтДНК видов рода *Proterorhinus* (объединенный сет собственных данных с таковыми из базы данных NCBI). Значения бутстреп-поддержки и апостериорных вероятностей показаны в узлах; масштаб указывает число ожидаемых замен на сайт (Vasil'eva, 2024)

Исследования рыб Понто-Каспия проводены в рамках государственного задания Московского государственного университета № 121032300105-0 и при финансовой поддержке РНФ (24-44-20019).

Литература

Берг Л.С. Рыбы пресных вод СССР и сопредельных стран. Ч. 3. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1949. С. 929–1382.

Богуцкая Н.Г, Кияшко П.В., Насека А.М., Орлова М.И. Определитель рыб и беспозвоночных Каспийского моря. Т. 1. Рыбы и моллюски. СПб., М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. 543 с.

Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А. Каспийское море: экстремальные гидрологические события. М.: Наука, 2007. 381 с.

Васильева Е.Д., Шварзханс В.В., Медведев Д.А., Васильев В.П. Криптические виды понто-каспийской группы «бычок-головач» рода *Ponticola* (Gobiidae) // Вопросы. ихтиологии. 2016. Т. 56. № 1. С. 3–21.

Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: МГУ, 1982. 192 с.

Зонн И.С. Каспий: иллюзии и реальность. М.: Эдель-М, 1999. 468 с.

Кесслер К.Ф. Рыбы, водящиеся и встречающиеся в Арало-каспийско-понтийской ихтиологической области // Тр. Арало-Каспийской экспедиции. Вып. 4. Прилож. к Тр. СПб общ-ва естествоиспыт. СПб, 1877. 360 с.

Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Закономерности воздействия повышения уровня моря на гидрологический режим и морфологическое строение речных дельт // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. №1. С. 3–16.

Fricke R., Eschmeyer W.N., van der Laan R. Eds. Eschmeyer's Catalog of Fishes: Genera, Species, References, Version of January 7, 2025. http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp

Geiger M.F., Herder F., Monaghan M.T. et al. Spatial heterogeneity in the Mediterranean Biodiversity Hotspot affects barcoding accuracy of its freshwater fishes // Mol. Ecol. Res. 2014. V. 14. №6. P. 1210–1221.

Ivanova N.V., Zemlak T.S., Hanner R.H., Hebert P.D. Universal primer cocktails for fish DNA barcoding // Mol. Ecol. Notes. 2007. V. 7. №4. P. 544–548.

Kalyaanamoorthy S., Minh B.Q., Wong T.K.F et al. ModelFinder: fast model selection for accurate phylogenetic estimates // Nat. Methods. 2017. V. 14. №6. P. 587–589.

Lanfear R., Frandsen P.B., Wright A.M. et al. PartitionFinder 2: new methods for selecting partitioned models of evolution for molecular and morphological phylogenetic analyses // Mol. Biol. Evol. 2016. V. 34. №3. P. 772–773.

Miya M. Environmental DNA metabarcoding: A novel method for biodiversity monitoring of marine fish communities // Ann. Review Marine Science. 2022. V. 14. №1. P. 161–185.

Vasil'eva E.D. Species diversity, diagnostic characters, and distribution of tubenose gobies of the genus *Proterorhinus* (Gobiidae). I. A new species of the tubenose goby from the water bodies of the eastern coast of the Black Sea // Journal of Ichthyology. 2024. V. 64. №6. P. 881–890.

Xiang C.Y., Gao F., Jakovlić I. et al. Using PhyloSuite for molecular phylogeny and tree-based analyses // Imeta. 2023. V. 2. №1. e87.

ON THE PROBLEM OF CONSERVATION OF THE ICHTHYOFAUNA OF THE CASPIAN SEA – THE LARGEST ENDORHEIC LAKE ON EARTH

E.D. Vasil'eva, B.A. Levin

A wide gradient of variable abiotic factors has contributed to the emergence of significant ecological and taxonomic diversity of the Caspian ichthyofauna, characterized by a high degree of endemism. The development of a strategy for the protection of this unique biodiversity requires the most accurate understanding of its real structure. Current data convincingly indicate that the taxonomic diversity of Caspian fish is significantly underestimated (examples are given for two genera of the Gobiidae family) and requires targeted research based on modern methods.

ВОЛНЫ ТЕПЛА НА БАЙКАЛЕ: ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ВЛИЯНИЯ ВОЛН ТЕПЛА НА ВЫЖИВАЕМОСТЬ И ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТАБОЛИЗМА МАССОВЫХ ВИДОВ АМФИПОД ЛИТОРАЛИ ОЗЕРА

К.П. Верещагина[1,2], С.С. Седова[1], Е.С. Кондратьева[1], Ж.М. Шатилина[1,2], Е.Б. Индосова[1], М.А. Тимофеев[1]

[1]Иркутский государственный университет

[2]Байкальский исследовательский центр

В работе представлены первые данные, полученные в ходе лабораторных экспериментов по влиянию волн тепла на выживаемость и показатели энергетического метаболизма (глюкоза, гликоген, лактат) молоди и взрослых особей массовых литоральных видов

байкальских эндемичных амфипод *Eulimnogammarus verrucosus*, *E. vittatus* и *E. cyaneus*. Показано наличие различных стратегий адаптации и регуляции энергетического метаболизма в условиях влияния волн тепла у изучаемых видов.

Планетарные процессы глобального изменения климата, активно наблюдающиеся в последнее десятилетия, сопровождаются ростом климатических аномалий, представляющих значительные риски для уникальных экосистем планеты. Среди климатических аномалий все большее внимания уделяется изучению такого явления, как «волны тепла» («heat waves»). Волны тепла — это продолжительные периоды аномально высоких температур выше порога 90-го процентиля климатологических средних показателей температуры за 30 лет, которые могут иметь разрушительные последствия для водных экосистем.

Волны тепла чрезвычайно опасны для водных организмов, которые имеют ограниченную возможность избежать неблагоприятные условия. Они также часто подвержены более длительному влиянию волн тепла, чем наземные организмы, из-за высокой теплоемкости и относительной термической однородности воды по сравнению с сушей. Понимание адаптивных поведенческих возможностей отдельных видов при наступлении волн тепла, а также их влияние на успешное развитие и размножение видов необходимо для более точного предсказания последствий, с которыми неизбежно столкнутся водные экосистемы уже в ближайшие десятилетия.

Основная масса исследований явления волн тепла направлена на изучение морских и океанических систем. Однако, очень мало известно о волнах тепла в озерах, какое влияние они могут оказать на пресноводные экосистемы и их обитателей в условиях глобального потепления климата. Озеро Байкал может служить актуальной моделью, на которой можно проследить влияние волн тепла на способность к быстрому стресс-ответу у пресноводных организмов, их выживаемость, рост и размер.

Целью исследования являлось сравнительное изучение влияния волны тепла на выживаемость и параметры энергетического метаболизма (глюкоза, гликоген, лактат) байкальских доминантных литоральных видов амфипод *Eulimnogammarus verrucosus* (Gerstfeldt, 1858), *Eulimnogammarus cyaneus* (Dybowsky, 1874) и *Eulimnogammarus vittatus* (Dybowsky, 1874).

Половозрелые особи и молодь исследуемых видов отлавливали с помощью сачка в литорали озера Байкал, недалеко от п. Листвянка (51.871, 104.828) в сентябре 2023 г. Температура вылова составляла 14.9–15.1 °C. После вылова амфипод разбирали по видам и акклимировали две недели в лабораторных условиях по схеме 13/15 °C ночь/день перед началом эксперимента (имитируя среднесуточные колебания температуры в июле-августе, перед началом наступления волны тепла). После двух недель лабораторной акклимации часть амфипод фиксировали в жидком азоте для измерения энергетических метаболитов (глюкоза, гликоген, лактат), данную группу обозначали «контроль». Далее, оставшихся амфипод разделяли на две группы: «параллельный контроль» (чтобы проследить, как влияет временной фактор на содержание амфипод в контрольных условиях) и «эксперимент». Экспериментальную группу амфипод экспонировали в условиях волны тепла. Волна тепла была смоделирована на основании реальных данных мониторинга за температурным режимом в зоне литорали: ночь 16 °C, день 20 °C в течение 10 дней. В ходе эксперимента регистрировали смертность амфипод. После окончания экспозиции, амфипод обеих групп фиксировали в жидком азоте для измерения параметров энергетического метаболизма (глюкоза, гликоген и лактат).

Показано, что выживаемость половозрелых особей амфипод вида *E. verrucosus* к окончанию экспозиции в условиях влияния волны тепла составляла 51,43%, тогда как

для *E. vittatus* и *E. cyaneus* отмечали 100% выживаемость. В случае молоди данных видов, показаны противоположные результаты. Так, для молоди *E. verrucosus* выживаемость составляла 100%, тогда как для молоди видов *E. vittatus* и *E. cyaneus* – 96.67% и 97.47%, соответственно (рис. 1).

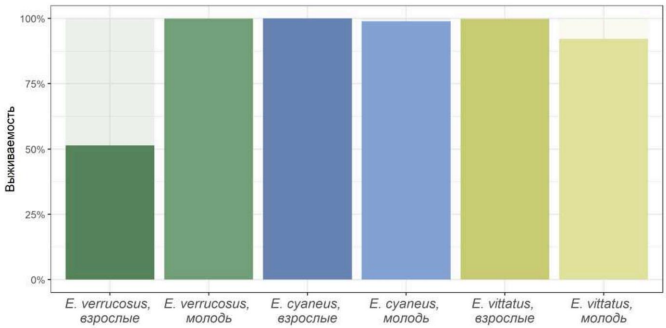


Рис. 1. Выживаемость половозрелых особей и молоди амфипод видов *E. verrucosus*, *E. cyaneus*, *E. vittatus* к окончанию экспозиции в условиях влияния волны тепла (в процентах). Волна тепла смоделирована на основании реальных данных мониторинга за температурным режимом в зоне литорали оз. Байкал: ночь 16 °С, день 20 °С в течение 10 дней

По результатам оценки параметров энергетического метаболизма у молоди *E. verrucosus* показано повышение уровня гликогена в условиях влияния волны тепла относительно контроля. Стоит отметить, что и в группе «параллельный контроль» молоди вида *E. verrucosus* также наблюдали повышение гликогена, что может отражать повышение гликогеногенеза в связи с высокой доступностью пищи и отсутствием конкуренции за нее в лабораторных условиях. У взрослых особей *E. verrucosus* отмечали снижение лактата после экспериментальной экспозиции в условиях влияния волны тепла. У взрослых особей *E. cyaneus* отмечали снижение гликогена в условиях влияния волны тепла по сравнению с контролем. В ходе экспериментального влияния волны тепла на молодь вида *E. vittatus* показано повышение глюкозы и гликогена, тогда как уровень лактата снижался. У взрослых особей *E. vittatus* отмечали повышение гликогена в условиях акклимации (параллельный контроль) (рис. 2).

E. verrucosus является холодолюбивым байкальским видом, мигрирующим на бóльшую глубину при повышении температуры литорали. Ранее было показано (Тимофеев, 2010), что данный вид является термочувствительным по сравнению с *E. vittatus* и *E. cyaneus*, хотя молодь данного вида более термотолерантна по сравнению со взрослыми особями, что также согласуется представленными в текущем исследовании данными по выживаемости и энергетическому метаболизму. Так, для всех показателей у взрослых особей *E. verrucosus* наблюдали тренд на снижение количества в условиях влияния волны тепла, что может свидетельствовать о метаболической депрессии на фоне теплового стресса, это также согласуется с данными о выживаемости – лишь 51,43%. Молодь вида *E. verrucosus* выживала в ходе эксперимента в 100 % случаев, также для них показано 2-3-кратное повышение гликогена. На эпигейных амфиподах неоднократно показано (Hervant, Mathieu, 1995; Hervant et al., 1995), что их наиболее важной адаптивной характеристикой является способность повышать уровни

гликогена и аргинина, что позволяет поддерживать аэробный метаболизм, продлевая выживание организмов.

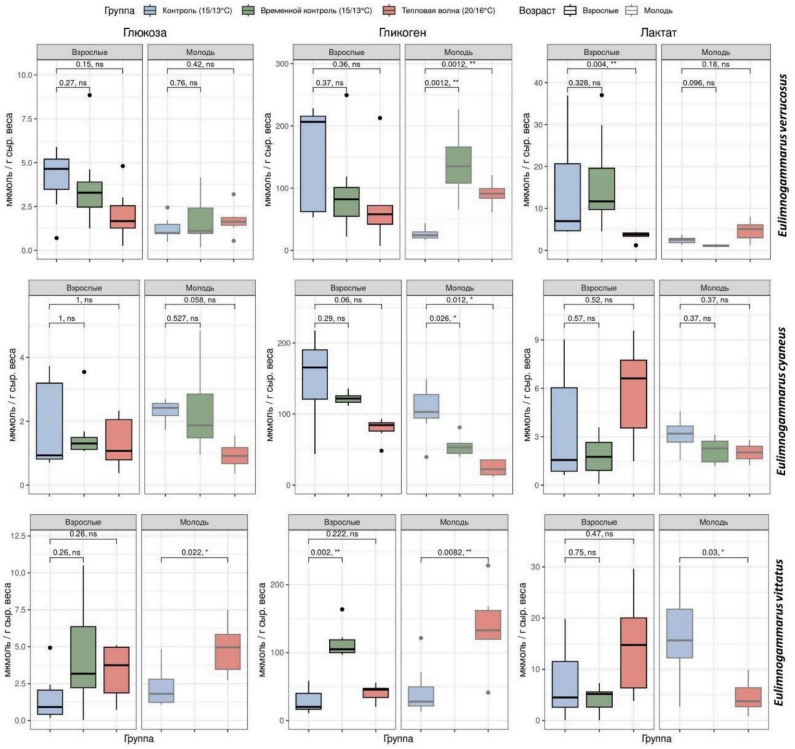


Рис. 2. Изменение содержания энергетических метаболитов (глюкоза, гликоген, лактат в ммоль/г сыр. веса) половозрелых особей и молоди амфипод видов *E. verrucosus*, *E. cyaneus*, *E. vittatus* в условиях влияния волны тепла. Особей контрольных групп экспонировали в условиях средних температур июля-августа без волн тепла: 13 °C (ночь), 15 °C (день). • статистически достоверное отклонение от контроля при $p < 0.05$

В ходе эксперимента взрослые особи вида *E. cyaneus* выживали в 100% случаев, а показатели энергетического метаболизма стабильно не изменялись до окончания экспериментального воздействия волны тепла, что согласуется с ранее полученными данными о термоустойчивости данного вида, по сравнению с близкородственным видом *E. verrucosus* (Vereshchagina et al., 2021).

Молодь вида *E. cyaneus* выживала в 96,67% случаев в ходе воздействия волны тепла, а также по результатам измерения параметров энергетического метаболизма наблюдали двукратное снижение гликогена по сравнению с контролем. Ранее показано, что предпочитаемая температура вида *E. cyaneus* составляет 12 °C (Тимофеев, 2010). Так, экспозиция в условиях волнытепла в течение 10 дней (температура которой составляла 20 °C) оказывает значимый эффект на метаболизм данного вида, хотя и не является

критичным для выживания в течение такого временного отрезка. Снижение содержания гликогена указывает на возрастающее расходование энергии в условиях температурного стресса и повышение интенсивности метаболизма (Pörtner, 2010).

Для третьего исследуемого вида *E. vittatus* показаны интересные результаты динамики маркеров энергетического метаболизма. Так, отмечали повышение уровня как глюкозы, так и гликогена у молоди данного вида. В то время как уровень лактата снижался. Полученные данные могут отражать стратегию интенсификации аэробного метаболизма в условиях стресса без подключения анаэробиоза и начало общего угнетение метаболизма на фоне длительного влияния повышенной температуры, что отражено результатами выживаемости (97,47%) (Jakob et al., 2021).

Полученные данные свидетельствуют о наличии разных стратегий адаптации к условиям влияния волны тепла у изучаемых видов. Развитие сценария глобального потепления и прогрева Байкала ниже зоны литорали может привести к массовой гибели холодолюбивых видов и, как следствие, нарушению баланса в экосистеме озера. Дальнейшее исследование биохимических и молекулярных параметров адаптации амфипод в условиях наступления тепловой волны поможет определить критические точки функционирования метаболизма.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ №23-74-01077, https://rscf.ru/en/project/23-74-01077.

Литература

Тимофеев М.А. Экологические и физиологические аспекты адаптации к абиотическим факторам среды эндемичных байкальских и палеарктических амфипод: Дисс. … док. биол. наук. Томск, 2010. 384 с.

Hervant F. Behavioral, ventilatory, and metabolic responses to severe hypoxia and subsequent recovery of the hypogean Niphargus rhenorhodanensis and the epigean *Gammarus fossarum* (Crustacea: Amphipoda) // Physiological Zoology. 1995. V. 68. № 2. P. 223–244.

Hervant F., Mathieu J. Ventilatory and locomotory activities in anoxia and subsequent recovery of epigean and hypogean crustaceans // Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série III, Sciences de la vie. 1995. V. 318. №5. P. 585–592.

Jakob L. Thermal reaction norms of key metabolic enzymes reflect divergent physiological and behavioral adaptations of closely related amphipod species / L. Jakob, K.P. Vereshchagina, A. Tillmann, L.R. Duarte, D.V. Axenov-Gribanov, D.S. Bedulina, A.N. Gurkov, P. Drozdova, M.A. Timofeyev, P.F. Stadler, T. Luckenbach, H.O. Pörtner, F.J. Sartoris, M. Lucassen // Scientific Reports. 2021. V. 11. №1. P. 4562.

Low annual temperature likely prevents the Holarctic amphipod *Gammarus lacustris* from invading Lake Baikal / K. Vereshchagina, E. Kondrateva, A. Mutin, L. Jakob, D. Bedulina, E. Shchapova, E. Madyarova, D. Axenov-Gribanov, T. Luckenbach, H. O. Pörtner, M. Lucassen, M. Timofeyev //Scientific Reports. 2021. V. 11. №1. P. 10532.

Pörtner H.O. Oxygen-and capacity-limitation of thermal tolerance: a matrix for integrating climate-related stressor effects in marine ecosystems // Journal of Experimental Biology. 2010. V. 213. №6. P. 881-893.

HEAT WAVES IN LAKE BAIKAL: FIRST EXPERIMENTAL DATA ON THE EFFECT OF HEAT WAVES ON SURVIVAL AND ENERGY METABOLISM PARAMETERS OF MASS AMPHIPODS SPECIES OF THE LAKE LITTORAL

Vereshchagina K.P., Sedova S.S., Kondrateva E.S., Shatilina Zh.M., Indosova E.B., Timofeyev M.A.

The study presents the first data obtained from laboratory experiments on the impact of heat waves on the survival and energy metabolism indicators (glucose, glycogen, lactate) of juvenile and adult individuals of the mass littoral Baikal endemic amphipod species *Eulimnogammarus verrucosus*, *E. vittatus*, and *E. cyaneus*. It demonstrates the presence of different adaptation and regulation strategies for energy metabolism under the influence of heat waves in the studied species.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ CLADOCERA В ТАФОЦЕНОЗЕ ОЗЕРАБ. ЧЕРЛИВОЕ (СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ)

С.Д. Ветлужских[1], Л.А. Фролова[1,2], Г.Р. Нигаматзянова[2]
[1]*Казанский (Приволжский) федеральный университет*
[2]*Институт археологии и этнографии Сибирского отделения РАН*

Проанализировано распределение остатков Cladocera в тафоценозе поверхностных донных отложений озера Большое Черливое. Показана неравномерность в распределении остатков Cladocera, с преобладанием пелагического таксона *Bosmina (Eubosmina) longispina,* ассоциированного с холодными олиготрофными водами. Степень видового богатства и соотношение основных биотопических групп ветвистоусых ракообразных варьировали в зависимости от места расположения и глубины.

В связи с нарастающим влиянием глобального изменения климата, реконструкции сообществ гидробионтов высокоширотных озёр приобретают особую актуальность (Нигматуллин и др., 2021; Фролова, Ибрагимова, 2015; Nigamatzyanova et al., 2020). Остатки водных беспозвоночных, водорослей и пыльцы широко используются при проведении палеоэкологических реконструкций ввиду своей распространенности и биоиндикаторной значимости (Frolova, 2018; Smol, 2010). Особенно часто в палеоэкологии используются остатки ветвистоусых ракообразных (Branchiopoda: Cladocera), преимущественно пресноводных организмов, которые составляют важную часть зоопланктонных сообществ (Фролова, 2014; Forro et al., 2008; Смирнов, 2010). Тафоценозы ветвистоусых ракообразных, отобранные в центральной и чаще всего наиболее глубокой точке озера, как принято считать, могут быть использованы для реконструкции сообщества всего водоема (Smol, 2008). Однако, различные тафономические процессы и локальные особенности водоемов могут существенно влиять на распределение остатков и создавать неравномерность в их распределении. Между тем, неравномерность распределения остатков ветвистоусых ракообразных в донных отложениях изучена относительно слабо (Жаров, Хасанов, Котов, 2018; Nevalainen, 2011).

Озеро Большое Черливое, (рис. 1) расположенное в северной части Карельского берега Белого моря, имеет ледниковое происхождение. Озеро имеет сложную форму и неравномерный рельеф. Центральная и наиболее глубокая часть озера имеет форму желоба, в самой глубокой точке достигает почти 26 м (Сабиров, 2011).

Отбор проб поверхностных донных отложений производился в ходе летней научно-исследовательской экспедиции на базе Беломорской биологической станции КФУ в июле 2023 г. Для анализа пространственного распределения остатков Cladocera были выбраны участки, расположенные вдоль всего водоема, с целью охватить максимально возможное количество возможных местообитаний ветвистоусых ракообразных. Высушенные пробы обрабатывались с использованием стандартной

методики Корхола и Раутио (Korhola, Rautio, 2001). Обнаруженные в отложениях остатки головных щитов, створок карапакса, постабдоменов и постабдоминальных коготков ветвистоусых ракообразных идентифицировались с применением определителей (Алексеев др., 2010; Szeroczyńska, Sarmaja-Korjonen, 2007) и подсчитывались. Количество экземпляров Cladocera для каждого таксона определялось по числу наиболее представленного вида остатков, две створки карапакса принимали за один экземпляр. В каждой пробе было идентифицировано по 70-100 экземпляров.

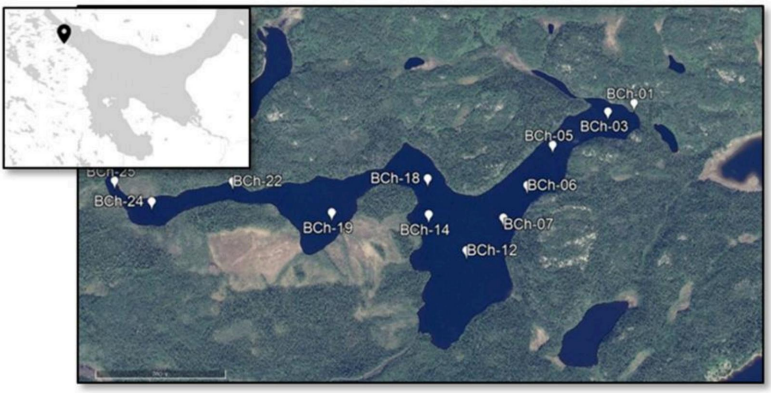


Рис.4. Карта-схема расположения точек отбора проб

Биологическое разнообразие оценивали с применением индексов Шеннона-Уивера (H) и Симпсона (D), для оценки выравненности сообщества использовали индекс Пиелу (e). Доминанты, субдоминанты и второстепенные виды определялись согласно шкале Любарского (Любарский, 1974). Математическую обработку производили в программе Past 3.17, диаграмму распределения остатков по участкам составляли в программе Tilia Graph.В результате карцинологического анализа было обнаружено 962 экз. Cladocera. Всего удалось обнаружить 27 таксонов (рис. 2), относящихся к семействам Bosminidae, Chydoridae, Daphniidae, Eurycercidae, Polyphemidae, Cercopagidae, и Sididae. Видовое богатство варьировалось от 4 до 14 таксонов. Были отобраны образцы макрофитов, среди которых в основном преобладали зарослевые сообщества *Carex sp,, Sparganium sp., Nuphar lutea, Menyanthes trifoliata* и *Equsetum fluviatilis*.

В центральной и наиболее глубокой точке озера было обнаружено всего 6 таксонов Cladocera (табл. 1), было отмечено доминирование таксона *Bosmina (Eubosmina) longispina*, ассоциированного с холодными олиготрофными водами. Индекс биологического разнообразия Шеннона-Уивера имеет сравнительно низкое значение (H=0.6), что может говорить о низком уровне видового разнообразия, что является характерной чертой высокоширотных олиготрофных озер. Значения индексов Симпсона (D=0.76) и Пиелу (e=0.3) говорят о низкой выравненности сообщества с преобладанием небольшого количества доминирующих таксонов.

В участках, отобранных в восточном крыле озера, отмечено доминирование таксона *Bosmina (Eubosmina) longispina.* Всего в данной части озера обранужено 17 таксонов ракообразных. Восточное крыло озера характеризуется средней глубиной 14 м, крутыми берегами и неразвитой литоральной зоной с небольшим количеством макрофитов. Грунт содержит большое количество песка. Для данной зоны характерно

преобладание пелагических таксонов (83%). Среднее значение индекса Шеннона (H=0.91) позволяет охарактеризовать видовое разнообразие сообщества как сравнительно низкое. Индексы Симпсона (D=0.64) и Пиелу (e=0.3) характеризуют сообщество как недостаточно выравненное с небольшим числом доминантов.

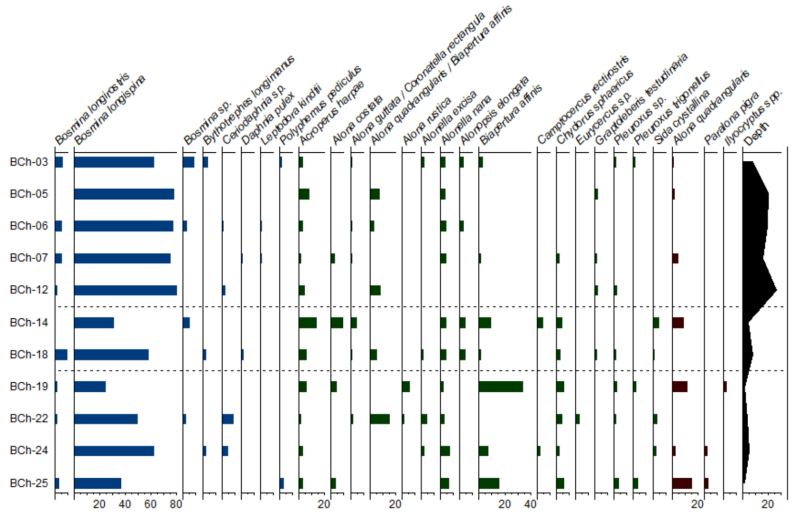


Рис. 2. Относительное обилие таксонов Cladocera в %: синим цветом обозначены пелагические таксоны, зеленым – литоральные, коричневым – бентосные

Таблица 1. Основные индексы биоразнообразия сообществ в отобранных участках

	Западное крыло				Центральная зона			Восточное крыло			
	BCh-03	BCh-05	BCh-06	BCh-07	BCh-12	BCh-14	BCh-18	BCh-19	BCh-22	BCh-24	BCh-25
Глубина, м	8.00	19.50	19.10	15.70	26.00	4.00	8.00	1.35	3.75	5.10	1.30
Число таксонов (S)	13	5	6	12	6	11	14	12	12	12	12
Индекс Шеннона (H)	1.37	0.64	0.79	1.13	0.6	2.13	1.57	1.9	1.58	1.53	2.02
Индекс Симпсона (D)	0.47	0.71	0.68	0.56	0.76	0.16	0.39	0.2	0.37	0.4	0.19
Индекс Пиелу (e)	0.3	0.38	0.27	0.26	0.3	0.77	0.34	0.58	0.4	0.39	0.81

В центральной части озера обнаружено 17 таксонов Cladocera. Отмечено доминирование таксона *B. (E.) longispina* и относительно высокое обилие *Acroperus harpae*, строго ассоциированного с макрофитами. Именно в данной части озера отмечено обилие зарослей *Sparganium sp.* и *Menyanthes trifoliata* на литорали. Грунт богат органикой и остатками макрофитов. Среднее значение индекса Шеннона-Уивера (H=1.85) выше чем в восточном и западном крыльях озера. Согласно индексу Симпсона (D=0,28) и Пиелу (e=0,56), тафоценоз Cladocera данной части озера является относительно выравненным.

Западное крыло озера характеризуется наибольшим разнообразием таксонов (n=21), в большинстве исследованных участков отмечено преобладание таксона *B. (E.) longispina*. В участке BCh-19 литоральный таксон *Biapertura affinis* является субдоминантом, что может быть связано с присутствием зарослей *N. lutea* и *E. fluviatilis*. Мелководное западное крыло озера со средней глубиной 4 м имеет развитую литораль и богатые органикой донные отложения, с большим количеством остатков макрофитов в составе. Здесь выше доля литорального эврибионтного таксона *Chydorus* cf. *sphaericus* и

бентосного таксона *Alona quadrangularis*. В этой части озера также отмечено присутствие редкого таксона *Paralona pigra*.

Таким образом, показана неравномерность в распределении остатков Cladocera в донных отложениях озера Большое Черливое. Наибольшее видовое разнообразие характерно для мелководных литоральных местообитаний, в то время как в центральной и наиболее глубокой точке озера обнаружено сравнительно низкое видовое разнообразие. Неравномерность распределения остатков Cladocera может быть объяснена различиями в глубине, влиянием водной растительности и составом грунта. Тафоценоз озера содержит преимущественно голарктические и палеарктические, ассоциированные с холодными олиготрофными водами таксоны. Работа выполнена за счет НИР №FWZG-2025-0005.

Литература

Жаров А.А., Хасанов Б.Ф., Котов А.А. Пространственная неоднородность тафоценоза озера Кендур (Московская область, Российская Федерация) по данным комплексного зоологического и кладоцерного анализа // Зоологический журнал. 2018. Т. 97. №11. С. 1330-1339.

Любарский Е.Л. К методике экспресс-квалификации и сравнения описаний фитоценозов. Количественные методы анализа растительности: материалы Четвёртого Всесоюзного совещания. Уфа: Ротапринт БФАН СССР, 1974. 126 с.

Сабиров Р.М. Мониторинг голоценогового палеарктического озера Большое Черливое (Северная Карелия) // Матер. Международн. научно-методического семинара «Российско-немецкое сотрудничество в области экологии арктических экосистем: результаты и перспективы». Казань: Казан. ун-т, 2011. С. 33–34.

Смирнов Н.Н. Историческая экология пресноводных зооценозов. М.: Т-во научных изданий КМК. 2010. 225 с.

Фролова Л.А., Ибрагимова А.Г. Карцинологический анализ донных отложений озер Километровое и Котово Харбейской системы (Болыпеземельская тундра) // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. №5. С. 5-17.

Frolova L.A. Cladocera from bottom deposits as an indicator of changes in climate and ecological conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. V. 107. №1. P. 012084.

Korhola A., Rautio M. Cladocera and other branchiopod crustaceans // Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Vol. 4: Zoological Indicators. 2001. P. 5-41.

Nevalainen L. Intra-lake heterogeneity of sedimentary cladoceran (Crustacea) assemblages forced by local hydrology // Hydrobiologia. 2011. V. 676. №1. P. 9-22.

Smol J.P. Pollution of lakes and rivers: a paleoenvironmental perspective. John Wiley & Sons, 2008. 389 c.

Smol J.P. The power of the past: using sediments to track the effects of multiple stressors on lake ecosystems // Freshwater biology. 2010. V. 55. P. 43-59.

Szeroczyńska K., Sarmaja-Korjonen K. Atlas of subfossil Cladocera from central and northern Europe. Friends of the Lower Vistula Society, Świecie. 2007. 84 p.

SPATIAL DISTRIBUTION OF CLADOCERA IN THE TAPHOCOENOSIS OF LAKE BOLSHOE CHERYLIVOE (NORTHERN KARELIA)

S.D. Vetluzhskikh, L.A. Frolova, G.R. Nigamatzyanova

The distribution of Cladocera remains in the taphocoenosis of surface bottom sediments of Lake Bolshoe Cherylivoe was analyzed. The unevenness in the distribution of Cladocera remains was shown, with the predominance of the pelagic taxon *Bosmina (Eubosmina) longispina*,

associated with cold oligotrophic waters. The species richness and the ratio of the main biotopic groups of cladocerans varied depending on the location and depth.

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРОДСКОГО ОЗЕРА СЕВЕРНОЕ (Г. МУРМАНСК, РОССИЯ) ПО ДИАТОМОВЫМ КОМПЛЕКСАМ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

С.И. Вокуева[1], Д.Б. Денисов[1], З.И. Слуковский[1,2]
[1]Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН
[2]Институт геологии Карельского научного центра РАН

Исследованы диатомовые комплексы донных отложений оз. Северное (г. Мурманск). По рассчитанным индексам и экологическим характеристикам диатомовых водорослей воды озера можно охарактеризовать как пресные, с превалированием индифферентных к минерализации и значению pH видов, а также предпочитающих слабощелочную среду алкалифилов. Значение pH близко к нейтральному, по индексу сапробности воды соответствуют «чистым». Сравнение современного состояния экосистемы с фоновым указывает на радикальную перестройку диатомовых комплексов, снижение видового разнообразия диатомей в современных отложениях, а также повышение уровня pH и сапробности.

Озеро Северное — маленький естественный водоём площадью 0,009 км^2, с максимальной глубиной 3,9 м, расположенный в северной части г. Мурманск (рис. 1), вдоль автодороги Мурманск-Североморск (Слуковский и др., 2023).

Данный водоём ранее изучался в рамках комплексного исследования гидрологических, гидрохимических и гидробиологических особенностей озёр города Мурманска (Слуковский и др, 2023). Изучаемое озеро описывается как среднеминерализованное, с нейтральным уровнем pH и невысокими концентрациями биогенных элементов, содержанием органических веществ ниже средних фоновых показателей, а также с мезотрофным трофическим статусом (Слуковский и др., 2023; Postevaya et al., 2023). Несмотря на то, что озеро находится в отдалении от основной части города и не имеет прямых источников загрязнения, помимо автотранспорта, в ДО водоёма отмечаются повышенные содержания некоторых химических элементов относительно кларка. Так, превышения U и Mo обусловлены влиянием коренных пород северо-западной части Мурманской области, а именно наличием месторождений и рудопроявлений U (Слуковский и др., 2020; Слуковский и др., 2023). А антропогенное загрязнение проявляется, в том числе, в виде поступления Zn вместе с дорожной пылью при работе городского транспорта, и V в результате деятельности мазутной Мурманской ТЭЦ (Слуковский и др., 2023; Postevaya et al., 2021; Slukovskii, 2023).

В данном исследовании изучались диатомовые комплексы поверхностных ДО водоёма, отражающие современное состояние экосистемы за несколько лет, а также фоновых слоёв, что позволило сделать вывод об изменениях этого состояния. Отбор колонки ДО длиной 44 см и анализ проб выполнялись стандартными методами (Давыдова, 1985), с изменениями, описанными в (Сандимиров и др., 2019). После лабораторной обработки проб производилась таксономическая идентификация диатомовых водорослей с помощью микроскопа «Motic BA 300». Полученные данные по диатомовому составу и количественным характеристикам заносились в запатентованную базу данных «Водоросли Евро-Арктического региона» (Денисов, Косова, 2017). Таксономическая информация сверялась с актуальной, регулярно

обновляемой мировой базой водорослей (Guiry, Guiry, 2025). Все постоянные препараты и очищенный материал створок диатомовых водорослей хранятся в гербарии Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН (Боровичёв и др., 2018).

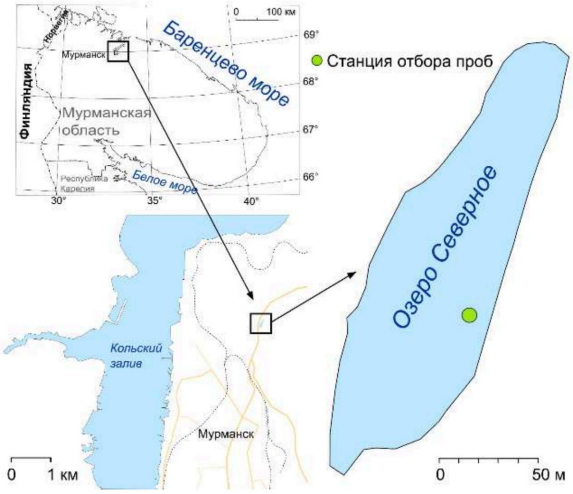


Рис. 1. Карта-схема расположения оз. Северное

Общий видовой состав для озера составил 163 вида диатомовых водорослей, принадлежащих к 53 родам. В поверхностном слое ДО доминируют пеннатные виды *Staurosira venter* (Ehrenberg) Cleve & J.D.Möller и *Fragilaria capucina* Desmazières, в качестве субдоминантов выделены виды *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kützing и *Fragilaria crotonensis* Kitton. Встречаются тератологические (уродливые) формы. В фоновых слоях ДО пеннатные доминанты сменяются единственным центрическим видом *Aulacoseira alpigena* (Grunow) Krammer. Среди субдоминантных видов выделяются пеннатные *Diploneis elliptica* (Kützing) Cleve, *Frustulia crassinervia* (Brébisson ex W.Smith) Lange-Bertalot & Krammer, *Fragilaria capucina* Desmazières, *Tabellaria flocculosa* и *Staurosira venter*.

На основе анализа экологических предпочтений выявленных диатомовых водорослей в поверхностных ДО и рассчитанных по диатомовым комплексам показателям воды озера Северное были охарактеризованы как пресные, индекс сапробности (1,23) соответствует второму классу качества вод («чистые» воды). Реконструированное по диатомовым комплексам значение pH определено как нейтральное (7,17), что близко к среднему значению pH воды озера (6,79), замеры которого проводились в течение 5 лет. Это также подтверждает распределение видов диатомей по предпочитаемому уровню pH: половина всех обнаруженных видов является алкалифилами (49%), обитающими в водах с pH около 7,5, алкалибионты же представлены в минимальном количестве (0,44%). Также в озере преобладают планктонно-бентосные и бентосные виды, что связано с его малой глубиной (3,9 м).

Анализ диатомовых комплексов слоёв ДО, отражающих фоновое состояние водоёма, и сравнение с современными сообществами показывают перестройку диатомовых комплексов, заключающуюся в смене доминантной группы *Aulacoseira*

alpigena – Diploneis elliptica – Frustulia crassinervia на *Staurosira venter – Fragilaria capucina* в поверхностном слое. В настоящее время наблюдается тенденция к повышению уровня pH и индекса сапробности: несмотря на сохраняющийся статус «чистых» вод, в фоновом слое реконструированный индекс сапробности не превышал 1, то есть воды имели статус «очень чистых». Видовое разнообразие, оцениваемое с помощью индекса Шеннона-Уивера, также заметно снизилось, с 5 до 3,8 бит/экз., что связано с подавлением видами-доминантами прочих видов.

Наблюдаемые изменения диатомовых комплексов относительно pH среды (а именно снижение доли ацидофилов и увеличение алкалифилов) и солёности (снижение доли галофобов) указывают на то, что озеро Северное ранее характеризовалось меньшей минерализацией и более кислой средой, чем в настоящее время.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках гранта № 24-17-20006.

Литература

Боровичёв Е.А., Денисов Д.Б., Корнейкова М.В., Исаева Л.Г., Разумовская А.В., Химич Ю.Р., Мелехин А.В., Косова А.Л. Гербарий ИППЭС КНЦ РАН // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. №9 (9-6). С. 179–186.

Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли — индикаторы экологических условий водоёмов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 244 с.

Денисов Д.Б., Косова А.Л. Разработка базы данных по водорослям Евро-Арктического региона // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. №6–5 (8). С. 45–52.

Сандимиров С.С., Кудрявцева Л.П., Даувальтер В.А., Денисов Д.Б., Косова А.Л., Черепанов А.А., Вандыш О.И., Валькова С.А., Терентьев П.М., Королева И.М., Зубова Е.М., Кашулин Н.А. Методы экологических исследований водоёмов Арктики. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2019. 180 с.

Слуковский З.И., Даувальтер В.А., Гузева А.В., Денисов Д.Б., Черепанов А.А. Природные и техногенные факторы в формировании геохимии современных донных отложений малых озёр г. Мурманска (Арктическая зона РФ) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. № 17. С. 510–514.

Слуковский З.И., Денисов Д.Б., Даувальтер В.А., Зубова Е.М., Мязин В.А., Гузева А.В., Черепанов А.А., Постевая М.А., Валькова С.А., Терентьев П.М., Фокина Н.В., Косова А.Л., Постнова С.В., Сошина А.С. Озёра города Мурманска: гидрологические, гидрохимические и гидробиологические особенности. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2023. 174 с.

Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, University of Galway. 2025. https://www.algaebase.org. (дата обращения: 31.01.2025).

Postevaya M.A., Slukovskii Z.I., Dauvalter V.A., Bernadskaya D.S. Estimation of Heavy Metal Concentrations in the Water of Urban Lakes in the Russian Arctic (Murmansk) // Water. 2021. 13(22). 3267.

Postevaya M.A., Dauvalter V.A., Slukovskii Z.I., Kudryavtseva L.P. Chemical composition and trophic status of urban lakes of the Arctic zone of the Russian Federation (Murmansk) // Ecohydrology. 2023. 16 (2). 11 p.

Slukovskii Z. I. Vanadium in modern sediments of urban lakes in the North of Russia: natural and anthropogenic sources // Marine Pollution Bulletin. 2023. 197.14 p.

ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATE OF THE URBAN LAKE SEVERNOYE (MURMANSK, RUSSIA) BY DIATOM ASSEMBLAGES IN SEDIMENTS

S.I. Vokueva, D.B. Denisov, Z.I. Slukovskii

Diatom assemblages of sediments of Lake Severnoye (Murmansk) have been studied. According to the calculated indices and ecological characteristics of diatoms from surface sediments, the lake water can be characterized as fresh, with a predominance of species indifferent to mineralization and pH, as well as alkaliphiles preferring a slightly alkaline environment. The pH value is approximately neutral, and the water corresponds to "pure" according to the saprobity index. A comparison of the current state of the ecosystem with the background indicates a radical restructuring of diatom assemblages, a decrease in species diversity in modern sediments, as well as an increase in pH and saprobity.

ФИТОПЛАНКТОН МАЛЫХ ОЗЕР ВАЛААМСКОГО АРХИПЕЛАГА

Е.Ю. Воякина

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербургский федеральный научный центр РАН, Российский государственный гидрометеорологический университет

В работе представлен многолетний материал по сукцессии фитопланктона, собранный на озерах Валаамского архипелага. Работа проводилась на 11 озерах о. Валаам, сохраняющих естественный режим функционирования. Озера различались по форме котловины, глубине и особенностям гидрохимического режима. Для озер был выявлен широкий диапазон ряда лимнологических параметров, таких как прозрачность, pH, цветность, электропроводность, содержание биогенных элементов. Структура фитопланктона существенно варьировала от озера к озеру. По показателям обилия в большинстве малых озер доминировали цианобактерии (по численности) и рафидофитовые (по биомассе) водоросли. В 2023-2024 гг. была изучена пространственно-временная неоднородность двух ацидных и двух нейтральных озер.

Фитопланктон озер Валаамского архипелага проводятся на протяжении последних 25 лет. За это время получена информация о структурно-функциональных характеристиках фитопланктона, изучены продукционные особенности озер, выявлены факторы среды, определяющие эти процессы.

Валаамский архипелаг расположен в северной ультропрофундальной зоне Ладожского озера, наименее подверженной влиянию вод притоков. На архипелаге расположено 10 малых лесных озер, различающихся по происхождению, морфометрии, гидрофизическим и гидрохимическим параметрам и одно проточное оз. Сисиярви.

Для оз. Сисиярви и Коневских озер основными факторами, определяющими структуру и динамику фитопланктона, были особенности температурной стратификации и прозрачность воды.

В малых озерах наибольшее влияние оказывали площадь удельного водосбора, глубина водоема, электропроводность и содержание биогенных элементов. Для ацидных озер наибольшее значение имели pH и цветность воды. Интенсивность влияния водосбора на озерные процессы менялась год от года и зависела, в том числе и от количества осадков (Воякина, 2017; Воякина, 2021).

В целом для водоемов Валаамского архипелага численность изменялась от 0.1 до 676.6 млн кл/л, биомасса от 0.1 до 82.3 мг/л. Внутри разных зон водной системы диапазон структурных показателей различался. По показателям обилия в большинстве малых озер доминировали цианобактерии (по численности) и рафидофитовые (по биомассе) водоросли. В ацидных полигумусных озерах было отмечено упрощение структуры фитопланктона. В них в течение всего сезона активно вегетировали представители отдела зеленых водорослей. Несмотря на то, что озера о. Валаам расположены на очень небольшой территории, таксономическая структура, численность, биомасса, а также сезонная динамика водорослей варьировала значительно как от озера к озеру, так и год от года.

В большинстве озер доминировали виды: *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs ex Born. et Flah., *Planktolyngbya limnetica* (Lemmerm.) Komark.-Legn. & Cronberg, *Gonyostomum semen* (Ehr.) Diesing. В ацидных озерах активно вегетировали виды рода *Cryptomonas* Ehr., а также *Elakatothrix genevensis* (Reverd.) Hind., *Oocystis lacustris* Chod. (Воякина, 2021).

Для фитопланктона Коневских озерах характерно высокое разнообразие таксономической структуры. Число встреченных таксонов варьировало от 80 (оз. Черное) до 127 (оз. Игуменское). Как и в большинстве озер Валаамского архипелага, здесь по численности в течение большей части сезона здесь доминировали цианобактерии. По биомассе доминировали рафидофитовые водоросли, они в среднем создавали до 36 % от общей биомассы. Чаще всего рафидофитовые водоросли достигали максимальных биомасс осенью. Хотя в разные годы наряду с этой группой водорослей и другие группы, такие как: криптофитовые, золотистые и динофитовые, достигали высоких значений по численности и биомассе (Воякина, 2017; Воякина, 2021).

Озера Игуменское и Черное имеют большее сходство по уровню количественного развития, по характеру сезонной динамики фитопланктона, а также доминированию определенных видов. Здесь в летний период были обычны в планктоне цианобактерии, они формировали один летний или осенний пик. В то время как, в олигоацидном водоеме Оссиево в разные годы доминировали различные группы водорослей (золотистые, диатомеи, цианобактерии и зеленые водоросли).

По показателям обилия озера Черное и Игуменское также были сходны. Среднемноголетние значения биомассы в этих водоемах отличались незначительно (6.0 мг/л - в оз. Черное, 6.3 мг/л - в оз. Игуменское). В тоже время в оз. Оссиево биомасса фитопланктона была выше практически в два раза (15.4 мг/л). Основной вклад в показатели обилия вносили виды: *Aphanizomenon flos-aquae*, *Planktolyngbya limnetica*, *Gonyostomum semen, Cryptomonas curvata* Ehr.

В 2023 – 2024 гг. наибольшее внимание было уделено изучению пространственно-временной структуры фитопланктона двух ацидных и двух нейтральных озер. Было показано, что самые низкие показатели pH наблюдались в озерах Антониевское и Германовское. В 2023 - 2024 гг. средние за сезон значения pH в оз. Антониевское было 6.1, в оз. Германовское – 5.4. Минимальные значения pH были характерны в июне 2023 г. (5.0). В озерах Никоновское и Крестовое среднее за период исследования значения pH были 6.6. Наиболее высокий показатель pH 7.0 был отмечен в июле 2023 г. в оз. Никоновское.

В Германовском озере число видов и разновидностей водорослей было невысоким (86). Показатели обилия в 2023 - 2024 гг. были минимальными: численность фитопланктона варьировала в диапазоне от 0.6 до 1.1 млн кл/л (среднее значение – 0.7 млн кл/л), биомасса колебалась от 0.16 до 0.43 мг/л (среднее значение - 0.26 мг/л). Высокие значения численности и биомассы были характерны для прибрежных станций. Основными доминирующими видами были виды рода *Cryptomonas, Komma caudata*

(L.Geitler) D.R.A.Hill, *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kütz., *Coenococcus planctonicus* Korsh., *Oocystis lacustris.*

В Антониевском озере число таксонов водорослей рангом ниже рода было минимальным (77). Показатели обилия варьировали значительно; численность - от 0.9 до 28.9 млн кл/л, а биомасса — от 0.62 до 7.52 мг/л. Средние показатели за 2023 – 2024 гг. были 15.2 млн кл/л и 2.46 мг/л соответственно. Максимальные значения отмечались на мониторинговых станциях. Доминировали виды *Merismopedia tenuissima* Lemm. и *Gonyostomum semen.*

В Никоновском озере за период исследования было идентифицировано 84 таксона рангом ниже рода. Численность фитопланктона варьировала от 0.8 до 16.6 млн кл/л, биомасса - от 3.01 — 7.92 мг/л. Средний показатель численности за весь сезон равен 7.3 млн кл/л, а биомассы — 4.21 мг/л. На видовом уровне превалировали виды *Aphanizomenon flos-aquae, Aulacoseira italica (Ehr.) Sim., Gonyostomum semen.*

В Крестовом озере было обнаружено 107 видов и разновидностей водорослей. Численность варьировала в диапазоне 1.4 — 12.0 млн кл/л, а у биомассы был диапазон значений 0.41 — 4.34 мг/л, средний показатель численности за весь исследуемый период равен 4.3 млн кл/л, а биомассы — 1.5 мг/л. В планктоне активно вегетировали *Aphanizomenon flos-aquae, Merismopedia tenuissima, Gonyostomum semen.*

За период исследования концентрация хлорофилла-*a* варьировала в во всех озерах в широком диапазоне (от 0.87 до 109.2 мкг/л), среднемноголетнее значение было 25.0 мкг/л. Минимальные значения хлорофилла-*a* были отмечены в полиацидном оз. Германовское, максимальное – в оз. Витальевское.

В итоге проведенного исследования, на основании полученных данных, можно сделать вывод о том, что с увеличением ацидности озер происходит снижение биоразнообразия и увеличение видов, адаптированных к низким pH, содержанию легкоусвояемого органического вещества и солей.

Литература

Воякина Е.Ю. Особенности продукционных процессов в озерах о. Валаам // Труды Зоологического института РАН. 2017. Т. 321. №1. С. 10-18.

Воякина Е.Ю. Сукцессия фитопланктона озер Валаамского архипелага // Вопросы современной альгологии. 2021. №2. С. 24–28.

PHYTOPLANKTON OF SMALL LAKES OF THE VALAAM ARCHIPELAGO

E.Ju. Voyakina

The paper presents long-term material on the succession of phytoplankton collected on the lakes of the Valaam archipelago. The work was carried out on 11 lakes about Valaam archipelago, maintaining a natural mode of functioning. The lakes differed in the shape of the basin, depth, and features of the hydrochemical regime. For lakes, a wide range of limnological parameters was revealed, such as transparency, pH, water color, conductivity, the content of nutrients. The phytoplankton structure varied significantly from lake to lake. In terms of abundance in most small lakes, cyanobacteria (in abundance) and rafidophyte (in biomass) algae dominated. In 2023 -2024 was studied spatio-temporal structure two acidic and two neutral lakes.

РОЛЬ ВИДОВ-ВСЕЛЕНЦЕВ В ЗООПЛАНКТОНЕ ЗАРОСЛЕЙ МАКРОФИТОВ ОЗЁР И ПРУДОВ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Д.Е. Гаврилко, В.С. Жихарев, Т.В. Золотарева, В.А. Бубнов, А.Ю. Сарапкин
Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Изучено распространение и обилие чужеродных видов в зоопланктоне зарослей макрофитов озёр и прудов Нижегородской области. Выявлено три вида-вселенца – коловратки *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908), *Mytilina acanthophora* Hauer, 1938 и веслоногий рачок *Eurytemora velox* (Lilljeborg, 1853). Показано, что наиболее распространенным видом-вселенцем в зарослях макрофитов является *K. bostoniensis*. Обитание *K. bostoniensis* в зарослях разнотипных озёр и прудов подтверждает её высокую экологическую пластичность.

В последние годы усиливаются процессы расселения чужеродных видов в пресноводных экосистемах Европейской России. Главным транспортным коридором для вселенцев принято считать каскад Волжских водохранилищ, по которому северные виды проникают на юг, а южные на север (Лазарева, 2014; 2019). В озёра планктонные виды-вселенцы попадают, в основном, с перелетными птицами. К таким вселенцам относится североамериканская коловратка *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908), обитающая в разнотипных по гидрологии и трофическому статусу озёрах Нижегородской области (Золотарева и др., 2021; 2022). Большинство находок чужеродных видов зоопланктона было сделано в пелагиали озёр и медиали рек. Исследованиям видов-вселенцев в зарослях высших водных растений по-прежнему уделяется мало внимания при проведении гидробиологических работ. Поэтому целью исследования была оценка роли видов-вселенцев в зоопланктоне зарослей макрофитов озёр и прудов Нижегородской области.

Материалом для работы послужили пробы зоопланктона, собранные с 2019 по 2024 гг. в 38 озёрах и 3 прудах Нижегородской области, преимущественно в летний период (июль-август). Исследованиями были охвачены озёра, расположенные на территории ГПБЗ «Керженский», озёра – памятники природы Нижегородской области, озёра и пруды, расположенные в черте г. Нижний Новгород. Пробы зоопланктона в зарослях макрофитов отбирали мерным ведром, путём процеживания через планктонную сеть (диаметр ячеи 70 мкм) 25-50 л воды. Отобранные пробы фиксировали 40%-м формалином. Обработку проб осуществляли общепринятыми в практике гидробиологических исследований методами (Методы …, 2024). Идентификацию организмов зоопланктона проводили с использованием определителей (Определитель …, 2010, Коровчинский и др., 2021).

По результатам исследований в зоопланктоне зарослей макрофитов было идентифицировано три вида-вселенца – североамериканская коловратка *K. bostoniensis*, пантропическая коловратка *Mytilina acanthophora* Hauer, 1938 и солоноватоводный веслоногий рачок *Eurytemora velox* (Lilljeborg, 1853). Наиболее обширное распространение в зарослях макрофитов исследованных водных объектах имела коловратка *K. bostoniensis.* Она была обнаружена в 10 озёрах и 2 прудовых расширениях малых водотоков. Коловратка обитала как в городских озёрах, так и в озёрах ООПТ. *K. bostoniensis* была встречена в зарослях погружённых макрофитов (элодея канадская, уруть мутовчатая, пузырчатка обыкновенная), растений с плавающими на поверхности воды листьями (кубышка жёлтая, кувшинка чисто-белая, рдест плавающий, белокрыльник обыкновенный, осока) и гелофитах (хвощ приречный, тростник

обыкновенный, частуха подорожниковая, стрелолист обычновенный, Минимальная численность *K. bostoniensis* наблюдалась в зарослях осоки оз. Жарёнское – 0.002 тыс. экз./м^3. Максимальная численность была зафиксирована в зарослях частухи и рдеста плавающего оз. Малое Круглое – 152.0 тыс. экз./м^3. Наибольшая доля *K. bostoniensis* от общей численности коловраток наблюдалась в зарослях макрофитов пойменных озёр Керженского заповедника – 28.2-41.3%. Минимальной доли от численности коловраток она достигала в зарослях частухи оз. Круглое – 0.0002%.

Пантропическая коловратка *M. acanthophora* была обнаружена в зарослях роголистника погруженного оз. Больничное и зарослях телореза обыкновенного пруда на р. Черная, расположенных на территории г. Нижний Новгород. В зарослях роголистника её численность достигала 0,08 тыс. экз./м^3, а в зарослях телореза – 10,0 тыс. экз./м^3. Стоит отметить, что данные водные объекты относятся к сильно эвтрофированным, что, по-видимому, способствует обитанию этого вида в данных зарослях.

Веслоногий рачок *E. velox* также был встречен только в водоёмах г. Нижний Новгород: озере Парковое и прудовом участке Шуваловского канала. В озере его максимальная численность достигала 9.6 тыс. экз./м^3 в зарослях тростника, в Шуваловском канале – 40.0 тыс. экз./м^3 в зарослях урути. Повышенная численность *E. velox* в пруду Шуваловского канала может объясняться повышенной минерализацией его вод (до 720 мг/л).

Проведенные исследования показали, что наиболее распространённым чужеродным видом в зарослях макрофитов исследованных озёр и прудов была коловратка *K. bostoniensis*. Её обилие сильно варьировало среди зарослей различных видов макрофитов. Обитание *K. bostoniensis* в зарослях разнотипных озёр и прудов подтверждает её высокую экологическую пластичность. Находки видов-вселенцев демонстрируют необходимость продолжения исследований зоопланктона зарослей озёрных и других водных экосистем.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-74-00016, https://rscf.ru/project/24-74-00016/.

Литература

Золотарева Т.В., Шурганова Г.В., Кудрин И.А., Гаврилко Д.Е., Жихарев В.С., Колесников А.А., Ильин М.Ю. Морфологические характеристики *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) в водных объектах бассейна Средней Волги // Поволжский экологический журнал. 2021. №1. С. 16-34.

Золотарева Т.В., Гаврилко Д.Е., Жихарев В.С., Обедиентова Е.С., Шурганова Г.В. Сезонная динамика вида-вселенца *Kellicottia bostoniensis* (Rotifera: Brachionidae) в городских озерах // Биология внутренних вод. 2022. № 5. С. 512-519.

Лазарева В.И. Потепление климата и его влияние на зоопланктон водохранилищ Волги // Экологический мониторинг. Ч. VIII. Современные проблемы мониторинга пресноводных экосистем. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. С. 207-236.

Лазарева В.И. Расселение чужеродных Понто-Каспийских видов зоопланктона в водохранилищах Волги и Камы // Российский журнал биологических инвазий. 2019. Т. 12. №3. С. 29-52.

Методы гидробиологических исследований внутренних вод. Ярославль: Филигрань, 2024. 592 с.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон. М.: Т-во научных изданий КМК, 2010. 495 с.

Коровчинский Н.М., Котов А.А., Синёв А.Ю., Неретина А.Н., Гарибян П.Г. Ветвистоусые ракообразные (Crustacea: Cladocera) Северной Евразии. Т. II. М.: Т-во научных изданий КМК, 2021. 544 с.

THE ROLE OF INVASIVE SPECIES IN THE ZOOPLANKTON OF MACROPHYTE THICKETS OF LAKES AND PONDS IN THE NIZHNY NOVGOROD REGION

D.E. Gavrilko, V.S. Zhikharev, T.V. Zolotareva, V.A. Bubnov, A.Yu. Sarapkin

The distribution and abundance of alien species in the zooplankton of macrophyte thickets of lakes and ponds in the Nizhny Novgorod region were studied. Three invasive species were identified: rotifers *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908), *Mytilina acanthophora* Hauer, 1938 and copepods *Eurytemora velox* (Lilljeborg, 1853). *K. bostoniensis* was shown to be the most common invasive species in macrophyte thickets. Habitat of *K. bostoniensis* in thickets of different types of lakes and ponds confirms its high ecological plasticity.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЯПУШКИ В ОЗЕРЕ ПЛЕЩЕЕВО ПО ДАННЫМ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ В ВЕСЕННЕ-ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2024 Г.

Ю.В. Герасимов[1], Э.С. Борисенко[2], А.И. Цветков[1]
[1]Институт биологии внутренних вод РАН
[2]Институт проблем экологии и эволюции РАН

Озеро Плещеево с глубинами до 24 м стратифицировано. В мае еще наблюдается гомотермия, летом с прогревом воды наблюдается классическое развитие термоклина. В конце июля на глубине 7–9 м устанавливается термоклин. Населяющий озеро холодноводный вид рыб – ряпушка *Coregonus albula* (Linnaeus, 1758) в период появления термоклина концентрируется в гиполимнионе при температуре 7-8°С. Весной ряпушка в количестве от 2311.5 до 2658.6 тыс. экз. регистрировалась на глубинах более 12 м. Осенью скопления ряпушки регистрировались под термоклинном на глубинах от 9 до 20 м, с разделением на два отдельных слоя с численностью более 3400 тыс. экз., включая молодь ряпушки около – 1100 тыс. экз.

Гидроакустические исследования на акватории оз. Плещеево проводили в темное время суток весенне-летнего периода 14-15.05. и 13-14.08.2024 с моторной лодки. Эхометрические съемки выполняли с использованием двухчастотного научно-исследовательского комплекса «PanCor-2» (производства ООО «ПромГидроакустика», Россия) в режиме вертикального зондирования водной среды. Комплекс включает в себя: научно-исследовательский эхолот с рабочими частотами 50/200 кГц и диаграммами направленности шириной – 14° для 200 КГц и 46° для 50 КГц и серийного спутникового навигационного приемника системы GPS. Для определения размерного состава рыб в скоплениях ряпушки по данным гидроакустических измерений применяли уравнение силы цели европейской ряпушки (Mehner, 2006): TS = 25.5× log10TL – 70.9, где TS – величина силы цели, дБ; TL – длина рыбы до конца хвостового плавника, см. Для таксономической идентификации рыб на уровне семейств по гидроакустическим данным, использовалась специальная программа, основанная на измерениях огибающей амплитуды отраженных эхосигналов с учетом особенностей формы плавательных пузырей этих рыб и их статистического анализа.

Гидроакустические съемки выполняли в соответствии с современными руководствами (Parker-Stetter et al., 2009) по стандартной методике, а обработку и представления полученных результатов с использованием современных геоинформационных продуктов «MapInfo Pro», «MapViewer» и «Surfer 15».

В 2017 г. в озере Плещеево впервые массового развития *Gloeotrichia echinulata* (Smith et Sowebry) Richter. До этого, наиболее обильными из синезеленых водорослей, вызывавших цветение озера, были водоросли из рода *Anabaena*, которые не создавали помех при проведении гидроакустических съемок. Крупные колонии *G. echinulata,* в клетках которых присутствуют газовые вакуоли (полости в протоплазме, наполненные азотом), которые обеспечивают плавучесть этих цианобактерий, при проведении гидроакустической съемки в августе 2024 г. создавали помехи. Отраженный от их скоплений сигнал имитировал сигнал, отражаемый от ранней молоди рыб. Выделить сигналы от рыб удалось с использованием программы таксономической идентификации, которая при обработке эхограмм сигналы от *G. echinulata* определяла как сигналы от не идентифицированных объектов.

Распределение ряпушки в мае. Скопления ряпушки имели разреженный характер с центрами повышенных плотностей – отмечено 3 участка акватории с максимальными плотностями скоплений в этих центрах: около 1000 экз./га, более 2000 экз./га и более 4000 экз./га (рис.1а). В мае скопления ряпушки наблюдали над глубинами более 8 м. Подавляющее большинство рыб было сконцентрировано на глубинах более 12 м. Наиболее плотные скопления были приурочены к слоям воды от 16 м до 20 м с максимумом на 18 м (hис. 2). Доминирующий размер рыб в слое воды от 8 м до дна составил около 18 см (рис. 3а).

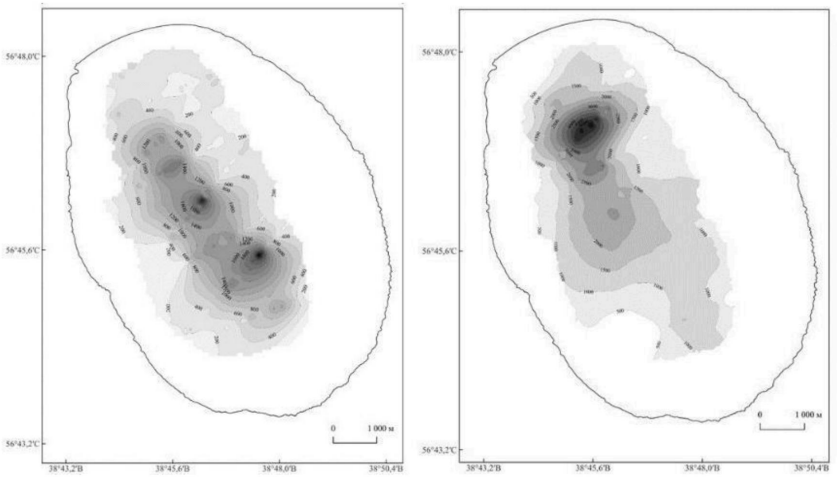
В этот период на эхограммах в скоплениях ряпушки не наблюдались посторонние включения в эхосигналах от рыб, поэтому была получена наиболее достоверная оценка численности ряпушки – от 2311.5 до 2658.6 тыс. экз.

По данным таксономической идентификации рыб в скоплениях ряпушки регистрировали карповых и окуневых рыб: карповые (7.9%) и окуневые (4.9%), при этом ряпушка составляла более 87%. Следует отметить, что доля не идентифицированных рыб было очень незначительно и не превышало 0,1%.

Наиболее плотные скопления рыб были характерны только для ряпушки, тогда как другие виды рыб не образовывали даже небольших стай.

В весенний период наличие неоднородностей водной среды с глеотрихией на эхограммах обнаружено не было.

Распределение ряпушки в августе. Пространственное распределение ряпушки в летний период характеризовалось более компактным их размещением в озере – площадь акватории, занимаемая ряпушкой, составила 3068,5 га (рис.1б), а средняя плотность скоплений увеличилась более чем в два раза до 1356 экз./га. Наибольшие по плотности скопления ряпушки находились в северо-восточной части озера с одним центром концентрации и максимальными плотностями более 9600 экз./га. Скопления ряпушки регистрировались на глубинах от 9 до 20 м, с разделением на два отдельных слоя большой горизонтальной протяженности (рис. 4). Скопление ряпушки в верхнем слое воды на границе с металимнионом на глубинах от 9 до 11 м в основном состояло из мелких рыб (по данным таксономического анализа – сеголетки ряпушки) с размерами от 4 до 6 см (3б). В этом слое также регистрировались карповые и окуневые виды рыб. Размерный состав ряпушки нижнего слоя (от 11 до 20 м) отличался более крупными размерами рыб от 10 до 16 см и доминирующей длиной тела 12.5 см (3в).



а б

Рис. 1. Пространственное распределение ряпушки в акватории озера а) в мае, б) в августе 2024 г.

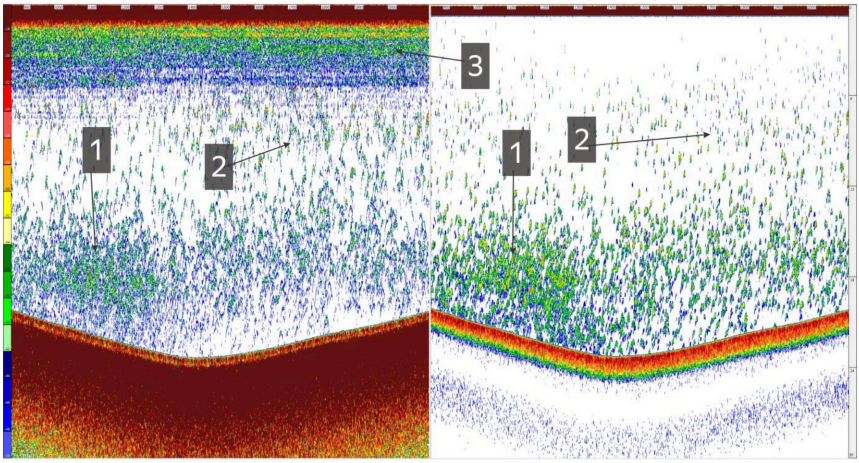


Рис. 2. Характерная эхограмма регистрации скоплений рыб в акватории озера в весенний период (15.05.2024): 1 – скопления ряпушки; 2 – разреженные скопления карповых и окуневых; 3 – приповерхностные звукорассеивающие слои

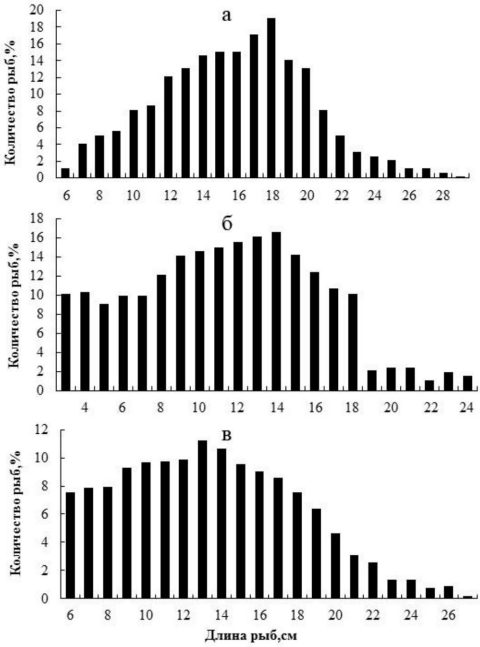


Рис. 3. Размерный состав рыб озера Плещеево: а) на глубинах от 8 м до дна в мае; б) на глубинах от 8 до 12 м в августе; в) на глубинах от 12 м до дна

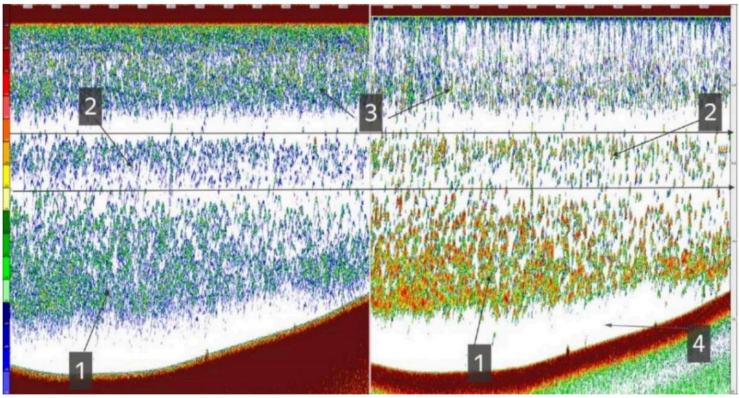


Рис. 4. Характерная эхограмма регистрации скоплений ряпушки и приповерхностных звукорассеивающих слоев воды, включая скопления разных видов рыб: 1 ряпушка старших размерных групп; 2 – скопления мелкоразмерной ряпушки (сеголетки); 3 – приповерхностные скопления рыб в слое с глеотрихией; 4 – зона без эхометок от рыб – сформировавшаяся бескислородная придонная зона

В отличие от весеннего распределения, в акватории озера появилось большое количество неоднородностей водной среды, состоящих скоплений глеотрихии, что существенно затрудняет выделение рыбных объектов при обработке эхосигналов от скоплений рыб разной плотности (рис. 3). В приповерхностных слоях воды и до глубины 9 м регистрируются слои неоднородностей высокой плотности.

Численность ряпушки в августе составила более 3400 тыс. экз., включая мелкоразмерную ряпушку (молодь, сеголетки). Исходя из результатов весенней съемки, где численность ряпушки насчитывалась более 2300 тыс. экз. можно оценить долю молоди ряпушки, которая составила более 1100 тыс. экз.

В результате таксономического анализа видно, что в этом слое преимущественно находятся сиговые рыбы (ряпушка 84.7%), а также окуневые (12.9%) и карповые (2.4%). При обработке всего массива данных летней съемки выявлено, что кроме основных видов рыб в слоях воды, в которых доминирующим видом является ряпушка – более 72%, регистрируются также неоднородности водной среды с глеотрихией в виде не идентифицированных объектов – более 10%.

По мере развития термоклина в озере начинается развитие гипоксии в придонных слоях, что связано с процессами деструкции органического вещества, поставляемого массово отмирающими цианобактериями. Оксиклин находится на глубинах 14 м с тенденцией уменьшения содержания кислорода с глубиной до полного отсутствия у дна (рис 4). На рисунке 4 хорошо видна белая придонная область с полным отсутствием эхометок (обозначена цифрой 4) высотой 5 м от дна, это придонная зона развития гипоксии не посещаемая рыбами, которая в сентябре может достигнуть высоты 10 м от дна.

Литература

Mehner T. Prediction of hydroacoustic target strength of vendace (Coregonus albula) from concurrent trawl catches // Fish. Res. 2006. 79. P. 162-169.

Parker-Stetter S.L., Rudstam L.G., Sullivan P.J., Warner D.M. Standard operating procedures for fisheries acoustic surveys in the Great Lakes // Great Lakes Fish. Comm. 2009. Spec. Pub. 170 p.

DISTRIBUTION OF VENDACE IN LAKE PLESHCHEEVO ACCORDING TO HYDROACOUSTIC SURVEY DATA IN THE SPRING-SUMMER PERIOD OF 2024

Yu.V. Gerasimov, E.S. Borisenko, A.I. Tsvetkov

Lake Pleshcheevo with depths up to 24 m is stratified. In May, homothermy is still observed; in summer, with the warming of the water, the classical development of the thermocline occurs. At the end of July, a thermocline is established at a depth of 7-9 m. The cold-water fish species inhabiting the lake, the vendace *Coregonus albula* (Linnaeus, 1758), concentrates in the hypolimnion at a temperature of 7-8ºC during the period of the thermocline. In spring, vendace with the abundance ranging from 2311.5 to 2658.6 thousand specimens were recorded at depths of more than 12 m. In autumn, aggregations of vendace were recorded under the thermocline at depths from 9 to 20 m, with separation into two particular layers with abundance of more than 3400 thousand specimens, including juvenile vendace, 1100 thousand specimens.

ВЕРТИКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА МИКРОБНОГО ПЛАНКТОНА В НЕБОЛЬШОМ ВЫСОКОГУМОЗНОМ ОЗЕРЕ

М.Ю. Горбунов[1], М.В. Уманская[1], Е.С. Краснова[1], Е.Н. Унковская[2]
[1]*Институт экологии Волжского бассейна РАН*
[2]*Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник*

С помощью метабаркодинга V4-фрагмента малой субъединицы рРНК про- и эукариот исследован состав микробного планктона на разных горизонтах стратифицированного высокогумозного озера Гнилое (Волжско-Камский заповедник (ВКГЗ), Татарстан, Россия). Обнаружена сильная вертикальная гетерогенность структуры сообществ планктонных прокариот и простейших. Максимум фототрофных прокариот в металимнионе образован единственным ОТЕ *Chlorobium*; прочие аноксигенные фототрофы малочисленны. Более половины последовательностей простейших в поверхностном слое принадлежат рафидофиту *Gonyostomum semen*; в нижележащих слоях его сменяют различные Chlorophyta. Вклад инфузорий в планктонное сообщество озера необычно низок. Структура планктона озера значительно отличается от ранее исследованного близлежащего оз. Линево, и позволяет ожидать значительного b-разнообразия во всей группе гумозных озер ВКГЗ.

Цветность озер, определяющаяся концентрацией в их воде окрашенного органического вещества (гуминовых соединений), оказывает большое влияние на гидрологический и гидрохимический режим водоемов и вертикальную структуру их планктона. Основным источником гуминовых соединений в озерах является микробная декомпозиция растительного органического вещества на их водосборных территориях. Темноводные озера с высокой цветностью воды широко распространены в бореальной зоне северного полушария. Из-за поглощения большей части солнечной энергии в УФ и синей области спекра в поверхностном слое воды они, при достаточной глубине, сильно термически стратифицированы, причем стратификация в них обычно сопровождается формированием анаэробных условий в гиполимнионе (Arvola et al., 1992; Salonen et al., 1984; Steinberg, 2004). Кроме того, гуминовые соединения влияют на кислотно-основную и окислительно-восстановительную емкость водной среды; они являются комплексонами двух- и трехвалентных катионов, в частности, железа и марганца.

Вблизи Казани, на территории Раифского участка Волжско-Камского заповедника в Татарстане, имеется несколько своеобразных темноводных озер, в которых мы, начиная с 2006 г., исследовали вертикальную структуру планктона (Уманская и др., 2007). В 2022 г., кроме исследований «классическими» методами, в нескольких озерах были отобраны пробы для определения филогенетического состава планктонных про- и микроэукариот с помощью метабаркодинга участка V4 гена малой субъединицы рРНК. Данный доклад посвящен результатам исследования одного из таких озер, озера Гнилого.

Озеро Гнилое расположено на северной границе Раифского участка Волжско-Камского заповедника, вблизи с. Бело-Безводное; оно имеет овальную форму размерами 200x60 м, площадь водного зеркала около 0,8-0,9 га и максимальную глубиной 5,6 м. Озеро со всех сторон окружено сплавиной шириной 20-50 м. Вода озера имеет высокую цветность, около 400 °Pt, низкоминерализована. Электропроводность в поверхностном слое в 2001-2015 гг. составляла ~25 мкСм/см (Унковская и др., 2016), а в июле 2022 г. – 42 мкСм/см, по нашим данным. Как и большинство других озер заповедника, в летний период озеро стратифицировано; мощность эпилимниона достигает лишь 1-1,5 м, а в безветренную погоду поверхностный изотермический слой может полностью

отстутствовать из-за образования мощного поверхностного термоклина. Водные слои ниже 1,5 м полностью лишены кислорода. Преобладающим восстановителем в гиполимнионе является железо; его концентрация в придонном слое может достигать 10-11 мг/л (~0,2 mM), при этом концентрация сульфидов составляет лишь около 10 мкМ. Содержание форм азота и фосфора сильно увеличивается в придонном слое (Унковская и др., 2024).

Пробы для определения филогенетического состава микроорганизмов с помощью метабаркодинга участка V4 гена малой субъединицы рРНК были отобраны на шести горизонтах, обозначенных звездочками на рис.1. Высокопроизводительное секвенироование было проведено фирмой Sintol (Москва) на приборе Miseq (Illumina). Обработка первичных данных производилась в программе USEARCH (Edgar, 2013); таксономия полученных OTE была присвоена с помощью алгоритма SINTAX с использованием баз данных SBDI (Lundin, Andersson, 2021) для прокариот и PR2 v.4.14 (Guillou et al., 2013) для простейших и хлоропластов.

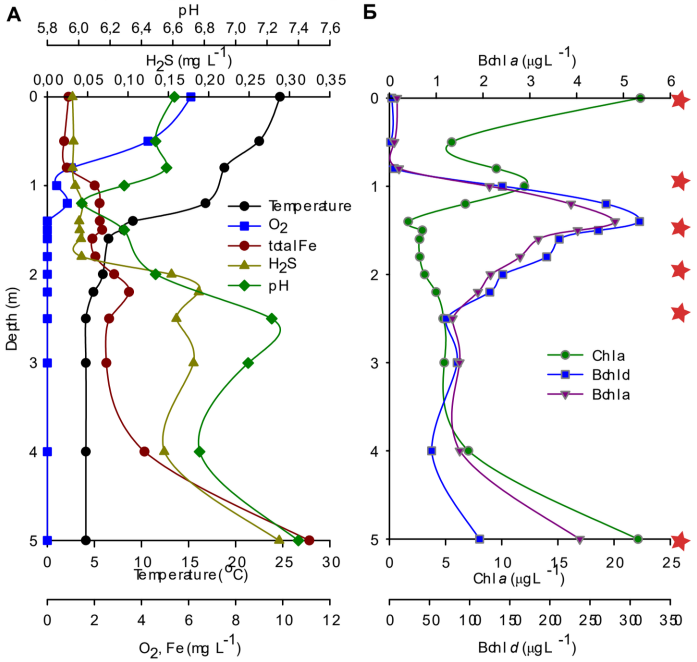


Рис. 1. Вертикальная структура физико-химических характеристик (А) и концентраций фотосинтетических пигментов (Б) в июле 2022 г.

В июле 2022 г. резкий термоклин в озере был расположен в диапазоне глубин 1,2-1,5 м; уже в термоклине растворенный кислород исчерпывался, и появлялись восстановленное железо (с 1 м) и сульфиды (ниже 1,5 м). pH в озере был околонейтральным, его минимальная величина (6,02) была зарегистрирована на глубине 1,2 м, а наибольшая (7,4) – в придонном слое (рис. 1А). Концентрация хлорофилла (Хл) *a* в поверхностном слое составляла более 20 мкг/л; на глубине 1 м наблюдался его «глубоководный» максимум; еще один максимум, сравнимый с поверхностным, регистрировался в придонном слое, вероятно, из-за седиментации фитопланктона.

Концентрации пигментов аноксигенных фототрофных бактерий достигали максимума на глубине 1,4 м, в нижней части термоклина. Расчетная интегральная концентрация бактериохлорофилла (Бхл) *d* в столбе воды была в 12 раз выше, чем Хл *a*. Концентрация Бхл *a* всюду, кроме эпилимниона, была более чем в 100 раз ниже Бхл *d*, что указывает на отсутствие существенных популяций пурпурных серных бактерий (рис. 1Б).

Результаты метабаркодинга показывают сильную вертикальную гетерогенность сообществ как прокариот, так и простейших (рис. 2). Так, в поверхностном слое среди бактерий доминируют Acidobacteriota, а в металимнионе (1,5 и 2 м) – Chlorobiota. На остальных горизонтах преобладают протеобактерии. В число доминантов входят также Chloroflexota, представленные почти исключительно гетеротрофными OTE. Их доля всюду превышает 5%, а с учетом Dormibacterota (=Chloroflexota: AD3 согласно классификатору Silva, или Chloroflexota: Dormibacteria в таксономии GTDB v.2.20) – более 10%.

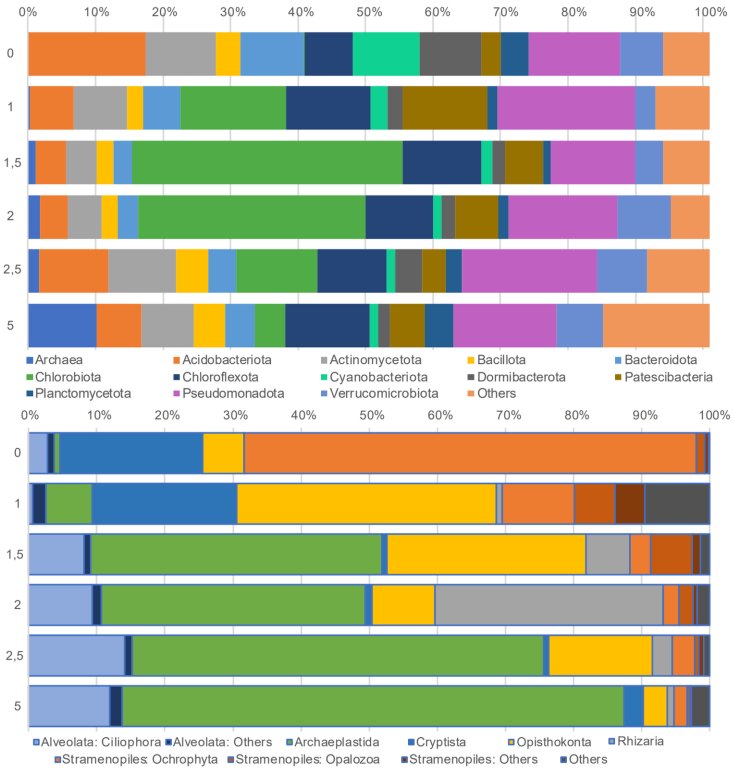


Рис. 2. Таксономическая структура сообществ прокариот (сверху) и простейших (снизу) на разных горизонтах озера по вкладу в общее число ридов

Цианобактерии составляют чуть менее 10% последовательностей в поверхностном слое и <2,5% во всех нижележащих слоях. Actinomycetota принадлежит

от 4,5 до 10,2% последовательностей, Verrucomicrobiota 3-8% с минимумом в области 1-1,5 м. Bacteroidota, исключая Chlorobia, довольно немногочисленны, 9% в поверхностном слое и <5% ниже 1 м. Надо отметить, кроме того, высокий вклад Patescibacteria (12% на глубине 1 м и 3-5% в нижележащих слоях) и Archaea (10% в придонном слое), представленных почти исключительно метаногенами из филума Halobacteriota.

Значительное развитие Dormibacteria и Patescibacteria в планктоне необычно. Дормибактерии были описаны как группа с атмосферным питанием из бедных почв. Patescibacteria (CPR, Candidate Phyla Radiation) более характерны для экстремальных и анаэробных местообитаний, и их относительные численности в планктоне озер редко превышают 1%. В оз. Гнилое среди них доминируют Paceibacteria, которые некоторые из которых известны как паразиты метаногенных архей; однако доминирующие OTE в оз. Гнилое достигают максимумов на горизонтах, где археи практически отстутсвуют.

В составе простейших, в поверхностном слое доминирует единственный OTE, определяемый как *Gonyostomum semen* (Ochrophyta: Raphydophyceae); в нижележащих горизонтах его вклад резко снижается. Около 20% последовательностей на горизонтах 0 и 1 м принадлежит фототрофным криптофитам; доминирующие OTE принадлежат к разным видам р. Cryptomonas, вероятно, *C. curvata, C. marssonii* и *C. phaseolis*. Представители Pyrenomonadaceae и гетеротрофные Cryptista в озере единичны. Начиная с 1,5 м среди обнаруженных последовательностей начинают доминировать Chlorophyta; на всех горизонтах, кроме 2 м, доминирует *Microglena monadina* (Chlamydomonadales); на 2 м – неидентифицированный празинофит с 92% сходством как с *Nephroselmis* spp., так и с *Pseudoscourfieldia*; и, наконец, на третьем месте идет *Lemmermannia* sp. (Trebouxiophyceae), второй доминант после *M. monadina* на глубине 1 м. Вероятно, *M. monadina* активно развивался или развивается именно на глубинах 1-1,5 м, а его доминирование ниже может быть связано либо с миграцией для получения биогенных элементов, либо с оседанием уже отмерших клеток.

Вклад инфузорий в структуру эукариотического планктона необычно мал, особенно на горизонте 1 м. В поверхностном слое среди них преобладают *Halteria* sp. и неопределенная до рода стромбидиида (по 1% последовательностей); ниже 1 м доминирование переходит к анаэробным инфузориям (Armophorea): *Atopospira galeata* = *Brachonella galeata* на 1,5 м; она же и неопределенный вид на 2 м, *Caenomorpha medusula* на 2,5 м и *Metopus aff. laminatus* в придонном слое. Из других гетеротрофов необходимо отметить доминирование грибов (Opistoconta: Fungi) в металимнионе и ризарий на глубине 2 м.

Сравнение полученных в оз. Гнилое данных с ранее исследованным, близко расположенным оз. Линево, показывает, что несмотря на сходство вертикальной стратификации в двух этих водоемах, структуры их микробных сообществ заметно различаются. Так, оз. Линево характеризуется доминированием Chloroflexia в составе аноксигенных фототрофных бактерий, а также высоким разнообразием как Chloroflexia, так и Chlorobia. В отличие от этого, в оз. Гнилое разнообразие этих групп значительно ниже, и они на 99% представлены единственным OTE Chlorobiales. Различия в составе гетеротрофного бактериопланктона почти столь же существенны.

Это позволяет ожидать, что высокое бета-разнообразие планктонных микробных сообществ, является характерной чертой всей группы высокогумозных озер Волжско-Камского заповедника, несмотря на их топографическую близость.

Литература

Горбунов М.Ю., Уманская М.В. Состав и вертикальная структура прокариотического планктона в голомиктическом высокогумозном озере Линево (Татарстан, Россия) // LXXVII Герценовские чтения. География: развитие науки и образования: Матер. Межд. научно-практической конф. Т. I. Спб: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2024. С. 239–243.

Уманская М.В., Горбунов М.Ю., Унковская Е.Н. Бактериопланктон озер Раифы (Татарстан, Россия) // Изв/ Самарского научного центра РАН. 2007. Т. 9, №4. С. 987–995.

Уманская М.В., Краснова Е.С., Горбунов М.Ю. Экологическое состояние стратифицированных гумозных озер Волжско-Камского государственного биосферного заповедника // LXXVII Герценовские чтения. География: развитие науки и образования: Матер. Межд. научно-практической конф. Т. I. СПб: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2024. С. 333–337.

Унковская Е.Н., Косова М. В., Шурмина Н.В., Мухаметзянова Ф.М., Игнатьев Ю.А. Гидрохимическая характеристика разнотипных озер Волжско-Камского заповедника // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. №2. С. 39–50.

Унковская Е.Н., Тарасов О.Ю. Гидрохимический режим водоемов и водотоков Раифского участка Волжско-Камского заповедника и его охранной зоны // Труды Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника. 2016. Вып. 7. С. 9–40.

Arvola L., Salonen K., Kankaala P. Lehtovaara A. Vertical distributions of bacteria and algae in a steeply stratified humic lake under high grazing pressure from Daphnia longispina // Hydrobiologia. 1992. V. 229. P. 253–269.

Edgar R.C. UPARSE: Highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads // Nature Methods. 2013. V. 10. P. 996–998.

Guillou L., Bachar D., Audic S., Bass D., Berney C., Bittner L., Boutte C. et al. 2013. The Protist Ribosomal Reference database (PR2): a catalog of unicellular eukaryote Small Sub-Unit rRNA sequences with curated taxonomy // Nucleic Acids Res. 2013. V. 41. D597–604.

Lundin D., Andersson A. SBDI Sativa curated 16S GTDB database. SciLifeLab. 2021. Dataset. https://doi.org/10.17044/scilifelab.14869077.v7 Accessed 25.12.2024.

Salonen K., Arvola L., Rask M. Autumnal and vernal circulation of small forest lakes in Southern Finland // Verh. Int. Ver. Limnol. 1984. V. 22. P. 103–107.

Steinberg C.E.W. Regulatory Impacts of Humic Substances in Lakes The Lakes Handbook // Limnology and Limnetic Ecology. Oxford: Blackwell Publ., 2004. V.1. P. 153–196.

VERTICAL STRUCTURE OF MICROBIAL PLANKTON COMMUNITY IN A SMALL POLYHUMIC LAKE

M.Yu. Gorbunov, M.V. Umanskaya, E.S. Krasnova, E.N. Unkovskaya

Microbial plankton structure in water column of stratified polyhumic Lake Gniloe (Volzhsko-Kamsky State Nature Biosphere Reserve, Tatarstan, Russia) was studied using metabarcoding of small rRNA subunit of pro- and eukaryotes. Strong vertical heterogeneity was observed. A single OTU of *Chlorobium* strongly dominated among anoxygenic phototrophs; other anoxygenic phototrophs were scarce. Contribution of ciliates to planktonic community was unusually low. More than half of the eukaryotic sequences in surface layer belonged to raphidophyte *Gonyostomum semen*; below it was replaced by various Chlorophyta. Plankton community structure of the lake differs significantly from that of adjacent Linevo Lake, suggesting significant β-diversity within the whole group of humic lakes of the Reserve.

МАЛЫЕ ВОДОЁМЫ СРЕДНЕВОЛЖСКОГО БИОСФЕРНОГО РЕЗЕРВАТА КАК МЕСТА ОБИТАНИЯ РЕДКИХ ВИДОВ ВОДОРОСЛЕЙ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ

О.Г. Горохова
Институт экологии Волжского бассейна РАН

Для водоёмов Средне-Волжского комплексного биосферного резервата зарегистрировано высокое видовое богатство и разнообразие альгофоры, а также наличие редко встречающихся и занесённых в «Красную книгу» Самарской области видов водорослей. Характеристика состояния разнотипных малых эвтрофных водных объектов СВБР по показателям структуры и разнообразия альгоценозов, оценка их сапробного и трофического статуса информативна для сравнительного анализа данных при антропогенном воздействии на автотрофный компонент водоёмов региона.

Эксплуатируя водные ресурсы, человек вовлекает в хозяйственную деятельность и экосистемы малых водоёмов. Несмотря на антропогенное воздействие часто именно эти небольшие водные объекты естественного происхождения или созданные для различных целей, являются убежищем для видов гидробионтов, которые не встречаются в более крупных и интенсивно используемых водоёмах. Оценить же встречаемость тех или иных видов для определения степени их «редкости» и уязвимости позволяют исследования, проводимые на охраняемых территориях региона. В этом случае материалом для сравнения и критерием выделения редких видов служит нахождение гидробионтов в водных объектах ООПТ, где обеспечена защита среды их обитания. Для Самарской области одной из таких территорией является Средне-Волжский комплексный биосферный резерват (СВБР).

Методически организованные комплексные гидробиологические исследования водоёмов, находящихся на территории СВБР, проведены в 1999-2009 гг. (Голубая книга..., 2007; Номоконова, 2009; Паутова, 2001; Поспелов и др., 2000; Ресурсы экосистем..., 2008). Малые водоёмы резервата разнотипны: они имеют различное происхождение, положение в ландшафтах, гидролого-гидрохимические характеристики, большинство из них высокоэвтрофны по содержанию общего фосфора в воде (Голубая книга..., 2007; Номоконова, 2009). В ряде водоёмов зарегистрировано цветение воды, обусловленное массовым развитием зелёных водорослей, реже эвгленовых и цианопрокариот (Горохова, 2018). Нами исследованы озёра в карстовых воронках, болотные водоёмы, небольшие искусственные водоёмы в Жигулёвском заповеднике, пойменные озёра, пруды у населённых пунктов на территории СВБР – в целом более 30 водных объектов (Голубая книга..., 2007; Ресурсы экосистем..., 2008). Многие водоёмы расположены в лесу и малодоступны, некоторые имеют рекреационное значение, наиболее активно используются пруды. Подробная гидролого-гидрохимическая характеристика каждого из водоёмов с оценкой трофического и сапробного статуса приведена ранее в ряде публикаций (Голубая книга..., 2007; Горохова, 2013, 2024; Номоконова, 2009; Паутова, 2001; Поспелов и др., 2000; Ресурсы экосистем..., 2008).

Важнейший автотрофный компонент изученных водных объектов – водоросли. В целом для альгофоры СВБР характерно высокое видовое богатство и разнообразие: к настоящему времени идентифицировано более тысячи видов из 9 таксономических отделов, с ведущей ролью Chlorophyta, Bacillariophyta и Euglenophyta. Индекс видового разнообразия (по Шеннону) в альгоценозах большинства водоемов, как правило, не менее 3,0-3,5 бит/экз. Сходство вдового состава в каждой из пар сравниваемых водоёмов от 9 до 51%. Число видов отмеченных лишь в одном из изученных водных объектов

составляет треть всего состава альгофлоры СВБР. Всё это свидетельствует о существовании локальных альгофлор, дающих в совокупности значительное видовое богатство. В исследованных водоемах зарегистрирован разнообразный состав водорослей-индикаторов сапробности (от ксено- и олигосапробов до индикаторов α-мезо- и полисапробных условий). Проведённая оценка характеризует сапробные условия разнотипных эвтрофных водоемов, находящихся на ООПТ: это информативно для экологического направления исследований и оценки состояния аналогичных водных объектов в зоне антропогенного воздействия (Горохова, 2024).

Проведён анализ таксономического списка водорослей по частоте встречаемости и роли видов в количественной структуре альгоценозов с учётом литературных данных об их экологии и распространении в водоёмах сопредельных территорий. Выделено 133 вида и внутривидовых таксона, которые следует рассматривать как предположительно уязвимые (Горохова, 2022). Одним из результатов альгологических исследований на территории СВБР было выявление новых мест обитания видов водорослей, внесенных в «Красную книгу Самарской области» (Красная книга..., 2007; 2017). Так, из одиннадцати видов, для сохранения которых в естественных условиях рекомендовано «выявление новых мест обитания и организация территорий охраны», в исследованных водоёмах СВБР были найдены восемь: *Tabellaria fenestrata* (Lyngb.) Kütz., *Heteromastix angulata* Korsch., *Volvox aureus* Ehr., *Spondylosium planum* (Wolle) W. et G.S. West, *Sphaerozosma vertebratum* (Breb.) Ralfs, *Tolypella prolifera* (Ziz ex A.Br.) Leonh., *Teilingia wallichii* (Jacobs.) Bourr., *Diplopsalis acuta* (Apstein) Entz. (Горохова, 2022).

Богатство альгофлоры водоёмов СВБР и наличие в них большого числа единично встречающихся и «краснокнижных» видов обусловлены не только охранным режимом, но и особенностями условий существования водорослей в разнотипных водных объектах этой территории. Именно разница условий приводит в данном случае к формированию индивидуальных черт видового состава альгофлоры. Например, в полигумозных озёрах отмечено максимально разнообразие видов рода Trachelomonas, многие из которых предпочитают богатые гуминовыми веществами во́ды. В озерах с гумозно-ацидными условиями и обилием погруженной водной растительности выше доля в альгофлоре представителей родов Eunotia, Pinnularia, Cosmarium. В прудах у населённых пунктов на территории СВБР развивается богатый состав эвгленовых водорослей, нередко специфичный в каждом из них. В пойменных водоёмах, имеющих временную или постоянную гидрологическую связь с водохранилищем, видовой состав богат, а максимальное разнообразие характерно для экотонной зоны «озеро-водохранилище». Лишь в отдельных водных объектах СВБР видовое богатство невысокое и структура альгофлоры упрощена. Это водоёмы с сочетанием нескольких неблагоприятных для развития водорослей факторов: низкие значения pH, высокая цветность и низкая прозрачность, а также неустойчивый водный режим (пересыхание).

Водные объекты Средне-Волжского комплексного биосферного резервата являются рефугиумами для большого количества видов водорослей, находящих здесь самые разнообразные условия существования, что обусловливает богатство альгофлоры водоёмов и важность их природоохранного статуса.

Литература

Голубая книга Самарской области: редкие и охраняемые гидробиоценозы / Под ред. Г.С. Розенберга, С.В. Саксонова. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2007. 200 с.

Горохова О.Г. Характеристика трофического состояния малых водоёмов Средне-Волжского биосферного резервата по фитопланктону // Вода: химия и экология. 2013. №11. С. 46-53

Горохова О.Г. Состав массовых видов и структура альгоценозов при «цветении» воды в малых водоёмах юга лесостепного Поволжья // Ученые записки Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2018. Т.160. кн. 2. С. 276-291.

Горохова О.Г. О критериях выделения редких видов водорослей и анализе таксономических списков при созологические исследованиях // Известия Самарского научного центра РАН. 2022. Т. 24, №5. С. 76-87.

Горохова О.Г. К оценке сапробности малых водоёмов и водотоков Средне-Волжского биосферного резервата // Биосфера. 2024. Т. 16, №4. С. 439-449.

Красная книга Самарской области. Т.1. Редкие виды растений, лишайников и грибов. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2007. 372 с.

Красная книга Самарской области. Т.1. Редкие виды растений и грибов. Самара: Издательство СГОАН, 2017. 284 с.

Номоконова В.И. Гидрохимический режим и трофическое состояние озер Самарской Луки и сопредельной территории // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т.11. №1. С. 155-164.

Паутова В.Н. Лимнологические исследования в юго-восточной части Самарской Луки. Положение в ландшафте, гидрологические и гидрохимические особенности водоемов // Известия Самарского научного центра РАН. 2001. Т.3. №2. - С. 265-273.

Поспелов А.П., Горбунов Ю.М., Уманская М.В., Поспелова М.Д. Характеристика гидрохимического режима водоёмов Самарской Луки // Известия Самарского научного центра РАН. 2000. Т. 2. №2. С. 216-223.

Ресурсы экосистем Волжского бассейна. В 2-х тт. Тольятти: Изд-во ИЭВБ РАН «Кассандра», 2008. Т. 1. Водные экосистемы. 286 с.

SMALL WATER BODIES OF THE MIDDLE VOLGA BIOSPHERE RESERVE AS HABITAT OF RARE ALGAE SPECIES OF THE SAMARA REGION

O.G. Gorokhova

High species richness and diversity of algophora, as well as the presence of rare algae species listed in the Red Book of the Samara Region, have been recorded for the reservoirs of the Middle Volga Complex Biosphere Reserve. The characteristics of the state of different types of small eutrophic water bodies of the SVBR based on the indicators of the structure and diversity of algae communities, the assessment of their saprobic and trophic status are informative for a comparative analysis of data on anthropogenic impact on the autotrophic component of the region's reservoirs.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ДИНАМИКА И ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ОЗЕР БЕЛАРУСИ (В РАЗРЕЗЕ КЛИМАТИЧЕСКИ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ АСПЕКТОВ)

Н.Д. Грищенкова, Н.М. Роговский

Институт экспериментальной ботаники имени В.Ф. Купревича НАН Беларуси

На основании анализа данных многолетних наблюдений за водной растительностью в озерах Беларуси и данных дистанционного зондирования Земли, определены общие тенденции изменений видового состава и количественного развития макрофитов для лет с различной водностью и температурными условиями. Представлен прогноз последствий потепления климата по отношению к водной растительности озер Беларуси.

Одним из основных факторов изменений состояния озерных экосистем (в том числе и высшей водной растительности) наряду с антропогенным является природно-климатический фактор. Ведущая роль в природно-климатической составляющей принадлежит кратко- и долгосрочным изменениям климата – температуры воздуха и количества осадков, которые определяют прогрев водной массы и амплитуду колебания уровня воды, влияющих на сроки и продолжительность вегетации растений, площадь и глубину распространения зарослей, обилие растений в доминирующих фитоценозах, поврежденность и т.д. Сезонная динамика основных показателей, характеризующих развитие макрофитов, достаточно хорошо изучена. Нами сделана попытка на основе сравнительного анализа данных многолетних наблюдений за состоянием макрофитов в озерах Беларуси проследить изменения в их видовом составе и количественном развитии для лет с различной водностью и температурными условиями.

С целью определения динамики площади открытого зеркала водных объектов и его заросшей надводной растительностью части использованы данные продукта GSW (Global Surface Water) от JRC (Joint Research Center) (Pekel, 2016). Тематический продукт базируется на значениях отражательной способности верхней части атмосферы (TOA reflectance) и яркостной температуры (L1T), полученных со спутников Landsat 5-TM, Landsat 7-ETM+ и Landsat 8-OLI. Выбранный датасет JRC Monthly Water History представляет собой ежемесячную базу изображений, каждое из которых содержит следующие 3 значения: нет данных (0), отсутствие водной поверхности (1) и наличие водной поверхности (2). Информация взята на платформе облачных вычислений Google Earth Engine (Google …, 2024). Временные рамки оценки динамики площади водной поверхности охватывали период с 1984 по 2021 гг., где значения показателя за определенный год брались по данным за июль-август, а в случае отсутствия данных ввиду высокого процента покрытия территории облаками значения не брались в расчёт. Растровые изображения добавлялись в среду ГИС ArcGIS 10.7, после чего через элиминацию слоя с реками, временными и искусственными водными объектами были подготовлены итоговые сцены и рассчитаны площади водных поверхностей на территории Беларуси за выбранный временной период.

Полученные данные позволяют сделать следующие выводы о влиянии природно-климатического фактора на развитие высшей водной растительности:

– многолетние циклические изменения климата определяют в большей степени количественное развитие макрофитов, влияние на видовой состав флоры менее очевидно;

– наиболее устойчивыми к климатическим флуктуациям являются крупные озера гидрофитного (Нарочь, Снуды, Швакшты и др.) и гелогидрофитного (Червоное, Синьша, Лисно, Вишневское, Освейское и др.) типов зарастания;

– теплые маловодные годы (1999, 2002, 2007, 2011, 2014, 2015, 2018-2020, 2023 гг.) характеризуются более интенсивным развитием растительности. При этом широкое распространение получают рдесты (среди подводной растительности) и растения с плавающими листьями. В надводной растительности наблюдается увеличение ширины полосы зарослей и биомассы доминирующих видов в тростниково-камышовых ассоциациях (рис. 1). На мелководье и обсыхаемой литоральной зоне фиксируется увеличение площади и биомассы зарослей околоводных растений (гигрофитов);

– в холодные многоводные годы (1998, 2003, 2004, 2010 гг.) при стабильном развитии надводной растительности отмечено некоторое относительное сокращение площади зарастания подводных растений. В результате затяжной, дождливой весны и повышенной мутности воды происходит запаздывание в вегетации (до 1 недели) подводных растений и растений с плавающими листьями;

– в годы с экстремально теплой зимой, с непродолжительным периодом ледостава (2005, 2007, 2008, 2020, 2022 гг.) отмечено опережение в развитии подводной растительности и растений с плавающими листьями над воздушно-водной. Отмечено, что стадия цветения у первых наступила на 1-2 недели раньше по сравнению с годами, отвечающими среднемноголетним характеристикам;

– в целом, отмечается тенденция увеличения зарастания озер Беларуси гелофитной (надводной) растительностью (см. рис. 1).

Прогноз изменений (в разрезе климатически детерминированных аспектов). В свете актуальной проблемы глобального изменения климата следует отметить, что:

– увеличение среднегодовой температуры воздуха приведет к увеличению теплозапаса озер и проявится в увеличении продолжительности периода вегетации макрофитов за счет смещения сроков весенней и осенней циркуляции, увеличении прогрева водной массы в безледный период;

– совокупное воздействие изменения климата, вероятно, приведет к увеличению численности и распространения надводных (рис. 2) и плавающих видов и снижению - погруженных макрофитов. Повышение температуры воды и содержания атмосферного CO_2 в целом увеличивает рост макрофитов, но снижение прозрачности вследствие увеличения биомассы фитопланктона может компенсировать это за счет уменьшения глубины их проникновения;

– численность стенобионтных видов сократится (что, например, уже происходит с полушником озерным и лобелией Дортманна), в то время как более конкурентоспособные инвазивные виды, вероятно, вытеснят аборигенные. Более длительный сезон роста в бореальных широтах, по прогнозам, будет способствовать инвазии экзотических видов;

– увеличение стратификации озер, и как следствие снижение уровня кислорода в придонных слоях, приведет к уменьшению глубины распространения или потере многих олиго- и мезосапробных видов. Уже в настоящее время наблюдается более активное развитие и распространение к северу ряда теплолюбивых видов (водяной орех плавающий, сальвиния плавающая, наяда большая), и уменьшение распространения видов индикаторов мезо- и олиготрофных условий (полушник озерный, лобелия Дортманна, водяные мхи (*Fontinalis*), пузырчатки);

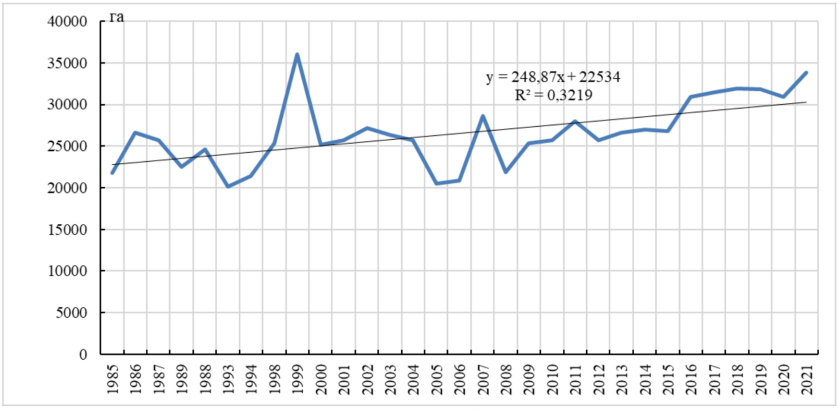


Рис. 1. Динамика зарастания озер Беларуси гелофитной (надводной) растительностью

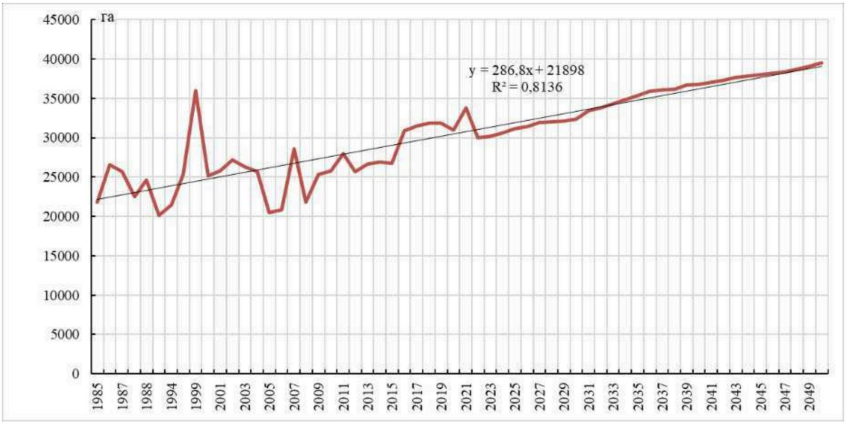


Рис. 2. Прогноз зарастания озер Беларуси гелофитной (надводной) растительностью

– при более низкой прозрачности, колебаниях уровня воды и повышении температуры в озерных системах будут преобладать низшие водные растения. Прогнозируется увеличение встречаемости и интенсивности цветения водорослей из-за интерактивного воздействия экстремальных температур и низких концентраций растворенного кислорода в воде;

– обзор воздействия изменения климата на биоразнообразие и функционирование пресноводных экосистем показал, что при всех сценариях, за исключением сценария с самым низким уровнем выбросов парниковых газов, ожидается, что биоразнообразие таких систем будет уменьшаться пропорционально степени потепления и изменения осадков (Settele et al., 2014). Ускорение глобальной потери биоразнообразия водных растений, особенно погруженных макрофитов, хорошо задокументировано (Korner, 2002; Sand-Jensen et al., 2000; Zhang et al., 2017). Основными факторами, влияющими на изменение видового богатства, по-видимому, являются глобальный климат и региональные изменения в землепользовании (Hofstra et al., 2020; Zhang et al., 2017), что приводит к изменениям температуры воды, доступности света (из-за снижения прозрачности воды) и питательных веществ. При этом, в будущем воздействие изменения климата на погруженные макрофиты представляется более очевидным, чем изменения в землепользовании;

– уменьшение размера тела было отмечено в качестве общей реакции пресноводных видов на изменение климата, учитывая связанные с температурой ограничения обмена веществ организмов с большим размером, так как большие отношения поверхности к объему, как правило, преобладают в более теплых условиях (Scheffers et al., 2016). Уменьшение размера тела и сдвиг в сторону более мелких видов как реакция на глобальное потепление были задокументированы для пресноводных бактерий, планктона и рыб (Daufresne et al., 2009; Farmer et al., 2015; Jeppesen et al., 2010; Jeppesen et al., 2014; Rasconi et al., 2015; Winder et al., 2009; Woodward et al., 2016);

– наиболее серьезные изменения ожидаются по отношению к наиболее уязвимым видам и экосистемам, характеризующимся присущими им особыми физиологическими, экологическими или поведенческими характеристиками, которые ограничивают их способность адаптироваться, а также в тех, которые в наибольшей степени подвержены климатическому влиянию. Среди озерных экосистем Беларуси к таковым относятся в первую очередь водоемы ацидотрофного типа (Свитязь, Бредно, Большое Островито,

Чербомысло и др.). Из-за слабого водообмена и низких значений концентрации веществ, растворенных в водной массе, они обладают высокой чувствительностью к изменению природно-климатических условий на водосборах и к антропогенной трансформации водного, гидрохимического и термического режимов. При этом озера подобного типа являются местами обитания представителей редких и охраняемых видов флоры (полушник озерный, лобелия Дортманна, прибрежница одноцветковая), что увеличивает риск утери данных видов для флоры Беларуси. Также особо уязвимыми являются небольшие и временные водоемы (в т.ч. старицы), в которых часто обитают редкие виды (в частности, кувшинка белая): прогнозируемое усиление засух будет способствовать их сильному обмелению и исчезновению.

Меры по адаптации к климату с учетом изменений в экосистемах (EbA) получили широкое признание на глобальном уровне (Reid, 2016). Среди мер по адаптации пресноводных экосистем особо выделяются следующие: затенение рек и ручьев путем восстановления прибрежной водной и древесно-кустарниковой растительности; лесовосстановление и гидрологическая рекультивация водосборных бассейнов; контроль распространения инвазивных водных растений для обеспечения водной безопасности.

Хотя меры по адаптации пресноводных экосистем к климатическим изменениям были реализованы во многих странах мира (Reid, 2019), доказательная база эффективности этих мер нуждается в улучшении. Эти меры также требуют большой финансовой поддержки, актуализации и расширения применения индивидуальных подходов.

Литература

Daufresne M., Lengfellner K., Sommer U. Global warming benefits the small in aquatic ecosystems // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2009. 106 (31). P. 12788–12793.

Farmer T., Marschall E., Dabrowski K., Ludsin S. Short winters threaten temperate fish populations // Nature Communications. 2015. 6.

Google Earth Engine (Electronic resource). https://earthengine.google.com. Date of access: 08.05.2024.

Hofstra B., Kulkarni V.V., Munoz-Najar Galvez S., He B., Jurafsky D., McFarland D.A. The diversity–innovation paradox in science // Proceedings the National Academy of Sciences. 2020. 117(17). P. 9284–9291.

Mountain Biodiversity: A Global Assessment. CRC Press, 2002 350 p.

Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. 2016. 540. P. 418–422.

Rasconi S., Gall A., Winter K., Kainz M.J. Increasing water temperature triggers dominance of small freshwater plankton // PLoS ONE. 2015. 10(10). e0140449.

Reid H. Ecosystem- and community-based adaptation: learning from community-based natural resource management // Clim. Dev. 2016. 8(1). P. 4–9.

Sand-Jensen K., Riis T., Vestergaard O., Larsen S.E. Macrophyte decline in Danish lakes and streams over the past 100 years // Journal of Ecology. 2000. 88. P. 1030-1040.

Settele J., Scholes R., Betts R.A., Bunn S., Leadley P., Nepstad D., … Winter M. Terrestrial and Inland Water Systems (Chapter 4) // Global and Sectoral Aspects. Vol. 1, Cambridge University Press, Cambridge, 2014. P. 271–360.

Winder M., Reuter J., Schladow S.: Lake warming favours small-sized planktonic diatom species // Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2009. 276. P. 427–435.

CURRENT STATE, DYNAMICS AND FORECAST OF CHANGES IN AQUATIC VEGETATION OF LAKES IN BELARUS (IN TERMS OF CLIMATICALLY DETERMINED ASPECTS)

N.D. Hryshchankava, N.M. Rogovsky

Based on the analysis of long-term observations of aquatic vegetation in lakes of Belarus and Earth remote sensing data, general trends in the species composition and quantitative development of macrophytes for years with different water content and temperature conditions were determined. A forecast of the consequences of climate warming in relation to the aquatic vegetation of lakes in Belarus is presented.

СТРУКТУРА ДОННЫХ СООБЩЕСТВ ОЗЕРА ЦАГАН-НУР (СИСТЕМА САРПИНСКИХ ОЗЕР ЗАПАДНО-КАСПИЙСКОГО БАССЕЙНОВОГО ОКРУГА)

Д.С. Даирова[1], Д.С. Петрушкиева[2]
[1]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
[2]Волжско-Каспийский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («КаспНИРХ»)

По материалам 2-х летних мониторинговых исследований (май-сентябрь 2012 г. и июль-август 2013 г.), проведен анализ изменения структурных характеристик донных сообществ в течение вегетационного сезона и дана оценка продуктивности оз. Цаган-Нур.

Известно, что водоемы с естественным высоким уровнем минерализации географически широко распространены, особенно в аридных зонах мира, и являются не только объектом повышенного интереса и интенсивного изучения в качестве источника рентабельного извлечения традиционных продуктов (поваренная соль, сода, сульфат натрия) и других полезных компонентов (соединения лития, брома, калия, бора, магния, урана и др.), но и объектом многочисленных исследований, связанных с различными аспектами экологических изменений под влиянием внешних воздействий (Первольф, 1953; Балушкина, Петрова, 1989; Балушкина и др., 2007; Зинченко и др., 2010, 2013, 2014, 2024; Семик, 2013; Головатюк, Зинченко, 2015; Ойдуп, 2018; Laprise, Dodson, 1993; Williams D., Williams N., 1998; Williams, 2002).

Поиск закономерностей структурной изменчивости сообществ гидробионтов под влиянием параметров окружающей среды является одной из основных задач экологии и гидробиологии. При этом под экологическими факторами понимается любая внешняя или внутренняя движущая сила, модифицирующая показатели жизнедеятельности экосистемы (Федоров, Гильманов, 1980). Количественная оценка реакции на эти возмущения со стороны отдельных видов живых организмов и всего сообщества в целом осуществляется путем изучения функционального отклика экосистемы (Зинченко и др., 2014).

Сарпинские озера богаты беспозвоночными гидробионтами – важным компонентом пищи рыб, а также являются уникальными биотопами для гнездования перелетных водоплавающих и околоводных птиц (Водно-болотные угодья …, 2000).

Учитывая выше сказанное, представляет практический интерес изучить динамику структурных характеристик зообентоса, являющегося важным трофическим звеном в питании бентосоядных рыб и птиц в экосистеме Сарпинских озер на примере оз. Цаган-Нур.

Карта-схема расположения станций отбора проб макрозообентоса в оз. Цаган-Нур, методика отбора проб подробно описаны в предыдущей статье настоящего сборника «Состав и эколого-фаунистическая характеристика макрозообентоса в условиях изменяющегося гидролого-гидрохимического режима озера Цаган-Нур (система Сарпинских озер Западно-Каспийского бассейнового округа»).

Оценку трофности исследуемых участков оз. Цаган-Нур определяли по шкале трофности С.П. Китаева (1986, 2007), выделившего стандартные классы биологических показателей продуктивности по биомассе хлорофилла «а», фито-, зоопланктона и зообентоса. Процедура распознавания степени трофности и класса продуктивности по классификации С.П. Китаева состоит в соотнесении значений биомасс определенных групп гидробионтов к той или иной градации классификационного признака. Градации признаков и размерность алфавитов классов трофического статуса водоемов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Стандартные классы биологических показателей продуктивности (по С.П. Китаеву, 1986, 2007)

Класс	Биомасса зообентоса, г/м^2	Преобладающий тип водоема
Самый низкий	<0.625	ультраолиготрофный
Очень низкий	0.625-1.25	α-олиготрофный
Низкий	1.25-2.5	β-олиготрофный
Умеренный	2.5-5	α-мезотрофный
Средний	5-10	β-мезотрофный
Повышенный	10-20	α- эвтрофный
Высокий	20-40	β-эвтрофный
Очень высокий	>40	гипертрофный

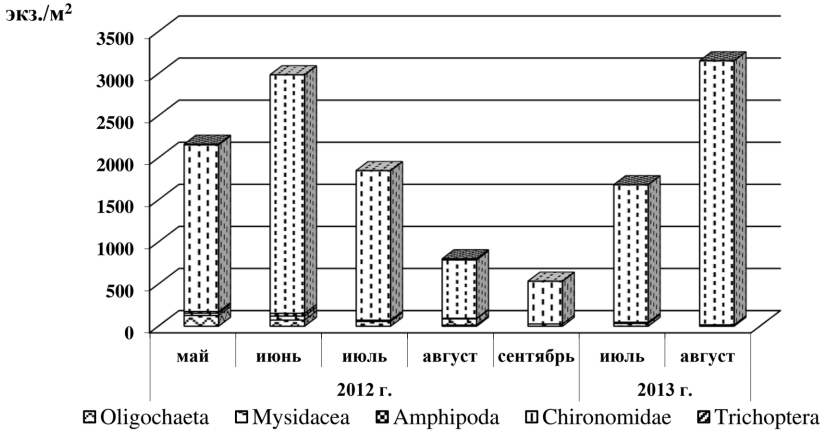
Примечание: оригинальная шкала значений биомасс приведена только для зообентоса.

В составе донной фауны оз. Цаган-Нур в течение 2012-2013 гг. идентифицировано 24 вида и таксона рангом выше вида, относящимся к трем классам: Oligochaeta, Crustacea и Insecta. При этом наибольшее таксономическое разнообразие наблюдалось среди амфибиотических насекомых – представителей кл. Insecta (16 видов и форм): отр. Diptera с преобладанием в данной группе хирономид (14 видов и форм) и ручейников (2 вида), остальные группы беспозвоночных (кл. Crustacea, кл. Oligochaeta,) были представлены меньшим количеством таксонов.

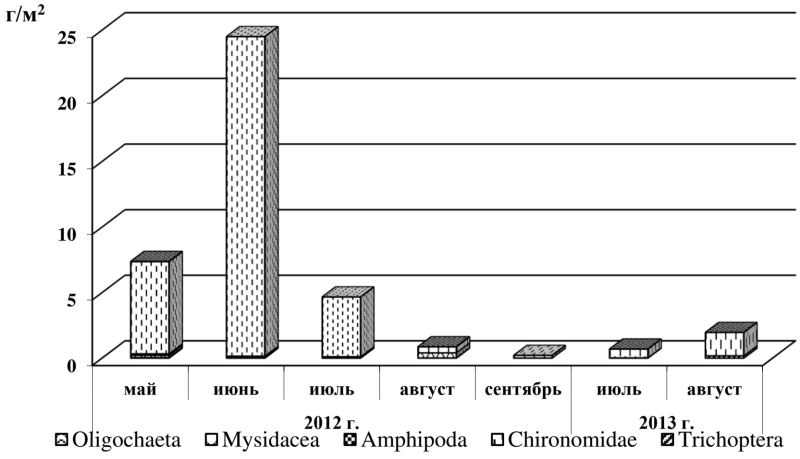
Изменения структурных характеристик донных сообществ в течение вегетационного сезона связаны с жизненными циклами отдельных видов беспозвоночных. Данные изменения наглядно отражает сезонная динамика зообентоса в 2012 г. (рис. 1). Так, в июне наблюдались максимальные значения численности (2986 экз./м^2) и биомассы (24,503 г/м^2) донных беспозвоночных, обусловленные массовым развитием личинок хирономид, преимущественно *Chironomus* (*C.*) *salinarius*. В последующие месяцы происходило снижение количественных показателей как хирономид, так и зообентоса в целом. Наименьшие количественные показатели бентофауны отмечены в августе и сентябре в связи с массовым вылетом хирономид и выеданием бентосоядными рыбами. Среднесезонное значение численности макрозообентоса составило 1666±799 экз./м^2, биомассы – 7,526±6,791 г/м^2.

В 2013 г. в июле численность донных беспозвоночных составила 1680 экз./м^2, в августе в результате развития и высокой численности хирономид (от I стадии до преимагинальной стадии (I-IVL, P)) данный показатель возрос до 3152 экз./м^2 (рис. 1 А). Незначительно увеличились показатели общей биомассы зообентоса – с 0,692 г/м^2 в июле до 1,957 г/м^2 в августе (рис. 1 Б). Основная часть биомассы, также как и численность, была сформирована водными стадиями амфибиотических насекомых, главным образом хирономидами. При видовой идентификации представителей сем.

Chironomidae в пробах, отобранных в июле-сентябре на станции 2 (южная сторона центральной части водоема «Кормоцех»), на станции 3 (урочище «5 курганов» в хвостовой части озера с южной стороны), на станции 4 (участок напротив «5 курганов») и на станциях 1 и 6 (приплотинные участки, расположенных на северной и южной сторонах озера возле плотины), были обнаружены куколки (pupae) и имаго (imago) *Chironomus* (*C.*) *salinarius, C.* (*Lobochironomus*) *dorsalis*, *Tanytarsus* gr. *gregarius*.



А



Б

Рис. 1. Распределение численности (А) и биомассы (Б) основных таксономических групп макрозообентоса в оз. Цаган-Нур (2012-2013 гг.)

Важнейшим прикладным аспектом гидробиологических исследований является определение степени трофности водоемов, которую обязательно учитывают при оценке экологического состояния водоема и решении вопроса о его практическом

использовании в рыбохозяйственных целях, что в свою очередь позволяет включить данную информацию при определении критериев народно-хозяйственной эффективности экономики Республики Калмыкия.

В основе трофической типизации водных экосистем лежит оценка уровня биопродуктивности, которая является главной функциональной характеристикой водоема (Китаев, 1984; Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990; Заварзин, 2003; Яценко-Степанова и др., 2014; Безматерных, 2017). Следует сказать, что существующие многочисленные классификации трофического состояния водоемов незначительно отличаются друг от друга по градациям трофности и классам продуктивности (Винберг, 1960; Жукинский и др., 1976; Бульон, 1983, 1993; Китаев, 1986, 2007; Алимов, 1989, 2000 и др.), поэтому классификацию трофности водоемов С.П. Китаева, ранее апробированную Д.М. Безматерных для минерализованных озер юга Западно-Сибирской равнины с использованием данных по зоопланктону и зообентосу (Безматерных, 2008, 2017), А.Ф. Сокольским для Северного Каспия с использованием данных по первичной продукции (Каспийское …, 2009), Д.С. Даировой с соавторами для дельты р. Волги и Северного Каспия с использованием данных по фито-, зоопланктону и зообентосу (Даирова и др., 2016; Даирова, 2017; Даирова и др., 2020; Даирова, Островская, 2020; Курапов и др., 2020), мы также предлагаем для определения уровня трофности и класса продуктивности оз. Цаган-Нур на основе имеющихся показателей по зообентосу (табл. 2).

На основании представленных в таблице 2 средних значений биомассы кормового зообентоса, уровень трофности оз. Цаган-Нур оценивался в диапазоне от α-олиготрофного (класс продуктивности «очень низкий» – ст. 2) до α-эвтрофного (класс продуктивности «повышенный» – ст. 3, 4), за весь период исследований (2012-2013 гг. – как β-мезотрофный (класс продуктивности «средний»).

Таблица 2. Средние значения биомассы ($B_{ср.}$, г/м^2) кормового зообентоса, уровня трофности и продуктивности оз. Цаган-Нур за 2012-2013 гг.

Станции отбора проб/ показатели	$B_{ср.}$, г/м^2	Уровень трофности	Класс продуктивности
1	1.535	β-олиготрофный	низкий
2	1.167	α-олиготрофный	очень низкий
3	19.450	α- эвтрофный	повышенный
4	10.046	α- эвтрофный	повышенный
5	1.885	β-олиготрофный	низкий
6	1.421	β-олиготрофный	низкий
$B_{ср.}$ за весь период	6.027	β-мезотрофный	средний

Оценку трофности обязательно учитывают при оценке экологического состояния водоема и решении вопросов относительно его использования в хозяйственных целях, а при необходимости – своевременного планирования природоохранных мероприятий и мониторинга трофности (Курапов и др., 2020; Даирова и др., 2020).

Учитывая, что гидробиологические исследования на оз. Цаган-Нур не проводились после 2013 г., рекомендуется возобновить их в целях актуализации таксономического списка макрозообентоса, его структурных характеристик для оценки продуктивности и рыбохозяйственного значения данного водоема в настоящее время.

В связи с тем, что оз. Цаган-Нур относится к водоемам мезотрофного типа, необходимо зарыбление оз. Цаган-Нур определенным количеством крупного рыбопосадочного материала, в первую очередь − растительноядными рыбами. Это в свою очередь позволит увеличить рыбопродуктивность водоема и улучшить гидрохимический режим.

Авторы выражают искреннюю благодарность заместителю руководителя Волжско-Каспийского филиала ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («КаспНИРХ», г. Астрахань), к.б.н. С.В. Шипулину за содействие в написании работы, к.т.н. В.Н. Ткач за консультативную помощь («КаспНИРХ», г. Астрахань), д.б.н., проф. Т.Д. Зинченко (Институт экологии Волжского бассейна РАН) за ценные замечания и консультации в процессе написания работы, а также сотрудникам отдела «Элистинкий Волжско-Каспийского филиала ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («КаспНИРХ», г. Элиста), принимавших участие в полевом этапе исследований.

Литература

Алимов А.Ф. Введение в продукционную гидробиологию. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 152 с.

Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб.: Наука, 2000. 147 с.

Балушкина Е.В., Петрова Н.А. Функционирование популяций хирономид в гипергалинных озерах Крыма // Тр. Зоол. ин-та АН СССР. 1989. Т. 205. С. 129-138.

Безматерных Д.М. Зообентос равнинных притоков Верхней Оби. Барнаул: Изд-во Алтайского ун-та, 2008. 186 с.

Безматерных Д.М. Пространственно-временная организация и факторы формирования макрозообентоса озер юга Западно-Сибирской равнины: Автореф. дис. … докт. биол. наук. Новосибирск, 2017. 45 с.

Бульон В.В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 150 с.

Бульон В.В. Первичная продукция и трофическая классификация водоемов // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. СПб: Гидрометеоиздат, 1993. С. 147-157.

Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 328 с.

Водно-болотные угодья России. Т. 3. Водно-болотные угодья, внесенные в Перспективный список Рамсарской конвенции. М., 2000. 490 с.

Головатюк Л.В., Зинченко Т.Д. Биологические характеристики массовых видов хирономид *Cricotopus salinophilus* и *Chironomus salinarius* из соленых рек Приэльтонья: жизненные циклы, удельная продукция // Известия Самарского научного центра РАН, 2015. Т. 17. № 4. С. 210-214.

Даирова Д.С. Состояние кормовой базы бентосоядных рыб и оценка уровня продуктивности водотоков дельты р. Волга в предпаводковый период по структурным характеристикам макрозообентоса // Тр. III Междунар. конф. «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: экологические вызовы XXI века». Казань, 2017. С. 528-531.

Даирова Д.С. Состояние кормовой базы бентосоядных рыб и оценка уровня продуктивности водотоков дельты р. Волга в предпаводковый период по структурным характеристикам макрозообентоса // Тр. III Междунар. конф. «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: экологические вызовы XXI века». Казань, 2017. С. 528-531.

Даирова Д.С., Кострыкина Т.А., Попова Е.В. Оценка состояния макрозообентоса как объекта питания сеголеток осетра в западной части Северного Каспия в 2015 г. // Сб. материалов Междунар. форума «Каспий – море дружбы и надежд», посвящ. 85-летию Дагестанского государственного университета. Махачкала, 2016. С. 188-192.

Даирова Д.С., Островская Е.В. Сезонная динамика уровня трофности западной части Северного Каспия по показателям макрозообентоса с учетом колебаний уровня

моря в 1978-2015 гг. // Сб. тез. докладов Междунар. науч. конф. «Экология водных беспозвоночных», посв. 110-летию со дня рождения Ф.Д. Мордухай-Болтовского / Ярославль: Филигрань, 2020. С. 27.

Даирова Д.С., Островская Е.В., Курапов А.А., Умербаева Р.И. Изменения биотических сообществ Северного Каспия в условиях меняющегося климата // Астраханский вестник экологического образования. 2020. №6. С. 97-107.

Жукинский В.Н., Оксиюк О.П., Цееб Я.Я., Георгиевский Б.В. Проект унифицированой системы для характеристики континентальных водоемов и водотоков и ее применение для анализа качества воды // Гидробиол. журн. 1976. Т. 12. № 6. С. 103-112.

Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии. М.: Наука, 2003. 348 с.

Зинченко Т.Д. Модели распределения популяционной плотности видов макрозообентоса по градиенту минерализации на примере малых рек Приэльтонья // Чтения памяти В.Я. Леванидова. Вып. 6. Владивосток: Дальнаука, 2014. С. 257-273.

Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В. Соленосная толерантность донных организмов речных вод (обзор) // Аридные экосистемы. 2013. Т. 19. №3. С. 5-11.

Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В., Выхристюк Л.А., Шитиков В.К. Разнообразие и структура сообществ макрозообентоса высокоминерализованной р. Хара (Приэльтонье) // Поволжский экологический журнал, 2010. Т. 1. С 14-30.

Каспийское море. О влиянии экологических изменений на биоразнообразие и биопродуктивность. Астрахань, 2009. 404 с.

Китаев С.П. О соотношении некоторых трофических уровней и «шкалах трофности» озер // V съезд Всесоюз. гидробиол. об-ва. Куйбышев, 1986. Ч. 2. С. 254-255.

Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 395 с.

Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озёр разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.

Курапов А.А., Островская Е.В., Даирова Д.С., Васильева Т.В. Влияние изменений климата на биологические сообщества Северного Каспия. Астрахань: Издатель: Сорокин Роман Васильевич, 2020. 264 с.

Ойдуп Ч.К. Литий-урановая минерализация соленых озер и подземных источников Центральной Тувы // Геосферные исследования. 2018. №3. С. 22-23.

Первольф Ю.В. Илы и условия их илообразования в соляных озерах Крыма // Тр. Лаб. озероведения АН СССР. 1953. Т. 2. С. 154-228.

Семик А.М. Продукционные показатели личинок хирономид (*Chironomus salinarius*) в Акташском озере // Труды ЮгНИРО, 2013. Т. 51. С. 53-57.

Фёдоров В.Д., Гильманов Т.Г. Экология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. 464 с.

Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х.Р. Умирающие озёра. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 279 с.

Яценко-Степанова Т.Н., Немцева Н.В., Игнатенко М.Е. Основные подходы к определению трофности природных водоемов // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2014. №1. С. 1-7.

Laprise R., Dodson J.J. Nature of environmental variability experienced by benthic and pelagic animals in the St. Lawrence Estuary, Canada // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1993. V. 94. P. 129-139.

Williams D.D., Williams N.E. Aguatic insects in an estuarine environment: densities, distribution and salinity tolerance // Freshw. Biol. 1998. Vl. 39. P. 411-421.

Williams W.D. Salinization of rivers and streams: an important environment hazard // Ambio, 1987. V. 16. №4. P. 180-185.

STRUCTURE OF BOTTOM COMMUNITIES OF LAKE TSAGAN-NUR (SYSTEM OF SARPINSKY LAKES OF THE WESTERN CASPIAN BASIN DISTRICT

D.S. Dairova, D.S. Petrushkieva

Based on the materials of two-year monitoring studies (may-september 2012 and july-august 2013), an analysis was carried out of the variability of the structural characteristics of benthic communities during the growing season and an assessment of the productivity of the lake Tsagan-Nur.

СОСТАВ И ЭКОЛОГО-ФАУНИСТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАКРОЗООБЕНТОСА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОЗЕРА ЦАГАН-НУР (СИСТЕМА САРПИНСКИХ ОЗЕР ЗАПАДНО-КАСПИЙСКОГО БАССЕЙНОВОГО ОКРУГА)

Д.С. Даирова[1], Д.С. Петрушкиева[2]
[1]*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН*
[2]*Волжско-Каспийский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («КаспНИРХ»)*

В работе представлены результаты 2-х летних мониторинговых исследований (май-сентябрь 2012 г. и июль-август 2013 г.), целью которых являлось изучение таксономического разнообразия, частоты встречаемости и эколого-фаунистических характеристик видов макрозообентоса оз. Цаган-Нур.

Сарпинские озера представляют собой типичную систему озер сухих степей и полупустынь Прикаспийской низменности. Формирование рельефа Сарпинской низменности связано с нижнехвалынской трансгрессией Каспия, соляной тектоникой и миграцией древних волжских рукавов. Сарпинские озера представляют собой реликт внутренней дельты, формировавшейся на протяжении 7-8 тыс. лет на месте глубокого эстуария в конце позднего плейстоцена. С руслово-дельтовым процессом (многорукавностью) связано наличие на Сарпинской низменности многочисленных меридионально расходящихся в юго-восточном направлении «пучков» ложбин с цепочками озер. Самым крупным по площади является оз. Цаган-Нур, входящее в систему озер Западно-Каспийского бассейнового округа северо-западной части Прикаспийской низменности. Исторически оно расположено древнем русле Волги. «Цаган-Нур» в переводе с калмыцкого означает «Белое озеро» и находится на границе 4-х районов Республики Калмыкия: Октябрьский, Кетченеровский, Малодербетовский и Сарпинский, в 3 км от с. Цаган-Нур. Его ложе вытянуто с северо-запада на юго-восток почти на 42-56 км при ширине от 0,9 до 1,5 км в зависимости от водности года. Площадь зеркала оз. Цаган-Нур составляет 23,5 км^2, объем 0,0235 км^3. Озеро разделено плотиной на две части (Ресурсы поверхностных вод СССР, 1964; Водно-болотные угодья …, 2000; Схема комплексного …, 2014).

В озеро поступает коллекторно-дренажная и частично транзитная волжская вода по ирригационным каналам Сарпинской оросительно-обводнительной системы (Сарпинской ООС). Уровенный режим оз. Цаган-Нур поддерживается преимущественно сбросом неочищенной воды с рисовых систем рисосеющих хозяйств. Ежегодно наблюдается нерегулярное поступление воды, основная часть ее уходит на залитие сенокосных угодий. Подача высоко минерализованного коллекторно-дренажного, хозяйственно-бытового стока в озеро при значительном испарении с их поверхности

приводит к накоплению солей в них, что делает водоем непригодным для хозяйственного использования (Схема комплексного …, 2014; Панфилий, Панфилий, 2016).

В оз. Цаган-Нур происходит постепенное снижение уровня воды в связи с тем, что водоснабжение водоема осуществляется в недостаточном объеме. Поэтому площадь водоема изменяется в зависимости от водности года. В многоводные годы она достигает 4,5-5,0 тыс. га при средних глубинах 2,5-2,8 м, а в маловодные годы площадь значительно сокращается за счет обсыхания мелководной верхней части (Богучарова и др., 2013). Так, площадь озера весной 2012 г. составила 1,38 тыс. га, а уже весной 2013 г. площадь сократилась до 1,31 тыс. га. Глубины в зависимости от водности равномерно увеличиваются от верхнего участка (0,3-0,5 м) к центральному (0,8-1,0 м) и приплотинному (1,3-1,5 м). Дно почти ровное, большей частью илистое. Прозрачность воды по всей акватории водоема составляет 40-50 см по диску Секки. Во время цветения микроводорослей, особенно при волновом перемешивании, взмучивающем донные осадки, она снижается до 20-25 см.

Снижение уровня воды в оз. Цаган-Нур происходит также по причине аварийного состояния гидротехнических сооружений, сопровождающегося существенной утечкой воды (рис. 1).



Рис. 1. Утечка воды через аварийное гидротехническое сооружение

Гидрохимический режим водоема определяется качеством воды источника водоснабжения, периодичностью ее поступления, подстилающими грунтами и зарастаемостью высшей водной растительностью (Панфилий, Панфилий, 2016).

В течение 2012-2013 гг. отмечалось увеличение зарастаемости акватории оз. Цаган-Нур высшей воздушно-водной и погруженной водной растительностью, представленной следующими видами: тростник обыкновенный – *Phragmites communus* Trin., рогоз узколистный – *Typha angustifolia* L., камыш озерный – *Scirpus lacustris* L; уруть колосистая – *Myriophyllum Spicoitum* L., роголистник погруженный – *Ceratophyllum demestrum* L., рдест стеблеобъемлющий – *Potamogeton perfoliatus* L. Зарастание озера неравномерное, зоны жесткой воздушно-водной растительности (тростник, рогоз, камыш) с глубины 1,5-2,0 м замещаются зарослями погруженной водной растительности, формируемых рдестами. Избыточное развитие макрофитов, с одной стороны, приводит к возникновению дефицита кислорода в зимний и весенний периоды (Схема комплексного …, 2014), с другой стороны, зона зарослей является местом откорма значительной части стада взрослых рыб-бентофагов, а также всей без исключения молоди рыб (Соколова и др., 1980).

Минерализация воды, поступающей с рисовых чеков, составила 1,2-1,5 г/л. В самом озере вода более минерализованная: весной, до поступления воды из рисовых чеков – 5,7-6,5 г/л, летом – 4,7-8,0 г/л, осенью – 5,8-8,8 г/л.

Минерализация воды оказывает существенное влияние на состав и структуру макрозообентоса, – при ее увеличении видовое разнообразие и уровень развития донных беспозвоночных снижаются, т. к. увеличение градиента солености приводит к повышению энергетических трат гидробионтов на осмотическую регуляцию, снижению их биомассы и продукции. Как правило, с увеличением минерализации часть таксонов

зообентоса элиминирует, а оставшиеся эвригалинные таксоны приспосабливаются к новым условиям среды (Безматерных, 2007, 2017).

Перманганатная окисляемость воды, как показатель содержания в ней органического вещества, колебалась в пределах 20,3-43,5 мгО/л.

Следует отметить, что проведение экологически неадаптивной хозяйственной деятельности, связанной с нерациональным природопользованием, приводит к ухудшению состояния водных объектов, изменению биотических комплексов, снижению видового разнообразия и численности наиболее уязвимых видов растений и животных (Зинченко и др., 2010).

В связи с тем, что озеро находится в условиях постоянно меняющегося гидролого-гидрохимического режима на фоне техногенного воздействия на его экосистему (изменения геоморфологии водоема, типа биотопов вследствие зарастания высшей водной растительностью и сокращения объема поступающей воды в водоем, повышении его минерализации и других гидрохимических факторов), одной из важнейших задач, поставленных в ходе мониторинговых исследований оз. Цаган-Нур, являлось изучение таксономического разнообразия, частоты встречаемости и эколого-фаунистических характеристик видов макрозообентоса данного водоема.

Материалом для настоящей работы послужили сборы макрозообентоса, проведенные в оз. Цаган-Нур с мая по сентябрь 2012 г. и с июля по август 2013 г. на 6 станциях: 1 – приплотинный участок, расположенный на южной стороне озера возле плотины; 2 – южная сторона центральной части водоема «Кормоцех»; 3 – урочище «5 курганов» в хвостовой части озера с южной стороны; 4 – участок напротив «5 курганов»; 5 – участок напротив южной стороны центральной части водоема, расположенный напротив «Кормоцеха»; 6 – приплотинный участок, расположенный на северной стороне озера возле плотины (рис. 2).

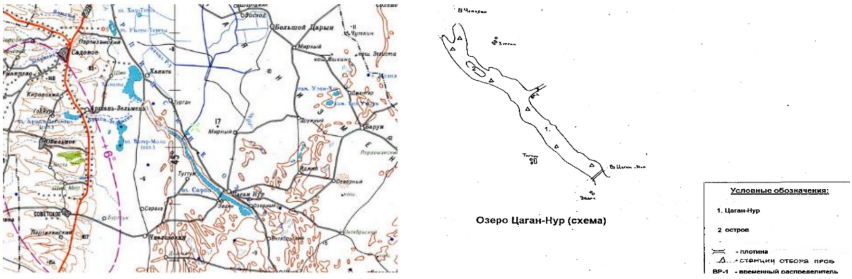


Рис. 2. Карта-схема расположения станций отбора проб макрозообентоса в оз. Цаган-Нур

Отбор проб осуществлялся с использованием дночерпателя Петерсена с площадью захвата 0.025 м^2. Пробы фиксировали 4% раствором формальдегида. В лабораторных условиях собранные бентосные пробы промывали с помощью сита из мельничного газа № 23. Камеральная обработка проб макрозообентоса проводилась согласно общепринятым методикам (Методика …, 1975; Руководство по методам …, 1983; Руководство …, 1992).

Видовая идентификация макрозообентоса оз. Цаган-Нур проведена Д.С. Даировой, И.В. Богучаровой в лаборатории Гидробиологии ФГУП «Каспийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства» (КаспНИРХ, г. Астрахань).

Определение малощетинковых червей (кл. Oligochaeta) выполнено Т.В. Попченко (ИЭВБ РАН, г. Тольятти).

Предварительные результаты исследования по изучению качественных и количественных показателей донной фауны оз. Цаган-Нур были опубликованы И.В. Богучаровой, Д.С. Петрушкиевой, А.А. Бугаковым (2013).

В составе макрозообентоса в течение 2012-2013 гг. зарегистрировано 24 вида и таксона рангом выше вида, относящимся к трем классам: Oligochaeta, Crustacea и Insecta (табл. 1). Длина таксономического списка постанционно варьировала от 4 (ст. 2 – южная сторона центральной части водоема «Кормоцех») до 12 таксонов (ст. 3 – урочище «5 курганов» в хвостовой части озера с южной стороны).

Наибольшее таксономическое разнообразие наблюдалось в группе амфибиотических насекомых отр. Diptera и отр. Trichoptera (16 видов и форм) с преобладанием в данной группе представителей отряда двукрылых, главным образом сем. Chironomidae (14 видов и форм). В состав других групп беспозвоночных входили ракообразные (кл. Crustacea), представленные бокоплавами (отр. Amphipoda, сем. Gammaridae – 5 видов) и мизидами (отр. Mysidacea – 2 вида), а также малощетинковые черви (кл. Oligochaeta) – 1 вид.

Таблица 1. Таксономический состав и распределение макрозообентоса на различных участках оз. Цаган-Нур (май-сентябрь 2012 г., июль-август 2013 г.)

Таксоны	Станции						Экологическая характеристика по отношению к градиенту солености (минерализации)
	1	2	3	4	5	6	
класс Oligochaeta							
Paranais litoralis (Müller, 1784)	+	+	+	+	+	+	Эвригалинный вид (Атлас беспозвоночных …, 1968)
класс Crustacea							
отряд Mysidacea							
Paramysis lacustris (Czerniavsky, 1882)	+	+	+	+	+	+	Пресноводный и олигогалинный вид (Атлас беспозвоночных …, 1968; Определитель пресноводных …, 1995; Данелия, Петряшев, 2011; Определитель рыб и беспозвоночных …, 2015); солоноватоводный вид (Малиновская, 2007)
Limnomysis benedeni Czerniavsky, 1882				+			Пресноводный и олигогалинный вид (Атлас беспозвоночных …, 1968; Определитель пресноводных …, 1995; Определитель рыб и беспозвоночных …, 2015); слабосолоноватоводный вид (Малиновская, 2007)
отряд Amphipoda							
сем. Gammaridae							
Chaetogammarus pauxillus G.O. Sars, 1896	+						Стеногалинный вид (Атлас …, 1968); морской вид (Малиновская, 2007)
Ch. warpachowskyi (G.O.Sars, 1894)				+			Олигогалинный вид (Атлас беспозвоночных …, 1968; Определитель пресноводных …, 1995); слабосолоноватоводный вид (Малиновская, 2007)
Dikerogammarus haemobaphes (N. Eichwald, 1841)			+	+			Эвригалинный вид (Атлас беспозвоночных …, 1968; Определитель пресноводных …, 1995); морской вид (Малиновская, 2007)
Niphargoides (*Pontogammarus*) *robustoides* (G.O. Sars, 1894)			+				Олигогалинный вид (Атлас беспозвоночных …, 1968; Определитель пресноводных …, 1995); слабосолоноватоводный вид (Малиновская, 2007)
Stenogammarus macrurus (G.O. Sars, 1894)	+						Эвригалинный вид (Атлас беспозвоночных …, 1968; Определитель пресноводных …, 1995); слабосолоноватоводный вид (Малиновская, 2007)
класс Insecta							
отряд Trichoptera							
Cyrnus flavidus MacLachlan, 1864			+				Пресноводный вид (Определитель пресноводных беспозвоночных …, 2001)
Ecnomus tenellus Rambur, 1842				+			Пресноводный вид (Определитель пресноводных беспозвоночных …, 2001)
отряд Diptera							
сем. Chironomidae							

Таксоны	Станции						Экологическая характеристика по отношению к градиенту солености (минерализации)
	1	2	3	4	5	6	
подсем. Tanypodinae							
Tanypus punctipennis Meigen, 1818					+		Эвригалинный вид; 6,8 г/л (Зинченко, Головатюк, 2013; Даирова, Зинченко, 2019; Зинченко и др., 2024)
подсем. Orthocladiinae							
Cricotopus (*Isocladius*) *sylvestris* (Fabricius, 1794)	+		+				Эвригалинный вид; 1,3-30,0 г/л (Зинченко, Головатюк, 2013; Даирова, Зинченко, 2019; Зинченко и др., 2024)
подсем. Chironominae							
триба Chironomini							
Chironomus (*Chironomus*) *salinarius* Kieffer, 1915	+	+	+	+	+	+	Эвригалинный вид; 5,8-41,1 г/л (Семик, 2013; Зинченко, Головатюк, 2013; Головатюк, Зинченко, 2015; Зинченко и др., 2024)
C. (*Camptochiromomus*) *tentans* Fabricius, 1805							Пресноводный и олигогалинный вид (Зинченко, Малиновская, 2013)
C. (*Chironomus*) *plumosus* (Linnaeus, 1758)						+	Эвригалинный вид; 3,9-9,6 г/л (*Chironomus* gr. *plumosus*) Зинченко, Головатюк, 2013; Зинченко и др., 2024))
C. (*Lobochironomus*) *dorsalis* Meigen, 1818			+		+	+	Пресноводный и олигогалинный вид (Зинченко, Малиновская, 2013)
Cladopelma goetghebueri Spies & Saether, 2004	+		+	+		+	Эвригалинный вид; 6,0-14,1 г/л (*Cladopelma* gr. *lateralis*) Зинченко, Головатюк, 2013; Зинченко и др., 2024))
Cryptochironomus gr. *defectus*						+	Эвригалинный вид (Зинченко, Малиновская, 2013; Даирова, Зинченко, 2019)
Cryptochironomus (*Cryptochironomus*) *obreptans* (Walker, 1856)	+				+		Эвригалинный вид (Зинченко, Малиновская, 2013; Даирова, Зинченко, 2019)
Glyptotendipes (*Glyptotendipes*) *gripekoveni* (Kieffer, 1913)	+						Эвригалинный вид (Зинченко, Малиновская, 2013; Даирова, Зинченко, 2019)
G. (*G.*) *paripes* (Edwards, 1929)			+		+		Эвригалинный вид; 6,0-14,4 г/л (Зинченко, Головатюк, 2013; Зинченко и др., 2024)
Polypedilum (*Polypedilum*) *nubeculosum* (Meigen, 1804)			+				Эвригалинный вид; 7,5 г/л (Зинченко, Головатюк, 2013; Даирова, Зинченко, 2019; Зинченко и др., 2024)
триба Tanytarsini							
Cladotanytarsus gr. *mancus*							Эвригалинный вид; 21,1 г/л (Зинченко, Головатюк, 2013; Даирова, Зинченко, 2019)
Tanytarsus gr. *gregarius* Kieffer, 1909	+	+	+		+	+	Эвригалинный вид; 7,4-13,8 г/л (Зинченко, Головатюк, 2013; Зинченко и др., 2024)
Всего:	10	4	12	8	7	8	

В условиях глобального изменения климатических условий процесс повышения минерализации влечет за собой изменения в биотической составляющей водоемов и водотоков. В этой связи наибольшую актуальность приобретают исследования особенностей отношения водных животных к солености, которая является одним из ведущих абиотических факторов среды, воздействующих на гидробионтов (Аладин, 1996; Алимов и др., 2000; Williams, 1987; Stoner, 1988; Velasco et al., 2006).

В таблице 1 приведена эколого-фаунистическая характеристика видов и групп видов макрозообентоса по отношению к солености, основанная на литературных источниках и результатах собственных исследований. В соответствии с данной информацией были выделены виды макрозообентоса, которые вошли в категорию эвригалинных: олигохеты *Paranais litoralis*, бокоплавы *Dikerogammarus haemobaphes*, *Stenogammarus macrurus*, хирономиды *Tanypus punctipennis*, *Cricotopus* (*I.*) *sylvestris*, *Chironomus* (*Ch.*) *salinarius*, *C.* (*Ch.*) *plumosus*, *Cladopelma goetghebueri*, *Cryptochironomus* gr. *defectus*, *Cryptochironomus* (*C.*) *obreptans*, *Glyptotendipes* (*G.*) *gripekoveni*, *Glyptotendipes* (*G.*) *paripes*, *Polypedilum* (*P.*) *nubeculosum*, *Cladotanytarsus* gr. *mancus*, *Tanytarsus* gr. *gregarius*. Таким образом, при увеличении минерализации водоема, и, как следствие, выпадении из структуры донного сообщества стеногалинных видов, эти виды

смогут обеспечивать его продуктивность и удовлетворять пищевые потребности бентосоядных рыб оз. Цаган-Нур.

Среди представленных выше таксономических групп макрозообентоса (табл. 1) наибольшая частота встречаемости как в 2012, так и 2013 гг. была характерна для хирономид (42,9-60,0% и 60-83,3% соответственно), что в свою очередь обусловлено их массовым развитием в данный период исследований (май-сентябрь), т. к. в теплое время года происходит интенсивное размножение и смена генераций представителей сем. Chironomidae, преимущественно подсем. Chironominae (рис. 3). Следующей наиболее часто встречаемой группой являлись олигохеты: в 2012 году частота их встречаемости составила 8,3-42,9%; в 2013 году олигохеты были обнаружены лишь в июле, в пробах, отобранных в августе, данная группа беспозвоночных отсутствовала. Ракообразные (отр. Mysidacea, отр. Amphipoda) наряду с хирономидами и олигохетами, также являлись одними из постоянных представителей бентофауны оз. Цаган-Нур в течение 2012-2013 гг.: мизиды в 2012 году наблюдались с мая по август (10,0-25,0%), гаммариды – в мае, июне и августе (8,3-14,3%); в 2013 году мизиды встречались только в июле (10,0%), гаммариды – как в июле (10,0%), так и в августе (16,7%). Личинки ручейников в пробах макрозообентоса на протяжении исследуемого периода регистрировались эпизодически.

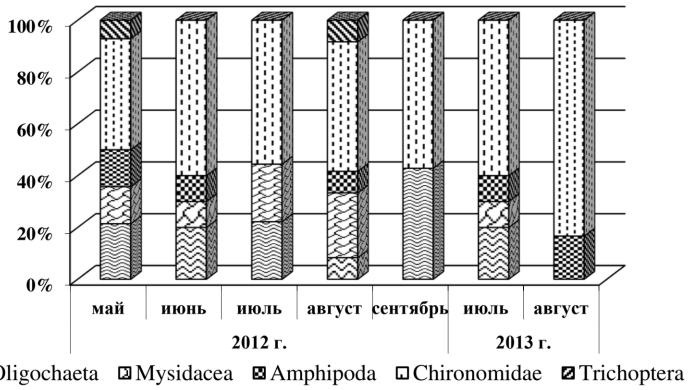


Рис. 3. Частота встречаемости (%) основных таксономических групп макрозообентоса в оз. Цаган-Нур (2012-2013 гг.)

Результаты исследований таксономического состава, частоты встречаемости и эколого-фаунистических характеристик видов макрозообентоса, полученные при проведении мониторинговых исследований в оз. Цаган-Нур, могут быть использованы при составлении Кадастра водных биологических ресурсов Республики Калмыкия.

В результате проведения идентификации таксономического состава макрозообентоса выявлен ряд новых видов для донной фауны оз. Цаган-Нур (табл. 1), преимущественно в таких таксономических группах, как отр. Diptera, отр. Trichoptera и кл. Oligochaeta относительно результатов предыдущих исследований (Богучарова и др., 2013).

Определены наиболее часто встречаемые таксоны макрозообентоса, среди которых одними из распространенных являлись представители сем. Chironomidae.

Эколого-фаунистическая характеристика таксономического состава донных сообществ оз. Цаган-Нур по отношению к градиенту солености позволила выделить

группу эвригалинных видов, которая при повышении минерализации сможет обеспечивать соответствующий уровень трофности для бентосоядных рыб (более подробная информация о трофности оз. Цаган-Нур представлена в следующей статье настоящего сборника «Структура донных сообществ озера Цаган-Нур (система Сарпинских озер Западно-Каспийского бассейнового округа»).

Литература

Аладин Н.В. Соленосные адаптации Ostracoda и Branchiopoda // Тр. ЗИН РАН. 1996. Т. 265. С. 220-234.

Алимов А.Ф., Орлова М.И., Голубков С.М., Жакова Л.В., Умнова Л.П. Гидробиологические исследования Зоологического института РАН в дельте Волги и Северном Каспии в 1994-1997 гг. Ч. 1. Район исследования, изучение сообществ автотрофных организмов и продукционно-деструкционных процессов // Касп. плавучий ун-т: Науч. бюл. Астрахань, 2000. № 1. С. 84-93.

Атлас беспозвоночных Каспийского моря / Под ред. Я.А. Бирштейна, Л.Г. Виноградовой. М: Пищевая промышленность, 1968. 430 с.

Безматерных Д.М. Пространственно-временная организация и факторы формирования макрозообентоса озер юга Западно-Сибирской равнины: Автореф. дис. … докт. биол. наук. Новосибирск, 2017. 45 с.

Безматерных Д.М. Уровень минерализации воды как фактор формирования зообентоса озер Барабинско-Кулундинской лимнобиологической области // Мир науки, культуры, образования, 2007. № 4(7). С. 7-11.

Богучарова И.В., Петрушкиева Д.С., Бугаков А.А. Качественная и количественная характеристика донной фауны в озере Цаган-Нур в 2012 г. // Современные проблемы и перспективы рыбохозяйственного комплекса: Материалы IV науч.-практ. конф. мол. уч. ФГУП «ВНИРО» с междунар. участием. М.: Изд-во ВНИРО, 2013. С. 6-9.

Водно-болотные угодья России. Т. 3. Водно-болотные угодья, внесенные в Перспективный список Рамсарской конвенции. М., 2000. 490 с.

Головатюк Л.В., Зинченко Т.Д. Биологические характеристики массовых видов хирономид *Cricotopus salinophilus* и *Chironomus salinarius* из соленых рек Приэльтонья: жизненные циклы, удельная продукция // Известия Самарского научного центра РАН, 2015. Т. 17. № 4. С. 210-214.

Даирова Д.С., Зинченко Т.Д. Эколого-фаунистическая характеристика хирономид (Diptera, Chironomidae) водных объектов на территории Астраханского государственного природного биосферного заповедника // Природные экосистемы Каспийского региона: прошлое, настоящее, будущее / Материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию Астраханского государственного заповедника. Астрахань: «МИР», 2019. С. 145-151.

Данелия М.Е., Петряшев В.В. Биогеографическое районирование Черноморско-Каспийского бассейна по фауне мизид (Crustacea: Mysidacea) // Биология моря, 2011. Т. 37. Вып. 2. С. 83-93.

Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В. Соленосная толерантность донных организмов речных вод (обзор) // Аридные экосистемы. 2013. Т. 19. №3. С. 5-11.

Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В., В.П. Моров Хирономиды (Diptera, Chironomidae) высокоминерализованных рек Приэльтонья (Россия): таксономический состав, экологические особенности // Экосистемы: экология и динамика. 2024. Т. 8. №2. С. 57-107.

Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В., Выхристюк Л.А., Шитиков В.К. Разнообразие и структура сообществ макрозообентоса высокоминерализованной р. Хара (Приэльтонье) // Поволжский экологический журнал, 2010. Т. 1. С 14-30.

Зинченко Т.Д., Малиновская Л.В. Изучение хирономид (Diptera, Chironomidae) в низовьях Волги и Северном Каспии и их многолетнее изменение биомассы // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. №3(1). С. 508-517.

Малиновская Л.В. Зообентос Северного Каспия в период подъема уровня моря: Дис. … канд. биол. наук. Тольятти, 2007. 168 с.

Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 240 с.

Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 5. Высшие насекомые / Под общ. ред. С.Я. Цалолихина. СПб.: Наука, 2001. 825 с.

Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 2. Ракообразные / Под общ. ред. С.Я. Цалолихина. СПб.: ЗИН РАН, 1995. 318 с.

Определитель рыб и беспозвоночных Каспийского моря. Т. 2. Стрекающие, гребневики, многощетинковые черви, веслоногие ракообразные и мизиды. Серия: Определитель рыб и беспозвоночных Каспийского моря. М.: Т-во научный изданий КМК, 2015. 248 с.

Панфилий С.А., Панфилий А.М. Гидролого-гидрохимическое состояние оз. Цаган-Нур, Республика Калмыкия // Материалы Всерос. молодеж. гидробиол. конф. «Перспективы и проблемы современной гидробиологии. Ярославль: Филигрань, 2016. С. 41-42.

Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 8. Северный Кавказ / Под ред. Д.Д. Мордухай-Болтовского. Л.: Гидрометеоиздат, 1964. 309 с.

Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Под ред. В.А. Абакумова. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 319 с.

Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / Под ред. В.А. Абакумова. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 239 с.

Семик А.М. Продукционные показатели личинок хирономид (*Chironomus salinarius*) в Акташском озере // Тр. ЮгНИРО. 2013. Т. 51. С. 53-57.

Соколова Н.Ю., Извекова Э.И., Львова А.А., Сахарова М.И. Бентос Учинского водохранилища. М.: Наука, 1980. 253 с.

Схема комплексного использования и охраны водных объектов бессточных районов междуречья Терека, Дона и Волги. Приложение 3. Пояснительная записка к книге 1. 185 с.

Stoner R. Engineering a solution to the problem of salt-laden soils. New Scientist, 1988. 44 p.

Williams W.D. Salinization of rivers and streams: an important environment hazard // Ambio. 1987. Vol. 16. №4. P. 180-185.

COMPOSITION AND ECOLOGICAL-FAUNISTIC CHARACTERISTICS OF MACROZOOBENTHOS UNDER THE CHANGING HYDROLOGICAL-HYDROCHEMICAL REGIME OF LAKE TSAGANG-NUR (SARPINSKY LAKE SYSTEM OF THE WESTERN CASPIAN BASIN DISTRICT

D.S. Dairova, D.S. Petrushkieva

The paper presents the results of two-year monitoring studies (may-september 2012 and july-august 2013), the purpose of which was to study the taxonomic diversity, frequency of occurrence and ecological and faunal characteristics of macrozoobenthos species of lake Tsagan-Nur.

ИССЛЕДОВАНИЯ АЛЬГОЦЕНОЗОВ ОЗЕР ЕВРО-АРКТИЧЕСКОГО БАРЕНЦЕВА РЕГИОНА В XXI ВЕКЕ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Д.Б. Денисов, А.Л. Косова, С.И. Вокуева
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

Первая четверть XXI века характеризуется значительными преобразованиями в сообществах водорослей и цианобактерий в арктических озерах. Радикальные изменения выявлены в урбанизированных районах – городских водоемах, а также в зоне влияния подогретых вод Кольской АЭС. Значимым фактором наблюдаемых изменений является токсическое воздействие целого ряда микроэлементов, включая тяжелые металлы, концентрация которых в воде исследованных водоемов может многократно превышать фоновые. Выявлены последствия климатических изменений и бореализации озер Арктики, проявляющиеся в увеличении доли цианопрокариот в составе сообществ фитопланктона и тенденции роста количественных показателей альгоценозов.

Сообщества водорослей и цианобактерий занимают лидирующее положение в системе биоиндикации состояния экосистем озер высоких широт и широко применяются для задач регионального экологического мониторинга (Sharov, Denisov, 2021). Ключевые структурно-функциональные показатели альгоценозов озер Арктической зоны РФ являются одними из базовых критериев оценки качества водных ресурсов региона на фоне общемировых тенденций антропогенного загрязнения, сокращения биоразнообразия, бореализации экосистем озер. Многолетние комплексные экологические исследования более 150 озер Евро-Арктического Баренцева региона (1992–2024 гг.) свидетельствуют об устойчивых тенденциях увеличения количественных показателей и усилении экосистемной роли видов, характерных для более низких широт в ответ на антропогенные преобразования окружающей природной среды и развитие процессов эвтрофикации вод на фоне потепления климата Арктики.

Большая часть проведенных исследований была сосредоточена в Мурманской области. В первой четверти XXI века в озерах региона наблюдается увеличение таксономического разнообразия и доли цианопрокариот в фитопланктоне, включая потенциально токсичные виды, способные к массовому развитию. Для Мурманской области характерным таксоном является *Dolichospermum lemmermannii*, вызывающий эпизодическое локальное цветение вод и способный к продукции токсинов (Denisov et al., 2020). В настоящее время присутствие этого вида отмечено в разнотипных водных объектах, в том числе и удаленных от промышленных и селитебных территорий. Например, летом 2023 г. на поверхности воды оз. Колмозеро, расположенного на значительном удалении от зон интенсивного природопользования (N 67,968864° E 36,894052°), в период штиля формировалась пленка, сформированная колониями *D. lemmermannii*. Вероятно, это могло быть следствием развития процессов эвтрофирования в результате функционирования вахтового рабочего поселка на берегах водоема, в котором одновременно могло проживать до 80 человек.

Сравнительно высоки численные показатели и таксономическое разнообразие цианопрокариот в озерах, расположенных на территории г. Мурманска, включая виды, способные вызывать цветение воды и являющиеся потенциально токсичными для водных организмов и человека, включая: *Aphanocapsa planctonica*, *Aphanizomenon gracile*; *Dolichospermum solitarium*; *D. lemmermannii; D. affine* (Белякова и др., 2006). В некоторых озерах города в отдельные годы была зарегистрирована высокая доля динофлагеллят и золотистых водорослей. В других озерах г. Мурманск диатомовые водоросли перестали быть доминирующей группой в сообществах фитопланктона, их

место заняли зеленые водоросли и цианопрокариоты. Также обращает на себя внимание сравнительно высокое таксономическое богатство зеленых водорослей, сопоставимое с таковым у диатомовых. Подобная структура сообществ фитопланктона зачастую характерна для более низких широт. Наибольшее видовое богатство отдела зеленых водорослей (Chlorophyta) выявлено в оз. Семеновское. Это связано не только со значительно большей изученностью этого водного объекта по сравнению с другими озерами г. Мурманска, но и с объективно благоприятными условиями для развития Chlorophyta в водоеме (Озера …, 2023).

Наблюдения за динамикой показателей фитопланктона озер г. Мурманска в течение нескольких лет (2018-2024 гг.) позволяют заключить, что малые городские водоемы, подверженные многофакторной антропогенной нагрузке, отличаются наиболее резкими изменениями структурно-функциональных показателей сообществ фитопланктона от года к году. Это выражается в смене доминантных видов и резких колебаниях уровня биомассы и свидетельствует о крайне нестабильных условиях обитания. Наблюдаемые изменения во многом оказались обусловлены гидрохимическими факторами. Химический состав воды озер г. Мурманска значительно отличается от состава озер ненарушенных территорий (Даувальтер и др., 2021). Определяющие значение для фитопланктона имели ежегодные изменения содержания биогенных элементов в воде. Так, максимальные концентрации соединений фосфора (до 45 мкгР/л) и азота (до 1600 мкгN/л) в оз. Ледовое в 2018 г. обусловили массовое развитие фитопланктона и экстремально высокий уровень биомассы – до 36,9 г/м^3. В последующие годы наблюдалось резкое снижение концентрации фосфатов, общего фосфора и аммиачного азота в воде озера, что привело к уменьшению биомассы фитопланктона. Наряду с этим, было отмечено увеличение суммарной концентраций токсичных металлов Co, Pb, Cr и Cd с 2018 по 2020 г более чем в 2 раза – с 1.5 до 5.1 мкг/л. В совокупности эти процессы, очевидно, явились причиной ежегодных кардинальных изменений в структуре сообществ и видовом составе планктонных альгоценозов. Важным обстоятельством следует также считать экстремально высокий уровень нитратов в воде оз. Ледового в июле 2020 году – до 793 мкгN/л, что более чем в 6 раз превышает концентрации в других исследованных водоемах. Проф. С.С. Бариновой (2018) а также нашими исследованиями (Denisov et al., 2020) было показано, что нитратный азот полностью используется фотоавтотрофными организмами, если какое-либо иное воздействие, например, токсическое, не препятствует фотосинтетической активности.

В озерах урбанизированных территорий Мурманской области, подверженных интенсивному загрязнению и эвтрофированию, содержание Chl «*a*» превышает фоновые для региона показатели и в некоторых водоемах достигает экстремальных для арктических вод значений. Несмотря на высокую концентрацию биогенных элементов, большинство озер характеризуется олиготрофным трофическим статусом, как результат угнетения развития водорослей и цианопрокариот, что особенно характерно для небольших озер, подверженных загрязнению предприятиями цветной металлургии АО «Кольская ГМК» пгт Никель и г. Мончегорск. Промежуточное положение занимают водоемы с признаками мезотрофии, где токсическая нагрузка частично компенсируется водообменными процессами в сочетании с эвтрофированием: оз. Куэтсъярви и оз. Нюдъявр. В озерах в черте г. Мурманска – Ледовое и Семеновское, где биогенные элементы присутствуют в количествах, многократно превышающих фоновые значения, при сравнительно низкой концентрации тяжелых металлов, формируются специфические, не типичные для арктических пресноводных экосистем высокопродуктивные сообщества фитопланктона, способные активно развиваться в

летний период. Концентрация Chl «*a*» в этих озерах достигает экстремальных значений (до 45.3 мг/м^3)

Подведены итоги долговременного изучения сообществ фитопланктона в зоне влияния Кольской АЭС. Использование естественных водоемов для охлаждения нагретой циркуляционной воды в системах оборотного водоснабжения АЭС является причиной так называемого теплового загрязнения, исследованием последствий которого для пресноводных и морских экосистем активно занимаются с момента активного развития атомной энергетики по настоящее время. Кольская АЭС, в силу своего географического расположения в Арктической зоне РФ, представляет собой уникальный объект для изучения ответных реакций экосистем арктических озер на тепловое воздействие. Для охлаждения реакторов используется вода из озера Имандра, при этом забор воды осуществляется в одном плесе, а сброс – в другом (Современное…, 2020). В условиях высоких широт температура является важнейшим лимитирующим фактором биогеохимических процессов, протекающих как в самом водоеме, так и на его водосборной территории. Зона поступления подогретых вод служит модельным объектом для изучения последствий потепления климата Арктики для внутренних водоемов.

В целом в структуре альгоценозов сохранилось доминирующее положение диатомовых водорослей по численности, биомассе и видовому разнообразию. Массовыми видами летнего фитопланктона были *Asterionella formosa*, *Tabellaria fenestrata*, *Aulacoseira islandica*. Позиции субдоминантов занимали: *Aulacoseira pusilla*, *A. italica*, *Rhizosolenia longiseta*, *Fragilaria crotonensis*. Среди массовых видов золотистых водорослей господствующее положение занимали *Dinobryon divergens* и *D. bavaricum*. Из зеленых водорослей встречались – *Tetraspora gelatinosa*, *Sphaerocystis schroeteri*, *Pediastrum spp*. Доля динофитовых водорослей была не велика, в пробах встречались преимущественно два вида: *Parvodinium goslaviense* и *Ceratium hirundinella*. В 2023 г. в летнем фитопланктоне исследованных станций сравнительно высока была доля цианобактерий: *Dolichospermum lemmermannii*, *D. circinale*, *D. flos-aquae*, *D. affine*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Phormidium spp*. В пробах также были обнаружены лизированные колонии *D. lemmermannii*, на которых активно развивались сувойки *Vorticella sp*.

За время функционирования Кольской АЭС происходили неоднократные изменения в таксономическом составе, структуре и численных характеристиках фитопланктона в участке акватории, подверженном влиянию подогретых вод (рис. 1).

Ва современном этапе таксономическая структура и количественные показатели фитопланктона радикально изменились, по сравнению с предыдущими периодами. В структуре сообществ увеличилась доля цианобактерий, на фоне многократного снижения биомассы. Наблюдаемые изменения закономерно отразились и на трансформациях в сообществах зоопланктона (рис.).

Предыдущие исследования фитопланктона оз. Имандра показали, что повышенные температуры воды, развитие макрофитов и активная гидродинамика сбросного канала Кольской АЭС способствуют интенсивной утилизации биогенных элементов альгоценозами (Современное состояние…, 2020). Очевидно, снижение численных характеристик – уровня биомассы и содержания хлорофилла «а» в планктоне до «доиндустриальных» значений в 2023 году подтверждает эту тенденцию. Тревожным обстоятельством на этом фоне выступает увеличение доли цианопрокариот в составе альгоценозов, включая потенциально токсичные виды, способные вызывать «цветение воды». Среди последних наибольшую опасность представляет *D. lemmermannii*, явления массового развития которого периодически фиксируются в северных участках акватории оз. Имандра и сопровождаются выделением цианотоксинов (Denisov et al., 2021)

Очевидно, в настоящее время в озере происходит реализация отдельных адаптационных механизмов на уровне сообществ водорослей и цианопрокариот к тепловому загрязнению, что актуализирует систематические мониторинговые наблюдения за состоянием водных экосистем в зоне влияния Кольской АЭС.

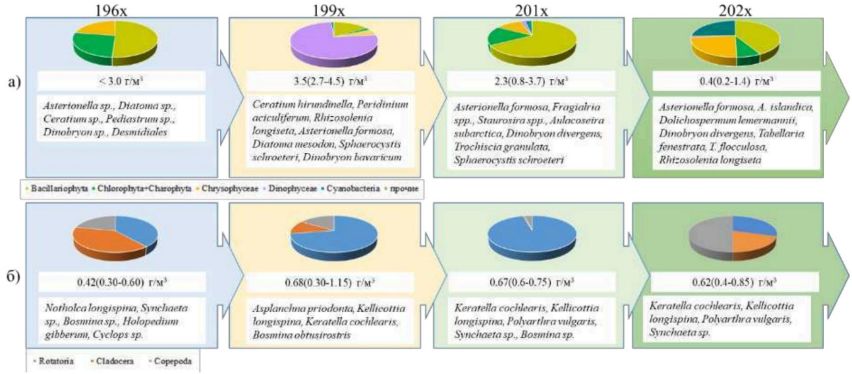


Рис. Изменения доминирующих видов, биомассы (июнь–август) и соотношения основных таксономических групп сообществ планктона оз. Имандра в зоне влияния подогретых вод Кольской АЭС в различные периоды исследований: а) фитопланктон, б) зоопланктон

В настоящее время сохраняются тенденции на стабилизацию количественных показателей фитопланктона, которые в большинстве водных объектов 30-км зоны вокруг Кольской АЭС находится в пределах фоновых для Мурманской области значений. В то же время, были зарегистрированы свидетельства роста трофического статуса вод и «бореализации» видового состава. В составе альгоценозов происходит увеличение доли цианопрокариот, включая потенциально токсичные виды, способные вызывать «цветение воды». Исследования показали, что эти события не связаны с влиянием подогретых вод Кольской АЭС, что подтверждается показателями диатомовых комплексов современных донных отложений (Экосистемы…, 2024).

Полученные результаты актуализируют необходимость продолжения исследований изменений альгоценозов озер региона для корректной интерпретации наблюдаемых изменений и прогнозирования возможных последствий, что предполагает не только надлежащий сезонный охват, но и анализ взаимодействия между факторами стресса, таксономическим разнообразием и структурой сообществ водорослей и цианопрокариот. Глобальный характер наблюдаемых изменений требует принципиально новых регионально-ориентированных схем оценки качества водных ресурсов, а также прикладных биогеохимических исследований.

Литература

Белякова Р.Н., Волошко Л.Н., Гаврилова О.В., Гогорев Р.М., Макарова И.В., Околодков Ю.Б., Рундина Л.А. Водоросли, вызывающие «цветение» водоемов Северо-Запада России. М.: Т-во научных изданий КМК, 2006. 367 с.

Даувальтер В.А., Слуковский З.И., Денисов Д.Б., Черепанов А.А. Особенности химического состава воды городских озер Мурманска // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2021. Т. 66. Вып. 2. С. 252–266.

Современное состояние экосистем в районе Кольской АЭС (Мурманскаяя область). Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020. 311 с.

Экосистемы в районе Кольской АЭС (Мурманскаяя область): современное состояние. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2024. 468 с.

Barinova S.S. The problem of integral toxic effects assessment on photosynthetic organisms in aquatic ecosystems // Aquat. Bioresour. Habitat. 2018. 1. P. 39–43.

Denisov D.B., Chernova E.N., Russkikh Ya.V. Toxic Cyanobacteria in the Arctic Lakes: New Environmental Challenges. A Case Study // SSC 2020, SPRINGERGEOGR, 2021. P. 161–170.

Denisov D.B., Terentjev P.M., Valkova S.A. Kudryavtzeva L.P. Small Lakes Ecosystems under the Impact of Non-Ferrous Metallurgy (Russia, Murmansk Region) // Environments. 2020. 7. 29.

Sharov A., Denisov D. Algae of lakes in the European North of Russia // Lake water: properties and uses (case studies of hydrochemistry and hydrobiology of lakes in northwest Russia). Nova Science Publishers Inc., 2021. P. 153-191.

ALGAE OF THE EURO-ARCTIC BARENTS REGION LAKES RESEARCH IN XXI: PROBLEMS AND PROSPECTS

D.B. Denisov, A.L. Kosova, S.I. Vokueva

The first quarter of the 21st century is characterized by significant transformations in the communities of algae and cyanobacteria in Arctic lakes. Radical changes have been revealed in lake of the urbanized areas, as well as in the zone of influence of the heated waters of the Kola NPP. A significant factor in the observed changes is the toxic effect of a number of trace elements. The concentrations in water of the studied lakes were many times higher than the references. The effects of climate change and borealization of Arctic lakes have been revealed, manifested in an increase in the proportion of cyanobacteria in phytoplankton and an increase in the quantitative indicators of algocenoses.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЗООПЛАНКТОНА ОЗЕРА МАЛОЕ ЧАЙКОВОЕ ПОСЛЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЭКОРЕАБЛИТАЦИИ

О.Ю. Деревенская

Казанский (Приволжский) федеральный университет

В период с 2021 по 2024 гг. изучалось сообщество зоопланктона озера Малое Чайковое (г. Казань) после проведенных работ по его благоустройству. Выявлено, что восстановление экосистемы сопровождалось динамическими изменениями в составе зоопланктона. Доля коловраток увеличилась до 75.6%, тогда как численность ветвистоусых и веслоногих ракообразных снизилась. Зафиксированы колебания индекса сапробности (1.7–2.1) и тенденция к росту индекса Шеннона по численности. В летние месяцы наблюдалось «цветение» воды и снижение её прозрачности. Для эффективного управления водоёмом необходим многолетний мониторинг его состояния.

Озеро Малое Чайковое расположено в районе с многоэтажной жилой застройкой в г. Казани. Ранее эта территория представляла собой заболоченный участок, который со временем был осушен и застроен жилыми домами. От прежнего болота сохранились лишь несколько небольших озёр, среди которых — озеро Малое Чайковое.

Экологическое значение водоёмов в городе заключается в сохранении биологического разнообразия, создании благоприятного микроклимата, а также в том, что озера служат местом гнездования птиц.

В 2021 году были проведены работы по благоустройству озера Малое Чайковое и прилегающей территории, включая изъятие донных отложений и укрепление берегов. Мероприятия по благоустройству и экоребилитации оказывают значительное воздействие на все компоненты водных экосистем, вызывая их изменения. После такого вмешательства требуется время для восстановления биотических компонентов и формирования новых экосистемных связей. Оценка состояния зоопланктона играет важную роль в системе экологического контроля и прогнозирования антропогенной нагрузки. Состав видов зоопланктона, структура популяций, количественные показатели и динамика биологических индексов позволяют оценить состояние водоема. Только многолетние наблюдения дают возможность объективно судить о результатах проведённых мероприятий и планировать дальнейшие шаги по стабилизации и улучшению состояния водоёма.

Цель работы — оценка изменений в сообществе зоопланктона озера Малое Чайковое после мероприятий по экологической реабилитации.

Исследования на озере Малое Чайковое проводилось в вегетационные сезоны 2022–2024 гг. (с мая по сентябрь) и включали измерение физико-химических показателей воды и изучение сообщества зоопланктона. Пробы зоопланктона отбирали с поверхности воды, процеживая 50 л воды через сеть Апштейна с периодичностью один раз в две недели на протяжении вегетационного периода. Дальнейшая обработка проб проводилась по общепринятым гидробиологическим методикам (Методические …, 1982). Для оценки качества воды использовались биотические индексы (Shannon, Weaver, 1949; Sladecek, 1973).

Анализ многолетних исследований физико-химических показателей воды озера Малое Чайковое показал характерную для естественных водоемов динамику температуры воды: от 10.2°C до 26.5°C, с максимальными значениями летом и минимальными — весной и осенью. Концентрация кислорода варьировала от 4.93 мг/л до 25.1 мг/л при насыщении от 46% до 294%. Низкие показатели кислорода в августе были связаны с повышенным потреблением кислорода и снижением фотосинтеза, в то время как июнь-июль характеризовались интенсивным «цветением» воды, что сопровождалось снижением её прозрачности до 18 см. Вне этих периодов прозрачность достигала 0.65 м, что соответствует эвтрофным водоёмам.

Электропроводность воды колебалась от 510 до 750 мкСм/см и демонстрировала тенденцию к снижению за три года. Уровень pH воды варьировал от 6.7 до 9,7, оставаясь преимущественно слабощелочным. Повышенные значения отмечались во время «цветения» фитопланктона, а в остальное время реакция воды приближалась к нейтральной.

Число видов зоопланктона в озере Малое Чайковое оставалось относительно стабильным на протяжении периода исследований, в разные годы выявлялось от 32 до 35 видов. В сообществе преобладали коловратки, чья доля выросла с 54,29% в 2022 г. до 75,76% в 2024 г. Доля ветвистоусых ракообразных сократилась с 31.43% в 2022 г. до 12.12% в 2024 г. Доля веслоногих ракообразных варьировалась от 14.29% до 18.75%.

Состав доминирующих видов зоопланктона изменялся по сезонам и годам. В 2022 году в начале сезона лидировали *Brachionus calyciflorus* Pallas, 1776 и *Synchaeta pectinata* Ehrenberg, 1832, позже доминировали Nauplia и Copepoda. В 2023 г. доминантами стали *B. calyciflorus, Asplanchna girodi* de Guerne, 1888 и *Brachionus diversicornis* (Daday, 1883). В 2024 году их сменили *Keratella cochlearis* (Gosse, 1851), *Brachionus angularis* Gosse,

1851 и *Cyclops vicinus* Uljanin, 1875. *B. calyciflorus*, а также науплиальные стадии циклопов неоднократно возвращались в число доминантов.

Доминанты по биомассе также не были постоянными. Некоторые виды проявляют сезонную активность. Например, *A. girodi* и *B. calyciflorus* появляются преимущественно летом (июнь-август), что указывает на их чувствительность к температурным условиям, кроме того они являются индикаторами эвтрофных и гипертрофных вод. *Daphnia longispina* O.F.Muller, 1785 появляется весной и осенью, а Nauplii – в основном летом. Эти колебания могут быть связаны с периодами размножения рачков, доступностью корма, температурой воды и другими экологическими факторами. *C. vicinus*, копеподитные стадии циклопов, *S. pectinata* присутствовали практически во все сезоны, что говорит об их высокой адаптации к условиям водоема. Такие виды как *B. diversicornis, Moina brachiata* (Jurine, 1820), *Asplanchna sieboldi* (Leydig, 1854) входят в состав доминирующих видов только через год-два после начала наблюдений, это может быть связано с воздействием случайных факторов, таких как изменение температуры воды. Таким образом, сообщество зоопланктона в озере Малое Чайковое характеризуется значительной динамичностью и подвержено влиянию различных внешних факторов, включая температуру, наличие пищи и хищников, конкуренции между видами.

Численность зоопланктона в озере Малое Чайковое существенно колебалась как в многолетней динамике, так и по сезонам. Наибольшая численность была зафиксирована в августе 2024 г. (1035.07 тыс. экз./м^3), что превышает показатели всех предыдущих измерений. Весной и в начале лета численность была ниже, особенно в 2023 г. Среди групп зоопланктона наибольший вклад вносили коловратки, их численность достигала максимума в летние месяцы каждого года. Веслоногие ракообразные демонстрировали значительный рост численности в сентябре 2022 и 2024 гг., тогда как ветвистоусые ракообразные имели относительно стабильную низкую численность на протяжении всего периода наблюдений.

Биомасса зоопланктона в озере Малое Чайковое также демонстрировала значительные колебания как в многолетней динамике, так и по сезонам. Максимальные значения биомассы наблюдались в октябре 2022 г. (2.5 г/м^3) и в июле 2024 г. (1.7 г/м^3). Минимальная биомасса отмечена в мае 2023 г. (0.041 г/м^3). Среди групп зоопланктона наибольшую долю в биомассе составляли веслоногие ракообразные, особенно в осенние месяцы. Весной и в начале лета биомасса была сравнительно низкой для всех групп, хотя летом 2023 г. она заметно увеличилась благодаря росту численности коловраток. Биомасса ветвистоусых ракообразных была самой низкой на протяжении всего периода наблюдений. Таким образом, динамика биомассы зоопланктона в озере Малое Чайковое зависела от времени года и колебаний численности основных групп организмов, причем наиболее значимо изменялась биомасса веслоногих ракообразных и коловраток.

Значения индекса сапробности в озере Малое Чайковое изменялись в пределах от 1.7 до 2.1, что соответствует β-мезосапробной зоне. Этот диапазон указывает на умеренно загрязненную воду с достаточным содержанием органических веществ. Значения индекса Шеннона изменялись, отражая изменения в видовом разнообразии и выровненности сообщества. В 2024 г. значения индекса Шеннона по численности достигали максимальных за все время наблюдений, что свидетельствует о росте видового разнообразия. Наблюдается тенденция к увеличению значений индекса по численности, но снижение по биомассе, что связано с возрастающей ролью коловраток в сообществе.

Таким образом, проведенные исследования показали, что мероприятия по благоустройству озера и прибрежной зоны значительно улучшили эстетические и рекреационные свойства. Озеро и парковая зона стали привлекательными объектами для

отдыха местных жителей. Однако благоустройство водоема включало только гидротехнические мероприятия, а биотехнические не проводились. Это привело к «цветению» воды фитопланктоном в летний период, особенно интенсивно в июле. В это время прозрачность воды снижалась до 18 см, а pH поднимался до 9 ед. В конце вегетационного периода наблюдалось снижение содержания кислорода в поверхностных слоях воды. Видовой состав зоопланктона был относительно постоянным, выявлялось от 32 до 35 видов. Преобладали коловратки, численность которых увеличивалась, тогда как доля веслоногих ракообразных снижалась, что характерно для эвтрофных и гипертрофных водоёмов. Состав доминирующих видов зоопланктона менялся в зависимости от сезона и года, что свидетельствует о динамичности сообщества и его зависимости от внешних факторов. Часто доминировали коловратки *Brachionus calyciflorus* или *Synchaeta pectinata*, являющиеся индикаторами загрязненных или эвтрофных вод. Численность и биомасса зоопланктона существенно варьировали: максимальные значения наблюдались летом, а минимальные – весной и в начале лета. Динамика биомассы определялась веслоногими ракообразными и коловратками. Количественные показатели соответствовали эвтрофным-гипертрофным водоёмам. По величине индекса сапробности водоем относится к умеренно загрязненным. Биотические индексы указывают на постепенное повышение видового разнообразия зоопланктона: численные показатели увеличиваются, но биомасса снижается из-за возрастающей роли коловраток.

Литература

Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция. Л.: ЗИН, ГОСНИОРХ, 1982. 33 с.

Shannon C.E., Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana: Univ. Illinois Press, 1949. 117 p.

Sladecek V. System of water quality from biological point of view. Egetnisse der Limnologie. Heft. 7, 1973. 218 p.

ASSESSMENT OF THE ZOOPLANKTON COMMUNITY OF LAKE MALOE CHAIKOVO AFTER ECOLOGICAL REHABILITATION ACTIVITIES

O.Y. Derevenskaya

Between 2021 and 2024, the zooplankton community of Lake Maloe Chaikovo (Kazan) was studied following the restoration works carried out on the lake. It was found that the ecosystem recovery was accompanied by dynamic changes in the zooplankton composition. The proportion of rotifers increased to 75.76%, while the abundance of branchiopods and copepods decreased. Fluctuations in the saprobity index (1.7–2.1) were recorded, along with a trend toward an increase in the Shannon index based on abundance. In the summer months, water «blooming» and a decrease in water transparency were observed. Long-term monitoring of the lake's condition is essential for effective water body management.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ОБИЛИЕ ЗООПЛАНКТОНА ПОЙМЕННОГО ОЗЕРА – РЫБОПИТОМНИКА (ОБЬ-ИРТЫШСКИЙ БАССЕЙН, ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

А.А. Евсеева

Тюменский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («Госрыбцентр»)

Представлены результаты исследования зоопланктона пойменного озера (сора) в бассейне Нижней Оби (Западная Сибирь), используемого в качестве питомника для подращивания молоди сиговых рыб для целей искусственного воспроизводства водных биологических ресурсов в рамках компенсационных мероприятий.

Западная Сибирь является одним из самых заозёренных регионов мира. Здесь сосредоточено более 998 тыс. озёр, что составляет 24.4% озерного фонда и 9% водноозерных акваторий материка Евразии. Обь-Иртышский бассейн является одним из крупнейших водных бассейнов мира. Характерной особенностью поймы Оби является соровая система – совокупность водоёмов, образующихся при затоплении водами Оби понижений долины реки во время паводка, которые в большинстве своём пересыхают во второй половине лета.

Соровая система обеспечивает многообразие местообитаний для множества групп организмов: беспозвоночных, рыб, амфибий, птиц. Пойменные водоемы формируют состав фито- и зоопланктона всех водных объектов речной системы, включая главный водоток. Сохранение и воспроизводство рыбных ресурсов связано с состоянием пойменной (соровой) системы Оби, так как она является местом нереста и нагула многих видов рыб.

Зоопланктон в питании молоди сиговых рыб в естественных условиях занимает ведущую роль, поэтому основное внимание при исследовании кормовой базы было отведено планктонным беспозвоночным. Пойменное озеро Малый Пальяновский сор представляет собой оптимальную модель для изучения особенностей формирования и развития зоопланктонных сообществ в условиях влияния молоди рыб. Цель данной публикации – представить результаты исследования зоопланктона пойменного озера (сора) в период подращивания молоди сиговых рыб.

Отбор и обработку проб зоопланктона проводили в 2021–2024 гг. в соответствии с общепринятыми методиками (Методическое …, 1974; Методические …, 1984). Продуктивность водоема определяли по «шкале трофности», разработанной С.П. Китаевым (Китаев, 2007). Кормность водоема определяли согласно рыбохозяйственной классификации (Пидгайко, 1968).

В 80-х гг. XX века было проведено комплексное исследование материковых соров Октябрьского района с целью определения возможности их зарегулирования для продления сроков нагула аборигенных рыб или создания на их базе магистральных рыбопитомников. По результатам данных исследований оз. Малый Пальяновский сор было рекомендовано для зарегулирования. Однако плотина построена не была, но для предотвращения захода в рыбопитомник хищных и сорных рыб, в устье сора ежегодно в апреле устанавливается рыбозаградитель.

Водоём оз. Малый Пальяновский сор (рыбопитомник «Ай-тор») расположен в Октябрьском районе Ханты-Мансийского автономного округа – Югры в 10 км западнее с. Каменное, в среднем течении протоки Ендырской. Малый Пальяновский сор с р. Обь связан протоками Малый Сор, Соровое Устье, Могилёвской, Ликуп, Ендырской, Ермолкиной. Наибольшая длина сора составляет 9,1 км; наибольшая ширина – 5,8 км. Водоем временный. Максимальная полезная площадь водоёма при среднемноголетнем уровне паводковых вод составляет около 4500 га. Залитие сора начинается в мае, в результате таяния снега на водосборе, а также поступления вод из протоки Малый Сор, рек Тантаёган, Средняя, Чёрная, Шишъёган и безымянных ручьёв. Площадь водосбора – 381 км^2. По мере спада воды, сор осушается, и в межень представляет собой остаточный водоём площадью 674 га, средней глубиной 0.7 м, изрезанный руслами соровых рек. Продолжительность залития сора колеблется по годам в зависимости от уровней воды, площадь водного зеркала сора непостоянна и зависит от уровня воды р. Оби. До

использования в качестве выростного водоема озеро по среднесезонной величине биомассы зоопланктона (0.69 г/м^3) считалось малокормным, по степени развития зообентоса (9.96 г/м^2) относилось к водоемам выше средней кормности. В целом, оз. Малый Пальяновский сор имеет большие резервы как выростной водоем для личинок и молоди сиговых рыб, и его возможности при искусственном воспроизводстве увеличиваются в годы с высоким уровнем воды в период половодья.

За период 2021–2024 гг. в оз. Малый Пальяновский сор был зарыблено около 770 млн личинок сиговых рыб. В 2021–2022 гг. численность личинки пеляди была превалирующей, с 2023 г. доминирующим видом по зарыблению стал муксун – до 80 % от общего количества зарыбленной личинки сиговых (рисунок 1). Плотность посадки личинок сиговых рыб зависела как от количества зарыбляемой личинки, так и от площади водоема, что, в конечном итоге, повлияло на структуру и обилие зоопланктона в водоеме.

Температурный режим является основополагающим для развития кормовой базы и, как следствие, роста молоди рыб. Вода в оз. Малый Пальяновский сор в 2021–2024 гг. прогревалась неравномерно, достигая в третьей декаде мая значений 17–19 °С. Летом в середине июня вода остывала до 5–7 °С, в первой декаде июля вода прогревалась до температуры 25–28 °С. Отмечалось два температурных пика – в начале июня и в начале июля. В целом, температурный режим в мае – июле 2021–2024 гг. соответствовал среднемноголетнему уровню и был вполне благоприятным для роста и развития кормовой базы и выращиваемой молоди холодноводных видов сиговых рыб.

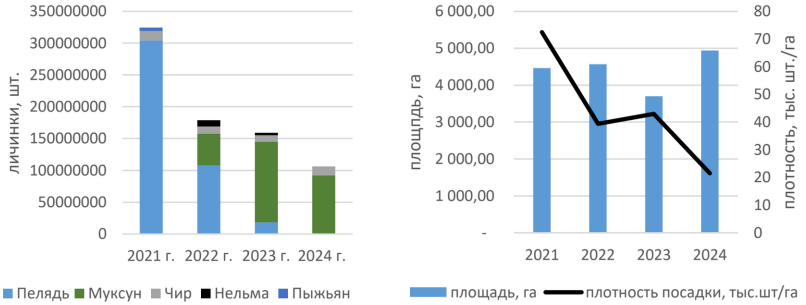


Рис. 1. Динамика количества зарыбленных личинок сиговых, их плотности и площади оз. Малый Пальяновский сор в 2021–2024 гг.

Состав высшей водной растительности сора представлен осокой *Caricetum sp*., гречихой земноводной *Persicaria amphibia*, рдестами (рдест злаковый *Potametum graminei,* рдест гребенчатый *Potamogeton pectinatus,* рдест пронзённолистный *P. perfoliatus, рдест плавающий P. natans*), хвощем *Equisetum arvense*, водяной сосенкой *Hippuris vulgaris*, элодеей *Elodeas sp.*, мхом *Fontinalis hypnoides*. Зарастаемость водного зеркала – до 70%. Макрофиты, особенно погруженные, служат хорошим рефугиумом для молоди сиговых рыб от пресса хищников (в основном, это молодь щуки). Однако погруженная растительность служит слабой защитой для зоопланктона из-за мощного пресса подращиваемой молоди рыб. Пресс молоди рыб направлен на крупный зоопланктон. Так как зоопланктон с малыми размерами не способен контролировать развитие фитопланктона, в летний период на водоёме наблюдается «цветение» воды вследствие массового развития планктонных водорослей.

В мае – июле 2021–2024 гг. в составе зоопланктонного комплекса было обнаружено около 44 таксонов: 17 – коловраток Rotifera, 6 – веслоногих рачков Copepoda, 20 ветвистоусых рачков Cladocera, а также собственно листоногие ракообразные (Euphyllopoda) (табл. 1).

Доминантами по частоте встречаемости в разные годы среди коловраток были *A. priodonta*, *P. dolichoptera*, *K. quadrata*, *C. unicornis*; среди веслоногих рачков – *E. gracilis*, *A. viridis, C. scutifer*; среди ветвистоусых рачков – *D. galeata*, *H. gibberum*, *C. quadrangula.*

Трофический статус рыбопитомника в 2022 г. по остаточной биомассе зоопланктона соответствовал категории «среднекормный» с низким классом продуктивности, в 2023–2024 гг. – «водоем выше средней кормности», β–мезотрофный тип, средний класс продуктивности (таблица 2). По биомассе в сборах доминировали ветвистоусые рачки, численно – коловратки и имагинальные, копеподитные стадии веслоногих рачков.

Зоопланктонные сообщества пойменного озера Малый Пальяновский сор неоднородны. Одни виды предпочитают условия, формирующиеся в зарослях макрофитов, другие виды населяют зону открытой воды.

Таблица 1. Таксономический состав зоопланктона озера Малый Пальяновский сор в мае – июле 2021–2024 гг.

Rotifera	Cladocera
Asplanchna priodonta Goss	*Acroperus harpae* (Baird)
Bipalpus hudsoni (Imhof)	*Alona quadrangularis* (Müller)
Brachionus angularis Goss	*Bosmina longirostris* (Muller)
Brachionus calyciflorus anuraeiformis Brehm	*Bythotrephes longimanus* Leydig
Brachionus calyciflorus f. *dorcas* Gosse	*Camptocercus restirostris* Sars
Brachionus sp.	*Ceriodaphnia quadrangula* (Muller)
Cephalobdella sp.	*Chydorus sphaericus* (Muller)
Conochilus unicornis Rouss.	*Daphnia cristata* Sars
Eothinia sp.	*Daphnia galeata* Sars
Euchlanis sp.	*Daphnia longispina* Muller
Filinia longiseta (Ehr.)	*Diaphanosoma brachyurum* (Lievin)
Kellicottia longispina (Kell.)	*Disparalona rostrata* (Koch)
Keratella cochlearis (Gosse)	*Eurycercus lamellatus* (Müller)
Keratella quadrata (Muller)	*Holopedium gibberum* Zaddach
Lecane luna (Muller)	*Leptodora kindtii* Focke
Polyarthra dolichoptera Idelson	*Limnosida frontosa* Sars
Trichocerca sp.	*Moina macrocopa* (Straus)
Copepoda	*Polyphemus pediculus* (Linnaeus)
Acanthocyclops viridis (Jurine)	*Sida crystallina* (Muller)
Cyclops scutifer Sars	*Simocephalus vetulus* Muller
Eudiaptomus gracilis (Sars)	Euphyllopoda
Macrocyclops albidus (Jurine)	*Lynceus brachyurus* Muller
Mesocyclops leuckarti (Claus)	
Harpacticoida gen sp.	

Таблица 2. Средние значения численности (N, тыс. экз./м^3) и биомассы (B, мг/м^3) зоопланктона оз. Малый Пальяновский сор в 2021–2024 гг. (среднее за май – июль)

Группы зоопланктеров	2021 г.		2022 г.		2023 г.		2024 г.	
	N, тыс. экз./м^3	B, мг/м^3	N, тыс. экз./м^3	B, мг/м^3	N, тыс. экз./м^3	B, мг/м^3	N, тыс. экз./м^3	B, мг/м^3
Rotifera	24,3	37	77,8	95	137,7	257	142,1	262
Copepoda	21,5	101	88,2	267	130,0	541	156,2	1076
Cladocera	8,6	278	11,8	371	100,2	2680	43,6	1229
Euphyllopoda	–	–	25,5	362	5,8	164	18,5	628
Всего	54,4	417	203,3	1094	373,7	3642	360,4	3194

За анализируемый период в 2021 г. количественные показатели зоопланктона по сравнению с последующими годами были на порядок ниже, что, прежде всего, связано с пищевой специализацией зарыбленного вида–эдификатора (рис. 2). По характеру питания в естественных условиях сиговые делятся на планктофагов, бентофагов и хищников. Так, в рыбопитомнике среди зарыбленных видов сиговых присутствовали представители всех трех категорий условной классификации по типу питания: пелядь – планктофаг, муксун и чир – бентофаги, нельма – хищник. Молодь муксуна и чира в первый месяц жизни питалась планктоном, но быстро переходила на потребление донных организмов (личинки хирономид, моллюски). Основу питания молоди пеляди в течение всего периода подращивания составлял зоопланктон (ветвистоусые рачки). Так как в 2021 г. пелядь была доминирующим видом в питомнике, то, следовательно, оказывала наибольший пресс на зоопланктон по сравнению с другими годами, когда доминировал бентофаг муксун. Кроме того, в 2021 г. была наибольшая плотность посадки личинки сиговых рыб (см. рис 1).

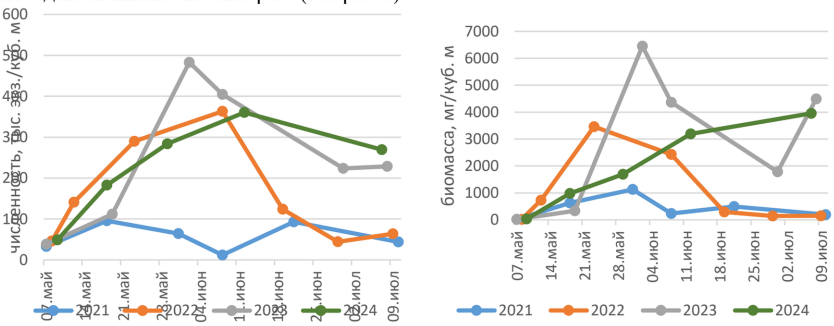


Рис. 2. Динамика средних значений численности и биомассы зоопланктона оз. Малый Пальяновский сор в 2021–2024 гг.

В сезонной динамике 2021–2024 гг. отмечены схожие тенденции обилия и доминирования зоопланктонных беспозвоночных (рис. 3; для примера приведены данные за 2021 г.).

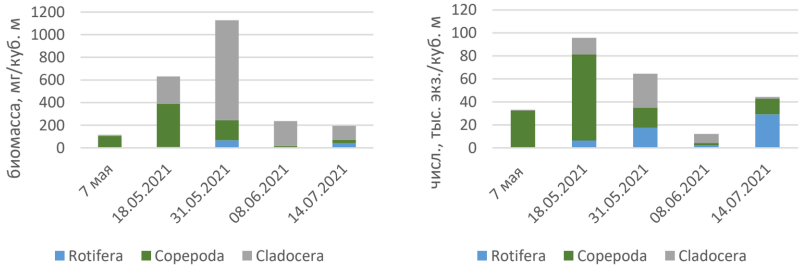


Рис. 3. Динамика средних значений численности и биомассы зоопланктона оз. Малый Пальяновский сор в 2021 г.

Так, в начале – середине мая в зоопланктоне по численности преобладали

науплиальные стадии веслоногих рачков, по биомассе взрослые особи веслоногих рачков. В начале июня численно доминантами в зоопланктонном комплексе являлись коловратки *A. priodonta, C. unicornis, K. quadrata*, к середине месяца наибольший вклад в значения биомассы вносили науплиальные стадии веслоногих рачков, к концу месяца уже доминировали ветвистоусые рачки, а среди них виды рода *Daphnia.* В течение всего месяца июня биомасса в основном состояла из ветвистоусых рачков. В начале июля основной вклад в значения численности и биомассы вносили крупные ветвистоусые рачки *P. pediculus* и *S. vetulus.* Снижение значений биомассы зоопланктона в конце июня, видимо, связаны с периодом летнего спада размножения зоопланктеров, а также с выеданием их подросшей молодью аборигенных и вселенных рыб.

Литература

Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН. 2007. 394 с.

Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоёмах. Зоопланктон и его продукция. Л., 1984.33 с.

Методическое пособие по изучению питания и пищевых отношений рыб в естественных условиях. М., 1974. 254 с.

Пидгайко М.Л., Александров Б.А., Иоффе Ц.И., Салазкин А.А. Краткая биолого-продукционная характеристика водоемов Северо-Запада СССР // Известия ГосНИОРХ. 1968. Т. 67. С. 205–225.

FEATURES OF THE STRUCTURE AND ABUNDANCE OF ZOOPLANKTON FLOODPLAIN LAKE – FISH NURSERY (OB-IRTYSH BASIN, WESTERN SIBERIA)

A.A. Evseeva

The results of research conducted in 2021–2024 on zooplankton in the floodplain lake (sor) in the Lower Ob basin (Western Siberia), used as a nursery for rearing juvenile whitefish for the purpose of artificial reproduction of aquatic biological resources as part of compensatory measures, are presented.

ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЛИТОРАЛЬНОГО ЗООПЛАНКТОНА ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА ПОД ВЛИЯНИЕМ ВОЗРАСТАЮЩЕЙ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

Н.И. Ермолаева, О.С. Бурмистрова
Институт водных и экологических проблем СО РАН

Проведена оценка изменения структуры зоопланктона в нескольких мелководных заливах Телецкого озера в 2004-2006 гг. и 2023 г. Обнаружено 89 видов и форм зоопланктона. В 2004-2006 гг. преобладали Cladocera, в 2023 г – Rotifera. В 2023 г. отмечено большее разнообразие видов зоопланктона (особенно за счет Rotifera), наличие видов-индикаторов повышенной сапробности и значительная перестройка соотношения основных групп зоопланктона в открытой литорали. Наблюдалось значительное увеличение численности и биомассы зоопланктона на литоральных участках озера,

прилегающих к зонам, которые подверглись застройке за 20 лет, прошедшие с первого обследования.

Телецкое озеро – уникальный природный объект Горного Алтая, включен ЮНЕСКО в список природных объектов Мирового наследия, что предполагает строго регламентированное использование озера в хозяйственной деятельности и в рекреационных целях. Озеро расположено в северо-восточной части Алтайских гор на высоте 434 м над уровнем моря и является наибольшим по объему и самым глубоким пресноводным водоемом юга Западной Сибири (Селегей, 2011). В последние годы заметно возрос антропогенный пресс на водосбор озера. Это связано развитием туристической деятельности – ростом потока отдыхающих, массовым строительством объектов туриндустрии и резким увеличением количества транспортных средств (Андреева и др., 2022). Основные рекреационные нагрузки создаются на крайнем северо-западном мелководном фланге Телецкого озера с наименьшим, по сравнению с другими его частями, потенциалом самоочищения, в результате чего здесь выявлены максимальные изменения физико-химических показателей озерной воды, в частности, ее подщелачивание, повышение минерализации, увеличение содержания соединений азота, фосфатов и нефтепродуктов (Шевченко, 2010).

Многими исследователями отмечается экстремальность условий и связанная с этим чувствительность горных холодноводных озер к различным внешним воздействиям (Krupa et al., 2019; Machate et al., 2023). Литоральная зона озер характеризуется динамичными условиями, принимает перерабатывает поступающие с водосбора вещества (Семенченко и др., 2013). Литораль, зарастающая макрофитами имеет особое значение в качестве барьера, препятствующая распространению загрязняющих веществ в озере (Зарубина и др., 2005). Площадь литорали Телецкого озера невелика (3,4 % от площади акватории) (Ремезова, 1934), степень зарастания Телецкого озера водной растительностью (менее 5%) характеризует озеро как очень слабо заросший водоем (Зарубина и др., 2005).

Зоопланктонные организмы считают одним из наиболее ранних и чувствительных индикаторов изменения окружающей среды (Андронникова, 1996; Redmond et al., 2018). Наиболее информативными экологическими характеристиками планктонных сообществ в озерных экосистемах считается оценка их фаунистического разнообразия, структуры и пространственного распределения (Кононова и др., 2014). В связи с увеличивающейся антропогенной нагрузкой и уязвимостью экосистемы Телецкого озера, были оценены изменения в видовой структуре и в количественных показателях зоопланктона литоральных участковдо строительства туристических баз на прилегающей территории и после него.

Отбор проб зоопланктона проводили в зарослях макрофитов и открытой воде в конце июля-начале августа в 2004-2006 гг. и 2023 г. Пробы отбирали путем процеживания 100л воды через планктонную сеть (ячея 112 мкм в 2004-2006 гг. и 62 мкм в 2023 г). Были выбраны мелководные участки с разной степенью антропогенной нагрузки. На юге озера – Кыгинский залив, находящийся в зоне охраняемой территории. На стыке широтной и меридиональной частей озера – залив р. Колдор, подвергающейся умеренной рекреационной нагрузке и Камгинский залив с усиленным режимом охраны. В северной части озера – залив р. Тевенек, подвергающийся высокой рекреационной нагрузке и небольшой залив в п. Артыбаш, подвергающейся значительной антропогенной нагрузке (в связи с расположением в пределах крупного поселка).

Значимость измерений между выборками проводили по тестам Манна-Уитни для числа видов (общее и основных групп) и по тесту ANOSIM для видовых списков с учетом их индивидуальной численности. Статистически значимыми считались различия

между данными при $p<0,05$. В качестве мер сходства сообществ использовали индекс Жаккара. Для выявления наиболее значимых в изменении видового состава между годами видов зоопланктона использовали SIMPER(с помощью критерия Брей-Кёртиса).

За все года исследования (2004-2006, 2023) в исследованных заливах литоральной зоны Телецкого озера отмечено 89 видов и форм зоопланктона. В 2004-2006 гг.обнаружен 61 вид и форма, в 2023 г (антропогенная нагрузка значительно возросла) – 66 видов.По числу видов в 2004-2006 годах в литорали озера преобладали Cladocera, в 2023 г. – Rotifera. Во все года встречены 30 видов и форм зоопланктона, которые, видимо, являются постоянным компонентом литоральных сообществ. Но виды-доминанты в каждый год исследования были разными: в 2004 г. *Asplanchna priodonta* Gosse; в 2005 г *Chydorus ovalis* Kurz; в 2005 г. копеподиты Cyclopoida; в 2023 г *Bosmina coregoni longispina* (O.F. Müller). В 2023 г. в составе литорального зоопланктона обнаружены виды с высокой (выше 2) индивидуальной сапробной валентностью: *Brachionus nilsoni* Ahlstrom, *Brachionus urceus* (Linnaeus), *Ilyocryptus acutifrons* G.O. Sars. Однако встречаемость этих видов низкая (от 0.1 до 2.% от общей численности в пробе). Количество видов литорального зоопланктона, обнаруживаемых в зарослях макрофитов, во все годы выше, чем в открытой воде, что, главным образом, связано с большим разнообразием видов Cladocera в зарослях макрофитов (тест Манна-Уитни $p=0.029$). Видовой состав литорального зоопланктона больше зависел от года исследования, чем от приуроченности к зарослям или открытой воде, однако в 2023 г. видовой состав сильнее отличался от ранее исследованных лет. Сходство видового состава между зарослями макрофитов в разные года исследования (средний коэффициент Жаккара 0.55 ± 0.06) значимо выше (Манн-Уитни $p=0.02$), чем между участками открытой литорали (0.34 ± 0.03).

Процентный анализ сходства (SIMPER) показал среднее различие в 84.7% в структуре сообщества зоопланктона между разными годами исследования. При этом 70% различий (таблица) обеспечивают всего 13 таксонов зоопланктона. Наиболее влияющим на различие между годами в литорали озера видом зоопланктона была *Asplanchna priodonta* Gosse. Можно отметить, что в 2023 г. около половины этих таксонов увеличили свою среднюю численность, некоторые значительно.

Таблица. SIMPER-анализ сообществ литорального зоопланктона Телецкого озера в разные годы (серым выделены виды с большей численностью в 2023 г.)

Таксон	Вклад таксона %	Совокупный вклад таксонов %	Средняя численность таксонов в экз./м^3			
			2004	2005	2006	2023
Asplanchna priodonta Gosse	10.89	12.87	4170.0	632.0	1430.0	3570.0
Науплии Cyclopoida	6.70	20.77	1630.0	176.0	895.0	3750.0
Kellicottia longispina (Kellicott)	6.37	28.30	2110.0	83.5	585.0	1490.0
Копеподиты Cyclopoida	6.12	35.53	1840.0	529.0	1190.0	2170.0
Bosmina (E.) coregoni longispina (O.F. Müller)	5.12	41.57	1130.0	407.0	260.0	8700.0
Polyarthra luminosa Kutikova	4.45	46.82	0.0	0.0	0.0	2300.0
Науплии Calanoida	4.45	52.07	967.0	89.3	140.0	2350.0
Polyphemus pediculus (Linnaeus)	2.97	55.58	17.0	22.1	77.8	8450.0
Keratella cochlearis (Gosse)	2.93	59.04	10.2	7.5	0.0	5230.0

Conochilus unicornis Rousselet	2.46	61.94	2800.0	1.9	0.0	328.0
Sida crystallina (O.F.Müller)	2.39	64.77	454.0	230.0	732.0	62.5
Копеподиты Calanoida	2.31	67.50	456.0	203.0	46.9	1010.0
Diaphanosoma brachyurum (Lievin)	2.16	70.04	1500.0	179.0	75.6	150.0

Наибольшее количество видов за все года исследования обнаружено в Камгинском заливе (59), также много видов найдено в заливах рек Колдор (55) и Тевенек (54), меньшее количество видов обнаружено в заливах п. Артыбаш (45) и в Кыгинском заливе (40). Значимых отличий в видовом составе литорального зоопланктона разных заливов не обнаружено (ANOSIM p=0.209). Только между наиболее крайними по антропогенной нагрузке – заливом п. Артыбаш (максимальная) и Камгинским заливом (минимальная) (ANOSIM p=0.027). По сравнению с 2004-2006 гг. в 2023 г. произошли перестройки во вкладе основных групп зоопланктона в общее количество видов. Так, в 2004-2006 гг. в зарослях макрофитов практически во всех заливах преобладали Cladocera, и только в Кыгинском – Copepoda. В 2023 г. в зарослях макрофитов только в Камгинском заливе и заливах рек Колдор и Тевенек, так же, как и в 2004-2006 гг., преобладали Cladocera, в остальных – Rotifera. В открытой литорали в 2004-2006 гг. соотношение основных групп было, как и в зарослях макрофитов (с преобладанием Cladocera), кроме Кыгинского залива (Copepoda) и залива в п. Артыбаш (Rotifera). В 2023 г. в открытой литорали всех заливов преобладали Rotifera, кроме залива р. Колдор (где Cladocera и Rotifera были одинаково представлены). Следовательно, увеличение антропогенной нагрузки больше влияет на перестройку видового состава открытой литорали.

Анализ численности и биомассы зоопланктона продемонстрировал относительную стабильность этих показателей на участках в зоне заповедника (заливы Кагинский и Камгинский). Тогда как в заливе в районе с. Артыбаш в 2023 г. численность зоопланктона выросла в 6-7 раз, относительно показателей 2004-2006 гг. Такие колебания можно было бы попытаться объяснить межгодовыми колебаниями численности, однако в заливах рек Колдор и Тевенек, особенно на зарастающих участках, численность зоопланктона выросла в 70-75 раз, а на примыкающих участках незарастающей литорали – в 10-35 раз. Соответственно, и биомасса зоопланктона на зарастающей литорали в 2023 году в заливе Тевенек превышала показатели 2004-2006 гг. в 130 раз, а в заливе Колдор – в 170 раз за счет массового развития ветвистоусых рачков. В пелагической зоне такой диапазон колебаний численности и биомассы зоопланктона в многолетнем аспекте не наблюдается (Бурмистрова, 2023). Именно на прилегающих к данным заливам участках водосбора в последние 20 лет наблюдается активное освоение территории. В первую очередь это строительство туристических баз (без организации сбора и утилизации канализационных стоков), которое обеспечивает рост органической нагрузки на акваторию озера.

Видовая структура зоопланктона литорали Телецкого озера каждый год существенно изменяется. При этом 70% различий обеспечивают всего 13 таксонов (из 89 обнаруженных) зоопланктона, основными из которых были *Asplanchna priodonta, Kellicottia longispina* и ювенильные стадии развития Cyclopoida. Отмечено только 30 видов зоопланктона, обнаруживаемых во все года наблюдений, но доминанты каждый год различаются. Количество видов зоопланктона, обнаруживаемых в зарослях макрофитов, во все годы выше, чем в незарастающей литорали. Значимых отличий в видовом составе литорального зоопланктона заливов с разной антропогенной нагрузкой не обнаружено (только между Камгинским заливом и заливчиком в п. Артыбаш). В 2023 г. отмечены большее разнообразие видов зоопланктона (большей частью за счет Rotifera), наличие видов-индикаторов повышенной сапробности и значительная

перестройка видового состава (соотношения основных групп зоопланктона). На мелководных участках озера, прилегающих к зонам активного рекреационного освоения, численность зоопланктона за последние 20 лет выросла в среднем в 50 раз (в среднем по зарастающей и не зарастающей литорали), а биомасса в зарослях макрофитов – в 130-170 раз, что является бесспорным индикатором локальной эвтрофикации прибрежья уникального Телецкого озера.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН, проект № FUFZ-2021-0001

Литература

Андреева И.В., Головин А.В., Рыбкина И.Д., Циликина С.В. Оценочные исследования рекреационного комплекса озера Телецкое в целях совершенствования политики сохранения экосистемы водоёма // Российский журнал прикладной экологии. 2022. № 4. С. 20–27.

Андронникова И.Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб.: Наука, 1996. 189 с.

Бурмистрова О.С. Характеристика зоопланктона на трех участках пелагиали Телецкого озера в 2016-2021 гг. // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2023. №2. С. 28–43.

Зарубина Е.Ю., Яныгина Л.В., Бурмистрова О.С., Митрофанова Е.Ю., Ким Г.В., Котовщиков А.В., Крылова Е.Н., Ковешников М.И. Литоральные биоценозы как один из факторов устойчивости экосистемы Телецкого озера // Ползуновский вестник. 2005. № 4-2. С. 201–207.

Кононова О.Н., Дубовская О.П., Фефилова Е.Б. Зоо- и некрозоопланктон Харбейских озер Большеземельской тундры (по исследованиям 2009-2012 годов) // Журнал СФУ. Биология. 2014. №3. 303–327.

Ремезова Н. В. Некоторые морфометрические величины Телецкого озера // Исследования озер СССР. 1934. Вып. 7. С. 53–58.

Селегей В.В. Телецкое озеро: очерки истории: в 3 кн. Барнаул: Пять плюс, 2011. Кн. 3. 244 с.

Семенченко В.П., Разлуцкий В.И., Бусева Ж.Ф., Палаш А.Л. Зоопланктон литоральной зоны озер разного типа. Минск: Беларус. навука, 2013. 172 с.

Шевченко Г.А. Геоэкологическое состояние акватории и прибрежной зоны Телецкого озера (Горный Алтай): Автореф. дисс. ... к.г.-м.н. Томск, 2010. 22 с

Barinova S., Dyadichko V. Zoological Water Quality Indicators for Assessment of Organic Pollution and Trophic Status of Continental Water Bodies // Transylvanian Review of Systematical and Ecological Research. 2022. Vol. 24(3). P. 65–106.

Krupa E.G., Barinova S.S., Romanova S.M. Zooplankton Size Structure in the Kolsay Mountain Lakes (Kungei Alatau, Southeastern Kazakhstan) and Its Relationships with Environmental Factors // Water Resources. 2019. V. 46. №3. P. 403–414.

Machate O., Schmelle D.S., Schulze T., Brack W. Review: mountain lakes as freshwater resources at risk from chemical pollution // Environmental Sciences Europe. 2023. V. 35. №3.

Redmond L.E., Loewen C.J.G., Vinebrooke R.D.A Functional Approach to Zooplankton Communities in Mountain Lakes Stocked With Non-Native Sportfish Under a Changing Climate // Water Resources Research. 2018. V. 54. №3. P. 2362–2375.

CHANGES IN THE STRUCTURE OF THE LITTORAL ZOOPLANKTON OF LAKE TELETSKOYE UNDER THE INFLUENCE OF INCREASING ANTHROPOGENIC LOAD

N.I. Yermolaeva, O.S. Burmistrova

An assessment of changes in the structure of zooplankton in shallow bays of Lake Teletskoye in 2004-2006 and 2023 was carried out. 89 species and forms of zooplankton were found. In 2004-2006 In 2024 Rotifera dominated the composition of the littoral zooplankton, and in 2023 – Cladocera. In 2023 there a wide variety of zooplankton species (especially due to Rotifera).The presence of species with increased saprobic valence index, and a significant restructuring of the ratio of the main zooplankton groups in the open littoral were noted. There has been a significant increase in the number and biomass of zooplankton in the littoral areas of the lake adjacent to the areas that have been developed over the 20 years since the first survey of the sites.

СРАВНЕНИЕ РЕАКЦИЙ ОСОБЕЙ АМФИПОД ВИДА *GAMMARUS LACUSTRIS* SARS, 1863, ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ И НЕ ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ ДЛИТЕЛЬНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ СВЕТОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ, НА РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ ОСВЕЩЕНИЯ

Я.К. Ермолаева, М.А. Масленникова, С.А. Бирицкая, А.В. Лавникова, Н.А. Кульбачная, Д.Г. Рэчилэ, А.Т. Гулигуев, И.Д. Кодатенко, Д.С. Кондратьева, А.Н. Соломка, А.В. Башкирцев, А.С. Слепченко, А.Е. Артёмов, Д.Ю. Карнаухов
Иркутский государственный университет

В исследовании сравниваются реакции на различные типы освещения особей *G. lacustris*, изъятых из разных популяций, одна из которых длительный период существует в условиях светового загрязнения, а другая не подвергается данному воздействию. В ходе экспериментов фиксировалось распределение в аквариуме особей по зонам освещенности в определенный период времени при естественном дневном, теплом и холодном освещениях, а также без света. Для особей из обеих популяций были обнаружены статистически значимые различия в распределении по зонам освещенности, и не были обнаружены по времени. Особи из подвергающейся световому загрязнению популяции, статистически значимо в большей степени избегали теплого света, чем особи, не подвергающиеся данному воздействию.

Световое загрязнение – это загрязнение, создаваемое использованием искусственных источников освещения в ночное время, способное негативно влиять на функционирование экосистем, нарушая биоритмы организмов. Высокие годовые темпы роста в 3–6% ночной яркости неба во всем мире во второй половине прошлого века увеличились почти до 10% в год только за последнее десятилетие (Light pollution …, 2023), что связано с увеличением территорий населенных пунктов и ростом численности населения, а также увеличением числа водного и наземного транспорта. Люди склонны селиться вблизи водоемов, так как они имеют большое значение в жизнедеятельности человека, поэтому водные экосистемы подвержены сильной антропогенной нагрузке, в том числе световому загрязнению. Река Ангара, протекающая в черте города Иркутск и других городов, не является исключением. По данным дистанционного зондирования Земли сила излучения видимого диапазона света города Иркутск за последние 30 лет выросла в 2 раза, что в первую очередь связано с увеличением светового загрязнения в

городе (Световое …, 2022). Световое загрязнение может привести к негативным изменениям на отдельных участках реки, подверженных данному загрязнению.

Известно, что световое загрязнение влияет на структуру трофических связей в водных экосистемах, делая гидробионтов видимыми в ночное время для хищников (Coastal …, 2017; Harrison, Gray, 2024). Также искусственный свет в ночное время влияет на миграционную активность зоопланктона (Use …, 2018) и других групп организмов, например, амфипод (Navarro-Barranco, Hughes, 2015). Ракообразные, в том числе амфиподы, являются важным объектом питания хищников, и использование искусственного освещения в ночной период может значительно повлиять на взаимодействие хищник-жертва в водных экосистемах.

В данном исследовании мы решили оценить способность амфипод адаптироваться к постоянному воздействию светового загрязнения, и для этого мы решили сравнить реакции на различные типы освещения особей вида *Gammarus lacustris* Sars, 1863, подвергающихся и не подвергающихся длительному воздействию светового загрязнения. Данный вид амфипод является голарктическим, он населяет широкий спектр водоемов, различающихся генезисом, положением по отношению к уровню океана, размерами и глубинами, проточностью, температурой воды, минерализацией, характером донных отложений, уровнем естественной продуктивности, с богатой ихтиофауной либо с ее полным отсутствием, с различными уровнями хозяйственно-бытовой нагрузки. Данный вид обладает эффективными механизмами устойчивости к стрессовым воздействиям, таким как повышенная температура и недостаток кислорода. Также он является объектом промышленного лова (Matafonov, Bazova, 2014).

Для исследования отлов амфипод, популяция которых не подвергается длительному воздействию светового загрязнения, проводили в озере №14, расположенном примерно в 1,5 км от поселка Большие Коты (51°55'14.4" с. ш. 105°04'19.6" в. д.). Амфиподы из популяции, подвергающейся в течение длительного периода световому загрязнению, отлавливались в реке Ангара в районе Академического моста города Иркутск (52°15'59.0" с. ш. 104°17'14.9" в. д.). Отлов производили с помощью гидробиологического сачка в дневное время суток.

Перед экспериментами проводили акклимацию отобранных амфипод в течение 7 дней в лабораторных условиях. Для амфипод, отловленных в озере №14, на период акклимации устанавливался нормальный суточный режим освещения (12 ч дневной свет, 12 ч без света). Для отловленных в Ангаре амфипод устанавливался следующий режим освещения: 12 ч дневной свет, 12 ч слабое освещение (значения уровня освещенности варьировались около 0.7 лк), соответствующее уровню освещенности на Ангаре в черте г. Иркутск в ночной период.

Для экспериментов использовался аквариум Т-образной формы, вдоль длинной части которого с помощью источника освещения создавался градиент света (теплого или холодного) от 0,1 до 30 лк, в ответвлениях аквариума уровень освещенности составлял 0 лк. В результате, в аквариуме было выделено 5 зон: 0 лк, 0,1-1 лк, 1-10 лк, 10-20 лк и 20-30 лк. В аквариум одновременно в зону 0.1-1 лк запускали по 20 амфипод (всего 5 повторностей) на 10 минут и фиксировали распределение амфипод по зонам в 1-ю, 3-ю, 5-ю, 7-ю и 10-ю минуты наблюдения. Данные эксперименты проводились в темное время суток в лаборатории с освещенностью 0 лк. Эксперименты также проводились днем при естественном освещении и в темное время суток без света. Цветовая температура искусственных источников освещения составляла 3200 К (теплый свет) и 5600 К (холодный свет).

Полученные данные обрабатывались с помощью языка программирования R в программе R-Studio. Для установления наличия статистически значимых различий между распределениями амфипод по зонам аквариума использовался

непараметрический критерий Краскела-Уоллиса. Для попарного сравнения распределений амфипод в зависимости от уровня освещенности, времени наблюдения и типа освещения использовался непараметрический апостериорный тест Данна с поправкой Холма на множественные сравнения. Для установления статистически значимых различий между двумя выборками в зависимости от места отлова амфипод использовался критерий Манна-Уитни. Различия между выборками считались статистически значимыми при $p<0.05$.

В результате использования критерия Краскела-Уоллиса и апостериорного теста Данна для амфипод, отловленных в озере № 14 (рис. 1), были получены значимые различия в распределении количества особей при дневном освещении между следующими зонами аквариума: 0 лк и 0-0,1 лк, 0 лк и 1-10 лк, 0 лк и 10-20 лк. В условиях без света значимые различия были обнаружены между зонами 0 лк и 1-10 лк, 0 лк и 10-20 лк, 0 лк и 10-30 лк, 0,1-1 лк и 10-20 лк. При теплом освещении значимые различия получены между зонами 0 лк и 10-20 лк, а в условиях холодного освещения между 0 лк и 10-20 лк, 0,1-1 лк и 10-20 лк. В результате сравнения распределения амфипод по зонам в зависимости от времени наблюдения не было обнаружено значимых различий.

В результате сравнения с помощью критерия Краскела-Уоллиса распределений в аквариуме *G. lacustris* из озера №14 при различных типах освещения, не было обнаружено значимых различий (p-value = 0.16).

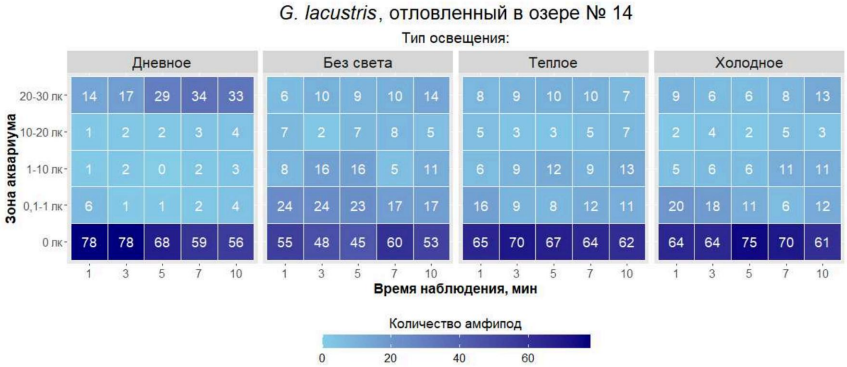


Рис. 1. Распределение суммарного количества особей *G. lacustris*, отловленных в озере № 14, в зависимости от уровня освещенности и времени наблюдения при различных типах освещения

Для амфипод, отловленных в Ангаре (рис. 2), в результате использования критерия Краскела-Уоллиса и апостериорного теста Данна были получены значимые различия в распределении количества амфипод при дневном освещении между следующими зонами аквариума: 0 лк и 1-10 лк, 0 лк и 10-20 лк. В условиях без света значимые различия были обнаружены между зонами 0 лк и 10-20 лк. При теплом освещении значимые различия получены между зонами 0 лк и 10-20 лк, 0 лк и 20-30 лк, 0,1-1 лк и 10-20 лк, а в условиях холодного освещения между 0 лк и 1-10 лк, 0 лк и 10-20 лк. В результате сравнения распределения амфипод по зонам в зависимости от времени наблюдения не было обнаружено значимых различий.

Использование критерия Краскела-Уоллиса показало, что распределение амфипод из Ангары в аквариуме не одинаково при разных типах освещения ($p=0.0005$).

Апостериорный тест Данна показал значимые различия между следующими типами освещения: дневное и без света (p=0.0004), теплое и без света (p=0.01).

Сравнение с помощью критерия Манна-Уитни реакций амфипод из озера № 14 и Ангары при разных типах освещения показало значимые различия для теплого освещения (Табл. 1). То есть особи, отловленные в Ангаре, статистически значимо в большей степени избегали теплого света, чем особи из озера № 14.

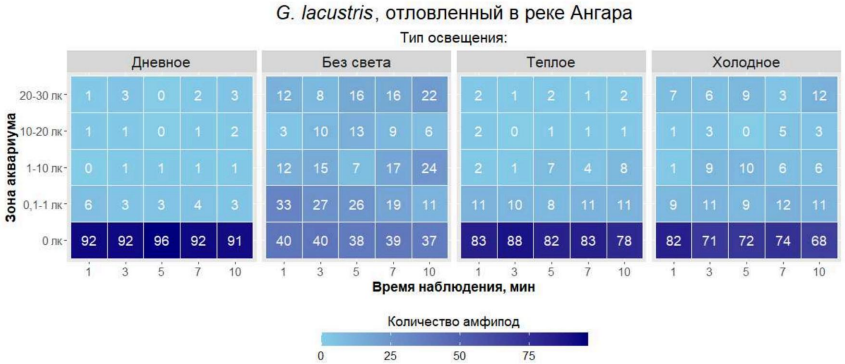


Рис. 2. Распределение суммарного количества особей *G. lacustris*, отловленных в реке Ангара, в зависимости от уровня освещенности и времени наблюдения при различных типах освещения

Таблица 1. Результаты сравнения с помощью теста Манна-Уитни распределения по зонам аквариума амфипод вида *G. lacustris* в зависимости от их места отлова

Дневное		Без света		Теплое		Холодное	
	p. Ангара		p. Ангара		p. Ангара		p. Ангара
Оз. №14	0.2	Оз. №14	0.4	Оз. №14	0.04	Оз. №14	0.7

Примечание: серым цветом закрашены ячейки, p-значение которых меньше 0,05 (наличие статистически значимых различий между выборками).

Из полученных данных видно, что особи *G. lacustris*, подвергающиеся в течение длительного периода световому загрязнению в реке Ангара, в большей степени избегают как естественного, так и искусственного освещения, чем особи, не подвергающиеся влиянию данного фактора в озере № 14, однако, статистически значимые различия были обнаружены только для теплого освещения. Полученные результаты могут свидетельствовать о способности данного вида частично адаптироваться к нарастающему с каждым годом световому загрязнению, в особенности к источникам освещения, в спектре которых длинные волны преобладают над короткими. Продемонстрированная особями *G. lacustris* реакция избегания как холодного, так и теплого освещения может приводить к уменьшению миграционной активности амфипод в ночной период при постоянном воздействии светового загрязнения, тем самым ограничивая обмен веществ на отдельных участках водных объектов. Однако для выявления возможных негативных последствий длительного воздействия светового

загрязнения требуются дальнейшие исследования, в том числе с увеличенным временем наблюдения за реакцией амфипод на разные типы освещения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-24-00417, https://rscf.ru/project/25-24-00417/.

Литература

Голубец Д.И., Ермолаева Я.К., Карнаухов Д.Ю., Зилов Е.А. Световое загрязнение города Иркутск // Сборник материалов участников XVIII Большого географического фестиваля, посвящённого 150-летию со дня рождения российского кругосветного путешественника, исследователя Дальнего Востока В.К. Арсеньева (1872-1930 гг.), 80-летию со дня рождения российского экономгеографа, заведующего кафедрой экономической и социальной географии СПбГУ А.А. Анохина (1942-2021 гг.) и 100-летию со дня рождения выдающегося географа-ландшафтоведа, основоположника экологической географии А.Г. Исаченко (1922-2018 гг.). СПб, 2022. С. 350-353.

Harrison S.E., Gray S.M. Effects of light pollution on Bluegill foraging behavior // Trans Am Fish Soc. 2024. Vol. 153, №2. P. 152–162.

Matafonov D.V., Bazova N.V. Decline of *Gammarus lacustris* Sars (Crustacea: Amphipoda) population in the delta of the Selenga River// Biol Bull Russ Acad Sci. – 2014. – Vol. 41. – P. 168–175. https://doi.org/10.1134/S1062359014020071

Navarro-Barranco C., Hughes L.E. Effects of light pollution on the emergent fauna of shallow marine ecosystems: Amphipods as a case study // Marine Pollution Bulletin. 2015. Vol. 94, № 1–2. P. 235-240.

COMPARISON OF THE REACTIONS TO DIFFERENT TYPES OF LIGHTING OF AMPHIPOD SPECIES GAMMARUS LACUSTRIS SARS, 1863 EXPOSED AND NOT EXPOSED TO LONG-TERM EXPOSURE OF LIGHT POLLUTION

Ya.K. Ermolaeva, M.A. Maslennikova, S.A. Biritskaya, A.V. Lavnikova, N.A. Kulbachnaya, D.G. Rechile, A.T. Guliguev, I.D. Kodatenko, D.S. Kondratieva, A.N. Solomka, A.V. Bashkirtsev, A.S. Slepchenko, A.E. Artyomov, D.Yu. Karnaukhov

The present study compares the responses to different types of lighting in *G. lacustris* collected from different populations, one of which has been exposed to light pollution for a long period of time, and the other is not exposed. During the experiments, the distribution of individuals in the aquarium according to light zones was recorded during a certain period of time under daylight, warm and cold lighting, and without light. For individuals from both populations, statistically significant differences were found in the distribution across light zones, but were not found over time. Individuals from a population exposed to light pollution were statistically significantly more likely to avoid warm light than those not exposed to it.

ВИДОВАЯ СТРУКТУРА СООБЩЕСТВ ЗООПЛАНКТОНА КОСИНСКИХ ОЗЕР (ПРИРОДНО-ИСТОРИЧЕСКИЙ ПАРК «КОСИНСКИЙ», Г. МОСКВА)

В.С. Жихарев[1], Д.И. Соколов[2], М.А. Терешина[2], О.Н. Ерина[2]

[1] Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

[2] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Изучена видовая структура сообществ зоопланктона Косинских озер в период с января по декабрь 2022 г. Проведена идентификация фауны зоопланктона озер Святое, Долгое и Черное. Определено количественное и качественное развитие зоопланктона, а также выявлены доминирующие виды зоопланктона. На основе анализа избыточности определены основные факторы окружающей среды, формирующие видовую структуру Косинских озер. Установлен трофический статус озер на современном этапе их существования.

Косинские озера – комплекс ледниковых озер, находящийся в г. Москва (городской район Косино-Ухтомский) и состоящий из трех озер (Белое, Чёрное и Святое), которые являются единственными оставшимися в пределах г. Москвы озерами природного происхождения. Предположительно, озера образовались после отступления ледника, при этом их котловины имеют доледниковый возраст и карстовое происхождение. Возраст озер порядка 10 тыс. лет, а толщина донных отложений варьирует в пределах 13 (оз. Белое) – 15 (оз. Черное) метров. Озера характеризуются разными гидрологическими, гидрохимическими и гидробиологическими режимами, а также морфологическими параметрами котловин. По химическому составу вода Косинских озер относится к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе (Широкова, Озерова, 2019).

Оз. Святое имеет площадь 0.08 км^2, средняя глубина – 3 м, максимальная глубина – 5.1 м. Озеро является дистрофным с малым содержанием органических веществ и большим содержанием гуминовых кислот (Ильинская и др., 2013). Оз. Белое имеет площадь 0.20 км^2 и максимальную глубину 13.5 м. Озеро является эвтрофным с высоким содержанием органических веществ и сероводородов в придонных слоях (Ильинская и др., 2013). Оз. Черное имеет площадь 0.26 км^2 и максимальную глубину 4.4 м (Вагнер, Дмитриева, 2004).

Для анализа видовой структуры Косинских озер в их акватории в период с января по декабрь 2022 г. были отобраны пробы зоопланктона. Пробы собирали планктонной сетью и обрабатывали общепринятыми методами (Методы гидробиологических …, 2024). Отобранные пробы фиксировали 40%-ным формалином. Идентификацию организмов зоопланктона проводили с использованием определителей (Определитель …, 2010, Коровчинский и др., 2021).

По данным 2022 г. для оз. Святое были характерны наибольшие среднегодовые значения температуры воды и цветности; для оз. Черное – удельной электропроводности воды, мутности, содержания хлорофилла-а, общего фосфора и азота, а также химического потребления кислорода; для оз. Белое – содержание растворенного в воде кислорода и фикоцианина (табл. 1).

В составе зоопланктона Косинских озер было выявлено 79 видов (Rotifera – 42, Cladocera – 24, Copepoda – 13). Наибольшее количество видов было идентифицировано в оз. Белое (60), минимальное в оз. Святое (44) (табл. 2). С точки зрения видового богатства, коловратки во всех озерах являлись наиболее представленной группой организмов.

В целом, большинство идентифицированных видов являлись космополитами. Однако были обнаружены чужеродные виды – североамериканские коловратка *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) и веслоногий рачок *Acanthocyclops americanus* (Marsh, 1892). Количественное развитие и роль в сообществах зоопланктона у этих видов были незначительными.

Количественное развитие зоопланктона исследованных озер существенно различалось (табл. 2). Наименьшие значения численности и биомассы были зарегистрированы в озерах Святое и Белое, максимальные – в оз. Черное (табл. 1). В

целом, в планктоне Косинских озер с точки зрения численности преобладали коловратки вертикаторы. По биомассе традиционно доминировали веслоногие ракообразные.

Среднегодовые значения таксономического разнообразия (*H'*) и выравненности (*E*) были максимальными в оз. Белое, минимальными в озерах Святое и Черное (табл. 2). Самые низкие значения функционального богатства (*FRic*) в озерах Святое и Белое указывают на то, что часть ресурсов, потенциально доступных сообществам зоопланктона, не используется.

Таблица. 1. Показатели окружающей среды (над чертой – среднегодовые значения, под чертой – минимальные и максимальные значения) Косинских озер в 2022 г.

Показатели окружающей среды	оз. Святое	оз. Черное	оз. Белое
Температура воды (WT), °C	11.9±2.7 2.2 – 25.1	10.9±2.6 1.5 – 24.1	10.8±2.7 0.7 – 24.6
Электропроводность (EC), мкСм/см	134.3±1.9 126.6 – 150.0	853.3±43.5 517.0 – 1028.0	528.3±39.9 150.0 – 769.0
Растворенный кислород (DO), мг/л	7.8±1.5 0.0 – 14.7	9.4±2.0 0.0 – 17.1	11.3±0.9 7.2±18.2
Мутность воды (TURB), FNU	4.6±1.8 1.8 – 24.2	6.7±2.0 1.4 – 21.0	3.9±0.6 2.0 – 10.2
Хлорофилл-а (CHL), мкг/л	14.3±3.0 2.3 – 35.0	26.7±9.1 2.5 – 100.0	8.5±1.5 3.0 – 18.6
Фикоцианин (PC), мкг/л	0.9±0.3 0.1 – 3.0	3.7±1.6 0.1 – 19.2	4.5±1.3 0.4 – 13.0
Общий фосфор (TP), мг/л	0.05±0.005 0.01 – 0.07	0.2±0.02 0.09 – 0.3	0.1±0.02 0.05 – 0.2
Общий азот (TN), мг/л	1.6±0.1 1.3 – 2.7	2.0±0.2 0.9 – 3.6	1.7±0.1 1.2 – 2.7
Цветность (COL), град	28.3±2.9 11.0 – 45.0	22.2±1.0 19.7 – 31.1	11.4±1.4 8.3 – 26.0
ХПК (COD), мг/л	44.5±2.9 33.9 – 66.9	51.4±3.2 39.3 – 70.1	11.4±1.4 36.9 – 68.4

Таблица 2. Показатели сообществ зоопланктона и трофического статуса Косинских озер в 2022 г.

Показатели		оз. Святое	оз. Белое	оз. Черное
Видовое богатство	Rotifera	25	29	30
	Cladocera	11	21	13
	Copepoda	8	10	7
	total	44	60	50
Численность, тыс. экз./м^3	Rotifera	35.85±14.39	25.42±12.36	173.23±87.21
	Cladocera	0.46±0.09	9.37±4.52	26.21±6.61
	Copepoda	20.60±5.25	15.91±3.62	109.24±31.94
	total	56.91±13.38	50.70±18.51	308.68±114.04
Биомасса, г/м^3	Rotifera	0.04±0.01	0.40±0.21	0.04±0.02
	Cladocera	0.01±0.001	0.10±0.05	0.24±0.06
	Copepoda	0.38±0.10	0.35±0.08	1.13±0.34
	total	0.42±0.10	0.49±0.13	1.77±0.49
Shannon Diversity Index (*H'*)		1.94±0.22	2.37±0.38	1.76±0.17
Pielou Evenness Index (*E*)		0.43±0.09	0.87±0.19	0.57±0.12
Функциональное богатство (*FRic*)		0.47±0.10	0.39±0.08	0.88±0.11
Индекс трофического состояния (*TSI*)		58.46±0,87	66.85±1.85	60.21±1.19
Трофический статус		эвтрофный	эвтрофный	эвтрофный

На основе индекса трофического состояния (*TSI*) был определен трофический статус Косинских озер (табл. 2). Все озера по итогам анализа содержания общего

фосфора, общего азота и хлорофилла-а были отнесены к эвтрофному статусу. При этом, в оз. Белом в течении 2022 г. наблюдались периоды, когда озеро переходило в гиперэвтрофное состояние.

Для независимой проверки факторов окружающей среды и выявления их взаимосвязи с видовой структурой зоопланктона сообществ зоопланктона Косинских озер был использован анализ избыточности (RDA) (табл. 3). Ряд протестированных факторов значимо объяснял изменения в структуре планктонных сообществ. Полная модель, которая включала все факторы окружающей среды, значимо объясняла 32.47% общей дисперсии (рис. 2).

Таблица 3. Результаты перестановочных тестов моделей RDA, построенных для Косинских озер по результатам исследований 2022 г.

Факторы	Adjusted R^2	pseudo-F	P
Температура воды (WT)	20.0%	9.7	0.001
Электропроводность (EC)	3.4%	2.2	0.048
Растворенный кислород (DO)	4.7%	2.7	0.012
Хлорофилл-а (CHL)	6.6%	3.5	0.003

Примечание: Adjusted R^2 – скорректированная доля изменчивости, которая объясняет каждый фактор; pseudo-F – тестовая статистика перестановочного теста; P – вероятность случайного влияния фактора; *p-value < 0.05*. В таблице перечислены только те факторы, которые оказывают статистически значимое влияние.

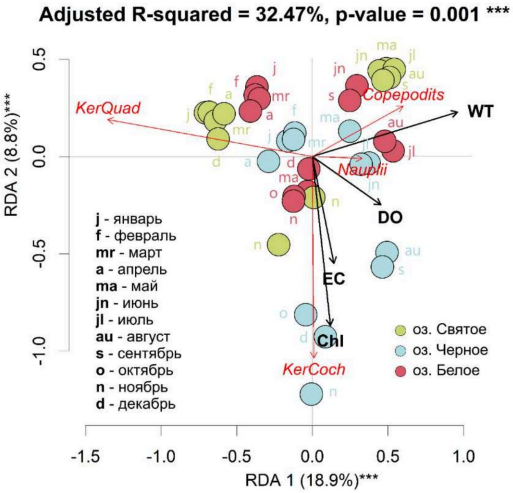


Рис. 2. Ординационная диаграмма анализа избыточности (RDA) для Косинских озер, построенная по результатам исследований 2022 г.

Температура воды (WT) была основным фактором, объясняющим 20% общей дисперсии видовой структуры Косинских озер на протяжении 2022 г. Кроме того, пробы, собранные в октябре, ноябре и декабре в оз. Черное положительно коррелировали с содержанием в воде хлорофилла-а (CHL) и удельной электропроводностью воды (EC) (рис. 2). В этот период в оз. Черное были зафиксированы максимальные значения этих факторов окружающей среды.

На ординационную диаграмму были добавлены векторы доминирующих видов (рис. 2). Из него видно, что коловратка *Keratella cochlearis* (Gosse, 1851) доминировала в

октябре, ноябре и декабре в оз. Черное, а ее численность положительно коррелировала с содержанием в воде хлорофилла-а (CHL) и удельной электропроводностью воды (EC) (рис. 2). В остальные периоды исследования доминирующее положение в исследованных озерах занимала коловратка *Keratella quadrata* (Müller, 1786), а также науплиальные и копеподитные стадии веслоногих ракообразных. При этом, количественное развитие коловратки *K. quadrata* отрицательно коррелировало с температурой воды (WT), а количественное развитие науплиальных и копеподитных стадий веслоногих рачков наоборот положительно коррелировало с этим фактором окружающей среды.

Проведенные исследования показали, что, несмотря на различные гидрологические и гидрохимические режимы, видовая структура сообществ зоопланктона Косинских озер имеет достаточно высокое сходство. Комплексы доминирующих видов схожие. Однако функциональная структура сообществ зоопланктона исследованных озер различается, что может быть связано с большим количеством малочисленных видов, которые имеют разные функциональные признаки. Трофический статус исследованных озер по данным 2022 г. оценивается как эвтрофный, однако он находится на границе с гиперэвтрофным, что заслуживает отдельного внимания и продолжения мониторинговых исследований. Кроме того, в планктоне Косинских озер были обнаружены чужеродные североамериканские виды, последствия от вселения которых могут быть определены только в будущем.

Таким образом, последние природные водоемы г. Москва заслуживают пристального внимания гидрохимиков и гидробиологов, а продолжение мониторинговых исследований является важной частью сохранения и развития рекреационного потенциала Природно-исторического парка «Косинский», а также поддержания статуса этих озер, как колыбели российской лимнологии.

Работа выполнена в рамках НИР кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (госзадание № ЦИТИС 121051400038-1 «Анализ, моделирование и прогнозирование изменений гидрологических систем, водных ресурсов и качества вод суши»).

Литература

Вагнер Б.Б., Дмитриева В.Т. Озера и водохранилища московского региона. М.: МГПУ, 2004. 105 с.

Ильинская В.В., Мошарова И.В., Акулова А.Ю., Мошаров С.А. Современное состояние гетеротрофного бактериопланктона Косинского Трехозерья // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 5. С. 477–487.

Коровчинский Н.М., Котов А.А., Синёв А.Ю., Неретина А.Н., Гарибян П.Г. Ветвистоусые ракообразные (Crustacea: Cladocera) Северной Евразии. Т. II. М.: Т-во научных изданий КМК, 2021. 544 с.

Методы гидробиологических исследований внутренних вод / под ред. А.В. Крылова. Борок, Ярославская обл.: ИБВВ РАН; Ярославль: Филигрань, 2024. 592 с.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон / Под ред. В.Р. Алексеева, С.Я. Цалолихина. М.: Т-во научных изданий КМК, 2010. 495 с.

Широкова В.А., Озерова Н.А. Косинские озера как колыбель российской лимнологии: история Косинской биологической станции и Косинского заповедника // Вопросы истории естествознания и техники. 2019. Т. 40. № 3. С. 233–253.

SPECIES STRUCTURE OF ZOOPLANKTON COMMUNITIES OF KOSINSK LAKES AND ITS RELATIONSHIP WITH ENVIRONMENTAL FACTORS

V.S. Zhikharev, D.I. Sokolov, M.A. Tereshina, O.N. Erina

The species structure of zooplankton communities of the Kosinsky Lakes was studied in the period from January to December 2022. The zooplankton fauna of the Svyatoe, Dolgoe and Chernoe lakes was identified. The quantitative and qualitative development of zooplankton was determined, and the dominant species of zooplankton were identified. Based on the analysis of redundancy, the main environmental factors that determine the species structure of the Kosinsky Lakes were determined. The trophic status of the lakes at the current stage of their existence was established.

ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОМ ТРАКТЕ РЫБ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

К.М. Зарипова[1], Д.А. Тихонова[2,3]

[1] ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»

[2]Институт озероведения РАН, Санкт-Петербургский ФИЦ РАН

[3]Санкт-Петербургский государственный университет

Исследование посвящено анализу содержания микропластика в желудочно-кишечном тракте корюшки (Osmerus eperlanus L.) из северной части Ладожского озера. В ходе работы были отобраны пробы рыбы у о. Валаам и о. Мякисало, проведены морфометрические измерения, а также анализ микропластиковых частиц. Установлено, что среднее количество частиц микропластика в рыбе у о. Валаам составило 1.10 ед./экз., тогда как у о. Мякисало микропластик не выявлен. Обнаруженные частицы представляли собой волокна. Статистически значимой корреляции между количеством микропластика, морфометрическими характеристиками и наполненностью желудка не выявлено.

Ладожское озеро – крупнейший пресноводный водоем Европы. Его площадь составляет 18 135 км^2, средняя глубина – 46,9 м, а максимальная достигает 230 м. Совместно с Онежским, Сайменским и Ильменским озерами оно входит в Европейскую систему великих озер, имеющую сток в Балтийское море через реку Неву. Ладожское озеро является завершающим звеном этой системы, вследствие чего его водосборный бассейн превышает площадь самого озера почти в 15 раз. Ладожское озеро выделяется значительным разнообразием флоры и фауны (Анкиева и др., 2018).

Корюшка (Osmerus eperlanus L.) – ведущая промысловая рыба Ладожского озера, составляющая 30–35 % общего улова и 35–42 % – в карельской части. В озере обитают две формы корюшки: крупная (достигающая 25–30 см), преимущественно встречающаяся в южных районах, и мелкая (шхерная) длиной 9–13 см, населяющая северные акватории. Корюшка играет важную роль в пищевой цепи озера, являясь основным кормовым объектом для ладожской нерпы, а также хищных рыб, таких как налим, судак, лосось, палия и щука (Георгиев, 2014).

Возрастающее загрязнение водоемов микропластиком может негативно сказываться на здоровье рыб, влияя на их метаболизм, рост и репродуктивные способности. Кроме того, потребление загрязненной рыбы может представлять потенциальную угрозу для здоровья человека, поскольку микропластик и адсорбированные на нем токсичные вещества способны попадать в пищевые цепи. Исследования в этой области необходимы для оценки уровня загрязнения, его

последствий для экосистем и разработки мер по снижению антропогенного воздействия. Наиболее интенсивное накопление микропластика в рыбе происходит в водоемах, водосбор которых занимает весьма обширные площади с крупными населенными пунктами и промышленными предприятиями (Тропин и др., 2024) Число исследований микропластика в ихтиофауне пресноводных водоемов России ограничено (Зарипова, Тихонова, 2024; Степанова и др., 2022; Тропин и др., 2024; Frank et al., 2020).

Целью данной работы является оценка содержания микропластика в ЖКТ корюшки из северной части Ладожского озера.

Рыба для исследований была отобрана 23-25 июля 2024 г. Корюшка была добыта и передана авторам Коваленко В.Н., лаборантом Карельского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («КарелНИРО»); разрешение № 78 20240319022 от 28.05.2024 г. Вылов рыбы был осуществлен в северной части Ладожского озера, на территории Республики Карелия (у о. Валаам и у пос. Ляскеля) (рис. 1).



Рис. 1. Точки отбора проб

После извлечении рыбы из сетей ее немедленно оборачивали алюминиевой фольгой для избежания контаминации и замораживали. В лабораторию транспортировали в сумках-холодильниках.

После извлечения рыбы из фольги, каждая особь промывалась дистиллированной водой 2 раза. Описание и препарирование рыбы осуществляли в вытяжном шкафу. Вся рабочая поверхность была покрыта алюминиевой фольгой непосредственно перед началом работы.

Общую длину тела (L) и стандартную длину (от кончика морды до заднего конца последнего позвонка или до заднего конца срединно-боковой части гипуральной пластинки, l) измеряли с помощью линейки. Общую массу (Q), массу тела без внутренностей (q), определяли с помощью электронных весов с точностью до 0,1 г, массу ЖКТ и жабр – с точностью до 0,01 г. (Правдин, 1966). Извлеченные ЖКТ помещали в полипропиленовые пробирки и хранили в морозилке до последующего анализа.

Для щелочного разложения тканей пробы перемещали из пробирок в стеклянные стаканы, заливали 10% раствором КОН и закрывали фольгой. Закрытые стаканы выдерживали в сушильном шкафу при температуре 50 °С 12 часов (адаптированная методика (Dehaut el al, 2016; Karami et al., 2017)). После разложения органических материалов образцы фильтровали на нейлоновую сетку с размером ячеек 100 мкм. В

случае большого количества жиров пробу на сетке дополнительно промывали 70% раствором пропилового спирта с помощью промывалки, после чего пробу смывали с сетки в чашку Петри и оставляли до полного высыхания. Далее пробы анализировались под оптическим микроскопом, фиксировалось количество и морфологические характеристики (размер, форма, цвет) частиц, визуально похожих на микропластик по отсутствию клеточной структуры и цвету.

Определение спектров обнаруженных частиц проводилось методами спектроскопии комбинационного рассеяния света на спектрометре Horiba Jobin-Yvon LabRam HR800. Интерпретация результатов проводилась на основании сравнения полученных спектров с имеющимися в базе данных Horiba JY Raman Library FORENSIC V2. Данные работы были проведен на базе Научного Парка СПбГУ (ресурсный центр «Геомодель»).

Для учета загрязнения микропластиком из воздуха в период препарирования рыбы на рабочем месте ставили 2 чистые чашки Петри с небольшим количеством дистиллированной воды. На всех последующих этапах анализа вместе с пробами с органами обрабатывали 3 холостые пробы. Всю лабораторную посуду и инструменты, используемые для анализа, промывали дистиллированной водой 2 раза перед использованием. Все реактивы и дистиллированную воду пропускали через сито 100 мкм во избежание контаминации.

Рыба, отобранная у о. Валаам, в среднем оказалась крупнее и с большей массой, чем у о. Мякисало (рис. 2). Средняя общая длина (L) корюшки по всей выборке составляет 14.5 см, а средняя общая масса (Q) — 18.7 г.

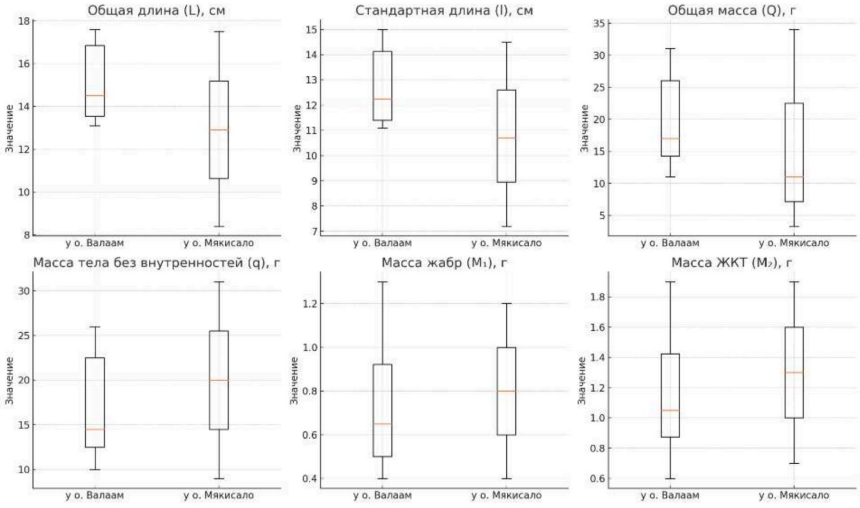


Рис. 2. Морфометрические показатели корюшки у о. Валаам и у о. Мякисало

Анализ содержания микропластика в желудочно-кишечном тракте корюшки показал, что в группе у о. Валаам среднее количество частиц составило 1.10 ед./экз., тогда как в группе у о. Мякисало микропластик не обнаружен (0 ед./экз.). Ранее в ЖКТ корюшки вблизи о. Мантсинсаари было обнаружено от 0 до 11 ед./экз (Зарипова, Тихонова, 2024).

По результатам исследования статистически значимой корреляционной зависимости между содержанием частиц микропластика в ЖКТ, морфометрическими показателями и наполненностью желудка не было выявлено. Отметим, что некоторые исследования обнаруживают корреляцию между количеством волокон и наполненностью желудка (Capone et al., 2020).

Все обнаруженные частицы являлись волокнами, преобладающая длина волокон составила 4000-5000 нм (рис. 3). Около 10% обнаруженных частиц проверены на спектрометре и идентифицированы как ПЭТ.

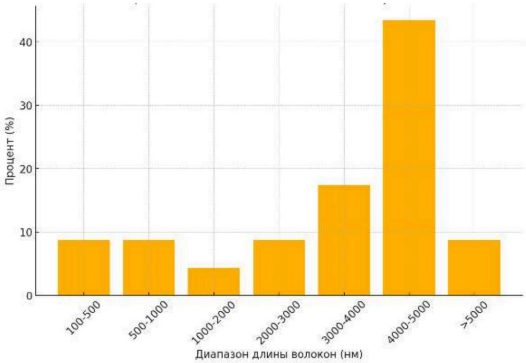


Рис. 3. Размер встреченных волокон микропластика

Проведенное исследование подтверждает необходимость комплексного мониторинга микропластикового загрязнения в пресноводных экосистемах. Несмотря на растущий интерес к данной проблеме, влияние микропластика на гидробионтов остается недостаточно изученным, что требует дальнейших исследований. Полученные результаты дополняют существующие данные о загрязнении внутренних водоемов и могут быть использованы для разработки природоохранных мер, направленных на снижение антропогенного воздействия.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН (тема FFZF-2024-0002 “Современные угрозы водным объектам и инновационные методы их сохранения, восстановления и рационального использования”). Исследования химического состава частиц проведены с использованием оборудования ресурсных центров Научного парка СПбГУ «Геомодель».

Литература

Аникиев, Л.В., Соколов С.Г., Мамонтова О.В., Паршуков А Н. Паразиты европейской корюшки Osmerus eperlanus (L.) Ладожского озера // Принципы экологии. 2018. №1. С. 4–14.

Георгиев А.П. Характеристика корюшки (Osmerus eperlanus L.) северной (карельской) части Ладожского озера с точки зрения ее рыбохозяйственного использования // Научно-исследовательские публикации. 2014. № 8 (12). С. 12–17.

Зарипова К.М., Тихонова Д.А. Изучение содержания микропластика в рыбе Ладожского озера // Актуальные проблемы экологии и природопользования / Сборник научных трудов XXV Международной научно-практической конференции. М.: РУДН, 2024. С. 347-351.

Зарипова К.М., Тихонова Д.А. Первые результаты исследований содержания микропластика в рыбе Ладожского озера // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Лимнология в России», посвященной 80-летию Института озероведения РАН. СПб.: РАН, 2024. С. 31-32.

Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб (преимущественно пресноводных). – М.: Пищ. пром-сть, 1966. 376 с.

Степанова Н.Ю., Шевчук К.А., Кузьмин Л.С., Гайсин А.Р. Содержание микропластика в абиотических и биотических компонентах Мешинского залива (Республика Татарстан) // Материалы I Всероссийской конференции с международным участием по загрязнению окружающей среды микропластиком «MicroPlasticsEnvironment-2022» (MPE-2022). Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2022. – С. 38-41.

Тропин Н. Ю., Рахматуллина С.Н., Воробьев Е.Д., Воробьев Д.С., Франк Ю.А. Содержание микропластика в желудочно-кишечном тракте некоторых видов рыб озера Кубенское (Вологодская обл.) // Биология внутренних вод. 2024. №2. С. 317-325.

Capone A., Petrillo M., Misic C. Ingestion and elimination of anthropogenic fibres and microplastic fragments by the European anchovy (Engraulis encrasicolus) of the NW Mediterranean Sea // Marine Biology. 2020. Vol. 167. P. 166.

Dehaut A., Cassone A.-L., Frère L., Hermabessiere L., Himber C., Rinnert E., Rivière G., Lambert C., Soudant P., Huvet A., Duflos G., Paul-Pont I. Microplastics in seafood: benchmark protocol for their extraction and characterization // Environmental Pollution. 2016. Vol. 215. P. 223–233.

Frank Yu.A., Vorobiev E.D., Babkina I.B., Antsiferov D.V., Vorobiev D.S. Microplastics in fish gut, first records from the Tom River in West Siberia, Russia // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya. 2020. №52. P. 130–139.

Karami A., Golieskardi A., Choo C.K., Romano N., Ho Y. Bin, Salamatinia B. A high-performance protocol for extraction of microplastics in fish // Science of the Total Environment. 2017. Vol. 578.

MICROPLASTIC RESEARCH IN THE GASTROINTESTINAL TRACT OF FISH FROM THE NORTHERN PART OF LAKE LADOGA

K.M. Zaripova, D.A. Tikhonova

This study focuses on analyzing microplastics content in the gastrointestinal tract of European smelt (Osmerus eperlanus L.) from the northern part of Lake Ladoga. Fish samples were collected near Valaam Island and Myakisalo Island, followed by morphometric measurements and an analysis of microplastic particles. It was found that the average number of microplastic particles in fish from Valaam Island was 1.10 particles per individual, while no microplastic was detected in fish from Myakisalo Island. The detected particles were identified as fibers. No statistically significant correlation was found between the amount of microplastics, morphometric characteristics, and stomach fullness.

ДИНАМИКА ВОДНЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ ГЛУБОКОГО ОЛИГОТРОФНОГО ВОДОЕМА В УСЛОВИЯХ ВОЗРОСШЕЙ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ (ТЕЛЕЦКОЕ ОЗЕРО, РЕСПУБЛИКА АЛТАЙ)

Е.Ю. Зарубина, М.И. Соколова
Институт водных и экологических проблем СО РАН

Анализ изменения состава, структуры, продукционных характеристик и особенностей распространения макрофитов в глубоком олиготрофном Телецком озере за более чем 20-летний период показал, что на участках с возросшей антропогенной нагрузкой произошла значительная трансформация растительного покрова, снизилась площадь зарослей, уменьшилась их продуктивность и плотность травостоя. Учитывая, что макрофиты играют большую роль в самоочищение водоема, служат местом обитания и пищевым ресурсом для гидробионтов, снижение площади их распространения и продуктивности на этом участке может негативно сказаться на состоянии озера в будущем.

Телецкое озеро расположено в верховьях р. Оби в северо-восточной части Горного Алтая на высоте 434 м над у. м. Водосборный бассейн площадью 20400 км^2 представляет собой горную область, вытянутую с юго-востока на северо-запад. Озеро имеет руслообразную форму. Площадь водного зеркала – 227.3 км^2, длина – 77.8 км, максимальная ширина – 5.2 км, максимальная глубина – 323.3 м. По максимальной глубине Телецкое озеро занимает 39 место среди 50 глубочайших озер мира (Selegei et al., 2001). По строению дна и распределению глубин в озере выделяют основной плес шириной до 5.2 км с наибольшими глубинами и сравнительно ровным дном и северо-западный плес – неширокий (до 1.8 км) с глубинами менее 100 м и волнистым дном. Вода озера по химическому составу относится к слабоминерализованным гидрокарбонатно-кальциевым водам со слабощелочной реакцией среды и высоким содержанием растворенного кислорода (Селегей, Селегей, 1978).

Пониженная температура воды, низкие концентрации биогенов и взвешенных веществ определяют низкий уровень развития биоценозов в Телецком озере. И только в литорали качественный и количественный состав гидробионтов изменяется. По таксономическому разнообразию и количественным характеристикам планктона, бентоса и рыб Телецкое озеро является типичным олиготрофным водоемом с элементами мезотрофии на отдельных участках литорали (Телецкое озеро, 2012).

За последние годы, в связи с активным развитием туризма в Республике Алтай, существенно возросла нагрузка на водоем, особенно на его мелководный северо-западный плес, где наиболее развита рекреационная структура и наиболее высокая плотность населения.

Экосистемы холодноводных олиготрофных озер наиболее уязвимы к внешнему воздействию. Невысокое обилие гидробионтов в подобных водоемах не позволяет им в полной мере утилизировать поступающие с водосбора загрязняющие вещества, которые могут существенно изменить интенсивность внутриводоемных процессов. Особое значение в качестве барьера, препятствующего распространению загрязняющих веществ в водоем, имеет литораль, зарастающая макрофитами. В связи с чем, актуальным является анализ изменения состава, структуры, продукционных характеристик, а также особенностей распространения макрофитов в Телецком озере за более чем 20-летний период.

Материалом для данной работы послужили результаты исследования макрофитов, проведенные в 2001, 2002, 2004-2006 и 2023 гг. на ключевых участках

Телецкого озера: Кыгинский и Камгинский заливы (территория заповедника с практически полным отсутствием антропогенной нагрузки), устья рек Колдор и Тевенек, а также участок в районе п. Артыбаш, испытывающее значительно возросшую в последние годы антропогенную нагрузку. Исследования выполнялись в период максимальной вегетации водной растительности (начало-середина августа) с применением стандартных методов сбора, гербаризации, описания и картирования высшей водной растительности (Катанская, 1981; Папченков, 2003). Уровень продуктивности водных фитоценозов определяли по их биомассе на укосных площадках размером 0.25 м^2 в 2–4-х кратной повторности. В камеральных условиях укосы досушивали при t = 85 °С до абсолютно сухого веса по методике И.М. Распопова (2006).

Для характеристики условий обитания растительных сообществ определяли: глубину произрастания видов, прозрачность и температуру поверхностного слоя воды, концентрацию растворенного в воде кислорода, водородный показатель (pH), $БПК_5$ с использованием портативных анализаторов воды Анион 7051 и МАРК 302Э. Приборы перед началом измерений калибровали.

Во флоре Телецкого озера обнаружено 62 вида и гибрида сосудистых растений (Зарубина, Ковешникова, 2006). Озеро характеризуется комплексом неблагоприятных для роста и развития растений факторов. К ним можно отнести незначительную площадь литорали (участки с глубинами до 10 м составляют около 3.5% от площади акватории), валунно-галечниковые или песчанно-галечниковые грунты, невысокие концентрации биогенных веществ. Несмотря на это видовое разнообразие флоры сопоставимо с таковым в крупных глубоководных озерах северо-запада России (Распопов, 1985). Зарастание озера наблюдается там, где действие неблагоприятных факторов сглажено – заливы, приустьевые участки крупных рек, район северо-западного мелководного плеса. Ведущую роль в зарастании литорали играют *Potamogeton perfoliatus* L., *Potamogeton gramineus* L., *Equisetum fluviatile* L., *Ranunculus reptans* L., *Ranunculus trichophyllus* Chaix., *Carex acuta* L. и др. Общая площадь зарослей как полупогруженных, так и погруженных видов, составляет около 30% площади литорали. Природные особенности отдельных участков озера обуславливают своеобразие их растительности. Так, в глубоководном Кыгинском заливе и в районе п. Артыбаш преобладают сообщества погруженных растений (гидатофитов), в районе устьев рек Колдор и Тевенек – полупогруженных (гелофитов). Наибольшее видовое разнообразие и продуктивность растительных сообществ наблюдается в Камгинском заливе (Зарубина, Соколова, 2006).

Погруженная растительность, представленная преимущественно сообществами рдестов, по биомассе уступает полупогруженной, однако по площади зарастания литорали в целом гидатофиты значительно превосходят гелофитов, что, вероятно, связано с особенностями строения берегов. Эти особенности распространения макрофитов в литорали Телецкого озера остаются стабильными на протяжении всего периода наблюдения. Однако, степень зарастания исследованных участков озера, а также плотность зарослей, процент проективного покрытия в фитоценозах и биомасса, образуемая доминирующими видами, за более чем 20-летний период значительно трансформировались.

Фитомасса погруженных растений (гидатофитов) в абсолютно-сухом весе (АСВ) на рассматриваемых участках Телецкого озера в 2001-2006 гг. в среднем составляла 96.5±56.4 г/м^2, полупогруженных (гелофитов) – 163.8±71.6 г/м^2. В 2023 г. биомасса, образуемая гидатофитами, значительно уменьшилась, составляя в среднем 36.2±23.9 г/м^2, в то время как гелофитов напротив увеличилась в среднем до 216.8±94.9 г/м^2. Однако, эти изменения коснулись только участков, испытывающих в последнее время высокую рекреационную нагрузку – устья рек Колдор и Тевенек, а также район п.

Артыбаш. В Кыгинском и Камгинском заливах (территория заповедника), изменений в видовом составе и биомассе доминантов не отмечено (рис.).

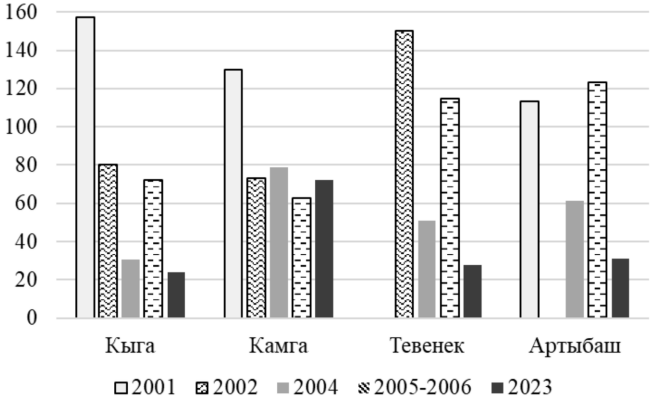


Рис. Динамика биомассы (г/м^2) гидатофитов в абсолютно-сухом весе на различных участках Телецкого озера в 2001-2002, 2004-2006 и 2023 гг.

Однако, значительно сократилась степень зарастания литорали озера в районе п. Артыбаш и устья р. Тевенек, уменьшилась продуктивность растительных сообществ и видовое разнообразие. Плотность травостоя в сообществах *Potamogeton perfoliatus* уменьшилась в среднем в 3,5 раза, биомасса – в 3 раза. Поскольку существенные изменения в составе, структуре и продуктивности макрофитов произошли за рассматриваемый период только на участках с возросшей что, вероятнее всего, связано с увеличившейся в последние годы рекреационной нагрузкой на этот участок озера. рекреационной нагрузкой, то с высокой долей вероятности причиной этих изменений является антропогенный фактор.

Большое количество маломерных судов, появившихся за последнее десятилетие, разрушают растительные сообщества, неблагоприятное влияние на формирование водных фитоценозов оказывает и активная застройка прибрежной полосы озера. Учитывая, что высшие водные растения играют большую роль в самоочищение водоема, служат местом обитания и пищевым ресурсом для гидробионтов, снижение площади их распространения и продуктивности на этом участке может негативно сказаться на состоянии этого участка озера в будущем.

Литература

Зарубина Е.Ю., Ковешникова А.С. Гидрофильная флора Телецкого озера (конспект флоры) // Флора и растительность Алтая. 2006. Т. 11. С. 80-85.

Зарубина Е.Ю., Соколова М.И. Продукционные характеристики макрофитов Телецкого озера // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2006. №5. С. 90-91.

Катанская В.М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР (методы изучения). Л.: Наука, 1981. 187 с.

Митрофанова Е.Ю. Фитопланктон Телецкого озера (Алтай, Россия): Особенности развития и многолетней динамики // Экология. 2018. №2. С. 146-151.

Папченков В.Г. Продукция макрофитов вод и методы ее изучения // Материалы Школы по гидроботанике «Гидроботаника: методология и методы». Рыбинск: Рыбинский Дом печати, 2003. С. 137–145.

Распопов И.М. Высшая водная растительность больших озер Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1985. 200 с.

Распопов И.М. Основные понятия продукционной гидробиологии применительно к макрофитам // Материалы VI Всероссийской школы-конференции по водным макрофитам «Гидроботаника 2005». Рыбинск: Рыбинский Дом печати, 2006. С. 153–158.

Селегей В.В., Селегей Т.С. Телецкое озеро. Л., 1978, 142 с.

Телецкое озеро: научно-информационное издание. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 28 с.

Selegei V., Dehandschutter B., Klerks J., Vysotsky A. Physical and geological environment of Lake Teletskoye // Annales Sci., Geologiques. 2001. V. 105. P. 1–310.

DYNAMICS OF AQUATIC PHYTOCENOSES OF A DEEP OLIGOTROPHIC RESERVOIR UNDER CONDITIONS OF INCREASED ANTHROPOGENIC LOAD (TELETSKOYE LAKE, ALTAI REPUBLIC)

E.Y. Zarubina, M.I. Sokolova

An analysis of changes in the composition, structure, production characteristics and distribution of macrophytes in the deep oligotrophic Lake Teletskoye over a period of more than 20 years has shown that in areas with increased anthropogenic load, a significant transformation of vegetation occurred, the area of thickets decreased, their productivity and density of herbage decreased. Considering that macrophytes play an important role in the self-purification of the reservoir, serve as a habitat and food resource for aquatic organisms, a decrease in their distribution area and productivity in this area may negatively affect the state of the lake in the future.

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФИТОПЛАНКТОНА В ПОДЛЕДНЫХ СООБЩЕСТВАХ ОЗЕРА БАЙКАЛ И СУБАРКТИЧЕСКИХ ОЗЕР ВОСТОЧНОЙ ЯКУТИИ

Ю.Р. Захарова[1], М.В. Башенхаева[1], А.Д. Фирсова[1], А.Ю. Бессудова[1], И.В. Томберг[1], М.В. Сакирко[1], Е.Д. Бедошвили[1], Л.И. Копырина[2], Е.В. Лихошвай[1]

[1]Лимнологический институт СО РАН

[2]Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН

Обобщены результаты исследований видового состава и количественных характеристик фитопланктона в подледный период развития в пелагиали озера Байкал и субарктических озерах на Оймяконском нагорье в Якутии. В подледных сообществах озера Байкал выявлено 64 вида микроводорослей с доминирующим комплексом жгутиконосцев. Показано, что количественные характеристики и разнообразие фитопланктона были сходны по всей пелагиали озера, при этом по численности доминировали зеленые водоросли, а по биомассе динофлагелляты. В озерах Якутии среди выявленных 202 видов фитопланктона с широким диапазоном количественных показателей преобладали центрические диатомовые и чешуйчатые золотистые водоросли. Показано, что разнотипные озера в условиях холодного климата при

световом и биогенном лимитировании характеризуются высоким разнообразием и численностью фитопланктона.

Фитопланктон, являясь основным первичным продуцентом, оказывает существенное влияние на все остальные трофические уровни водной экосистемы. Исследования озер, сезонно покрытых льдом, указывают, что зимние пищевые сети и физические процессы являются активными и сложными. Низкие температуры, пониженный уровень освещенности, ограниченное поступление питательных веществ во время ледяного покрова влияют на скорость биологических реакций (Bertilsson et al., 2013). Тем не менее, несмотря на более экстремальные условия среды по сравнению с другими сезонами, фитопланктон развивается на протяжении всего ледового периода. Арктические и субарктические озера наиболее чувствительны к изменению условий окружающей среды, и одним из основных факторов является глобальное повышение температуры. Эти изменения затрагивают как континентальную Арктику, так и панарктический регион, запуская каскад трансформаций, которые меняют физические и биогеохимические свойства экосистем (Smol et al., 2005). Виды фитопланктона, предпочитающие холодные и олиготрофные условия, могут быть маркерами устойчивости экосистем северных озер. Анализ данных литературы по исследованию континентальных арктических и субарктических особенностей озер показал, что существуют пробелы в понимании структуры сообщества и весеннего роста фитопланктона в период ледостава.

Озеро Байкал – самое глубокое и крупное по объему пресной воды озеро в мире, ежегодно полностью покрывается льдом, образование которого начинается в мелководных заливах в ноябре и в открытых частях озера в январе. Активное развитие фитопланктона начинается в январе-феврале, а пик подледного цветения происходит в апреле (Поповская, 1987). Так как протяженность озера с юго-запада на северо-восток составляет 636 км и на границе южной и средней котловин в озеро впадает самый крупный приток р. Селенга, все процессы, как гидрологические, так и биологические, происходят неравномерно в южной, средней и северной частях озера. В последнее время исследования фитопланктона в ледовый период носили локальный характер, ограниченный несколькими районами Южного и Среднего Байкала (Bashenkhaeva et al., 2025 in press). Субарктические озера Якутии расположены в горном районе Оймяконского нагорья, известного как «Северный полюс холода» и является одним из самых холодных мест Северного полушария (http://wmo.asu.edu/con ent/asia-lowest-temperature). Регион имеет резко континентальный климат и самую высокую амплитуду температур, с годовым диапазоном более 60 °C. Холодный сезон длится с конца октября до середины июня, в течение которого озера покрыты ледяным и снежным покровом. На сегодняшний день в регионе Оймякона проведено очень мало исследований озер в период ледостава, ранее подробно были изучены гидрохимия и фитопланктон только в двух глубоководных озерах Лабынкыр и Ворота (Томберг и др., 2017; Koryrina et al., 2020), а другие озера вообще не были исследованы.

В данной работе проведен анализ и сравнение численности и биомассы, структуры и видового богатства фитопланктона в озере Байкал и в нескольких водоемах субарктической зоны Северо-Восточного региона Якутии в подледный период с целью выявления особенностей структуры фитопланктона для дальнейшего мониторинга в рамках наблюдаемых изменений климата. Материалом для исследования послужили пробы воды, отобранные из-подо льда на 14 станциях пелагической зоны по всей акватории озера Байкал в марте 2022 г. и в озерах Лабынкыр, Водораздельное, Мямичи Улу, Мертвое, истока и устья реки Лабынкыр в апреле 2021 и 2022 гг. Физико-химические параметры и микроскопический анализ проб проводили согласно ранее

опубликованным методикам (Томберг и др., 2017; Zakharova et al., 2022), полученные данные доступны на онлайн ресурсах (Bashenkhaeva et al., 2025 in press; Firsova et al., 2025 in press).

Байкал – озеро тектонического происхождения расположено на 456-457 метров над уровнем моря в южной части Восточной Сибири (53°13′00″ с. ш. 107°45′00″ в. д.), площадью 31 722 км², размером 636×79.5 км, с максимальной 1642 м и средней глубиной 744.4 м. Озеро Лабынкыр ледниково-тектонического происхождения находится на высоте 1020 м над уровнем моря на стыке хребта Сунтар-Хаята и нагорья Оймякон (62°30′17″ с. ш. 143°36′03″ в. д.), площадью 44.7 км², размером 14.3×4.1 км, с максимальной 75 м и средней глубиной 52 м. Озеро Водораздельное ледниково-тектонического происхождения расположено на хребте Сунтар-Хаята расположено на высоте 1465 м над уровнем моря (62º2′12″ с. ш. 143º17′47″ в. д.), площадью 2.85 км^2, размером 4.2×1.7 км, с глубиной, по нашим данным 66 м. Озеро Мямичи входит в систему Малых Лабынкырских озер термокарстового происхождения, находится в 20 км от нижнего берега озера Лабынкыр на высоте 958 м над уровнем моря (62°38′56″ с. ш. 143°30′36″ в. д.), площадью 2.7 км^2, размером 2.3×1.3 км, глубиной 3 м. Улу – озеро ледникового происхождения расположено на высоте 969 м над уровнем моря (63º20′22″ с. ш 141º2′53″ в. д.), площадью 4,8 км^2, размером 4.0×1.8 км, с максимальной 40 м и средней 20 м глубиной. Озеро Мертвое карового происхождения, округлой формы, без выраженного притока или стока воды, находится на 960 м над уровнем моря (63º19′47″ с. ш 141º7′2″ в. д.), длинна береговой линии 3 км, глубина 6 м. Физико-химические параметры в образцах воды из разных точек отбора проб Байкала и озер Якутии в исследуемые периоды ледостава были относительно стабильными (рис. 1).

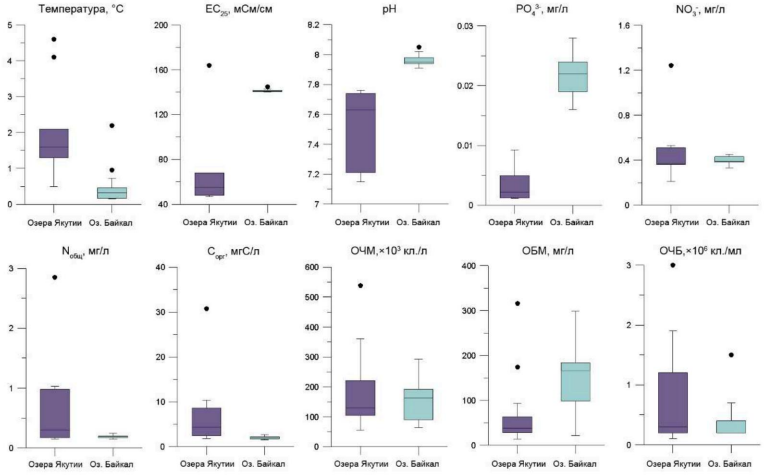


Рис. 1. Физико-химические (величины температуры, электропроводности, pH, концентрации фосфатов, нитратов, общего азота и органического углерода) и биологические (общая численность и биомасса микроводорослей, общая численность бактерий) параметры подледной воды в озерах Якутии (апрель 2021-2022 гг.) и Байкала (март 2022 г.)

Все озера в Якутиивo время исследований были на 100% покрыты снегом, толщина которого варьировала от 30 до 51 см, а толщина льда от 80 до 120 см. На Байкале толщина снежного покрова была меньше, варьировала от 3.5 до 21 см с наибольшими значениями в южной части озера, а толщина льда варьировала от 45 до 88 см. Также выявлены различия в параметрах электропроводности, pH, концентрациях фосфатов, значения которых были выше в подледных пробах Байкала, чем в озерах Якутии. Поверхностная вода была достаточно насыщена кислородом и, таким образом, допускала преобладание аэробных процессов подо льдом. Концентрации биогенных элементов и органического вещества были довольно низкими, соответствующим олиготрофному типу озер.

Сравнительный анализ структуры фитопланктона показал относительное сходство по составу, численности и биомассе на всех исследуемых станциях пелагиали озера Байкал. Показатели численности варьировали в пределах 63.3-292×10^3 кл/л, а биомасса составляла 21.7-280 мг/$м^3$ (рис. 2). В подледных сообществах фитопланктона озера Байкал было выявлено обилие жгутиковых форм микроводорослей. Из них значительную долю по биомассе составляли динофлагелляты, которые были выявлены по всей пелагиали Байкала и представлены шестью видами *Peridinium baicalense*, *P. euryceps*, *Gymnodinium baicalense*, *Gyrodinium helveticum*, *Scrippsiella hangoei* и *Glenodinium* sp. Так же выявлено высокое разнообразие хризофитовых среди представителей родов *Mallomonas* (*M. vannigera*, *M. getseniae*, *M. striata*, *M. grachevii*, *M. baicalensis*, *M. alpina*, *Mallomonas* sp.) и *Dinobryon* (*D. cylindricum*, *D. cylindricum* var. *palustre*, *D. sociale* var. *americanum*, *D. bavaricum*). Жгутиковые из отделов гаптофитовых и криптофитовых микроводорослей встречались по всей пелагиали и доминировали на некоторых станциях (*Chysochromulina parva*). Кроме того, было выявлено массовое развитие мелкоклеточных (не более 10 мкм) нанофлагеллят, отнесенных к двум морфотипам: нечешуйчатым хризофитовым рода *Spumella* и зеленым водорослям из рода *Chlamydomonas*. Ранее такое обилие нанофлагеллят в подледный период наблюдалось только в литоральной зоне Байкала. Наряду со жгутиковыми, значительную долю в фитопланктоне составляли зеленые водоросли *Monoraphidium griffithii*, *M. contortum*, *M. arcuatum* и *Koliella longiseta,* а также в меньшем обилии встречались диатомовые водоросли *Fragilaria radians*, *Ulnaria acus* и *Nitzschia graciliformis.*

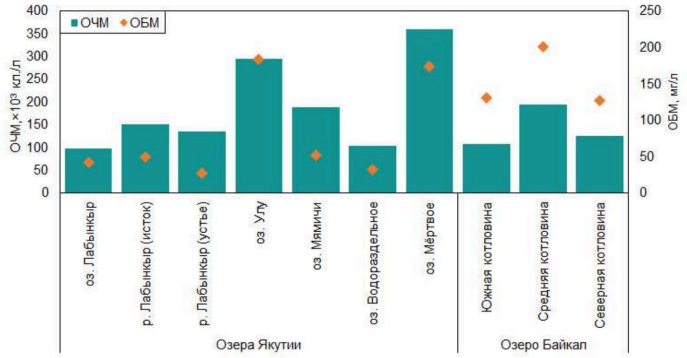


Рис. 2 Общая численность (ОЧМ) и биомасса (ОБМ) микроводорослей в пробах исследуемых водоемов в подледный период. Озера Якутии – средние значения в пробах фитопланктона в апреле 2021-2022 гг., озеро Байкал – средние значения по котловинам в пробах в марте 2022 г.

Общая численность и биомасса фитопланктона в озерах Якутии была самой высокой в апреле 2021 г. в озере Мертвое (360.4×10^3 кл/л и 174.4 мг/м^3) и в озере Улу в апреле 2022 (526×10^3 кл/л и 315 мг/м^3). В фитопланктоне всех исследованных озер Якутии доминировали диатомовые водоросли, субдоминантами были определены хризофитовые, зеленые, криптофитовые и в меньшем количестве выявлены динофитовые, харовые, эвгленовые, гаптофитовые и цианобактерии. Видовое богатство фитопланктона в озерах Улу и Мямичи, было выше (41-68 видов), чем в озерах Лабынкыр, Водораздельное, Мертвое и реке Лабынкыр (16-40 видов). Наибольшее видовое богатство во всех озерах определено у диатомовых водорослей родов *Pantocsekiella* (*P. schumannii*, *P. arctica*, *P. costei*, *P. hinziae*, *P. ocellata* и *P. pseudocomensis*), *Lindavia* (*Lindavia* sp., *L. minuta*, *L.* cf. *comta*, *L. costata* и *L. radiosa*) и *Aulacoseira* (*Aulacoseira* sp., *A. ambigua*, *A. islandica*, *A. granulata*, *A. subarctica* и *A. valida*). Золотистые водоросли были представлены в основном чешуйчатыми формами, принадлежащими к разным эволюционным линиям и отличающиеся трофическими типами. Наибольшее видовое богатство сформировали автотрофы рода *Mallomonas* (9 видов), миксотрофы *Spiniferomonas* (8 видов) и *Chrysosphaerella* и гетеротрофы *Paraphysomonas* (5 видов) и *Lepidochromonas*. В озере Лабынкыр представители трех трофических групп формировали высокую относительную численность одновременно, но при этом доминировала, как правило, миксотрофная форма *Spiniferomonas trioralis* f. *cuspidata*. В остальных озерах преобладали чешуйчатые золотистые водоросли одного трофического типа, например, клетки *Mallomonas* sp. часто обнаруживались в озере Улу, *Paraphysomonas uniformis* subsp. в озере Мямичи, а *Spiniferomonas heterospina* в озере Водораздельное. Общее видовое богатство зеленых водорослей с часто встречающимся видом *Sphaerocystis* sp. было невысоким, однако в озере Мямичи (10 видов), а также в реке Лабынкыр превышало богатство хризофитовых. Среди криптофитовых во всех озерах обнаружены представители рода *Cryptomonas*, а также виды *Komma caudata* и *Rhodomonas pusilla*. Харовые водоросли *Elakatothrix genevensis* были выявлены в озерах Лабынкыр, Улу и реке Лабынкыр, а также два таксона *Elakatothrix* sp. и *Elakatothrix gelatinosa* обнаружены только в озере Лабынкыр. Среди наиболее распространенных динофлагеллят определены виды *Gymnodinium* sp. и *Gyrodinium helveticum*. Цианобактерии *Synechocystis* sp. и *Pseudanabaena limnetica* были выявлены во всех образцах кроме озер Водораздельное и Мертвое. При этом в озере Мертвое выявлены цианобактерии *Oscillatoria limosa* и *Microcystis aeruginosa* с максимальными значениями численности и биомассы. Эвгленовые (*Bodo saltans* и *Euglena viridis*) были обнаружены только в озере Мямичи и реке Лабынкыр, а единственный представитель гаптофитовых *Chrysochromulina parva* присутствовал во всех образцах, кроме озер Улу и Водораздельное.

Работа выполнена в рамках государственного задания ЛИН СО РАН по теме №121032300186-9 и ИБПК СО РАН по теме №121012190038.

Литература

Bertilsson S., Burgin A., Carey C.C., Fey S.B., The under-ice microbiome of seasonally frozen lakes // Limnol. Oceanogr. 2013. V. 58. P. 1998–2012.

Popovskaya G.I. Phytoplankton of the deepest lake in the world // Marine and Fresh-Water Plankton. 1987. P. 199–210.

GENERAL PATTERNS AND REGIONAL FEATURES OF PHYTOPLANKTON IN SUB-ICE COMMUNITIES OF LAKE BAIKAL AND SUBARCTIC LAKES OF EASTERN YAKUTIA

Yu.R. Zakharova, M.V. Bashenkhaeva, A.D. Firsova, A.Yu. Bessudova,
Ye.D. Bedoshvili, L.I. Kopyrina, I.V. Tomberg, M.V. Sakirko, Ye.V. Likhoshway

The article combines the results of studies of the species composition and quantitative characteristics of phytoplankton during the ice-cover period of blooming in the pelagic zone of Lake Baikal and subarctic lakes on the Oymyakon Highlands in Yakutia. In the under-ice communities of Lake Baikal, 64 species of microalgae with a dominant complex of flagellates were identified. It is shown that the quantitative characteristics and diversity of phytoplankton were similar throughout the pelagic zone of the lake, with green algae dominating in abundance and dinoflagellates in biomass. In the lakes of Yakutia, among the 202 identified phytoplankton species with a wide range of quantitative indicators, centric diatoms and scaly scaled chrysophytes prevailed. It is shown that lakes of different types in cold climates with light and biogenic limitation are characterized by high diversity and abundance of phytoplankton.

ОЗЕРО ИНГОЛЬ: РЕЗУЛЬТАТ АККЛИМАТИЗАЦИИ ЕВРОПЕЙСКОЙ РЯПУШКИ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЕЁ ПОПУЛЯЦИИ

Д.В. Злотник, Ю.Ю. Форина
Красноярский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («НИИЭРВ»)

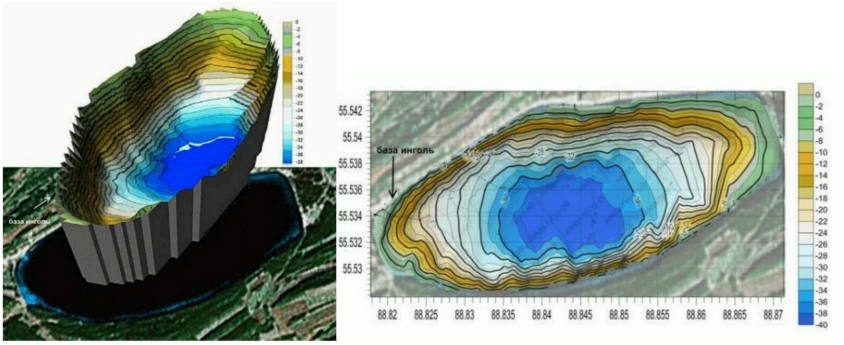
Проанализированы особенности морфологии интродуцированной популяции ряпушки *Coregonus albula* (L.) оз. Инголь (басс. р. Обь). Показано, что современная популяция ряпушки оз. Инголь характеризуется рядом особенностей внешней морфологии, которые, очевидно, сформировались под воздействием условий новой среды обитания. Представлены некоторые экологические характеристики (плодовитость, темпы роста). Показано антропогенное влияние на питание в зимний период и снижение темпов роста.

Реки и озера Сибири – ареал ценных сиговых (Coregonidae) видов рыб, многие из которых являются эндемиками этого региона. Распределение представителей семейства в пределах рассматриваемой территории достаточно неоднородно: наибольшее видовое разнообразие и численность отмечены для районов Субарктической зоны. В верховьях же крупных сибирских рек, таких как Обь, Енисей, Лена сиговые представлены локально, что связано не только с особенностями происхождения и историей расселения этой группы (Боровикова, 2013; Решетников, 1980), но и нерациональным использованием рыбных ресурсов (Кузнецов, 2013; Решетников, 1980; Скрябин, 1979). Значительное снижение численности сиговых рыб обусловило в свое время интенсивное зарыбление водоёмов Сибири ценными видами этого семейства, в том числе и теми, которые здесь ранее не встречались (Бурмакин, 1963).

В пределах Красноярского края, где расположена система реки Чулым (правый приток Среднего течения Оби, длиной 1799 км и общей площадью водосбора более 134 тыс. км²) и Верхне-Чулымская группа озёр, аборигенная сиговая фауна в настоящее время не сохранилась (Глазырина и др., 1980), хотя, согласно работе М. Д. Рузского (Рузский, 1920),ещё около столетия назад в реках Томь и Чулым отмечались такие виды, как тугун *Coregonus tugun* (Pallas, 1814) и пыжьяновидный сиг *Coregonus lavaretus pidschian* (Gmelin, 1788).

В первой половине XX века на юге Красноярского края начались работы по направленному формированию ихтиофауны местных озер, тем более что этому были все предпосылки. Наличие в юго-западной части края большого количества озер с ограниченным видовым составом рыб, лишенных типичных планктофагов и бентофагов, давало широкие возможности для повышения их рыбопродуктивности за счет вселения ценных видов рыб, в первую очередь сиговых (Иоганзен и др., 1972). В 30-е годы именно этот район стал ключевым центром аквакультуры в регионе (Зуев и др., 2016). Одним из объектов активных акклиматизационных работ в середине прошлого столетия стало озеро Инголь (Верхне-Чулымская система).

Озеро находится в Шарыповском районе Красноярского края, в 30км к западу от г. Шарыпово. Расположено в северных отрогах Кузнецкого Алатау на высоте 312 м над уровнем моря. Чаша озера овальной формы, объемом 85,9 млн м^3 (рис. 1). Максимальная глубина 40 м (средняя – 21,1 м), протяженность озера – 3470 м, максимальная ширина – 1580 м (средняя – 1170 м), изрезанность береговой линии – 8345 м. Площадь водосбора только в 1,5 раза больше площади поверхности водного зеркала (4,063 км^2), что определяет уникальность и чувствительность экосистемы. В 1983 г. с целью сохранения природного комплекса озера Инголь и создания условий для организации его устойчивого рекреационного использования был организован государственный памятник природы краевого значения «Озеро Инголь» (http://www.doopt.ru/?id=85). В озеро впадают два ручья – Железный (Святой) и Сухой, вытекает только один – Ингольский (приток р. Урюп, который в свою очередь впадает в Чулым). Питание озера осуществляется за счет дождевых стоков (69 % приходной части), притока грунтовых и поверхностных вод (Петров, Космаков, 2010).



а б

Рис. 1. Схема оз. Инголь с отметками глубин (изобатами)

Гидрохимический режим: pH воды составляет 7,9–8,0; содержание хлоридов – 1,75–3,50 мг/л; сульфатов – 6,7–13,6 мг/л; железа – 0,03–0,04 мг/л; медь – менее 0,002 мг/л (Научно-исследовательское …, 2002). Содержание кислорода у дна – 68,5 %, окисляемость – 2,7 мг/л O_2. Температурный минимум средних значений наблюдается в конце февраля – начале марта и составляет примерно 1,5 °С, температура воды подо льдом близка к 0 °С, а уже у дна составляет 2–2,5 °С. После схода льда (май) стратификация наступает практически сразу, термоклин устанавливается на глубине 8–9 м и составляет около 6 °С. В летние месяцы вода в озере прогревается до 20 °С (до глубины 5–7 м). В конце октября в озере устанавливается осенняя гомотермия при температуре воды около 6 °С (Петров, Космаков, 2006).

Современный состав аборигенной ихтиофауны оз. Инголь представлен обыкновенной плотвой *Rutilus rutilus* (Linnaeus, 1758), обыкновенной щукой *Esox lucius* (Linnaeus, 1758), язём *Leuciscus idus* (Linnaeus, 1758) и окунем *Perca fluviatilis* (Linnaeus, 1758). В первой половине 20 в. ихтиофауна озера пополнилась инвазионными видами рыб, так, кроме сиговых, в озере успешно натурализовался лещ *Abramis brama* (Linnaeus, 1758).

Первая посадка сиговых рыб в оз. Инголь (рисунок) произведена в апреле 1939 г. икрой (1 млн шт. икринок). К сожалению, данные о происхождении посадочного материала разнятся: в одном источнике донором икры указан Ленинградский рыбоводный завод (Башмаков, 1953), тогда как Е.В. Бурмакин (1963) сообщает, что икра была привезена с Волховского завода. Хотя планировали выпускать лишь икру европейской ряпушки и рипуса, среди нее оказалась и икра сига из оз. Чудское. Несмотря на относительно невысокую плотность посадки, малую жизнестойкость посадочного материала и наличие в озере хищных рыб натурализация прошла успешно (Бурмакин, 1963). В пятидесятых годах прошлого столетия в оз. Инголь в уловах преобладала ряпушка (Башмаков, 1953), в то время как В.Н. Грезе (Грезе, 1955) считал, что ряпушка и рипус в озере составляли около 15% ихтиомассы озера. В период с 1963 по 1966 гг. в оз. Инголь было посажено 10,5 млн личинок европейской ряпушки из оз. Ильмень (Башмаков, 1953). На сегодняшний день *C. albula* является одним из массовых видов в озере.

Морфологические особенности ряпушки оз. Инголь. Сравнение средних значений меристических (табл. 1) признаков ряпушки оз. Инголь с таковыми для других популяций позволяет говорить о значительном своеобразии первой (Злотник, 2020; Злотник и др., 2018).

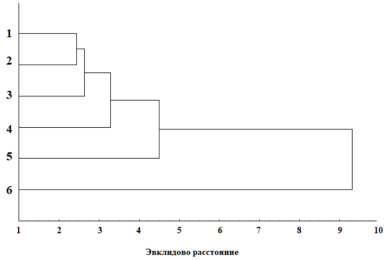
Таблица 1. Меристические признаки ряпушки из оз. Инголь в сравнении с таковыми ряпушки ряда европейских и сибирских популяций

Признак	Водоем						
	оз. Инголь (Злотник и др, 2018); n=43 экз.	оз. Ладожское (Дятлов, 2002); n=53 экз.	оз. Ладожское (рипус) (Дятлов, 2002); n=11 экз.	оз. Белое (Дрягин, 1933); n=50 экз.	оз. Водлозеро (Боровикова, Махров, 2008); n=24–94 экз.	оз. Томмот (Романов, 2000); n=49 экз.	р. Щучья (Амстиславский, 1972); n=60 экз.
D	9,4±0,07	***8,1±0,08***	***8,6±0,23***	***9,7±0,09***	***9,5±0,07***	***9,0±0,10***	***9,0±0,10***
P	16,0	–	–	***13,6±0,11***	–	***14,1±0,10***	–
V	9,5±0,08	–	–	***9,9±0,06***	9,8±0,07	***10,1±0,08***	–
A	11,8±0,09	***11,8±0,11***	***11,6±0,23***	***13,7±0,09***	13,0±0,10	***11,5±0,11***	***11,8±0,11***
L.l.	83,3±0,41	***81,9±0,53***	83,4±0,94	***67,5±0,41***	–	***77,9±0,47***	***79,1±0,57***
Sp.br	44,5±0,35	**44,5±0,39**	**46,3±0,53**	***39,2±0,27***	***36,5±0,38***	45,0±0,30	***40,4±0,38***
Vert.	55,4±0,13	***56,4±0,22***	***57,4±0,26***	***54,4±0,11***	54,7±0,12	***58,2±0,14***	–

Примечание: указано среднее значение признака и стандартная ошибка средней, в скобках указаны лимиты признака; прочерк означает отсутствие данных. *Курсивом* выделены средние значения признаков, различающиеся с показателями ряпушки оз. Инголь на уровне значимости $P \leq 0,05$; жирным шрифтом – на уровне значимости $P \leq 0,01$; жирным курсивом – на уровне значимости $P \leq 0,001$. Vert. – число позвонков, L.l. – число прободенных чешуй в боковой линии, Sp.br. – число жаберных тычинок на первой жаберной дуге, *D, P, V, A* – число ветвистых лучей в спинном, грудном, брюшном и анальном плавниках.

Следует отметить, что часть признаков ряпушки оз. Инголь сближают ее с озерными популяциями Европейской территории России, другие – с ряпушкой сибирских водоемов. По меристическим признакам ингольская ряпушка оказалась ближе к рипусу из оз. Ладожское (рис. 2). Интересно, что ряпушка оз. Водлозеро и ингольская популяция морфологически разные, но по данным молекулярно-

генетического анализа особи этих водоемов имели одинаковый вариант нуклеотидной последовательности ND1 фрагмента мтДНК (Злотник и др., 2018).



1 – ряпушка оз. Инголь (Злотник и др., 2018);
2 – рипус оз. Ладожское (Дятлов, 2002);
3 – ряпушка оз. Ладожское (Дятлов, 2002);
4 – ряпушка оз. Ладожское (Правдин, 1939);
5 – малопозвонковая ряпушка оз. Томмот (Романов, 2000);
6 – ряпушка оз. Вадлозера (Боровикова и др., 2006)

Рис. 2. Дендрограмма сходства популяций ряпушки из различных водоемов

Очевидно отмеченные особенности, как и пластические признаки (Злотник, 2020), сформировались у ингольской популяции за время ее существования в новых условиях обитания: хорошо известно, что ряпушки, как большинство сиговых, очень пластичная группа и существенные изменения ряда морфологических признаков могут происходить в течение нескольких поколений (Боровикова, Махров, 2013; Попов, Сендек, 2003). Анализ литературных источников показывает, что изменения в морфологии и экологии интродуцентов могут быть очень существенными; часто отмечается увеличение размеров тела вселенцев (Беляева, 1967; Корляков, 2014; Sandlund, 1992).

Питание ряпушки в озере в зимний период. Всего исследовано питание у 28 ряпушек. Обследование ЖКТ ряпушки показало, что визуально степень наполнения желудков (Питание …, 2015) в среднем – 4 (полное наполнение). Индекс наполнения желудка и кишечника, характеризующий интенсивность питания рыб, высокий: в среднем около 115, у отдельных особей – превышал 400. По степени переваренности пищевого материала исследованных ЖКТ ряпушки можно оценить на 3 балла, поскольку чаще всего комок состоял из полупереваренных организмов и их фрагментов. Однако также среди уже переваренной пищи встречались практически ненарушенные организмы, что указывает на то, что рыба уже довольно долго кормилась на участке отлова. В период исследований состав пищевого комка ряпушки состоял из бокоплавов (Amphipoda), зерен кукурузной крупы (32 %), икры рыб (единично) и единичных особей зоопланктона (1 экз. веслоногих рачков и 2 экз. остракод). По частоте встречаемости доминировали амфиподы – до 71 %, их доля по массе составляла в среднем 18 %. Выявленные компоненты питания ряпушки в зимний период являются нехарактерными для ряпушки и планктофагов в целом (Стрельникова, 2021). Наличие вареных бокоплавов и крупы в желудках ряпушки обосновано разрешенным любительским ловом на озере. По данным 2005 г. (Вышегородцев и др., 2006) спектр питания ряпушки включал 4 группы кормовых объектов: гаммариды (основа рациона), копеподы (представлены незначительно), личинки и куколки хирономид.

Рост ряпушки. При сравнении данных по росту и весу ряпушки за разные годы видно, что в 2024 г. темпы роста снизились (рис. 3), что можно связать с высокой плотностью особей в популяции.

В уловах 2024 г. в возрасте 3+ лет длина по Смитту (и далее) и вес с внутренностями составляли соответственно 181 мм и 51,2 г, в 4+ – 191 мм и 57,2 г, в 5+ – 211 мм и 66,5 г. В 2011 г. (Злотник, 2020) темпы роста были выше, так, в 3+ лет длина составляла 202 мм, вес – 78 г, в 4+ – 210 мм и 85 г, 5+ –220 мм и 100 г, 6+ – 231 мм и 113 г. В 1950 г. (Башмаков В.Н., 1950) параметры были следующие: 1+ – 140 мм и 28 г,

2+ – 170 мм и 46 г, 3+ – 198 мм и 77 г, в 4+ – 229 мм и 117 г. Так, до 60-х годов вёлся интенсивный промысел (Башмаков, 1950), и популяция находилась в депрессивном состоянии, в настоящее же время ее численность, несмотря на пресс браконьерского лова, находится на высоком уровне.

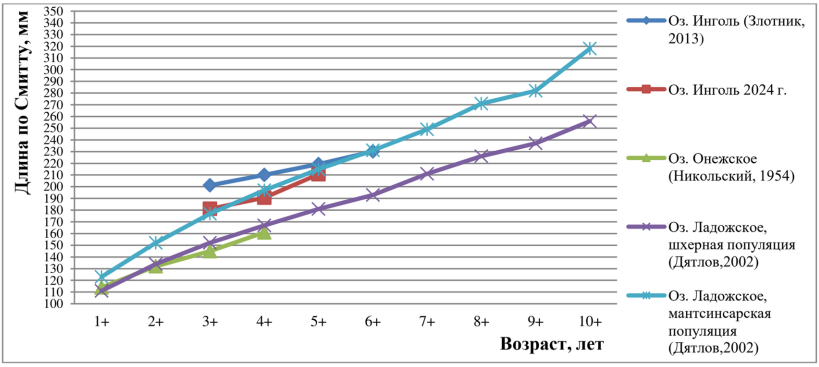


Рис. 3. Линейный рост ряпушки оз. Инголь и водоёмов нативного ареала

На графике (рис. 3) видно, что темп роста ряпушки из озера Инголь близок к таковому ряпушки из материнского водоёма (мантсинсарская популяция ряпушки оз. Ладожское). Наиболее интенсивный как линейный, так и весовой прирост наблюдается летом, что связанно с интенсивным развитием кормовых организмов ряпушки.

Размножение. Нерест у ряпушки в оз. Инголь происходит в конце октября – начале ноября при температурах воды близких к 2°С. Большая часть самцов ряпушки созревает на третьем году жизни, самки – на год позже. Абсолютная плодовитость варьирует от 3537 до 10693 (в среднем 6292) икринок, а относительная – от 36 до 89 (в среднем 58) икринок (табл. 2) (Злотник и др., 2010).

Таблица 2. Изменение основных биологических показателей и плодовитости ряпушки из озера Инголь в зависимости от возраста

Возраст	ИАП	ИОП	Вес гонад (R)	Коэф. зрел.	n
4+	3537,00–9303,00 5655,56±2758,3	36,09–96,90 55,76±2,77	4,10–8,30 4,78±0,20	3,96–8,83 4,75±0,23	27
5+	4831,00–8700,00 6477,95±228,44	43,52–72,50 59,11±1,87	3,50–7,20 5,36±0,23	3,16–6,00 4,87±0,18	19
6+	4756,00–10693,00 7996,63±681,47	41,72–89,11 67,32±5,51	5,20–8,50 7,15±0,48	4,56–7,20 6,03±0,38	8

Современная популяция ряпушки оз. Инголь характеризуется рядом особенностей морфологии, которые, несомненно, сформировались под воздействием условий новой среды обитания. Сравнение параметров морфологии ингольской ряпушки с таковыми популяций ряда европейских и сибирских водоемов, а также проведенный молекулярно-генетический анализ, подтвердили близость ее к ряпушке Ладожского озера. Европейская ряпушка достаточно быстро встроилась в биоценоз озера, так как заняла свободную экологическую нишу (в озере кроме ряпушки нет типичных планктофагов) и имела невысокий пресс со стороны хищных видов рыб. Кроме того, абиотические условия нового места обитания (оз. Инголь) были достаточно близки

практически по всем параметрам материнского водоема (оз. Ладожское). Несмотря на высокий пресс рыболовства (любительского и незаконного) популяция ряпушки в озере Инголь находится на стабильном уровне.

LAKE INGOL: THE RESULT OF ACCLIMATIZATION OF THE OF VENDACE (COREGONUS ALBULA L.) AND THE ACTUAL STATUS OF ITS POPULATION

D.V. Zlotnik, Yu.Yu. Forina

The morphological characteristics of the introduced population of vendace Coregonus albula (L.) Lake Ingol (the basin of the river Ob) have been analyzed. It is shown that the modern population of the Lake Ingol is characterized by several peculiarities of external morphology which, evidently, have been formed under the influence of the conditions of the new habitat. Some ecological characteristics (fertility, growth rates) are presented. It is shown anthropogenic effect on nutrition in winter and a decrease in growth rates.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ И КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ CLADOCERA ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАРЕЛИИ (СЕВЕРО-ЗАПАД РОССИИ) В НЕОПЛЕЙСТОЦЕНЕ-ГОЛОЦЕНЕ

А.Г. Ибрагимова[1,2], Д.Г. Селезнев[3], Л.А. Фролова[2,4], Д.А. Субетто[5], М.С. Потахин[6,7], Н.А. Белкина[6], А.А. Котов[1]

[1]Институт экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН
[2]Казанский (Приволжский) федеральный университет
[3]Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН
[4]Институт археологии и этнографии СО РАН
[5]Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена
[6]Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
[7]Петрозаводский государственный университет

Озеро Торосъярви (Республика Карелия) в течение всей его истории было холодноводным, олиготрофным, с развитой зоной пелагиали. Анализ количественных данных показал, что тафоценоз кладоцер трижды претерпевал значительные изменения в позднем неоплейстоцене-голоцене, которые, вероятно, были связаны с колебаниями климатических условий на Северо-Западе России и изменением уровня воды. Анализ встречаемости видов в колонке выделил два периода с границей возрастом 10.6 кал. тыс. л. н., приходящейся на период окончания Валдайского оледенения. На качественных палеоданных впервые использован анализ ассоциированности видов. С его помощью выделено пять групп видов, типичных для условий среды в разные временные периоды. Установлено, что разделение керна по численности видов демонстрирует более подробную и плавную смену абиотических факторов, тогда как анализ встречаемости выявляет более общие и глобальные закономерности.

Отбор колонок донных отложений оз. Торосъярви (Республика Карелия, 63.48 N, 33.23 E; площадь – 0.58 км^2, высота н.у.м. – 120,4 м, максимальна глубина – 8.9 м) проводился со льда в апреле 2016 г. Радиоуглеродное датирование показало, что керн охватывает весь голоцен и позднеплейстоценовое время. Для исследования тафоценоза Cladocera отобрано 33 образца донных отложений, нарезанные с шагом 6–8 см. Образцы подготавливали по стандартной методике (Korhola, Rautio, 2001). Идентификация

остатков проводилась по современным определителям Cladocera и по определительным ключам их субфоссильных остатков из европейских водоемов. Стратиграфический анализ выполнен в программе C2 (Juggins, 2007), статистический – в среде R 4.4 (R Core Team, 2024). Фаунистические зоны по численности и встречаемости таксонов выделены методом иерархической кластеризации с ограничениями на последовательность CONISS (Juggins, 2023). Число кластеров определялось методом сравнения с моделью разломанного стержня. Качественные данные по встречаемости исследованы методом анализа ассоциированности видов (Seleznev et al., 2024). Цель работы – сравнение результатов количественного и качественного анализа.

Анализ количественных данных по численности

В колонке донных отложений оз. Торосъярви идентифицированы остатки 42 таксонов Cladocera (видов, групп видов). В тафоценозе Cladocera не выявлено доминантов, в роли субдоминантов выступают *Bosmina* (*Eubosmina*) cf. *longispina* (23.51%), *Biapertura affinis* (16.68%) и *Alona quadrangularis* (16.14%).

В зоне I (Рис. 1А) тафоценоз Cladocera представлен холодноводными видами, толерантными к неблагоприятным условиям среды и низкому содержанию органического вещества; здесь встречается редкий для территории России вид таксоценоза Cladocera с субдоминированием *Alonella nana*. Доминирование *A. nana* свойственно некоторым озерам Финляндии (Sarmaja-Korjonen, 2006 и др.). Вторым субдоминантом сообщества Cladocera в зоне I является *Chydorus* cf. s*phaericus*, который, как известно, обладает высокой экологической пластичностью и может легко приспосабливаться к различным условиям среды (Fryer, 1968). Доля пелагических видов в зоне I незначительна. Полученные данные позволяют заключить, что на начальном этапе своего формирования водоем представляется холодноводным и мелководным, в нем преобладала открытая литоральная зона с отдельными участками водной растительности.

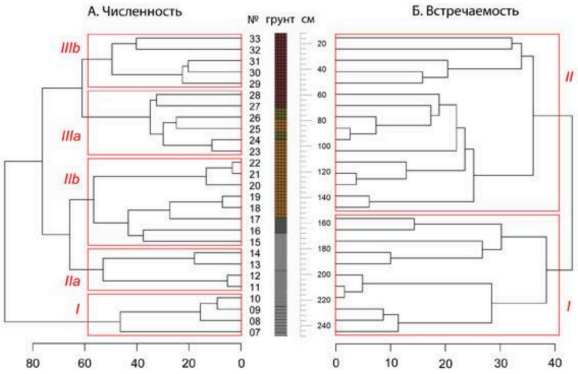


Рис. 1. Кластеризация проб по численности (А) и встречаемости (Б)

В зоне IIа условия по-прежнему остаются неблагоприятными, хотя отмечается увеличение доли фитофильных видов и видов, обитающих в ассоциации с водной растительностью. При этом, увеличение доли *Eubosmina (Bosmina)* cf. *longispina,* типичного пелагического вида, свидетельствует об увеличении открытоводных участков в водоеме. Согласно результатам кладоцерного анализа в зоне IIа оз. Торосъярви было олиготрофным, холодноводным водоемом с развитой литоральной зоной, включающей

участки с зарослями макрофитов, с намеченной тенденцией к повышению трофности и обводненности.

В зоне IIb отмечаются изменения, связанные с улучшением климатических условий и с отделением оз. Торосъярви от Сегозерского приледникового озера (Бискэ, 1959): прослеживается смена осадконакопления и повышение содержания органического вещества. Увеличение в этот период доли *Camptocercus rectirostris* обычно связывают с более мягкими условиями среды (Flössner, 2000). Активного развития в данной зоне достигает *Alona quadrangularis*, что может указывать на увеличение трофического статуса водоема (Van Damme, Dumont, 2008). Присутствие представителей рода *Leydigia* также свидетельствуют об увеличении органической составляющей в оз. Торосъярви. Состав тафоценоза Cladocera в зоне IIb свидетельствует о потеплении климата в регионе исследования, развитии растительности в озере, увеличении его трофического статуса.

Зона IIIa, частично охватывающая бореальный и атлантический периоды, характеризуется изменением доминирующего комплекса ракообразных оз. Торосъярви. Смягчение условий на границе зон IIb и IIIa, связанное с потеплением и увеличением количества осадков в регионе, оказало влияние на состав сообщества ракообразных и соотношение пелагических и литоральных видов. В зоне IIIa увеличилась численность фитофильных видов и таксонов, которые указывают на смягчение климатических условий в исследуемом регионе. Кроме этого, наблюдалось дальнейшее повышение доли пелагических видов, связанное, вероятно, с увеличением глубины водоёма. Тафоценоз ракообразных в зоне IIIa указывал на благоприятные климатические условия, увеличение уровня воды в озере и развитие зоны высшей растительности.

Зона IIIb охватывала суббореальный период, который начался в зоне IIIa, и субатлантический период (2.5 тыс. лет назад – настоящее время). В этой зоне отмечено снижение органической составляющей (с 24 до 15%), за которым последовало ее увеличение (до 20 и 30%). Климатические колебания также проявились в увеличении в составе ракообразных доли северных и пелагических видов. В озере продолжалось активное развитие зоны макрофитов. В зоне IIIb изменения в распределении тафоценоза ракообразных были связаны с охлаждением и увеличением глубины озера при сохранении участков литоральной зоны с высокой степенью зарастания макрофитами.

Таким образом, доминирующий комплекс в кладоцерном трафоценозе оз. Торосъярви изменился трижды с момента его формирования. Озеро во все периоды своего существования было и остается холодноводным, олиготрофным и довольно глубоким, что также подтверждается результатами анализа диатомовых водорослей короткого керна из оз. Торосъярви (Shelekhova, Tikhonova, 2022).

Анализ качественных данных по встречаемости

Кластерный анализ встречаемости видов (Рис. 1Б) выделил два кластера: нижний, содержащий пробы с глубины 245–150 см, и верхний – с глубины 150–15 см. Граница между кластерами, проходящая на глубине 150 см (4 м от поверхности воды), примерно соответствует возрасту 10.6 кал. тыс. л. н. и не совпадает с границей зон, выделенных кластерным анализом по численности, попадая в зону IIb.

Анализ ассоциированности видов выделил пять групп взаимно ассоциированных видов с модулярностью разбиения 0.43 (рис. 2). Две крупных группы (II, III) содержат соответственно 7 и 10 видов с высокой встречаемостью в колонке. Три других группы (I, IV, V) состоят из пар видов с низкой или единичной встречаемостью.

Перестановочный дисперсионный анализ показал, что виды группы II ассоциированы с кластером, содержащем пробы из нижней части колонки (p=0.0036), а виды группы III – с кластером с пробами из ее верхней части (p=0.0021). Виды группы I ассоциированы с наиболее глубокой и ранней зоной I по численности, а виды групп IV

и V единично встречаются в наиболее современной зоне IIIb. Выделение этих видов в отдельные группы, соответствующие зонам при делении колонки по численности, свидетельствует о более точной работе метода ассоциированности видов по сравнению с кластерным анализом CONISS на одних и тех же качественных данных.

Видовой состав в крупных группах ассоциированных видов II и III опосредованно характеризует условия среды в периоды, соотнесенные с этими группами. В группе II остатки стенотермных видов *Alona intermedia* и *Bosmina longirostris*, олиго-мезосапробного вида *Paralona pigra*, фитофильных видов *Acroperus harpae* и *Alonella excisa* указывают на низкие температуру воды и трофический статус озера, а также наличие в нем литоральной зоны с водной растительностью. В группе III увеличение доли фитофильных видов *Camptocercus rectirostris*, *Leydigia leydigi*, *Sida crystallina*, *Eurycercus* sp., *Graptoleberis testudinaria* и пелагического вида *Eubosmina (Bosmina)* cf. *longispina* могут свидетельствовать о расширении площади прибрежных участков высшей водной растительности, а также об увеличении глубины озера или об увеличении его размеров вследствие отступления ледника. Смена характера донных отложений с различных типов глин на илы указывает на повышение органической составляющей озера.

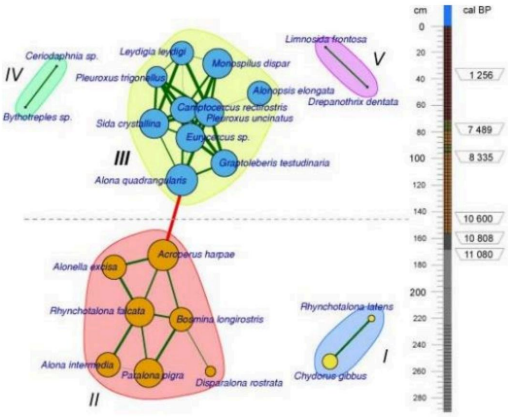


Рис. 2. Граф положительно ассоциированных видов Cladocera. Размер маркера узлов логарифмически пропорционален встречаемости вида в колонке, толщина ребра пропорциональна силе связи между видами. Положение видов относительно шкалы глубин условное

При сравнении результатов кластерного анализа по численности и по встречаемости можно сделать вывод, что результаты анализа численности более детально и последовательно отражают процесс изменения видового состава Cladocera, тогда как результаты анализа встречаемости выявляют более общую тенденцию в изменении тафоценоза в колонке донных отложений оз. Торосъярви. На это же указывает и число выделенных кластеров: 5 по численности и 2 по встречаемости. Временная граница между двумя качественными кластерами возрастом 10.6 кал. тыс. л. н. попадает на период окончания ледникового периода, сопровождавшегося повышением температуры и влажности, а также гидрологическими изменениями в озере, повышением содержания органического вещества и изменением структуры донных отложений.

Анализ численности не показывает эту границу, разделяя колонку на более дробные периоды. Метод анализа ассоциированности, ранее применявшийся только на пространственных данных современных биоценозов, показал свою эффективность и на временных палеоданных. Он подтвердил, что смена периодов сопровождалась тенденцией к повышению доли тепловодных видов Cladocera относительно холодноводных, а также увеличению доли фитофильных и пелагических видов. Показано, что анализ ассоциированности видов работает точнее, чем кластерный анализ CONISS на тех же качественных данных о встречаемости видов.

QUANTITATIVE AND QUALITATIVE ANALYSIS OF CLADOCERA IN THE ECOLOGICAL CONDITIONS RECONSTRUCTION FOR CENTRAL KARELIA (NW RUSSIA) IN THE NEOPLEISTOCENE -HOLOCENE

A.G. Ibragimova, D.G. Seleznev, L.A. Frolova, D.A. Subetto, M.S. Potakhin, N.A. Belkina, A.A. Kotov

Lake Torosjärvi (Republic of Karelia) has been cold-water, oligotrophic, with a developed pelagic zone throughout its history. Analysis of quantitative data showed that the taphocoenosis of cladocerans underwent significant changes three times in the late Neopleistocene-Holocene, which were probably associated with fluctuations in climatic conditions in Northwest Russia and changes in water levels. The analysis of species occurrence in the core identified two periods with a boundary at 10.6 cal. thousand years ago, which coincides with the end of the Valdai glaciation. The analysis of species association was used for the first time on high-quality paleodata. It was used to identify five groups of species typical of environmental conditions in different time periods. It was found that the division of the core by the number of species demonstrates a more detailed and smooth change in abiotic factors, while the analysis of occurrence reveals more general and global patterns.

ФИТОПЛАНКТОН СУБАРКТИЧЕСКОГО МЕРОМИКТИЧЕСКОГО ОЗЕРА ТРЕХЦВЕТНОЕ С ПРЕСНЫМ МИКСОЛИМНИОНОМ ЛЕТОМ 2024 Г.

Д.А. Иванова [1], Е.Д. Краснова [2], Д.А. Воронов [3], И.Г. Радченко [1]
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[2]Беломорская биологическая станция им. Н.А. Перцова МГУ им. М.В. Ломоносова
[3]Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

Меромиктическое озеро Трехцветное, отделившееся от Белого моря, характеризуется постоянной трехслойной структурой с пресноводным миксолимнионом, хемоклином и соленой сероводородной зоной. Такая изоляция способствует развитию особенного фитопланктона. С июня по август было зарегистрировано 39 видов водорослей, принадлежащих преимущественно Heterokontophyta и Chlorophyta. Биомасса фитопланктона варьировала от 13,2 мг/м^2 до 32,2 мг/м^2. Доминирующие виды включали *Carteria obtusa*, cf. *Micromonas* sp. и *Ceratium hirundinella*. Плотностная стратификация и «запирание» биогенных веществ в сероводородной зоне ограничивают продуктивность фитопланктона, что приводит к стабильной, но относительно низкой биомассе.

Озеро Трехцветное (66°35.53′ с.ш., 32°59.97′ в.д.) – один из отделяющихся водоемов Карельского берега Белого моря, образованных в результате послеледникового поднятия земной коры (Краснова и др., 2016). Линейные размеры озера составляют

340 м × 150 м × 7,5 м (максимальная глубина). Озеро считается меромиктическим, так как в течение нескольких лет в нем сохраняется трехслойная вертикальная стратификация с верхним (до 2 м) пресным слоем, хемоклином, цветным из-за присутствия фототрофных бактерий, и подлежащей соленой сероводородной зоной. Известно, что изоляция и специфические гидрологические условия приводят к развитию биоты, отличной от беломорской (Иванова и др., 2022; Иванова и др., 2024; Radchenko et al., 2023). Целью данной работы было получить качественные и количественные сведения о фитопланктоне оз. Трехцветное как единственного представителя изолированных водоемов с полностью пресным миксолимнионом в окрестностях Беломорской биологической станции МГУ.

Для исследования фитопланктона оз. Трехцветное с июня по август 2024 г. пробы воды отбирали сетью Джеди с диаметром входящего кольца 18 см, от границы сероводородной зоны до поверхности, на станции с максимальной глубиной. Нефиксированными пробы просматривали с помощью светового и флуоресцентного микроскопа Leica с набором фильтров N2.1 (возбуждение/пропускание 515-560/580 нм). Фиксированные раствором Люголя пробы просчитывали в камере Нажотта на микроскопе МИКМЕД-6 при увеличении х200 и х400. Для расчета углеродной биомассы объемы клеток определяли методом геометрического подобия (Hillebrand et al., 1999) с последующим переводом в единицы углерода (Menden-Deuer, Lessard, 2000). Современную классификацию водорослей приводили по электронной базе данных «AlgaeBase» (https://www.algaebase.org/).

Фитопланктон был представлен пресноводными, преимущественно автотрофными видами. В июне – июле было обнаружено 39 видов водорослей (таблица), относящихся к 4 классам отдела Heterokontophyta: Bacillariophyceae (7 видов), Coscinodiscophyceae (2 вида), Mediophyceae (3 вида), Chrysophyceae (2 вида); 4 классам отдела Chlorophyta: Chlorophyceae (8 видов), Mamiellophyceae (1вид), Pedinophyceae (1 вид), Trebouxiophyceae (4 вида); классу Zygnematophyceae отдела Charophyta (3 вида); классу Dinophyceae отдела Dinoflagellata (3 вида); классу Cyanophyceae отдела Cyanobacteria (5 видов).

Сырая и углеродная биомассы фитопланктона в столбе воды 28 июня составляли 24,8 мг/м^2 и 3,8 мг С/м^2 соответственно, 10 июля – 19,0 мг/м^2 и 2,2 мг С/м^2, 2 августа – 13,2 мг/м^2 и 1,4 мг С/м^2, 22 августа – 32,3 мг/м^2 и 3,4 мг С/м^2. Наибольший вклад в биомассу вносили зеленые водоросли *Carteria obtusa* (0,5-21,2 %) и cf. *Micromonas* sp. (30,4-74,0 %), а также автотрофная динофлагеллята *Ceratium hirundinella* (1,8-90,8 %). Вклад в биомассу большей части видов не превышал 1%.

Численность фитопланктона в столбе воды 28 июня составляла 172 тыс. кл./л, 10 июля – 43 тыс. кл./л, 2 августа – 7 тыс. кл./л, 22 августа – 5 тыс. кл./л. Наибольшей численности достигали зеленые водоросли cf. *Micromonas* sp. и *Scourfieldia* cf. *marina*, населявшие хемоклин озера. К массовым видам относились и упомянутые выше *Carteria obtusa*, *Ceratium hirundinella*, а также диатомовые водоросли *Urosolenia longiseta* и *Ulnaria ulna*, золотистая водоросль *Dinobryon divergens*, зеленая водоросль *Lemmermannia tetrapedia*.

Таким образом, в фитопланктоне оз. Трехцветное ожидаемо отсутствуют морские виды вследствие полного распреснения миксолимниона озера. Отмечено относительное постоянство видового состава. Более низкие количественные показатели фитопланктона скорее всего связаны с недоступностью для водорослей биогенных элементов, «запертых» в сероводородной зоне из-за продолжительной стратификации озера.

Таблица. Список видов, обнаруженных в пресноводном миксолимнионе оз. Трехцветное в июне-августе 2024 г.

	28.06.24	10.07.24	02.08.24	22.08.24
Phylum Heterokontophyta				
Class Bacillariophyceae				
Gyrosigma obscurum	+		+	+
Tabellaria flocculosa	+	+		
Ulnaria ulna	+	+	+	+
Navicula sp.	+			
Nitzschia sp. 1	+	+		
Nitzschia sp. 2		+		
Pennales, sp.			+	
Phylum Heterokontophyta				
Class Coscinodiscophyceae				
Paralia sulcata	+			
Urosolenia longiseta	+	+	+	+
Phylum Heterokontophyta				
Class Mediophyceae				
Cyclotella cf. *striata*		+		
cf. *Leptocylindrus* sp.	+	+	+	+
Cyclotella sp.				+
Phylum Heterokontophyta				
Class Chrysophyceae				
Dinobryon divergens	+	+	+	+
Mallomonas sp.		+		
Phylum Chlorophyta				
Class Chlorophyceae				
Acutodesmus acutiformis	+	+	+	
Carteria obtusa	+	+	+	+
Comasiella arcuata		+	+	
Monoraphidium contortum	+			
Monoraphidium komarkovae	+	+	+	+
Scenedemsus quadricauda	+			
Stauridium tetras		+		+
Tetraëdron triangulare			+	+
Phylum Chlorophyta				
Class Mamiellophyceae				
cf. *Micromonas* sp.	+	+	+	
Phylum Chlorophyta				
Class Pedinophyceae				
Scourfieldia cf. *marina*			+	+
Phylum Chlorophyta				
Class Trebouxiophyceae				
Crucigenia quadrata	+			
Lemmermannia tetrapedia	+	+	+	+
cf. *Coccomyxa* sp.	+			
Oocystis sp.		+		
Phylum Charophyta				
Class Zygnematophyceae				
Closterium aciculare		+		+
Spondylosium sp./*Sphaerozosma filiforme*	+	+		
Closterium sp.	+			
Phylum Dinoflagellata,				
Class Dinophyceae				
Ceratium hirundinella	+	+	+	+
Parvodinium umbonatum			+	+
Gymnodinium sp.		+		
Phylum Cyanobacteria				
Class Cyanophyceae				
Merismopedia tenuissima	+	+		

	28.06.24	10.07.24	02.08.24	22.08.24
Planktolyngbya limnetica	+	+		
Anabaena sp.		+	+	
Oscillatoria sp.		+		
неидент. цианобактериальная нить				+

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ №24-24-00008, https://rscf.ru/en/project/24-24-00008/.

Литература

Иванова Д.А., Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Радченко И.Г. Сезонная динамика альгофлоры стратифицированного озера Кисло-Сладкое, частично изолированного от Белого моря // Океанология. 2022. Т. 62. №2. С. 245-259.

Иванова Д.А., Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Радченко И.Г. Сезонная динамика фитопланктона озера Кисло-Сладкое, частично изолированного от Белого моря, в период двухлетней меромиксии // Вестник Московского университета. Сер. 16. Биология. 2024. Т. 79. №2. С. 129-136.

Menden-Deuer S., Lessard E.J. Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms, and other protist plankton // Limnol. Oceanogr. 2000. V. 45. №3. P. 569-579.

PHYTOPLANKTON OF SUBARCTIC MEROMICTIC LAKE TREKHTSVETNOE WITH FRESHWATER MYXOLIMNION IN SUMMER 2024

D.A. Ivanova, E.D. Krasnova, D.A. Voronov, I.G. Radchenko

Lake Trekhtsvetnoe, a meromictic lake on the Karelian shore of the White Sea, is characterized by a three-layer vertical structure with a freshwater myxolimnion, a colorful chemocline, and a saline hydrogen sulfide zone. This isolation supports a unique freshwater phytoplankton community. From June to August, 39 algal species were recorded, predominantly Heterokontophyta and Chlorophyta. Phytoplankton biomass varied from 13.2 mg/m^2 to 32.2 mg/m^2. Dominant species included *Carteria obtusa*, cf. *Micromonas* sp., and *Ceratium hirundinella*. Stratification, and nutrient blocking in the hydrogen sulfide zone limit phytoplankton productivity, resulting in stable but relatively low biomass.

ТИПОЛОГИЯ И БИОРАЗНООБРАЗИЕ (ЗООБЕНТОС, ИХТИОФАУНА) ОЗЕР АБХАЗИИ

В.М. Иванова, А.В. Горбунова, А.И. Галеева, Н.М. Мингазова, Р.С. Дбар, Н.Г. Назаров, Э.Г. Набеева, Д.Ю. Мингазова, А.М. Тарасенко

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт экологии АН Абхазии

Озера Абхазии достаточно разнообразны по типологии и видовому разнообразию. Многие могут считаться эталонами качества воды и состояния озерной горной экосистемы. В ходе совместных экспедиций Лаборатории оптимизации водных экосистем Казанского федерального университета и Института экологии АН Абхазии в 2007-2023 гг. были обследованы 25 озер разного генезиса, в т.ч. искусственного происхождения. В настоящей статье отражены вопросы типологии озер с использованием универсальной эколого-лимнологической классификации, а также биологического разнообразия озер по зообентосу и ихтиофауне.

Озера Абхазии (Кавказ) представлены почти 350 водоемами разных типов, с преобладанием горных каровых (ледниковых) озер, представленных в исследованиях авторов озерами Чхы, Мзы, Сердечко, Заросшее, Малое и Большое. Среди горных озер реже встречаются озера тектонического (Большая Рица, Амткел) и карстового (озера Малая Рица, Голубое, Адзия) происхождения. Эти озера различной формы и глубин, пресноводные, с очень малой минерализацией. Низинные озера расположены в междуречьях и устьевых участках рек, пойменные и старичные, чаще солоноватые, либо пресно-соленые (озера-лиманы Инкит, Солдатское, Пицундское, Змеиное на Пицундской низменности западной Абхазии, Скурча и пойменные озера Б. Бебесир, М. Бебесир в восточной Абхазии). Встречается большая группа искусственных озер (прудов, карьеров, запруженных водоемов), это чаще пресноводные водоемы (озера Маяк, Акуна 1, Акуна 2, Карповое и др.).

Целью проведенных исследований было выявление преобладающих типов озер Абхазии и их биологического разнообразия по зообентосу и ихтиофауне.

В данную статью вошли материалы исследований 18 озер Абхазии, расположенных на разных высотах над уровнем моря от 0 (озера Скурча, Инкит, Солдатское, Акуна, Акуна-1) до 2500 м (оз. Чхы). Было отобрано и обработано 85 проб зообентоса водоемов, расположенных в различных экосистемах. Пробы собирались в период с 2007 по 2018 год в летний период, что позволило получить данные о разнообразии и временных изменениях в составе зообентоса.

Типология озер

В Абхазии множество высокогорных озер. Самое известное – озеро Рица, располагающееся на Западном Кавказе на территории Рицинского национального реликтового парка и имеющее ледниково-тектоническое происхождение, уникальное высокогорное озеро Амткел, реликтовые озера Инкит и озеро Мзы, а напротив главного Кавказского Хребта находится «Долина семи озер».

По результатам инвентаризации водных объектов Абхазии по космоснимкам, проведенной 2016-2019 гг. кафедрой Природообустройства и водопользования, выявлено около 350 водоемов (озер и прудов), которые можно отнести к равнинным и горным.

При помощи УЛЭК равнинным и горным озерам Абхазии был создан «портрет» озерной экосистемы с формулой озера.

Таким образом, при помощи УЛЭК было выявлено четыре преобладающих типа со следующими формулами озер: 1). $Z_1\ Sl_5\ G_2\ A_5\ D_3\ W_3\ T_1\ S_3\ M_1\ I_{1(3)}\ Ph_1\ Tr_2\ Fl_1\ Fa_4$ - малые горные каровые озерные экосистемы; 2). $Z_1\ Sl_3\ G_1\ A_4\ D_3\ W_1\ T_3\ S_2\ M_1\ I_{1(1)}\ Ph_1\ Tr_3\ Fl_1\ Fa_1$ – тектонические глубоководные озера Большая Рица, Амткел; 3). $Z_1\ Sl_1\ G_4\ A_4\ D_4\ W_1\ T_4\ S_4\ M_1\ I_{1(3)}\ Ph_1 Tr_3 Fl_2 Fa_2$ - равнинные пойменные пресноводные озера, оз. Большой Бебесир; 4). $Z_1\ Sl_1\ G_{15}\ A_4\ D_3\ W_1\ T_3\ S_4\ M_5\ I_{3(3)}\ Ph_1\ Tr_3\ Fl_2\ Fa_2$ - равнинные лиманные солоноватоводные озера Скурча, Инкит.

Видовое разнообразие зообентоса

Анализ видового состава и биоразнообразия зообентоса 18 озер (Б. и М. Рица, Голубое, Мзы, Инкит, Солдатское, Амткел, Акуна и Акуна- 1, Маяк, Чхы, Скурча, Б. и М. Бебесир, Сердечко, Заросшее, Малое и Большое), позволяет выделить следующие ключевые аспекты. Таксономический состав зообентоса озер Абхазии представлен четырьмя основными типами донных организмов: Моллюски, Кольчатые черви, Плоские черви и Членистоногие. Всего было обнаружено 92 вида донных беспозвоночных из 45 семейств. Обитателями озер Абхазии явились представители классов Высшие раки (11 видов) и Насекомые (45 видов). Наиболее разнообразно представлен тип Членистоногих – 54 вида. Наименее разнообразно представлен тип Плоских червей -1 вид (табл. 1).

Таблица 1. Систематическое разнообразие зообентоса озер Абхазии.

Тип	Класс	Количество		
		Отряды	Семейства	Виды
Членистоногие	Высшие раки	3	5	10
	Насекомые	6	21	44
Кольчатые черви	Поясковые		7	18
	Многощетинковые черви	1	1	1
Моллюски	Брюхоногие	2	9	16
	Двустворчатые		2	3
Плоские черви	Планарии	1	1	1

В восьми озерах (оз. Б. Рица, Голубое, Инкит, Амткел, Акуна-1, Чхы, Скурча и Большое) отмечено наибольшее разнообразие таксонов: от 5 до 11 групп. Наибольшее количество видов обнаружено в озере Скурча – 54 вида из 15 отрядов и 3 типов (Членистоногие, Кольчатые черви и Моллюски). Наиболее бедным в видовом отношении оказались озера Заросшее и Малое (по 1 виду). Также небольшое разнообразие видов отмечено для озер: М. Рица, Солдатское, Сердечко – по 3 вида и М. Бебесир - 5 видов.

В целом по всем озерам доминантами по биомассе явились представители Олигохет, Брюхоногих моллюсков, Полихет, Жуков и Стрекоз (в т. ч. в силу своих крупных размеров). В меньшей массе обнаружены Пиявки, Веснянки, Ручейники, некоторые Ракообразные. Доминантами по численности стали также Олигохеты, Брюхоногие моллюски, Стрекозы и Хирономиды. Реже встречались Поденки, Ручейники, Ракообразные и Полихеты.

На мелководных участках доминируют Брюхоногие моллюски и Ручейники (оз. Б. Рица, Акуна, Акуна-1, Маяк, Б. и М. Бебесир, Малое), Поденки и Веснянки (оз. Голубое), что характерно для зон с более высокой освещенностью и активным процессом фотосинтеза.

На глубоководных участках (оз. Б. Рица, Амткел) и литорали озер Мзы и Большое доминируют Олигохеты – показатель высокого содержания органического вещества в донных отложениях, т. к. эта группа беспозвоночным предпочитаю условия с повышенным содержанием органических веществ в донных отложения. В озера Чхы и Сердечко доминантами по численности явились представители жесткокрылых насекомых.

Используя классификацию трофических групп В. А. Яковлева (2000), можно сделать выводы о том, что в озерах Абхазии представлены все 6 трофических групп (рис. 1). Практически во всех озерах присутствуют собиратели-детритофаги и активные хищники. Грунтозаглатыватели встречаются в 50 % озер, но их доля в каждом озере варьируется. Размельчители чаще встречаются в горных или холодных водоемах. Облигатные собиратели-фильтраторы (двустворчатые моллюски) встречаются реже и обнаружены нами только в двух озерах (оз. Скурча и Б. Бебесир).

В некоторых озерах были встречены виды предпочитающие слабосолоноватые условия среды. Так, например в озерах Инкит и Скурча были обнаружены представители ракообразных (в т. ч. *Cirripedia* sp., *Gammarus duebeni* (Lilljeborg, 1851), *Palaemon serratus* (Pennant, 1777)), а также полихеты *Hediste diversicolor*. Эти озера равнинные и имеют связь с Черным морем.

Отсутствие фильтраторов и обильное присутствие Стрекоз и Хирономид, в частности *Cricotopus laricomalis* (Edwards, 1932) в оз. Солдатское демонстрирует слабозагрязненные условия, что также подтверждает и невысокое видовое разнообразие.

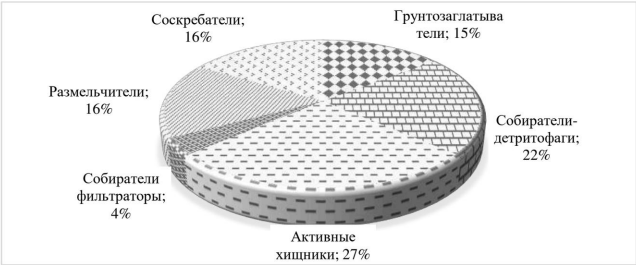


Рис. 1. Трофическая структура зообентоса озер Абхазии

В целом наибольшее влияние на зообентос оказывают условия среды, связанные с качеством воды и доступностью пищевых ресурсов, в том числе высокая концентрация органического вещества. Водоемы с обильной растительностью, как правило, имеют более высокое биоразнообразие.

Видовое разнообразие ихтиофауны

Ихтиофауна исследованных 10 озер (Б. Рица, Амткел, Инкит, Скурча, Акуна, Б. Бебесир, М. Бебесир, Маяк, Солдатское и искусственный пруд Акуна) неоднородна по видовому составу. Всего выявлено 24 вида из класса *Actinopterygii* (лучеперые рыбы). Видовое разнообразие рыб варьировалось в диапазоне от 2 (оз. Маяк) до 12 (оз. Скурча). Наибольшее число видов (15) принадлежит отряду карпообразные, все из них представители семейства карповые. Также, обнаружены представители отряда кефалеобразные и отряда бычкообразные по 2 вида из одного семейства, представители из отрядов карпозубообразные, лососеобразные, скорпенообразные, иглообразные и щукообразные по 1 виду.

Наиболее часто встречаемый вид рыб в озерах и прудах – голавль кавказский, карась серебряный, подуст колхидский.

Было проанализировано 5 типов экологических групп ихтиофауны по приуроченности к условиям среды. По приуроченности к режиму солености в озерах было выявлено 4 экологические группы ихтиофауны. В озерах и прудах преобладают пресноводные виды ихтиофауны – 54%, пресноводные и солоноватоводные составляют 25%, морские, пресноводные и солоноватоводные - 21%. По приуроченности к скорости течения воды преобладают реофильные виды (58%), лимнофильные виды составляют 42%. При разделении рыб по местообитаниям в толще воды лидирующей группой видов являются донные виды рыб (46%), группа донные и пелагические виды составляют 29% и пелагические виды – 25%. По преобладающему типу питания выделены 5 групп ихтиофауны: бентофаги (67%), планктофаги (21%) и детритофаги, перефитонофаги, хищники по 4% (рис. 2).

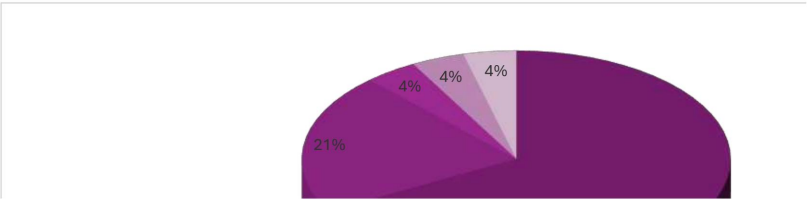


Рис. 2. Экологические группы ихтиофауны озёр Абхазии по типу питания

На основе данных о видовом составе ихтиофауны озёр Абхазии выявлены 8 фаунистических комплексов: понто-каспийский пресноводный (быстрянка южная, голавль кавказский, уклейка кавказская, усач колхидский, шемая, карп обыкновенный, лещ обыкновенный, верховка кавказская, краснопёрка, подуст колхидский) (42%), понто-каспийский реликтовый (бычок-песочник, бычок-цуцик, лобан обыкновенный, сингиль) (17%), бореально-равнинный (карась серебряный, пескарь кавказский, линь, щука обыкновенная) (17%), бореально-предгорный (гольян обыкновенный, форель) (8%), понто-каспийский морской (пухлощекая черноморская рыба-игла), южно-американский (гамбузия обыкновенная), третично-равнинный (горчак обыкновенный) и арктобореальный (колюшка трехиглая) – по 4% .

В озере Скурча в ходе исследований наблюдался процесс трансформации организмов, составляющих бентофауну в результате действия двух разнонаправленных гидротехнических мероприятий. Озеро Скурча по средним показателям биомассы зообентоса относится к умеренному классу кормности. В связи со стратификацией вод, в озере Скурча создались условия совместного существования биотопов с различными показателями солености, что привело к сосуществованию в одной экосистеме гидробионтов, обитающих в различных условиях среды. Оз. Инкит имеет средний класс кормности, по численности зообентоса преобладают ракообразные, а по биомассе стрекозы. По исследованиям ихтиофауны озер и их кормности, озеро Скурча имеет наибольшее количество видов (12). Рыбохозяйственный потенциал этого озера огромен, так как Скурча имеет солоноватые воды, благоприятные для развития богатого видового разнообразия. Сведения о кормовой базе указывают на возможность устойчивого развития гидробионтов

При анализе гидробиологических проб было выявлено, что основной составляющей зообентоса озера Большой Бебесир являлись стрекозы. Обе части озера Большой Бебесир по показателям биомассы зообентоса имеют умеренный класс кормности.

Озёра Большой и Малый Бебесир являются мелководными хорошо прогреваемыми водоемами, благоприятными для разведения теплолюбивых видов рыб. Разнообразная кормовая база сопутствует развитию рыбохозяйственной деятельности.

Равнинные озера (и пресные, и солоноватые) при хорошей прогреваемости имеют хорошие кормовые возможности, соответственно, ихтиоценозы этих озер более богатые (23 вида обнаружено в равнинных водоемах) и эти озера имеют высокую рыбохозяйственную ценность.

Высокогорные озера отличаются экстремальными условиями (холодноводность, низкая электропроводность/минерализация, ионный состав воды, олиготрофность и др.), не способствующими развитию кормовых ресурсов и ихтиоценозов. Тем не менее, ихтиоценозы в некоторых из них присутствуют, например, на озёрах Большая Рица и Амткел. Большинство высокогорных озёр бедны по обеспеченности кормовыми ресурсами и не имеют рыбохозяйственной ценности. К таким относится группа «Долины семи озёр» (Большое, Малое, Сердечко, Заросшее), высокогорные озера Чхо, Мзы, Голубое и Малая Рица.

Среди зообентоса озера Большая Рица преобладали моллюски, олигохеты и насекомые. Озеро Большая Рица имеет средний класс кормности. Оз. Голубое имеет средний класс кормности. Среди зообентоса преобладают насекомые. Озеро Мзы по показателям бентоса имеет умеренный класс кормности. В озере Амткел среди бентосных организмов преобладали насекомые. Озеро по всем показателям имеет очень низкий класс кормности.

Таким образом, озера Абхазии разнообразны по генезису, морфометрии, минерализации и составу воды. Среди горных преобладают каровые озера, среди низинных – пойменные и лиманы.

Озера Абхазии характеризуются высоким разнообразием зообентоса (92 вида из 45 семейств), что связано с разнообразием экологических условий (высота, тип субстрата, содержание органических веществ, связь с морем). Олигохеты и Брюхоногие моллюски являются ключевыми доминантами как по биомассе, так и по численности в большинстве водоемов.

Ихтиофауна исследованных 10 озер (Б. Рица, Амткел, Инкит, Скурча, Акуна, Б. Бебесир, М. Бебесир, Маяк, Солдатское и искусственный пруд Акуна) неоднородна по видовому составу. Всего выявлено 24 вида из класса *Actinopterygii* (лучеперые рыбы). Видовое разнообразие рыб варьировалось в диапазоне от 2 (оз. Маяк) до 12 (оз. Скурча). Наибольшее число видов (15) принадлежит отряду карпообразные, все из них представители семейства карповые. Также, обнаружены представители отряда кефалеобразные и отряда бычкообразные по 2 вида из одного семейства, представители из отрядов карпозубообразные, лососеобразные, скорпенообразные, иглообразные и щукообразные по 1 виду. Равнинные озёра Абхазии имеют более высокую рыбохозяйственную ценность по сравнению с высокогорными.

Литература

Бадретдинова Ю.В., Мингазова Н.М., Назаров Н.Г., Иванова В.М., Дбар Р.С., Мингазова Д.Ю., Набеева Э.Г., Пустоварова О.Н., Павлова Л.Р. Современное состояние и развитие аквакультуры: экологическое и ихтиопатологическое состояние водоемов и объектов разведения, технологии выращивания // Материалы международной конференции «Современное состояние и развитие аквакультуры: экологическое и ихтиопатологическое состояние водоемов и объектов разведения, технологии выращивания». Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2020. С. 66–70.

Мингазова Н.М., Дбар Р.С., Иванова В.М., Мингазова Д.Ю., Шигапов И.С., Галиуллина А.А., Палагушкина О.В., Деревенская О.Ю., Набеева Э.Г., Кильмаматова Э.И., Назаров Н.Г., Пустоварова О.В., Павлова Л.Р., Маятина Ю.В., Бадретдинова Ю.Р., Валиуллина Ф.З. Количество, типология водных объектов Республики Абхазия и их биоразнообразие (Западный Кавказ) // Материалы XX междунар. научной конф. «Биологическое разнообразие Кавказа и юга России». Махачкала, 2018. С. 69–71.

Яковлев В.А. Трофическая структура зообентоса – показатель состояния водных экосистем и качества воды // Водные ресурсы. 2000. Т. 27. №2. С. 237–244.

BIODIVERSITY (ZOOBENTHOS, ICHTHYOFAUNA) AND TYPOLOGY OF ABKHAZIA LAKES

V.M. Ivanova, A.V. Gorbunova, A.I. Galeeva, N.M. Mingazova, R.S. Dbar, N.G. Nazarov, E.G. Nabeeva, D.Yu. Mingazova, A.M. Tarasenko

The lakes of Abkhazia are quite diverse in typology and species diversity. Many lakes can be considered standards of water quality and the state of a lake mountain ecosystem. During joint expeditions of the Laboratory of Optimization of Aquatic Ecosystems of Kazan Federal University and the Institute of Ecology of the Academy of Sciences of Abkhazia in 2007-2023, 25 lakes of different genesis, including artificial ones, were surveyed. This article reflects the issues of lake typology using the universal ecological-limnological classification (ULEC), as well as the biological diversity of lakes in terms of zoobenthos and ichthyofauna.

ОСОБЕННОСТИ ВИДОВОЙ СТРУКТУРЫ РЫБНОГО НАСЕЛЕНИЯ ПОЙМЕННОГО ОЗЕРА НЕОБЫЧНОГО СТРОЕНИЯ

Е.Ю. Иванчева, В.П. Иванчев
Окский государственный биосферный заповедник

В статье рассматривается влияние строения пойменного озера реки Оки на видовую структуру рыбного населения. Показано, что вследствие особого формирования озеро обладает чертами экотональности и привлекательно для многих видов рыбного населения на всех этапах жизненного цикла: нерестового хода, нереста и нагула.

Юго-восточная часть Мещерской низменности, к территории которой относится Окский заповедник (Спасский район Рязанской области), располагает обширными болотами и многочисленными водоемами различного происхождения. Более 95% водоемов заповедника относится к пойменным. Пойменные озера и старицы обеспечивают многообразие местообитаний для множества групп водных и околоводных организмов (Joniak, Kuczynska-Kippen, 2016). Они формируют основу видового состава планктона всех водных объектов речной системы, включая главный водоток (Krylov, 2015), являются местом нереста и нагула многих видов рыб (Starrett, 1951; Holland, Huston, 1985; Иванчев, Иванчева, 2010; Иванчева и др., 2023).

Развитие пойменного водоема определяется его положением относительно прохождения транзитного потока во время половодья (Печенюк, 2005) При расположении в тени транзитного потока водоем, из-за отложения автохтонного и пойменного аллохтонного материала постепенно переходит из озерной в болотную стадию. В зоне же транзитного потока водоем становится более глубоким, длительно сохраняется в озерной стадии.

Озеро Лопата – молодая старица Оки (рис. 1). Озеро имеет площадь – 84,1 га, протяженность береговой линии 8762 м. Преобладающая растительность – водяной орех *Trapa natans* L. с общей площадью проекционного покрытия до 30-40%, вдоль берега распространена осока острая *Carex acuta* L. (Панкова, 2012, 2014).



Рис. 1. Озеро Лопата

Своеобразие озера заключается в его формировании, когда оно, являясь молодой старицей Оки, соединяется с ней протоками, а также соединяется протоками с левым притоком Оки – рекой Прой. В водоеме наблюдается слабое течение, которое усиливается до достаточно сильного во время половодья, т.о. Лопата соединяет в себе черты и озера, и реки (рис. 1).

Цель работы – провести анализ структуры рыбного населения пойменного озера, имеющего сложное строение в виде связи с реками разного характера (дочернего и материнского).

Материал для работы получен путём проведения однократных отловов рыб в августе 2008, 2009 и 2015 гг. и трёхкратных (в апреле, августе и октябре) в 2022 и 2024 гг. Отловы проводили набором сетей с ячеей 22, 30, 40, 60, 100 мм, устанавливая их перпендикулярно береговой линии. Для сравнения структуры рыбного населения оз. Лопата с другими озёрами (n = 19) использовали данные по их населению, полученные в 2008–2024 гг.

Таблица 1. Состав и структура рыбного населения озера Лопата в 2022 и 2024 гг. и среднее значение за годы исследований.

Вид	Доля в уловах в 2022/2024 гг. и средняя					
	апрель		август		октябрь	
	2022/2024	$x_{ср}$	2022/2024	$x_{ср}$	2022/2024	$x_{ср}$
Щука *Esox lucius* Linnaeus, 1758	4.8/0	2.4	0.4/0.9	0.4	1.5/0.3	0,8
Синец *Abramis ballerus* (Linnaeus, 1758)	12.9/0	6.5	56.8/25.9	47.7	10.6/8.5	11,8
Лещ *Abramus brama* (Linnaeus, 1758)	0/0	0	2.6/22.2	8.6	6.1/1.6	2,3
Серебряный карась *Carassius auratus* (Linnaeus, 1758)	3.2/0	1.6	0/0	0	0/0	0
Густера *Blicca bjoerkna* (Linnaeus, 1758)	12.9/4.2	8.6	13.3/13	12.1	46.1/43.7	42,4
Плотва *Rutilus rutilus* (Linnaeus, 1758)	16.1/56.4	72.5	4/8.3	7.9	0.6/22	8,7
Красноперка *Scardinius erythrophthalmus* (Linnaeus, 1758)	0/0	0	0/0	0.03	0.6/0.9	0,5
Речной окунь *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758	11.3/2.8	7.1	2.6/8.3	3.9	0/0.9	0,8
Ёрш *Gymnocephalus cernuus* (Linnaeus, 1758)	1.6/0	0.8	1.1/10.2	5.2	0/0	7,7
Сом *Silurus glanis* Linnaeus, 1758	0/0	0	0.4/3.7	1.5	0/0	0,03
Обыкновенный жерех *Aspius aspius* (Linnaeus, 1758)	3.2/2.8	3.0	1.5/0	0.5	0	0,05
Уклейка *Alburnus alburnus* (Linnaeus, 1758)	0/0	0	9.6/2.8	6.2	1.8/12.7	15,7
Язь *Leuciscus idus* (Linnaeus, 1758)	1.6/0	0.8	0/0	0.5	0.3/5.6	0,7
Чехонь *Pelecus cultratus* (Linnaeus, 1758)	6.5/1.4	4.0	7/1.9	3.0	29.7/5.6	13,3
Белоглазка *Abramis sapa* (Pallas, 1814)	9.7/21.1	15.4	0/0	0.03	0.3/0	0,4
Судак *Sander lucioperca* (Linnaeus, 1758)	6.5/1.4	4.0	0.7/2.8	1.3	2.4/1.1	1,0
Подуст *Chondrostoma variabile* Jakowlew, 1870	9.7/9.9	9.8	0/0	0	0/0	0
Елец *Leuciscus leuciscus* (Linnaeus, 1758)	0/0	0	0/0	0.4	0/0	0
Белоперый пескарь *Romanogobio albipinnatus* (Lukasch, 1933)	0/0	0	0/0	0.3	0/0	0
Линь *Tinca tinca* (Linnaeus, 1758)	0/0	0	0/0	0.03	0/0	0

Пойменное озеро Лопата, по нашим наблюдениям, многофункционально, т.к. соединяет в себе свойства лотических и лентических водоемов и вследствие этого проявляет экотональные черты. Для одних видов оно служит транзитным водоемом из материнской реки в пойму на нерест и нагул, а также обратно, для других – местом нереста, а для третьих – местом нагула.

Только транзитные, нерестящиеся и нагуливающиеся виды отдельно выделить невозможно. Однако, определенные тенденции можно наблюдать.

В качестве мест нагула озеро привлекательно для планктоноядных видов: синца, уклейки и чехони. Синец входит в доминантный комплекс летом и осенью, а уклейка и чехонь многочисленны летом, а осенью доминируют в отловах. Исследования, проведенные в 2007 г. С.М. Смирновой (2008), показали, что среди пойменных водоемов максимальным видовым разнообразием зоопланктона характеризовались участки озера Лопата. Численность и биомасса зоопланктеров, по сравнению с другими пойменными водоемами, также были высоки. Высокие значения ценности зоопланктона, как корма рыб (отношение биомассы ракообразных к биомассе коловраток) также характерны для озера (табл. 2)

Таблица 2. Показатели зоопланктона озера Лопата в июле 2007 г. (по Смирновой, 2008)

Станция	Rotatoria		Cladocera		Copepoda		Общая		H***	B_{crust}/B_{rot}
	N*	B**	N	B	N	B	N	B		
1	74.2	0.20	12.67	0.28	6.98	0.02	93.86	0.50	4.07	1.49
2	1679.02	1.42	29.75	0.56	117.25	0.67	1826.02	2.6	1.51	0.87
3	128.98	0.50	85.95	1.82	95.55	0.59	310.45	2.91	3.57	4.81

*N- численность, тыс./экз./м^2, **B – биомасса, г/м^2, ***H- индекс Шеннона, бит.

Подуст, встречается в озере лишь весной в период нерестового хода. Белоглазка и плотва, наибольшие доли которых наблюдаются в весенний период, также используют озеро в качестве транзита и нереста. Также особей этих видов отлавливали в водоеме во время нереста. Особенно привлекательным озеро оказалось для густеры: в течение всех проведенных отловов ее доля была доминирующей. Вероятно, этот вид использует озеро на различных этапах жизненного цикла: транзита, нереста и нагула. Сомы наблюдаются на озере в летний период. Спуск сома из пойменных водоемов в материнскую реку начинается с начала июля и продолжается до начала сентября. В озере Лопата сом задерживается, привлеченный обилием рыбы, но при понижении температуры воды ниже 16°С мигрирует в Оку (Иванчева и др., 2023). Другие хищники, такие как щука, судак, речной окунь в наибольшем количестве (доле в уловах) встречаются в весенний период – используя озеро в качестве места нереста, а также летом при максимальном обилии потенциальных жертв – синца и густеры – а также молоди этих и других видов рыб.

Ни в одном из прочих пойменных озер Оки не выявлена подобная структура рыбного населения как в озере Лопата, что хорошо видно на дендрограмме сходства (рис. 2), где водоем находится на наибольшем удалении от других.

Таким образом, молодая старица Оки – озеро Лопата – многофункциональна для многих видов рыб и используется ими на всех этапах жизненного цикла. Взаимосвязь между биоразнообразием и многофункциональностью экосистем прослеживается во многих экологических исследованиях. Изменения в биоразнообразии в естественных экосистемах распределены в пространстве и во времени неравномерно, и на взаимосвязь влияет сочетание биотических и абиотических факторов (Koua et al., 2023).

По сравнению с другими пойменными озерами среднего течения Оки оно более всех богато планктоном как по богатству видов, так и по биоразнообразию, так и по биомассе, так и по ценности, как корма для планктоноядных видов. Вследствие этого озеро особенно привлекательно для синца, чехони, уклейки. Такие скопления густеры, как в озере Лопата в течение всего периода открытой воды не наблюдаются ни в одном другом обследованном нами пойменном озере (Иванчева и др.2023). Такие особенности видовой структуры рыбного населения озера Лопата обуславливается ее сложным строением, когда в водоеме сочетаются лентические и лотические элементы экосистем, формируя экотональный эффект.

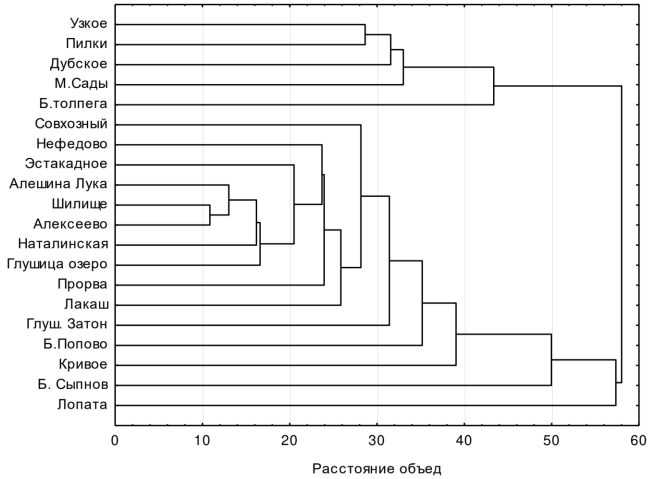


Рис.2. Дендрограмма сходства пойменных водоемов среднего течения Оки

Литература

Иванчев В.П., Иванчева Е.Ю. Круглоротые и рыбы Рязанской области и прилежащих территорий. Рязань: НП «Голос губернии», 2010. 291 с.

Иванчева Е.Ю., Лычковская И.Ю., Иванчев В.П. Рыбное население и макрозообентос центральной озерно-речной системы Мещерской низменности // Труды Окского заповедника, т.41. Рязань: 2023. 126 с.

Панкова Н.Л. Характеристика и синтаксономический состав высшей водной растительности Окского заповедника // Труды Окского заповедника, т.27. Рязань: НП «Голос губернии», 2012. С.265.

Панкова Н.Л. Структура и динамика растительного покрова водоемов Окского заповедника // Труды Окского заповедника, т. 31. Рязань: НП «Голос губернии», 2014. 165 с.

Печенюк Е.В. Развитие водоемов в пойме р. Хопра // Состояние особо охраняемых природных территорий Европейской части России. Воронеж, 2005. С. 59.

Смирнова С.М. Зоопланктон некоторых водоемов Окского заповедника // Мониторинг редких видов животных и растений и среды их обитания в Рязанской области. Рязань: НП «Голос губернии», 2008. С.196.

Baber M.J., Childers D.L., Babbitt K.J. Anderson D.H. Controls on fish distribution and abundance in temporary wetlands // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 59. 2002. P. 1441

Holland L.E., Huston M.L. Distribution and food-habits of Young-of-the-Year fishes in a backwater lake of the upper Mississippi River // Journal of Freshwater Ecology. 1985. 3. P. 81.

Joniak T., Kuczynska-Kippen N. Habitat features and zooplankton community structure of oxbows in the limnophase: reference to transitional phase between flooding and stabilization // Limnetica. 2016. V. 35 (1). P. 37.

Krylov A.V. Interannual changes in the summer zooplankton in the lakes of the Khopyor River flood plain // Biol. Bull. 2015. V. 42 (10). P. 891

Starrett W.C. Some factors affecting the abundance of minnows in the Des Moines River, Iowa // Ecology. 1951. 32. P. 13.

FEATURES OF THE SPECIES STRUCTURE OF THE FISH POPULATION OF A FLOODPLAIN LAKE OF UNUSUAL STRUCTURE

E.Yu. Ivancheva, V.P. Ivanchev

The article examines the influence of the formation of the floodplain lake of the Oka River on the species structure of the fish population. It is shown that due to its special formation, the lake has ecotonality features and is attractive for many species of fish population at all stages of the life cycle: spawning run, spawning and fattening.

СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ БОЛОТ, СФОРМИРОВАВШИХСЯ ВОКРУГ МАЛЫХ ВОДОЕМОВ НИЗКОГОРНОЙ ЧАСТИ ЮЖНОГО УРАЛА (ЧЕЛЯБИНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Т.Г. Ивченко
Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН

Начало болотообразовательного процесса в низкогорной части Южного Урала (до 650 м над ур.м.) на территориях, расположенных у подножия хребтов связано с ранним голоценом (Панова, 1990). Чаще всего болота формировались и формируются здесь вокруг мелких водоемов, имеют небольшие размеры (редко более 100 га), весьма многочисленны и разнообразны по типу питания и увлажнения (Ивченко, 2005, 2019).

На настоящий момент автором были обобщены сведения о распространении растительных сообществ 7 сфагновых переходных болот, сформировавшихся или формирующихся на месте малых озер и водохранилищ низкогорной части Челябинской области (Южно-Уральский регион). На исследованных болотных массивах было изучено все разнообразие растительных сообществ методом пробных площадей и экологических профилей и их полное геоботаническое описание по общепринятой методике (Полевая геоботаника, 1964). Площадки были заложены в типичных частях фитоценозов, а при изучении комплексных участков отдельно описаны слагающие их фитоценозы по элементам микрорельефа. Размер пробных площадей составил 10х10 м, если площадь фитоценоза была меньше, описание проводили в его естественных границах. Учитывался полный флористический состав сосудистых растений и мохообразных. Материалами для данной публикации послужили 156 геоботанических описания, представленные в виде сводной электронной таблицы.

Флористический список исследованных болот насчитывает 176 видов высших сосудистых растений и 63 видов мхов, в том числе в мезотрофных сообществах произрастает 29 видов высших сосудистых растений и 33 вида мхов. Отмечено 6 видов сосудистых растений, занесённых в Красную книгу Челябинской области (2017).

Видовое разнообразие на отдельных массивах колеблется от 58 до 98 видов сосудистых растений и от 24 до 43 видов листостебельных мхов. Значительная разница в числе видов объясняется, на наш взгляд, долевым участием евтрофной, мезотрофной и олиготрофной частей в общем спектре сообществ болотного массива. Наибольшее флористическое богатство (96-98 видов сосудистых растений и 37-43 вида листостебельных мхов) свойственно болотам с равной степенью представленности растительных сообществ разной степени трофности и увлажнения в их структурной

организации. Преобладание олиготрофного компонента снижает видовое разнообразие до 58-69 видов сосудистых растений и до 24-27 видов листостебельных мхов.

Охарактеризовано фитоценотическое разнообразие исследованных переходных болот. Проведены классификационные построения, основанные на эколого-фитоценотическом подходе. Растительные сообщества центральный частей были объединены в ассоциации *Carex lasiocarpa–Sphagnum teres, Carex limosa–Sphagnum teres+S. obtusum, Carex limosa–Sphagnum angustifolium+S. fallax. Rhynchospora alba+Menyanthes trifoliata–Sphagnum riparium.*

На примере диаграммы ботанического состава торфов и палеосообществ цетральной мезотрофной части болота «Лебяжье» (окр. гор. Кыштым, 55°39'15,6" с.ш. 60°28'35,9" в.д., 276 абс.м) представлена динамика развития исследованных осоково-сфагновых сообществ в голоцене. Мощность торфяной залежи – 3,5 метра. Основная ее толща сложена низинными видами торфа, среди которых преобладают гипновые, гипново-осоковые, отмечены осоковые. Мощность переходных торфов (осоковый и сфагновый виды) – 0.75 м. Начало болотообразовательного процесса связано с евтрофными осоково-гипновыми сообществами разной степени богатства, которая уменьшается по мере увеличения торфяного слоя. Переход в мезотрофную стадию развития и, как следствие, формирование современных осоково-сфагновых растительных сообществ связаны с появлением таких видов, как *Carex limosa* и *Eriophorum vaginatum*, а также сфагновых мхов (*Sphagnum fallax, S. riparium, S. obtusum*).

Составлены карты-схемы и охарактеризована структура исследованных болот. Центральные части представлены мезотрофными осоково-сфагновыми сообществами с участием гомо- и гетеротрофотипных кочковато-мочажинных комплексов. Основные различия в структурной организации сводятся к усложнению микроструктуры сообществ, развитию мезо-олиготрофных кочковато-мочажинных комплексов и как следствие вступление частей болотных массивов в олиготрофную, а всего болота в мезо-олиготрофную стадию развития (Ивченко, 2005, 2009, 2019). Окраину болотных массивов занимают евтрофные древесно-осоковые сообщества, что характерно для большинства болот таежной зоны (Юрковская, 1980). Как правило, это березово-кочкарноосоковые и ольхово-осоковые фитоценозы.

В целом, доля участия кочковато-мочажинных микрокомплексов в структуре болотных массивов данного варианта составляет от 10% до 50% от их площади. Более обычны ниже следующие, приведенные нами по степени увеличения их олиготрофизации:

1. Ковррово-мочажинный ев-мезотрофный гетеротрофотипный комплекс ассоциаций *Carex lasiocarpa–Sphagnum teres* и *Menyanthes trifoliata+Carex lasiocarpa–Drepanocladus polygamus* субасс. *typicum*
2. Кочковато-мочажинный олиго-мезотрофный гетеротрофотипный комплекс ассоциаций *Chamaedaphne calyculata+Menyanthes trifoliata–Sphagnum magellanicum, Chamaedaphne calyculata–Sphagnum fuscum* и *Carex lasiocarpa–Sphagnum teres*
3. Кочковато-мочажинный олиго-мезотрофный гетеротрофотипный комплекс ассоциаций *Chamaedaphne calyculata–Sphagnum fuscum* и *Carex limosa–Sphagnum teres+Sphagnum obtusum*
4. Кочковато-мочажинный олиго-мезотрофный гетеротрофотипный комплекс ассоциаций *Chamaedaphne calyculata–Sphagnum fuscum* и *Eriophorum vaginatum–Sphagnum fallax* вар. *Chamaedaphne calyculata.*

Литература

Ивченко Т.Г. Болотные комплексы Ильменского заповедника (Южный Урал) // Ботанический журнал. 2005. Т. 90. № 4. С. 544 - 554.

Ивченко Т.Г. Хорология болотных комплексов Ильменского заповедника и ее отображение на геоботанических картах. Челябинск: Энциклопедия, 2009.144 с.

Ивченко Т.Г. Растительность болот Южно-Уральского региона (в пределах Челябинской области): Дис. … докт. биол. наук. СПС, 2019. 476 с.

Красная книга Челябинской области: животные, растения, грибы. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2017. 511 с.

Панова Н.К. История развития растительности горной части Южного Урала в позднем плейстоцене и голоцене, по палинологическим данным // Историческая экология животных гор Южного Урала. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. С. 144-159.

Полевая геоботаника. Т. 3. М.; Л: Наука, 1964. 530 с.

Юрковская Т. К. Болота // Растительность европейской части СССР. Л.: Наука, 1980. С. 300-345.

STRUCTURAL ORGANIZATION OF MIRES FORMED AROUND SMALL WATER BODIES IN THE LOW-MOUNTAIN PART OF THE SOUTHERN URALS (CHELYABINSK REGION)

T.G. Ivchenko

Geobotanical studies of 7 sphagnum mesotrophic mires formed or being formed on the site of small lakes and reservoirs in the low-mountain part of the Chelyabinsk Region (Southen Urals) were conducted. The floristic list includes 176 species of higher vascular plants and 63 species of mosses. Species diversity in individual massifs ranges from 58 to 98 species of vascular plants and from 24 to 43 species of mosses. In our opinion, such a difference in the number of species is explained by the proportional participation of eutrophic, mesotrophic and oligotrophic parts in the general spectrum of communities of a separate mire. Plant communities of the central parts were combined into associations Carex lasiocarpa–Sphagnum teres, Carex limosa–Sphagnum teres+S. Rhynchospora alba+Menyanthes trifoliata–Sphagnum riparium. The peat deposit is 3.5 meters. The dynamics of development of the studied sedge-sphagnum communities in the Holocene is presented. Maps-schemes were compiled and the structure of the studied mires was characterized. The central parts are represented by mesotrophic sedge-sphagnum communities with the participation of homo- and heterotrophic hummocky-hollow complexes. The outskirts of the mire areas are occupied by eutrophic tree-sedge communities, which is typical for most mires in the taiga zone.

ПРЕСНОВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ КАРЕЛИИ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Н.В. Ильмаст, Я.А. Кучко, Н.П. Милянчук
Институт биологии Карельского научного центр РАН

Изучены гидробиологические сообщества водоемов системы реки Кенти (Костомукшское хвостохранилище, озера Окуневое, Поппалиярви, Койвас). Исследуемые водоемы подвержены влиянию сбрасываемых техногенных вод горно–обогатительного комбината. Результаты исследования показывают, что водные объекты характеризуются не высокими количественными показателями планктона и бентоса и с трофической точки зрения относятся к олиготрофным водоемам. В водоемах среднего течения р. Кенти, по мере удаления от источника минерального загрязнения, отмечается

увеличение числа видов гидробионтов, что свидетельствует о постепенной нормализации условий их обитания.

Необратимые или сукцессионные изменения в пресноводных экосистемах могут происходить под влиянием как климатических изменений (стойкие и длительные изменения температуры и водности), так и человеческой деятельности (Решетников и др., 1982; Алимов и др., 2004, 2005 и др.). Карелия имеет хорошо развитую гидрографическую сеть. Она представлена большей частью небольшими реками, которые соединяют многочисленные озера, образуя озерно-речные системы (Филатов и др., 2001; Филатов, Литвиненко, 2010). Основным фактором антропогенного влияния на водоемы региона является сброс сточных вод промышленными центрами. Среди предприятий Карелии ведущая роль в этом плане принадлежит объектам целлюлозно-бумажной промышленности. Особой и весьма специфичной проблемой республики является характер антропогенного влияния АО «Карельский окатыш» на водоемы озерно-речной системы р. Кенти. Река Кенти протяженностью 97 км протекает через ряд озер и впадает в оз. Среднее Куйто и относится к водосбору р. Кеми. В связи со строительством и последующей эксплуатацией предприятия, верхнее озеро системы (оз. Костомукшское) преобразовано в хвостохранилище и используется для захоронения хвостов и оборотного водоснабжения. Формирование химического состава вод в этот период осуществлялось в основном за счет выщелачивания руды при контакте с оборотной водой в производственном цикле и поступления рудничных вод, а также поверхностного притока с водосбора, атмосферных осадков на водную поверхность.

Как было показано в ряде работ в последнее десятилетие в воде хвостохранилища отмечается стабилизация химических показателей, но продолжает расти содержание калия, сульфатов и лития, а также наблюдается увеличение минерализации воды и уменьшение ее щелочности (Пальшин и др., 1994; Поверхностные воды…, 2001; Морозов, 1998; Лозовик и др., 2007, 2010). Данную тенденцию авторы связывают с многократным использованием воды хвостохранилища для оборотного водоснабжения комбината и с увеличением примеси сернистых соединений в руде. Одной из актуальных экологических проблем, обусловленной деятельностью предприятия является сброс техногенных вод в водоемы системы р. Кенти, которые поступают в результате попусков воды из хвостохранилища, с фильтрационными водами и с водами отводных каналов (Биота…, 2012).

До строительства предприятия воды озера относились к маломинерализованным (17–30 мг/л) гидрокарбонатного класса группы кальция. Величина pH варьировала в пределах 6,3–6,9. Средняя минерализация воды составляла – 25 мг/л. Многолетние исследования водоема позволили проследить изменения гидрохимического режима на разных стадиях его наполнения (Феоктистов, Сало, 1990; Лозовик и др., 2001; 2012). Так минерализация воды в 1984 г. уже составляла уже 247 мг/л, в настоящее время свыше 600 мг/л. В воде отмечаются высокие концентрации $K+$, Na^+, SO_4^2, а также аномальное соотношение главных катионов, по сравнению с природными водами. Большие концентрации щелочных металлов, а также гидрокарбонатов определили сдвиг pH в щелочную область (8,2). Подобные условия представляют собой геохимический барьер для миграции большинства тяжелых металлов, поэтому концентрации их невелики, и находятся на уровне единиц микрограммов, что ниже предельно допустимых концентраций для воды рыбохозяйственных водоемов (Лозовик, Кулакова, 2012).

Состав поступающей взвеси вследствие выщелачивания различных компонентов непосредственно влияет на химические показатели воды озер, расположенных ниже. Начиная с 1994 г. в нижележащие озера регулярно производятся попуски воды из хвостохранилища. Сброс техногенных вод приводит к изменению минерального состава

расположенных ниже озер, наблюдается увеличение содержания калия (до 1,2 мг/л) и лития (до 0,6 мкг/л) при фоновом содержании 0,2 - 0.4 мкг/л. Основными факторами влияния является загрязнение их вод минеральными веществами – сульфатами и калием.

Оценка гидробиологических сообществ показала, что видовой состав фитопланктона исследуемых водных объектов представлен 18-23 видами водорослей (оз. Окуневое – 22, оз. Поппалиярви – 18, оз. Койвас – 23). Основу пелагического и литорального фитопланктона составляют диатомовые и зеленые водоросли. Большинство из встреченных в фитопланктоне видов являются индикаторами олигосапробных или бетамезосапробных условий. Значения индекса сапробности позволяют отнести воды к 3 классу качества («удовлетворительная чистота»), разряд 3а («удовлетворительно чистая»), что соответствует бетамезосапробной зоне.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными исследований зоопланктона, проведенных на водоемах системы р. Кенти ранее в 1999−2001 гг. (Куликова, Калинкина, 2007) и 2009-2013 гг. (Кучко и др., 2015). Сравнение имеющихся материалов позволяет сделать вывод о сохранении общих тенденций в развитии зоопланктонных сообществ на протяжении последних 20 лет при продолжающемся техногенном воздействии. Зоопланктон водоемов верхнего течения р. Кенти (оз. Костомукшское и оз. Окуневое) характеризуется низкими количественными показателями и значительной обедненностью видового состава. Структурообразующие виды зоопланктона в этих водоемах можно отнести к палеолимническим, которые в ходе своей эволюции выработали приспособления к обитанию в водоемах с сильными колебаниями абиотических факторов, а также временных локациях. Обращает внимание отсутствие в планктоне многих видов кладоцер, типичных для водоемов Карелии, таких как *H. gibberum*, видов семейств *Cercopagidae*, *Leptodoridae* и ряда других, относящихся к группе мезолимнических. В водоемах среднего течения р. Кенти, по мере удаления от источника минерального загрязнения, отмечается возрастание числа видов и количественных показателей зоопланктона, что свидетельствует о постепенной нормализации условий обитания гидробионтов. Коэффициенты корреляции между суммой ионов и численностью, и биомассой зоопланктона в исследуемых водоемах, указывают на наличие обратной связи (-0,66 и -0,79, достоверные при $p<0,01$), обусловленной в первую очередь повышенными концентрациями ионов K^+, SO_4^{2-}, HCO_3^-.

В целом, видовое разнообразие сообщества зоопланктона возрастает по направлению стока от оз. Окуневое к оз. Койвас. Общее число видов увеличивается с 15 до 24, в планктоне появляются типичные обитатели северных слабоминерализованных водоемов. Индекс видового разнообразия также возрастает от 1,13 до 1,62. По уровню количественного развития зоопланктона оз. Окуневое характеризуется как ультраолиготрофный водоем, оз. Поппалиярви как β-мезотрофный и озеро Койвас – как олиготрофный.

Результаты исследований донной фауны показали, что наиболее высокие значения количественных показателей макрозообентоса (численность и биомасса) отмечены для оз. Поппалиярви, наименьшие - для оз. Койвас. Биомасса донных организмов варьировала от 0,28 г/м^2 до 2,38 г/м^2, закономерно снижаясь от литоральной зоны к пелагической части водоемов. Таким образом, все исследованные водоемы по уровню количественного развития макрозообентоса соответствуют олиготрофному статусу водных объектов, характеризующихся бедным фаунистическим составом и невысокими показателями обилия донных животных. По результатам расчетов индекса «К» (Балушкина, 1987) все три озера соответствуют классу умеренно-загрязненных вод.

Анализ контрольных уловов рыбы показал, что ихтиофауна озер представлена от 4 до 12 видами. По числу видов и по биомассе доминируют рыбы бореального равнинного комплекса. В целом, в структуре ихтиофауны исследуемых водоемов

системы р.Кенти наблюдается увеличение видового разнообразия начиная от самого верхнего озера Окуневого (4 вида) до озера Койвас (12 видов), что свидетельствует о снижении антропогенной нагрузки на озерные экосистемы и в частности на рыбное население расположенных ниже хвостохранилища водоемов. Во всех исследуемых озерах доминантным видом является плотва. Сравнительный анализ линейно – весового роста плотвы из близлежащих озер системы р. Кенти показал, что она обладает медленным темпом роста, что, по-видимому, связано с ограниченностью кормовых ресурсов.

Анализ результатов показал, что техногенная трансформация водоемов системы р. Кенти привела к упрощению структуры ихтиоценозов, а именно к снижению видового разнообразия. Можно предположить, что одной из причин негативного воздействия техногенных вод на популяции рыб является минеральная взвесь, которая сносится на значительные расстояния, а наиболее мелкие фракции размером менее 0,2 мкм, проникают сквозь клеточные мембраны (Моисеенко, 1997). Такая взвесь может угнетать дыхание и усвоение пищи у рыб (Альбастер, Ллойд, 1984; Gagnon, Holdway. 1999). Кроме того, снижение прозрачности ухудшает зрительную оценку рыбами кормовых объектов, по крайней мере, хищными. Установлено, что чем ближе к источнику загрязнения, тем меньше видов населяет водоем. Наблюдаемое обеднение ихтиофауны в значительной степени связано со средой обитания (щелочная), и с утратой условий для нереста и роста молоди рыб (малые площади водной растительности). Вместе с тем, сам факт выживания и размножения рыб в техногенных водоемах, свидетельствует об их высоком адаптивном потенциале даже в неблагоприятных условиях обитания.

Литература

Алимов А.Ф., Бульон В.В., Голубков С.М. Динамика структурно-функциональной организации экосистем континентальных водоемов // Фундаментальные основы управления биологическими ресурсами. Сборник научных статей. М.: Товарищество науч. изданий КМК, 2005. С. 241-253.

Альбастер Д., Ллойд Р. Критерий качества воды для пресноводных рыб. М.: Пищевая промышленность, 1984. 343 с.

Балушкина Е.В. Функциональное значение личинок хирономид в континентальных водоемах. Л.: Наука, 1987.

Биота северных озер в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 230 с.

Кучко Я.А., Ильмаст Н.В., Кучко Т.Ю. Зоопланктон водоемов верхнего течения системы реки Кенти (Северная Карелия) в условиях длительного промышленного загрязнения // Известия РАН. Серия биологическая. 2015. №5. С. 552 – 560.

Лозовик П.А., Калмыков М.В., Дубровина Л.В. Озерно-речная система Кенти. Химический состав техногенных вод. // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998-2006 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С.100-106.

Лозовик П.А., Калмыков М.В., Кулакова Н.Е. Многолетняя динамика изменения режима системы р. Кенти под влиянием техногенных вод Костомукшского ГОКа // Экологические проблемы Северных регионов и пути их решения / Материалы докл. всерос. конф. Апатиты: КНЦ РАН, 2010. С. 203-208.

Лозовик А.П., Кулакова Н.Е. Гидрохимический состав вод хвостохранилища и оз. Окуневого // Биота Северных озер в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 28–38.

Моисеенко Т. И. Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики. Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 262 с.

Морозов А.К. Водоемы района Костомукши. Бассейн реки Каменной. Общая характеристика. Химический состав воды. // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992-1997 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. С. 122-125.

Пальшин Н.И., Сало Ю.А., Кухарев В.И. Влияние Костомукшского ГОКа на систему р. Кенти. Гидрологические и гидрохимические аспекты // Использование и охрана водных ресурсов бассейна Белого моря (в границах Карелии). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1994. С. 140-161/

Поверхностные воды Калевальского района и территории Костомукши в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 165 с.

Феоктистов В.М., Сало Ю.А. Формирование химического состава воды хвостохранилища // Режим эксплуатации хвостохранилища Костомукшского ГОКа. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1990.С. 15–25.

Филатов Н.Н., Литвиненко А.В. Опыт исследования и использования водных ресурсов Карелии // Современные проблемы и задачи рационального использования ресурсов Онежско-Ладожского и Беломорского водных бассейнов. Петрозаводск: ПетрГУ, 2010. С. 68-76.

Gagnon D.F., Holdway A.I. Respiratory functional activity of gills of some fish species at toxic effect // Comp. Biochem. Physiol. B. Biochem. Mol. Biol. 1999. V. 120. №5. P. 256–266.

KARELIA'S FRESHWATER ECOSYSTEMS AFFECTED BY MAN-INDUCED POLLUTION

N.V. Ilmast, Y.A. Kuchko, N.P. Milyanchuk

The hydrobiological communities of water bodies in the Kenti River system (Kostomuksha tailings storage and lakes Okunyovoye, Poppalijärvi and Koivas) were studied. The water bodies are affected by industrial water discharged from a mining concentration plant. The results of our studies show that the lakes display low abundances of plankton and benthos and are classified as oligotrophic water bodies, based on their nutrient supplies. Aquatic organism species in the water bodies of the middle River Kenti become more abundant away from the source of mineral pollution, indicating that their ambient conditions are gradually normalized.

ВЛИЯНИЕ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЛИТОРАЛЬНЫХ И ГЛУБОКОВОДНЫХ АМФИПОД ОЗЕРА БАЙКАЛ

Е.С. Кондратьева, А.Н. Гурков, Я.А. Ржечицкий, Ж.М. Шатилина, М.А. Тимофеев
Иркутский государственный университет

Ультрафиолет (УФ) относится к числу важных экологических факторов, формирующих состав биоты на поверхности планеты, в том числе в верхних слоях водоемов. Эволюция байкальских литоральных амфипод происходила в условиях высокой прозрачности воды, что могло обеспечить их устойчивость к УФ-излучению. Напротив, у представителей глубоководной эндемичной фауны озера Байкал устойчивость к УФ-излучению должна быть снижена. В данной работе мы показали, что взрослые особи глубоководных байкальских амфипод *Ommatogammarus flavus* и *O. albinus* действительно обладают высокой чувствительностью к экологически значимым уровням УФ-излучения в отличие от литоральных видов *Eulimnogammarus cyaneus* и *E. verrucosus.*

В последние десятилетия возрастает внимание к ультрафиолету (УФ) как к значимому фактору окружающей среды, который оказывает влияние как на наземные экосистемы, так и на водные (Barnes, 2019). Прозрачность воды — важный критерий для проникновения УФ в водоемы (Rose, 2009). Благодаря высокой прозрачности воды, литоральная зона Байкала характеризуется высоким уровнем проникновения УФ-излучения. Известно, что УФ-излучение и его воздействие на водные организмы наблюдаются на значительной глубине (Häder, 2015; Williamson, 2019; Neale, 2023).

В процессе эволюции в Байкале произошло образование огромного числа эндемичных видов амфипод, насчитывающих сегодня более 350 видов и подвидов. Следует отметить, что байкальские амфиподы расселились по всем глубинам озера от линии уреза воды до максимальных глубин 1600 метров и более. Вероятнее всего, виды, населяющие верхние отделы фотической зоны озера, испытывают выраженное влияние УФ-излучения. В результате, длительной эволюции литоральных и сублиторальных эндемиков Байкала должна была быть обеспечена их высокая устойчивость к УФ-излучению, представляющему существенную опасность для всех живых организмов. Напротив, у представителей глубоководной эндемичной фауны озера Байкал устойчивость к УФ-излучению может быть снижена.

Объектами данного исследования являлись представители литорального сообщества амфипод — *Eulimnogammarus verrucosus* (Gerstfeldt, 1858) и *Eulimnogammarus cyaneus* (Dybowsky, 1874), а также представители глубоководной фауны — *Ommatogammarus flavus* (Dybowsky, 1874) и *O. albinus* (Dybowsky, 1874). В ходе экспозиции литорального *E. verrucosus* в условиях освещения как УФ-А, так и УФ-Б смертность рачков не превышала 3 % в течение 10 дней. У *E. cyaneus* через 10 дней в условиях освещения УФ-А отмечали гибель 17 % особей, а при воздействии УФ-Б — не более 2 % особей. Начало гибели глубоководного *O. flavus* при воздействии УФ-А отмечали уже в первые сутки эксперимента. Спустя 10 суток гибель амфипод данного вида составляла 60 % при воздействии УФ-А, и 100% при воздействии УФ-Б. Начало гибели *O. albinus* при воздействии УФ-А отмечали спустя двое суток экспозиции, а уже через семь суток экспозиции в УФ-А и через пять суток в УФ-Б наблюдали гибель 100% особей.

Также оценивали такой показатель, как двигательная активность животных (ДА) под воздействием УФ - излучения. Показано снижение активности в УФ-А только у одного литорального вида — у *E. cyaneus* более чем в 5 раз с 6-го дня. Напротив, воздействие УФ Б вызвало более выраженную реакцию двух литоральных видов амфипод и глубоководного *O. flavus*. У них также наблюдалось снижение активности. Для E. cyaneus наблюдалось то снижение, то повышение двигательной активности на 2, 3 и 6 день, у *E. verrucosus* снижение активности на 3-й и 8-й день. Для *O. flavus* снижение в конце эксперимента на 6-й и 8-й дни. Глубоководный *O. albinus* ни разу не показал статистически значимого ответа по сравнению с параллельной контрольной группой.

Для оценки влияния УФ-излучения на повреждение ДНК в гемоцитах амфипод мы использовали метод ДНК-комет после трехдневного воздействия УФ. Установлено статистически значимое увеличение уровня повреждения ДНК в гемоцитах амфипод глубоководного вида *O. flavus* при воздействии УФ-А и УФ-В в сравнении с литоральными *E. cyaneus* и *E. verrucosus* и глубоководного *O. albinus*, у которых повреждений ДНК обнаружено не было. Для того чтобы оценить окислительный статус тканей животных, измеряли активность антиоксидантных ферментов. Показано, что у *E. verrucosus* и *E. cyaneus* в условиях воздействия УФ-А и УФ-Б не происходило изменения активности ферментов антиоксидатной системы (пероксидазы, глутатион-S-трансферазы, каталазы). Напротив, у глубоководных *O. flavus* и *O. albinus* наблюдали

повышение активности одного из ферментов - GST под воздействием УФ-Б после 3 дней экспонирования.

Одним из механизмов защиты от УФ-излучения могут являться фотоингибирующие молекулы, такие как каротиноиды, которые поступают в организм с растительной пищей. В связи с этим, нами был оценен базовый уровень каротиноидов у всех исследуемых видов и обнаружено градиентное снижение в уровне каротиноидов, согласующееся с предпочитаемыми глубинами обитания изучаемых видов: *E. verrucosus* - 68 мкг/г, *E. cyaneus* - 50 мкг/г, *O. flavus* - 12 мкг/г, *O. albinus* - 4,9 мкг/г. Такие различия в уровне каротиноидов могут являться одной из причин большей устойчивости к УФ-излучению у литоральных амфипод *E. verrucosus* и *E. cyaneus.*

Таким образом нами было показано, что исследованные байкальские глубоководные виды амфипод *O. flavus* и *O. albinus* обладают сниженной устойчивостью к воздействию УФ-А и УФ-Б по сравнению с литоральными амфиподами *E. verrucosus* и *E. cyaneus.* Такие различия могут быть связаны с тем, что в процессе формирования этих глубоководных видов, у них менялся спектр питания (с преимущественно растительного в зоне литорали, на детрит и падаль в зоне больших глубин), что в свою очередь отражалось на характере поступления каротиноидов, продуцируемых в растениях. При этом снижалась и необходимость в адаптации к ультрафиолету, за счет ограничения его проникновения, что и могло привести к редукции механизмов УФ- устойчивости.

Литература

Häder D.-P., Williamson C.E., Wängberg S.-Å., Rautio M., Rose K.C., Gao K., Helbling E.W., Sinha R.P., Worrest R. Effects of UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with other environmental factors // Photochemical and Photobiological Sciences. 2015. V. 14, №1. P. 108-126.

Rose K.C., Williamson C.E., Saros J.E., Sommaruga R., Fischer J.M. Differences in UV transparency and thermal structure between alpine and subalpine lakes: Implications for organisms // Photochemical and Photobiological Sciences. 2009. V. 8, №9. P. 1244-1256.

EFFECT OF UV RADIATION ON LITTORAL AND DEEP-WATER AMPHIPODS OF LAKE BAIKAL

E.S. Kondrateva, A.N. Gurkov, Y.A. Rzhechitskiy, Z.M. Shatilina, M.A. Timofeyev

Ultraviolet (UV) is among the most important ecological factors shaping the composition of biota on the planet surface, including upper layers of waterbodies. The evolution of Baikal littoral amphipods occurred under conditions of high water transparency, which could ensure their resistance to UV radiation. On the contrary, in representatives of the deep-water endemic fauna of Lake Baikal the resistance to UV radiation should be reduced. In this study, we have shown that adults of the deep-water Baikal amphipods *Ommatogammarus flavus* and *O. albinus* are indeed highly sensitive to ecologically significant levels of UV radiation in contrast to the littoral species *Eulimnogammarus cyaneus* and *E. verrucosus.*

ДИАТОМОВАЯ ФЛОРА МАЛЫХ ОЗЕР, ПОДВЕРЖЕННЫХ АНТРОПОГЕННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

А.Л. Косова, Д.Б. Денисов

Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН

В работе представлены результаты палеоэкологических исследований донных отложений арктических озер Хибинского горного массива, испытывающих антропогенную нагрузку разной интенсивности. Выявлены значительные изменения в видовом составе и структуре диатомовых комплексов озер, проявляющиеся в смене доминирующих видов, а также в изменениях общей численности, видового разнообразия. Изменения в относительном обилии планктонных и бентосных видов в оз. Комарином указывают на лимнологические изменения, связанные со сложным взаимодействиями между эвтрофикацией и токсичностью тяжелых металлов.

Антропогенное загрязнение металлами является мощным стрессором для экосистем. Загрязнения металлами северных водных экосистем было зафиксировано во всем мире в связи с горнодобывающей и металлургической деятельностью, в том числе в Канаде (Jones et al., 2024; Simmatis et al., 2022), Швеции (Ek, Renberg, 2001; Silvester et al., 2024), Франции (Morin et al., 2008), России (Biskaborn et al., 2021; Maslennikova et al., 2023).

Мурманская область относится к одному из наиболее развитых горнорудных регионов Российской Федерации. Запасы многих полезных ископаемых области имеют общероссийское значение, а по апатит-нефелиновым – мировое. Одним из самых крупных и богатых месторождений апатит-нефелиновых руд является Хибинский горный массив. Разработка месторождений полезных ископаемых представляет серьезную опасность для водных экосистем. Кроме высокого содержания основного полезного компонента – P_2O_3, щелочные породы массива характеризуются повышенным содержанием Al, F, Cl, Sr, щелочных и щелочноземельных металлов. В результате ведения горнотехнических работ повышенные концентрации поступают в природные воды, которые в ряде случаев приобретают токсичные свойства для водных организмов и человека (Кашулин и др., 2008). Для установления антропогенного воздействия на водные экосистемы широко применяется метод диатомового анализа.

В работе представлены данные диатомового анализа колонок донных отложений озер Хибинского горного массива: оз. Щучье (67°50′18,8″; 33°40′24,5″) и оз. Комариное (67°40′49,93″; 34°16′28,47″) (рис.).

Озеро Щучье расположено в северной части Хибинского горного массива, принадлежит бассейну оз. Имандра. Это малое (площадь 0,30 км^2), по форме близкое к округлому озеро ледникового происхождения. Наибольшая длина озера 0,76 км, наибольшая ширина 0,55 км, максимальная глубина 3 м, площадь водосбора 1,9 км^2. Абсолютная отметка уровня воды 208,3 м. Район исследования подвержен значительному влиянию выбросов комбинатов «Североникель» и «Апатит», а также дальнему атмосферному переносу поллютантов. Озеро Комариное расположено на юго-востоке Хибинского горного массива (рис.) на высоте 174 м над уровнем моря. Озеро ледникового происхождения, по форме близкое к овальному, наибольшая длина которого составляет 1,53 км, наибольшая ширина 0,65 км, максимальная глубина 15 м, площадь зеркала 0,66 км^2, площадь водосбора 4,26 км^2. С 2011 г. попадает в зону воздействия нового предприятия АО «СЗФК» по добыче и переработке апатит-нефелиновых руд ГОК «Олений ручей».

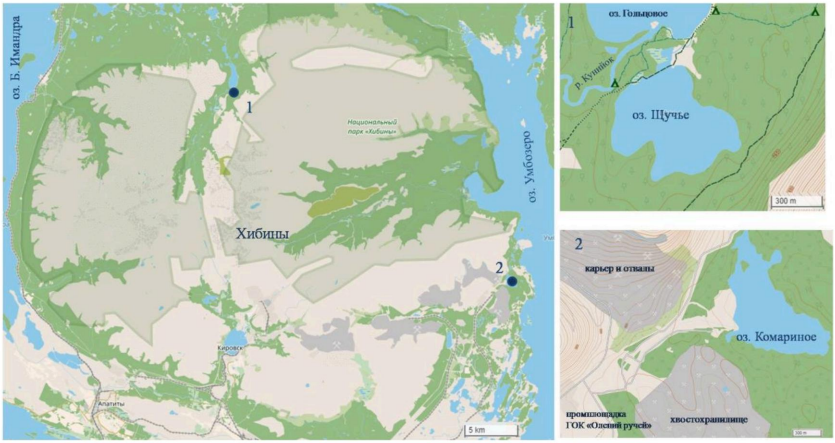


Рис. Карта расположения изученных озер (1 – Щучье, 2 – Комариное)

Материалами исследования послужили донные отложения (ДО) оз. Щучьего и оз. Комариного (рис.), изученные с помощью диатомового анализа. Колонки ДО мощностью 20 и 24 см, соответственно, получали с помощью пробоотборника открытого гравитационного типа (внутренний диаметр трубки 44 мм) с автоматически закрывающейся диафрагмой (Skogheim, 1979) и ненарушенной транспортировали в лабораторию. Диатомовый анализ ДО проводили по стандартной общепринятой методике (Давыдова, 1985), по схеме, используемой в Институте проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (Методы..., 2019). Определение диатомей велось с помощью световых микроскопов «Wild Leitz GMBH» и «Olympus CX 41» при увеличении в 1000 раз, с применением иммерсионного объектива. Все обнаруженные в препаратах створки водорослей определяли, по возможности, до внутривидовых таксономических категорий согласно определителям (Krammer and Lange Bertalot, 1988-1991; Krammer, 2000, 2002, 2003). Классификация уточнялась согласно международной альгологической базе данных (International Algological …). Все препараты, а также очищенный материал створок диатомовых водорослей хранятся в гербарии Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН (Боровичев и др., 2018).

Более богатая диатомовая флора определена из ДО оз. Щучьего и представлена 215 видами из 59 родов, в оз. Комарином - 154 вида из 46 родов. Таксономический состав двух озер представлен 276 видами и разновидностями диатомовых водорослей. Общими являются 42 вида, что составляет 33 % от всего таксономического списка диатомей. Массовыми являются *Achnanthidium minutissimum* (Kützing) Czarnecki, *Aulacoseira alpigena* (Grunow) Krammer, *Brachysira vitrea* (Grunow) R.Ross, *Staurosira construens* Ehrenberg. Индекс Серенсена-Чекановского между флористическими списками оз. Комариного и оз. Щучьего составил 0,49.

Анализ видового состава диатомей показал, что структура диатомовых комплексов, исследованных озер, претерпела существенные изменения за период накопления донных отложений, отражая смену экологических условий в водоемах (табл.).

Таблица. Изменения состава и структуры диатомовых комплексов в ДО по отношению к pH (acf – ацидофилы, ind – индифференты, alf – алкалифилы,); по отношению к местообитанию (B – бентосные, P-B – планктонно-бентосные, P – планктонные); по отношению к солености (i – индифференты)

Экологические группы	оз. Щучье	оз. Комариное
pH	acf+alf→acf+ind+alf→alf	ind→acf+alf→alf
местообитание	P-B→B+P-B→B→P	P+P-B+B→B+P-B→B
соленость	i	i
Доминанты	*Pseudostaurosira brevistriata, Staurosira venter, Aulacoseira alpigena→S. venter, Brachysira brebissonii, Tabellaria flocculosa →A. subarctica, A. valida, Achnanthidium minutissimum, S.construens*	*Aulacoseira alpigena, Staurosira construens, Cyclotella lemanica→ C. lemanica, S. construens, Tabellaria flocculosa → Achnanthidium minutissimum, T. flocculosa*

Массовое развитие планктонных алкалифильных видов рода Aulacoseira *(A. subarctica* и *A. valida)* в верхних слоях ДО оз. Щучьего, исчезновение ацидофильного бентосного вида *Brachysira brebissonii* в верхних слоях ДО указывают на процессы защелачивания, которые, вероятнее всего, обусловлены поступлением воды со значением pH>8 из самоизливающейся скважины, пробуренной в ходе геологических изысканий, а также аэротехногенному загрязнению водосборной площади тяжелыми металлами (Ni, Cu, Co).

Структурно-функциональная перестройка диатомовых комплексов оз. Комариного, подверженного непосредственному воздействию со стороны апатит-нефелинового производства, в первую очередь связана с эвтрофикацией водоема и токсическим действием химических элементов. Смена планктонных видов представителями бентосных и эпифитных сообществ обусловлена токсическим воздействием загрязнителей (тяжелых металлов) на более уязвимые виды планктона.

Работа выполнена в рамках темы НИР № 1024081300010-8 «Оценка и прогноз состояния арктических пресноводных экосистем в условиях потепления климата и современных вариаций антропогенной нагрузки».

Литература

Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л., 1985.244 с.

Боровичёв Е.А., Денисов Д.Б., Корнейкова М.В., Исаева Л.Г., Разумовская А.В., Химич Ю.Р., Мелехин А.В., Косова А.Л. Гербарий ИППЭС КНЦ РАН // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. №9. С.179-186.

Кашулин Н.А., Денисов Д.Б., Сандимиров С.С., Даувальтер В.А., Кашулина Т.Г., Малиновский Д.Н., Вандыш О.И., Ильяшук Б.П., Кудрявцева Л.П. Антропогенные изменения водных систем Хибинского горного массива (Мурманская область). В 2 ч. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. 2008. Ч. 1. 250 с., ч. 2. 282 с.

Методы экологических исследований водоемов Арктики. Мурманск: Изд-во МГТУ; 2019. 180 с.

Ek A.S., Renberg I. Heavy metal pollution and lake acidity changes caused by one thousand years of copper mining at Falun, central Sweden // Journal of Paleolimnology. 2001. №26. P. 89–107.

Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. Subwasserflora von Mitteleuropa, Band 2 (1-4). Stuttgart; Jena: Gustav Fisher Verlag, 1988–1991.

Krammer K. The Genus Pinnularia. Diatoms of Europe, Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. V. 1. Liechtenstein: A.R.G. Gantner Verlag K.G., 2000. 703 p.

Krammer K. Cymbopleura, Delicata, Navicymbula, Gomphocymbellopsis, Afrocymbella. Diatoms of Europe,Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. V. 4. Ruggell, Liechtenstein: A.R.G. Gantner Verlag K.G., 2003. 530 p.

Krammer K. Cymbella. Diatoms of Europe, Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. V. 3. Ruggell, Liechtenstein: A.R.G. Gantner Verlag K.G., 2002. 584 p.

Simmatis B, Rühland K, Evans M, Meyer-Jacob C, Kirk J, Muir DCG, Smol J.P. Metal contamination in alkaline Phantom Lake (Flin Flon, Manitoba, Canada) generates strong responses in multiple paleolimnological proxies // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 811. 152299.

Skogheim O.K. Rapport fra Arungenprosjectet. Oslo, 1979. №2. 7 p.

DIATOM FLORA OF SMALL LAKES SUBJECT TO ANTHROPOGENIC IMPACT OF VARIOUS INTENSITY (MURMANSK REGION)

A.L. Kosova., D.B. Denisov

The article presents the results of a paleoecological study of bottom sediments of Arctic lakes in the Khibiny Mountains, which are subject to anthropogenic loads of varying intensity. Significant changes in the species composition and structure of diatom complexes in lakes have been revealed, which manifest themselves in a change in dominant species, as well as in a change in the total number and species diversity. Changes in the relative abundance of planktonic and benthic species in Lake Komarinoe indicate limnological changes associated with complex interactions between eutrophication and heavy metal toxicity.

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА И ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАССОВЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ В ПРИБРЕЖНОМ МЕРОМИКТИЧЕСКОМ ОЗЕРЕ ТРЕХЦВЕТНОЕ (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ, БЕЛОЕ МОРЕ)

Е.Д. Краснова[1], Д.А. Воронов[2]

[1]Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

[2] Институт проблем передачи информации РАН.

В беломорском меромиктическом озере Трехцветное с января по октябрь 2024 г. наблюдали за составом, динамикой и вертикальным распределением массовых водорослей и инфузорий. У большинства видов, обитающих возле поверхности, массовое развитие начинается в июне, у тех, чья зона обитания захватывает начало хемоклина (1,7-1,8 м) – начинается в июне или июле и длится до августа, у *Scourfeldia marina*, обитающих в хемоклине, цветение начинается в августе и продолжается до октября. Инфузории в хемоклине присутствуют круглогодично. Тенденция к смещению массового развития на более поздние сроки у видов, обитающих глубже, и утрате сезонности в хемоклине хорошо согласуется с изменчивостью температурных условий в разных зонах озера.

На побережье Белого моря из-за послеледникового поднятия берега образовалось множество прибрежных водоемов, в разной степени изолированных от моря (Краснова и др., 2014). Ледник, который отступил немногим более 10 тысяч лет назад, сформировал

неровный рельеф из гряд и ложбин и изрезанную береговую линию. После схода ледника земная кора, придавленная им, стала подниматься, что продолжается и в наши дни со скоростью около 3 мм в год. Некоторые заливы отделяются от моря и становятся солеными лагунами с ослабленными асимметричными приливами; по мере ослабления приливов вода в таких лагунах опресняется, но если они достаточно глубокие, то опреснение захватывает не всю толщу, а только верхнюю ее часть, при этом внизу сохраняется соленая вода. Из-за разницы в плотности воды слои не перемешиваются, и такие водоемы получили название меромиктических.

На побережье Кандалакшского залива Белого моря мы нашли более тридцати водоемов, в разной степени от него изолированных, из которых 21 обладает устойчивой стратификацией, то есть квалифицируются как меромиктические.

Гидрологическая структура прибрежного меромиктического водоема определяется балансом между поступлением соленой воды из моря и пресным стоком с водосбора, который зависит от высот изолирующего порога и площади водосборного бассейна. На водный баланс могут также влиять подземные воды, но пока ни в одном из известных нам водоемов мы родников не обнаружили.

Типовая гидрологическая структура отделяющегося от моря водоема состоит из трех слоев. 1) Миксолимнион - верхний слой, принимающий пресный сток, осадки и подверженный ветровому и сезонному перемешиванию. Он может быть пресным, солоноватым или иметь морскую соленость, но в любом случае та водная масса, которая находится под ним, имеет бОльшую соленость; 2) галоклин, то есть переходная зона; 3) монимолимнион – водная масса, никогда не подвергающаяся перемешиванию за счёт высокой плотности соленой воды. На начальных стадиях изоляции повышенная соленость нижней водной массы может быть связана с забросами из моря зимой, когда соленость воды в море выше, чем в летнее время, а также с накоплением рассола, который образуется при замерзании соленой воды и опускается на дно, а пониженная соленость поверхностного слоя связана с таянием льда. Глубина перемешиваемого слоя – миксолимниона – зависит еще и от морфометрии водоема и защищенности от ветров.

Гидрологическая структура – это, своего рода «контурная карта», которую в разных водоемах по-разному «раскрашивают» живые организмы. Данное исследование нацелено на изучение состава, сезонной динамики и вертикального распределения массовых микроорганизмов в озере Трехцветное в 2024 г.

Озеро Трехцветное (66°35′33″ С, 32°58′43″ В) отделилось от Белого моря не менее нескольких столетий назад. Его гидрологическая структура включает: 1) пресный миксолимнион глубиной 1,5 м с удельной электропроводностью 200-550 мСм/см; 2) галоклин от 1,7 м до 4 м; на глубине 2-2,1 м располагается граница анаэробной зоны с высокой концентрацией сероводорода (до 600 мг/л); 3) монимолимнион с соленостью воды, свойственной Белому морю (20-22 ‰) от 4 м до дна. Максимальная глубина озера 7,5 м, площадь 3,5 га.

С января по октябрь 2024 г. в оз. Трехцветное проводили наблюдения за развитием фитопланктона и массовых видов инфузорий на разной глубине. В самой глубокой точке озера погружным насосом отбирали пробы воды от поверхности до глубины 2,5 м с шагом по вертикали 0,5 м, а в градиентной зоне от 1,5 до 2,5 м с шагом 10 см. Было сделано 10 съемок: по одной в январе и апреле, две в июне, одна в июле, три в августе, и по одной в середине сентября и в начале октября. В общей сложности проанализировано 140 проб.

Пробы просматривали живыми в день отбора под люминесцентным микроскопом LEICA DM2500 с использованием флуоресценции, что помогало идентифицировать таксономическую принадлежность фототрофных организмов. Названия видов приведены в соответствии с AlgaeBase (Guiry, Guiry, 2023). Для целей данной работы

регистрировали только массовые формы с концентрацией клеток более 200 тыс.кл./л. Численность оценивали по количеству клеток в поле зрения микроскопа при увеличении 10×20 при микроскопировании 200-кратного концентрата микро-планктона, полученного путем центрифугирования (3000 об./мин –1000 g; 10 минут).

При каждом отборе проб на каждом горизонте многопараметровым зондом YSI Pro измеряли температуру, соленость воды и окислительно-восстановительный потенциал, оптическим зондом-кислородомером YSI Pro ODO определяли концентрацию кислорода, люксметром AR813A Lux Meter (Smart Sensor), модифицированным для погружения в воду, измеряли освещенность. Кроме того, в пробе измеряли pH портативным измерителем качества воды WaterLiner (MetronX).

Гидрологические характеристики. Профили солености в этом водоеме не меняются на протяжении многих лет и одинаковы в разные сезоны (рис. 1-А). Температура верхнего слоя воды колеблется от 0 ºС, когда водоем покрыт льдом (с декабря по май) до максимальных значений в июле (в 2024 г. +24,7ºС) (рис. 1-Б). Минимальная температура в нем в период. Диапазон сезонных колебаний температуры уменьшается с глубиной. В 2024 г. у поверхности диапазон вариаций температуры составил +24,7 º, на глубине 1 м +18º, 2 м +10º, 3 м +4º, 4 м + 3º. Начиная с глубины 5 м, температура стабильна (+6ºС). Концентрация растворенного в воде кислорода в поверхностном 1 м обычно соответствует уровню насыщения (рис. 1-В), ниже она быстро уменьшается и на глубине 2 м равна нулю. Осенью зона 100% насыщения кислородом глубже, чем летом и зимой, и доходит до глубины 1,6 м. В апреле 2024 г. был зарегистрирован замор – кислород отсутствовал во всей толще. Окислительно-восстановительный потенциал соответствовал профилям кислорода (рис. 1-Г). Между горизонтами 1,9 м (в микроаэробной зоне) и 2,1 м (ниже редокс-перехода) разность потенциалов составляла 250-400 мВ. Освещенность под водой быстро уменьшалась от поверхности по направлению вниз (рис. 1-Д). Верхние 1-1,5 м поглощали 90% световой энергии, до глубины 1,9 м доходили сотые доли процента от света, падающего на поверхность воды. pH в миксолимнионе варьировала, она была минимальной в апреле и в начале лета (6,6) и постепенно увеличилась к осени до 7,8 (рис. 1-Е). В области редокс-перехода pH резко уменьшалась, а ниже была почти одинаковой с небольшими сезонными различиями той же направленности, что в поверхностном слое воды.

Под редокс-переходом в слое 2-2,2 м в течение всего года существует прослойка воды темно-зеленого цвета с высокоплотной популяцией зеленых серных бактерий *Chlorobium phaeovibrioides* (Лунина и др., 2019; Savvichev et al., 2018).

Массовые микроорганизмы, сезоны их развития и вертикальная зональность. В числе массовых микроорганизмов в озере Трехцветное в сезон исследований зарегистрированы: золотистые водоросли Dinobryon divergens (Heterokontophyta, Chrysophyceae), динофлагелляты *Ceratium hirudinella* (Myzozoa, Dinophyceae), диатомовые водоросли *Ulnaria ulna* и *Urosolenia longiseta* (Bacillariophyceae), зеленые водоросли *Monoraphidium* (с доминированием *M. minutum*) и *Scourfieldia marina* (Chlorophyta), пять видов инфузорий (*Urotricha* sp., *Coleps* sp., *Cyclidium* sp., *Holophrya* sp. и *Paramecium* sp.), очень мелкие цианобактерии с флуоресценцией фикоэритрина, а также мелкие кокки с хлорофиллом, которых мы не идентифицировали (табл.).

Многие из них были четко приурочены к определенным горизонтам (рис. 2). Большинство обнаруженных водорослей – пресноводные с зоной обитания в пресном миксолимнионе. В пределах пресного миксолимниона выделяется поверхностная зона до глубины 0,5 м, которой ограничено распространение пресноводной водоросли *Monoraphidium* и части цианобактерий. У двух диатомей (*S. ulna* и *U. longoseta*) зона обитания захватывала начало галоклина (1,7-1,8 м) с соленостью 0,2-0,3‰. Особняком стоят зеленые жгутиконосцы *S. marina*, которые считаются морскими (Guiry, Guiry,

2023); в оз. Трехцветное в 2024 г. и в предыдущие годы этот вид встречался только в хемоклине на глубине 1,7-1,9 м с соленостью воды 0,5-0,7‰. Мелкие кокки-цианобактерии образовывали в водоеме два слоя: один возле поверхности и другой возле редокс-перехода на глубине 1,9-2,0 м. Инфузории были представлены пятью массовыми видами, один из которых, *Urotricha* sp., обитал в пресной зоне, а остальные четыре – в хемоклине, где образовывали вертикальную последовательность: верхний этаж, начиная с глубины 1,7 м занимал *Coleps* sp., на 10 см ниже концентрировались *Holophrya* sp., под ними *Cyclidium* sp. и еще ниже *Paramecium* sp. В отдельные годы в хемоклине этого водоема развивается еще один вид инфузорий – *Plagiopylla* sp., которые обитают еще ниже, в анаэробной части хемоклина.

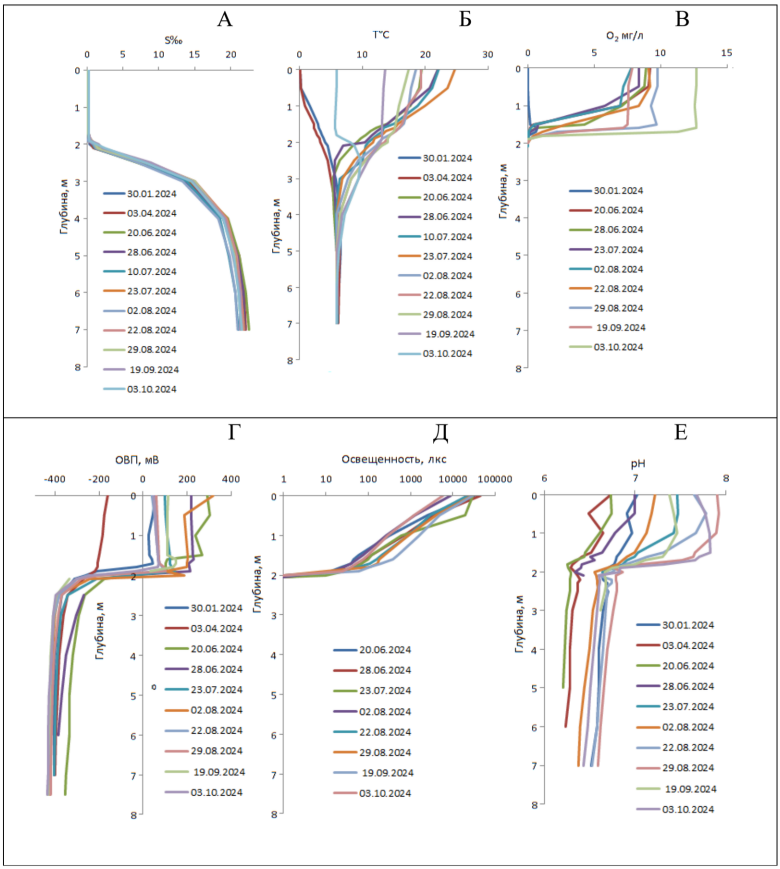


Рис. 1. Профили гидрологических параметров в оз. Трехцветное в разные месяцы 2024 года по данным 11 сезонных съемок: А – соленость (‰), Б – температура (ºС), В – концентрация растворенного воде кислорода (мг/л), Г – окислительно-восстановительный потенциал (мВ), Д – освещенность под водой (лк), Е – Ph

Таблица. Массовые микроорганизмы в оз. Трехцветное в 2024 г., зона их обитания и сезон развития

Таксон/группа	Глубина, м	Сезон
Мелкие фототрофные кокки	0-2,2	конец VI-X
Monoraphidium minutum (Chlorophyceae)	0-0,5	VI
Cyanobacteria	0-0,5	I, VI-VII, X
Dinobryon divergens (Chrysophyceae)	0-1,0	конец VII-VIII
Urotricha (Ciliophora, Prostomatea)	0-1,5	VI-VIII
Ceratium (Dinophyceae)	0-1,5	конец VII-VIII
Ulnaria ulna (Bacillariophyceae)	0-1,7	конец VI-IX
Urosolenia longiseta (Bacillariophyceae)	0-1,8	конец VI-VIII
Scourfieldia marina (Chlorophyta, Pedinophyceae)	1,7-1,8	VIII-X
Coleps (Ciliophora, Prostomatea)	1,6-1,9	I, VI-X
Holophrya (Ciliophora, Prostomatea)	1,7-1,8	конец VII-X
Cyclidium (Ciliophora, Oligohymenophorea)	1,7-1,9	VII-X
Paramecium (Ciliophora, Oligohymenophorea)	1,9-2,0	I, VI-X
Cyanobacteria	1,9-2,0	VI-VIII
Зеленые серные бактерии	2,0-2,1	I-X

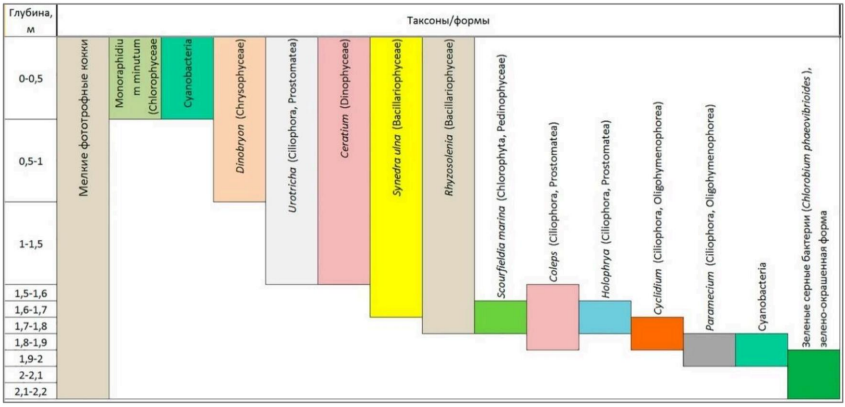


Рис. 2. Зоны обитания разных микроорганизмов в оз. Трехцветное в 2024 г.

В меромиктическом озере Трехцветное прослеживается закономерное смещение на более поздние сроки массового развития у видов, обитающих глубже, и утрата сезонности у таксонов, населяющих хемоклин. У большинства видов, которые обитают возле самой поверхности воды, развитие начинается в июне, у тех, чья зона обитания захватывает начало хемоклина – в июне или июле и длится до августа, у обитателя хемоклина *S. marina* цветение начинается в августе и продолжается до октября. Два вида инфузорий из хемоклина в массе развиваются в течение всего года, в том числе зимой, и еще два со второй половины лета до осени. Эта тенденция хорошо согласуется с изменчивостью температурных условий.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-24-00008).

Литература

Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Демиденко Н.А., Кокрятская Н.М., Пантюлин А.Н., Рогатых Т.А., Самсонов Т.Е., Фролова Н.Л. Исследования отделяющихся водоемов на побережье Белого моря // Комплексные исследования Бабьего моря, полуизолированной беломорской лагуны: геология, гидрология, биота — изменения на фоне трансгрессии берегов // Тр. Беломорской биостанции МГУ. Т. 12. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2016. С. 211–241.

Лунина О.Н., Саввичев А.С., Бабенко В.В., Болдырева Д.И., Кузнецов Б.Б., Колганова Т.В., Краснова Е.Д., Кокрятская Н.М., Веслополова Е.Ф., Воронов Д.А., Демиденко Н.А., Летарова М.А., Летаров А.В., Горленко В.М. Сезонные изменения структуры сообщества аноксигенных фототрофных бактерий меромиктического озера Трехцветное (Кандалакшский залив Белого моря) // Микробиология. 2019. Т. 88, №1. С. 100–115.

Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. https://www.algaebase.org; (дата обращения 24.01.2025).

Savvichev A.S., Babenko V.V., Lunina O.N., Letarova M.A., Boldyreva D.I., Veslopolova E.F., Demidenko N.A., Kokryatskaya N.M., Krasnova E.D., Gaisin V.A., Kostryukova E.S., Gorlenko V.M., Letarov A.V. Sharp water column stratification with an extremely dense microbial population in a small meromictic lake, Trekhtzvetnoe // Environmental Microbiology. 2018. V 20, №10. P. 3784–3797.

SEASONAL DYNAMICS AND VERTICAL DISTRIBUTION OF ABUNGANT MICROORGANISMS IN COASTAL MEROMICTIC LAKE TREKHTZVETNOE (MURMANSK OBLAST, WHITE SEA)

E.D. Krasnova, D.A. Voronov

In the meromictic Lake Trekhtzvetnoe on the White Sea coast, the composition, dynamics, and vertical distribution of most abundant algae and ciliates were investigated from January to October 2024. For most of the species living near the surface, mass development begins in June; those with habitat extending to the chemocline (1.7-1.8 m) develop from June or July until August; bloom of *Scourfeldia marina* inhabiting the chemocline begins in August and lasts until October. Ciliates are present in the chemocline all year round. The tendency for mass development to shift to later dates for species living deeper and the loss of seasonality in the chemocline is consistent with the variability of temperature conditions in different zones of the lake.

ТРАНСФОРМАЦИЯ СООБЩЕСТВА ИНФУЗОРИЙ ОЗЕРА МАНЫЧ-ГУДИЛО ВСЛЕДСТВИЕ РОСТА МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОД

К.В. Кренева

ФИЦ Южный Научный Центр РАН

В октябре 2022 г проведены исследования состояния цилиатоценоза озера Маныч-Гудило. Серьёзные изменения водного баланса и рост минерализации (с 32 до 84,5‰) вод озера вызвали перестройку структуры и состава сообщества инфузорий и повлияли

на уровень количественного развития его компонентов. Перестройка структуры и изменения в составе комплекса массовых видов обусловлены, также, увеличением роли вида-вселенца - *Eutintinnus lususundae* Entz, 1885.

Цилиатопланктон гиперсолёных водоёмов, зачастую является важнейшим, а в некоторых водоёмах, на протяжении долгих временных периодов, единственным компонентом зоопланктонного сообщества. При этом, уровень количественного развития инфузорий достигает значений, сравнимых с таковым сетного зоопланктона (Павловская и др., 2009).

С конца 60-х гг., для озера Маныч-Гудило наступил период прогрессирующего осолонения, который продолжается до сих пор. С 2001 по 2018 г., уровень минерализации озера вырос с 32 до 56‰ (Клещенков и др, 2018), и до 73‰ в 2021-22гг (по неопубликованным данным). Причём, в прибрежных водах в 2021г., уровень минерализации доходил до 84,5‰ (х. Молодёжный).

Несмотря на то, что фауна инфузорий озера Маныч-Гудило в основном состоит из эвригалинных видов с широким пищевым спектром, настолько серьёзное изменение одного из параметров среды не могло не сказаться на состоянии планктонного сообщества. По литературе, известно (Шадрин, Ануфриева, 2018), что при высоких уровнях минерализации, сообщество водоёма существует, переходя из одного альтернативного устойчивого состояния, к другому относительно устойчивому состоянию. При этом, в диапазоне до 100-150 ‰, уровень минерализации не является единственным и главным фактором перехода из одного состояния в другое. Однако, в условиях высокой минерализации, чаще всего наблюдается низкое видовое разнообразие, вплоть до развития монокультуры. Подобную картину можно наблюдать в соседних с Маныч-Гудило мелких гипергалинных озёрах Грузское и Круглое. Уровень минерализации в этих озёрах превышает 200‰, а в периоды длительной засухи они могут почти полностью пересыхать. Большую часть года, цилиатоценоз этих озёр представлен одним видом - *Stichotricha* sp., питающимся, массово развивающимся здесь галофильным видом *Dunaliella salina* (Dunal) Teodoresco, 1905. В периоды, сопровождающиеся повышением уровня вод, видовое богатство в этих озёрах увеличивается. Начинает активно развиваться галофильная *Fabrea salina* Corlis, 1980, в озёрах может одновременно встречаться до 5-7 видов цилиат. Кроме того, здесь появляется и в массе начинает развиваться крупный зоопланктонный рачок *Artemia salina* (Linnaeus, 1758).

Зоопланктонное сообщество более крупного, непересыхающего озера Маныч-Гудило, активно функционирует на протяжении всего года.

Всего за время исследований на акватории озера нами было обнаружено более 60 форм инфузорий, 27 из которых определены до вида. Одномоментно, может встречаться от 15 (август, 2006 г.) до 57 видов (октябрь, 2022 г.).

Таблица 1. Изменения статуса в списке комплекса массовых видов

Виды	2001-2004	2006-2008	2017-2018	2021-2022
Pleuronema sp.	*	**	*	**
Mesodinium pulex Claparede & Lachmann, 1858	**	**	***	**
Fabrea salina Corlis, 1980	***	*	**	**
Strombidium sp.	**	*	**	***
Eutintinnus lususundae Entz, 1885	*	*	**	***
Tintinnopsis karajacensis Brandt, 1908	***	**	-	-
T. minuta Wailes,1925	***	*	*	**
Aspidisca sp.	**	**	**	**
Vorticella sp.	**	**	**	**
Cothurnia sp.	-	-	**	***

* обычный вид, ** массовый вид, *** доминант, прочерк -вид не обнаружен

Видовой состав и состав комплекса массовых видов цилиоценоза за прошедший период претерпели значительные изменения. Индекс видового сходства между фауной инфузорий в 2001-2004 гг. и 2021-2022 гг. очень низкий – 30%.

На основании литературных (Круглова, 1962, 1972; Минoранский, Саяпин, 2002; Харин, 1948) и полученных нами данных (2001-2022) о составе и структуре сообщества инфузорий озера Маныч-Гудило можно сказать, что оно не имеет специфической, исторически сложившейся фауны, т.к. фауна озера состоит из привнесенных различными путями видов-космополитов, адаптирующихся к условиям, складывающимся в тот или иной период. За время исследования нами был обнаружен только один вид, являющийся понто-каспийским эндемиком – *Plagiopila binucleata* Agamaliev, 1978 (Агамалиев, 1983).

Примером изменений может служить сообщество планктонных инфузорий-тинтинниид. По нашим и литературным данным до 2001 г. здесь встречались 5 видов тинтинниид (Кренёва и др., 2005; Минoранский, Саяпин, 2002). В 2001 г. в озере Маныч-Гудило нами был обнаружен инвазивный вид тинтиннид *Eutintinnus lususundae* Entz, 1885 (Кренёва и др., 2005). В Черном и Азовском море, уровень его развития невысок (1,3-25 тыс.экз./м^3), а период активного развития приурочен к концу лета – началу осени (Гаврилова, 2001, Кренёва, 2003). В озере Маныч-Гудило, вплоть до последнего времени, он встречался в весенний и осенний периоды, в 2017-2018 гг. единичные экземпляры этого вида начали встречаться в зимний период (Кренёва, 2018), а начиная с 2021 г. этот вид встречается на акватории озера круглогодично. В летний и осенний сезоны этот вид нередко занимает в планктоне доминирующее положение (частота встречаемости до 86%, численность до 3,4 млн.экз/м^3). Параллельно встречаются *Tintinnopsis minuta* Wailes,1925 и единичные экземпляры *Tintinnopsis sp*.. Остальные виды тинтинниид в период 2021-2022 гг. на акватории озера обнаружены не были.

Необходимо также отметить активное распространение по акватории озера жаброногого рачка *Artemia salina* (Linnaeus, 1758). По данным натурных наблюдений, до 2021 г. артемия появлялась в озере Маныч-Гудило на короткое время в весенний период, причём область её распространения ограничивалась прибрежным мелководьем. В 2021 г. этот вид был нами отмечен в осенний период, в 2022 г. отдельные особи отмечались, начиная с марта, а в октябре, при проведении масштабных исследований, охватывающих большую часть акватории озера, было зафиксировано распространение этого вида на открытой части озера, вплоть до 17 станции, т.е. начиная с 42‰. Науплии и взрослые особи артемии питаются детритом, бактерио- и фитопланктоном, т.е. по отношению к инфузориям, может наблюдаться конкуренция за пищевые ресурсы.

Несмотря на перестройку структуры сообщества инфузорий, снижения общего уровня количественных характеристик, в среднем, не наблюдалось. Но увеличилась амплитуда изменений количественных характеристик цилиоценоза: в апреле 2018г. был зафиксирован минимум (0,01 млн. экз./м^3), а в августе 2021г., максимум (до 97 млн. экз./м^3) численности инфузорий за всё время наблюдений. Увеличение диапазона колебаний количественных характеристик может служить показателем увеличения нестабильности сообщества.

Численность инфузорий в октябре 2022 г. была в пределах среднемноголетних значений и колебалась от 0,2 до 4,7 млн. экз./м^3, в среднем – 2,3 млн. экз./м^3.

Анализируя график пространственной динамики численности инфузорий по градиенту солёности (рис. 1) можно увидеть, что в пределах от 4 до 42 ‰, уровень численности инфузорий на порядок ниже, чем на остальной части акватории. При этом видовое разнообразие инфузорий на этом участке выше среднего – 10-15 видов на станции (рис. 2).

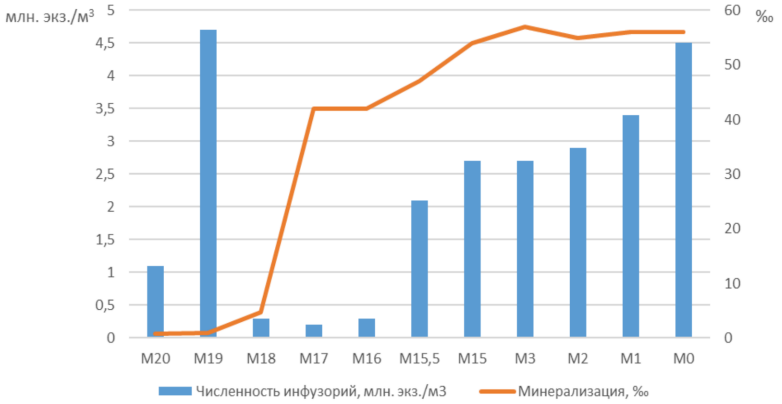


Рис. 1. Пространственная динамика численности инфузорий по градиенту солёности (октябрь 2022 г.)

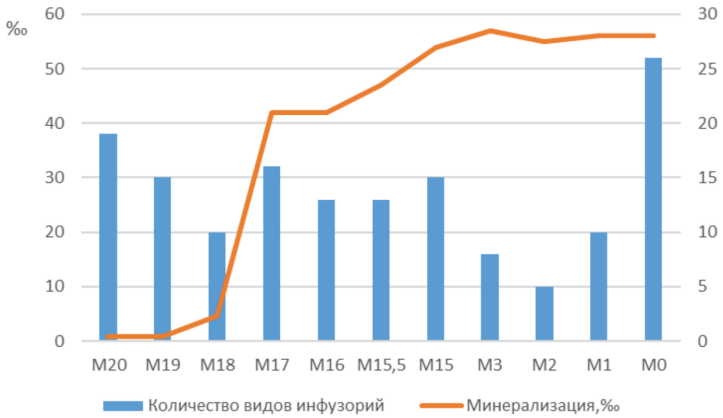


Рис. 2. Пространственная динамика видового богатства инфузорий озера Маныч-Гудило по градиенту солёности (октябрь 2022 г.)

На акватории озера наблюдается разнородность состава сообщества инфузорий по градиенту минерализации. Несмотря на эвригалинность многих встреченных здесь видов, *Cothurnia sp.* – единственный вид, который распространен по всей акватории озера. Начиная с уровня минерализации 42 ‰ и выше, комплекс массовых видов состоит из таких видов, как *Eutintinnus lusundae* Entz, 1885, *Mesodinium pulex* Claparede & Lachmann, 1858 и мелких стромбидиумов. Также, здесь начинают встречаться такие галофильные виды, как *Fabrea salina* Corlis, 1980 и *Uronichia transfuga* (O.F.Müller, 1786). Видовое богатство инфузорий остаётся на высоком для гипергалинного водоёма уровне, на всей акватории озера, независимо от уровня минерализации (рис. 2). Высоким видовым разнообразием отличаются зоны: «пресная» (до 19 видов, станция M20-M19), зона «нитчатых водорослей» (13-16 видов на станции, M15-M17) и прибрежье (26 видов,

М0). Также, высоким видовым разнообразием отличаются плавучие маты, состоящие из отмерших водорослей и бактериальных плёнок (до 20 видов). Наименьшее видовое разнообразие наблюдалось в глубоководной зоне (3-4м) открытой акватории (5-7 видов на станции, М2-М3).

Таким образом, прогрессирующее осолонение озера Маныч-Гудило повлекло за собой перестройку состава и структуры сообщества инфузорий, увеличило амплитуду изменений количественных характеристик цилиоценоза, но не вызвало снижения их уровня**.** Количественные характеристики сообщества, в среднем, находятся на прежнем уровне за счет смены доминантных видов.

Работа подготовлена в рамках Государственного задания ЮНЦ РАН №125012100503-4.

Литература

Агамалиев Ф.Д. Инфузории Каспийского моря. Систематика, экология, зоогеография. Л.: Наука, 1983. 232 с.

Гаврилова Н.А. Eutintinnus (Ciliophora, Oligotrichida, Tintinnina, Tintinnidae) – новый для фауны Черного моря род раковинных инфузорий // Экология моря. 2001. Вып. 58. С. 29-31.

Клещенков А.В., Сойер В.Г., Алёшина Е.Г., Григоренко К.С., Милутка М.С., Олейников Е.П., Булышева Н.И., Сушко К.С. Гидрометеорологические и гидрологохимические условия восточной части пролетарского водохранилища и водоёмов долины Маныча в современный период // Труды Южного научного центра РАН. 2018. Т. 7. С. 38-56.

Кренёва К.В. *Eutintinnus lususundae* (Entz, 1885) – вид раковинных инфузорий, новый для фауны Азовского моря// Эволюция морских экосистем под влиянием вселенцев и искусственной смертности фауны / Тез. докл. междун. конф. Ростов-на-Дону, 2003. С. 20-21.

Кренёва К.В. Состояние сообщества микрозоопланктона в водоёмах бассейна озера Маныч-Гудило в условиях сильного весеннего паводка. // Труды Южного научного центра РАН. 2018. Т. 7. С. 114-117.

Кренева С.В., Саяпин В.В., Кренева К.В., Поважный В.В., Свистунова Л.Д. Зоопланктон: предварительные исследования // Маныч-Чограй: история и современность (предварительные исследования). Ростов-на-Дону: Изд-во Эверест, 2005. С. 77-95.

Круглова В.М. Веселовское водохранилище. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1962. 116 с.

Круглова В.М. Пролетарское водохранилище. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1972. 180 с.

Миноранский В.А, Саяпин В.В. Некоторые замечания по водной фауне озера Маныч-Гудило и прилегающих степных водоемов // Труды Государственного заповедника «Ростовский». Ростов-на-Дону: ООО «ЦВВР», 2002. С. 63-87.

Павловская Т.М., Празукин А.В., Шадрин Н.В. Сезонные явления в сообществе инфузорий гиперсоленого озера Херсонесское (Крым) // Морск. экол. журн. 2009. Т. 8(2). С. 53–63.

Харин Н.Н. Зоопланктон Манычских водохранилищ // Уч. зап. РГУ, Тр. НИЕИ. 1948. Т. 12. Вып. 1.

Шадрин Н.В., Ануфриева Е.В. Экосистемы гиперсолёных водоёмов: структура и трофические связи // Журнал общей биологии. 2018. Т.79. №6. С. 418-428.

TRANSFORMATION OF THE CILATE COMMUNITY OF LAKE MANYCH-GUDILO IN CONDITIONS OF GROWTH IN WATER MINERALIZATION

K.V. Kreneva

In October 2022, studies of the state of the ciliatocenosis of Lake Manych-Gudilo were conducted. Serious changes in the water balance and an increase in mineralization (from 32 to 84.5%) of the lake waters caused a restructuring of the structure and composition of the ciliate community and affected the level of quantitative development of its components. The restructuring of the structure and changes in the composition of the mass species complex are also due to an increase in the role of the universal species, *Eutintinnus lususundae* Entz, 1885.

ОСОБЕННОСТИ ФАУНЫ ВЕТВИСТОУСЫХ РАКООБРАЗНЫХ (CRUSTACEA: CLADOCERA) В МАЛЫХ ВОДОЕМАХ ГОРОДА МОСКВЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМА ОХРАНЫ ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ТЕРРИТОРИИ

И.И. Кроленко

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН

В работе проанализированы пробы зоопланктона, отобранные в малых водоемах на территории "старой Москвы" в осенний период в разные годы. Из 157 изученных водоемов, на момент отбора проб 73 располагались в границах ООПТ города Москвы, 84 за их пределами. Всего выявлено 47 видов ветвистоусых ракообразных, 40 видов в неохраняемых и 42 вида в охраняемых водоемах. Фауны обоих типов водоемов демонстрируют высокое сходство, в то время как количество видов на водоем для охраняемых территорий значимо выше. Обсуждаются механизмы, ответственные за выравнивание видового состава ветвистоусых ракообразных на территориях Москвы с разным режимом охраны.

Целью работы является сравнение видового состава ветвистоусых ракообразных, выявленного в процессе обследования малых водоемов города Москвы, в зависимости от охранного статуса прилегающей территории. Особо охраняемые природные территории (ООПТ) города Москвы решают противоречивые задачи сохранения ценных природных сообществ и рекреационные задачи. В литературе описаны разные закономерности, определяющие видовое разнообразие фауны мегаполисов (Szulkin et al., 2020), но большая часть работ сосредоточена на растительных сообществах, авифауне и почвенных сообществах. Ветвистоусые ракообразные являются важной модельной группой для биологического мониторинга экосистем (Коровчинский и др., 2021, Smirnov 2017), но исследованность их в Москве еще недостаточна (Mityaeva et al., 2024).

В исследование вошли 164 качественные пробы, отобранные из 157 водоемов на территории «Старой Москвы» в период с 1998 до 2021 года в осенние месяцы, большая часть этого материала опубликована (Mityaeva et al., 2024) и дополнена пробами из коллекции А.А. Котова ИПЭЭ РАН. Отбор и обработка проб осуществлена в соответствии с протоколом, описанным в (Mityaeva et al., 2024). Для данного исследования использованы только объекты, определенные до видового уровня.

Водоемы оценивались как принадлежащие к ООПТ («охраняемые»), или находящиеся вне переделов ООПТ («неохраняемые») на основании изучения карты и списка особо охраняемых природных территорий на сайте Правительства Москвы (ООПТ …, 2024), 73 водоема отнесены к охраняемым, 84 к неохраняемым. Виды отнесены к двум основным образам жизни на основании опубликованных работ

(Коровчинский и др., 2021, Mityaeva et al., 2024): планктонно-нейстонный (PL) и бентосно-фитофильные (BP). Результаты представлены в таблице.

Таблица. Виды, обнаруженные на территории Москвы, с отнесением к фаунистическим комплексам (Котов, 2016) и образу жизни

Наименование	FC	WOL	неохраняемый	охраняемый
Acroperus angustatus	WE	BP		+
Acroperus harpae	WE	BP	+	+
Alona guttata	WR	BP	+	+
Alonella excisa	WR	BP	+	+
Alonella exigua	WR	BP	+	+
Biapertura affinis	WR	BP	+	+
Bosmina longirostris	WR	PL	+	+
Camptocercus rectirostris	WE	BP	+	+
Ceriodaphnia dubia	WR	PL	+	
Ceriodaphnia laticaudata	WR	PL	+	+
Ceriodaphnia pulchella	WR	PL	+	+
Ceriodaphnia quadrangula	WR	PL	+	+
Ceriodaphnia reticulata	WR	PL		+
Ceriodaphnia rotunda	WR	PL	+	
Chydorus sphaericus	WE	BP	+	+
Coronatella rectangula	WR	BP	+	+
Daphnia cucullata	WE	PL	+	+
Daphnia curvirostris	WE	PL	+	+
Daphnia galeata	WE	PL	+	+
Daphnia longispina	WR	PL	+	+
Daphnia magna	WR	PL	+	+
Daphnia pulex	WR	PL	+	+
Diaphanosoma brachyurum	WE	PL	+	+
Disparalona rostrata	WE	BP	+	+
Flavalona costata	WR	BP		+
Graptoleberis testudinaria	WR	BP	+	+
Ilyocryptus agilis	WR	BP	+	+
Ilyocryptus cuneatus	WE	BP	+	+
Ilyocryptus sordidus	WE	BP	+	
Leptodora kindtii	WE	PL		+
Leydigia acanthocercoides	WE	BP	+	
Macrothrix laticornis	WE	BP	+	+
Megafenestra aurita	WE	PL		+
Moina brachiata	WE	PL	+	+
Moina macrocopa	WE	PL	+	
Oxyurella tenuicaudis	WE	BP		+
Pleuroxus aduncus	WR	BP	+	+
Pleuroxus laevis	WE	BP		+
Pleuroxus trigonellus	WE	BP	+	+
Pleuroxus truncatus	WE	BP	+	+
Pleuroxus uncinatus	WE	BP	+	+
Polyphemus pediculus	WR	BP	+	+
Pseudochydorus globosus	WE	BP	+	+
Scapholeberis mucronata	WR	PL	+	+
Sida crystallina	WE	BP	+	+
Simocephalus serrulatus	WR	BP	+	+
Simocephalus vetulus	WR	BP	+	+

Использовано 783 определения, обнаружено 47 видов, отнесенных к двум фаунистическим комплексам (табл.). Кривые накопления видов для охраняемых и неохраняемых водоемов идут параллельно, приближаясь к выходу на плато, что говорит

о хорошей, но неполной исследованности (Colwell, 2014). Наилучшей была признана модель Bootstrap, предсказывающая для неохраняемых водоемов присутствие 44 видов, а для охраняемых в 48 видов при выявленных 40 и 42, соответственно. Форма кривых предполагает, что в охраняемых водоемах мы можем ожидать большего количества новых видов при увеличении числа исследований, чем в неохраняемых. Но даже при экстраполяции до равного размера выборок в сто проб, разрыв остается несущественным, в приделах стандартного отклонения. В неохраняемых водоемах отмечено 16 планктонных и 24 бентосных вида, а в охраняемых водоемах – также 16 планктонных видов, бентосных видов 26. Состав по фаунистическим комплексам для города Москвы ожидаемый, более половины видов принадлежит к широко распространённым европейским видам, остальные - к группе широко распространенных видов, ожидающих ревизии (Котов, 2016).Среднее число видов на водоем для охраняемых оказывается значимо выше, 5.63±0.36, тогда как для неохраняемых число видов на водоем 4.42±0.34 (тест Манна-Уитни $z=1.855$, $p=0.0382$). Общеизвестная биогеографическая закономерность связывает число видов в экосистеме с ее площадью, были проверены различия в средней площади (десятичный логарифм) исследованных охраняемых и неохраняемых водоемов, значимых различий не было выявлено (средние значения 3.39±0.09 и 3.53±0.11 соответственно, тест Манна-Уитни $z=1.0966$, $p=0.2797$). Регрессионная модель связи числа видов с площадью водоема при этом демонстрирует значимую положительную связь, хотя и небольшой силы ($n=157$, $r=0.25$, $r^2=0.06$, $F=10.44$ $p=0.0014$), для охраняемых водоемов эта связь чуть сильнее ($n=73$, $r=0.31$, $r^2=0.10$, $F=7.33$ $p=0.0062$), а для неохраняемых незначима ($n=84$, $r=0.16$, $r^2=0.02$, $F=2.23$, $p=0.1467$).

В соответствии с прогнозом (Mityaeva et al., 2024), увеличение числа обследованных водоемов привело к умеренному росту числа выявленных видов в общем списке (47 против 45 таксономических групп в предыдущем исследовании). В разрезе фаунистических комплексов, Москва (по крайней мере в масштабах исследованной осенней фауне малых водоемов) демонстрирует предсказуемую однородность, в отличие от ранее исследованных переходных зон биоразнообразия (Garibian et al., 2020). По образу жизни, зарегистрировано примерно равное количество видов планктонного и бентосного образа жизни. При этом, по результатам нашего исследования, можно утверждать, что видовой состав микроракообразных незначительно различается между водоемами, находящимися в границах ООПТ, и вне их. Значения индекса филогенетического разнообразия (Clarke, Warwick 1998) практически одинаковы для обоих видов водоемов: 2.821 (доверительный интервал 2.624-2.959) для неохраняемых и 2.835 (2.630-2.948) для охраняемых водоемов. Индекс доминирования несколько ниже среди охраняемых водоемов 0.057±0.007 против 0.073±0.012 в неохраняемых, но различие также незначимо. Фаунистическое богатство на территории города находится под противоречивыми воздействиями (Szulkin et al., 2020) и для ряда таксономических групп показано большее видовое богатство в антропогенных, чем в природных ландшафтах (Dearborn, Kark, 2010). Имеет место приток видов-вселенцев и синантропных видов, и под воздействием антропогенных влияний изменяется среда обитания. Изменения могут иметь различную природу, создаются новые местообитания и изменяются старые. Традиционно, максимум внимания в городской экологии сосредоточен на антропогенных загрязнениях: помимо химического загрязнения (нитраты, металлы, ПАВ), имеет место тепловое загрязнение, оказывающее влияние на гидробионтов, и световое загрязнение, влияющее на суточные и сезонные ритмы разных организмов (Szulkin et al., 2020). Городские ООПТ, занимающие в «старой Москве» до 18% территории, вероятно предоставляют равную защиту не от всех видов загрязнений. Наблюдаемая однородность фаун может иметь несколько объяснений, исходящих как из свойств самих водоемов, так и свойств ветвистоусых ракообразных.

1. Водная система ООПТ тесно интегрирована с территориями урбанистического каркаса города. Ручьи и реки, формирующие пруды как на территории ООПТ, так и за их пределами, на всем протяжении могут иметь существенный уровень загрязнения (Евграфов и др., 2023, Савушкина и др., 2018). Одна река может начинаться в одной ООПТ, проходить в коллекторе и формировать пруды вне ООПТ, и далее формировать пруды на территории другой ООПТ. Помимо того, перенос загрязнений происходит с осадками и с поверхностным стоком (Савушкина и др., 2018).

2. Противоречивые функции городских ООПТ приводят к тому, что в целях эстетического улучшения, водоемы на их территории подвергаются чистке с глубокой реконструкцией береговой полосы и дна, так же, как и вне ООПТ (ГУП …, 2024). Следствием такой реконструкции может являться потеря разнообразия фауны микроракообразных в виду разрушения мест их обитания и уничтожения банка пропагул в донных отложениях.

Образ жизни и расселительные способности ветвистоусых ракообразных дают им возможность достаточно быстро восполнять свою численность и занимать новые местообитания, благодаря наличию партеногенетически размножающихся поколений, и банку покоящихся стадий (пропагул), одновременно являющихся основной расселяющейся стадией (Коровчинский и др., 2021, Smirnov 2017). Наличие в Москве большого количества водоемов разных типов, в том числе речной системы, а также постоянной (круглогодичной) популяции околоводных птиц, обеспечивает хорошие условия для выравнивания видового состава сходных между собой водоемов. Несмотря на эти противоречивые влияния, мы наблюдаем статистически значимое превышение числа выявляемых видов на водоем в границах ООПТ, независимо от его размера. Можно предположить, что на охраняемых территориях водоемы реже подвергаются реконструкции, экранированы от части загрязнений, и в них образуется более сложно структурированные биотопы, на что косвенно указывает большее количество видов бентосного образа жизни, встреченных в них. Регрессионный анализ связи числа видов с площадью показал, что в отличие от охраняемых водоемов, неохраняемые водоемы при увеличении площади не демонстрируют соответствующего роста числа выявленных видов ветвистоусых ракообразных. Это может быть следствием неоднородности среди таких водоемов по важным для видового разнообразия параметрам: сроку существования, в том числе после реконструкции, уровням разнородных загрязнений (не только химических, но и другой природы), что требует дальнейшего изучения.

Литература

ГУП Мосводосток. Реконструкция водоемов https://xn--b1aesfkbbawel.xn--p1ai/vodojomy-v-rabote/ (дата обращения 15.01.2025).

Евграфов А.В., Косов Н.С., Цветкова А.В. Влияние экологических условий на состав зоопланктона в среднем течении реки Лихоборка // Тимирязевский биологический журнал. 2023. №1. С. 73–79.

Коровчинский Н.М., Котов А.А., Синёв А.Ю., Неретина А.Н., Гарибян П.Г. Ветвисттоусые ракообразные (Crustacea: Cladocera) Северной Евразии. Т. I, II. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2021.

Котов А.А. Фаунистические комплексы Cladocera (Crustacea, Branchiopoda) Восточной Сибири и Дальнего Востока России // Зоологический журнал. 2016. 95. С. 748–768.

ООПТ Москвы список: https://www.mos.ru/eco/function/departament/oopt-moskvy/ (дата обращения 15.01.2025)

Савушкина Е.Ю., Петрова О.И., Степанова М.В. Многолетние эколого-геохимические исследования поверхностных водотоков ландшафтного заказника

«Тёплый Стан» // Геология, геоэкология, эволюционная география. Т. XVII. СПб.: Издво РГПУ им. А. И. Герцена. 2018.

Colwell R.K., Elsensohn J.E. EstimateS turns 20: statistical estimation of species richness and shared species from samples, with non-parametric extrapolation // Ecography. 2014. 37. P. 609–613.

Dearborn D.C., Kark S. Motivations for conserving urban biodiversity. Conservation Biology 2020. 24. P. 432–440.

Garibian P.G., Neretina A.N., Korovchinsky N.M., Sinev A.Y., Tchabovsky A.V., Kotov A.A., Smirnov N.N. The Southern part of Russian Far East and Korean Peninsula as a transition zone between the boreal and tropical faunas of the water fleas (Cladocera, Crustacea). // Zoologicheskiy Zhurnal. 2020. 99. P. 1094–1109.

Clarke K.R., Warwick R.M. A taxonomic distinctness index and its statistical properties. Journal of Applied Ecology. 1998. 35. P. 523–531.

Mityaeva K.Yu., Neretina A.N., Garibian P.G., Kotov A.A., Petrovskiy A.B. Fauna and local associations of water fleas (Crustacea: Branchiopoda: Cladocera) in small water bodies of Moscow City // Arthropoda Selecta. 2024. 33(4). P. 480–492.

Smirnov N.N. Physiology of the Cladocera. London: Academic Press, 2017.

Urban evolutionary biology. Oxford: Oxford University Press, 2020.

FEATURES OF THE FAUNA OF WATER FLEAS (CRUSTACEA: CLADOCERA) IN SMALL WATER BODIES OF MOSCOW DEPENDING ON THE PROTECTION REGIME OF THE ADJACENT TERRITORY

I.I. Krolenko, A.B. Petrovsky, A.A. Kotov

The work analyzes zooplankton samples collected in small water bodies in the territory of "old Moscow" in the autumn period in different years. Of the 157 studied water bodies, at the time of sampling, 73 were located within the boundaries of protected areas of the city of Moscow, 84 outside them. A total of 47 species of Cladocera were identified, 40 species in unprotected and 42 species in protected water bodies. The faunas of both types of water bodies demonstrate high similarity, while the number of species per water body for protected areas is significantly higher. The mechanisms possibly making the species composition of water fleas similar in city areas with different protection regimes are discussed.

ТАКСОНОМИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ПРОКАРИОТ ХЕМОКЛИНОВ ПРЕСНОВОДНЫХ МЕРОМИКТИЧЕСКИХ ОЗЕР СЕВЕРА АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Т.И. Ловдина[1], С.Д. Прасолов[1], Т.Я. Воробьева[1], Н.С. Прилуцкая[1], А.С. Аксенов[2]

[1]ФИЦ комплексного изучения Арктики УрО РАН им. академика Н.П. Лаверова

[2]Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова

Проведена оценка таксономического разнообразия прокариот хемоклинов четырех меромиктических озер: материкового Светлое, островных Светленькое, Малый Валдай, Мертвое. Основной используемый метод – секвенирование нового поколения последовательностей гена 16S рРНК (участок V4). В озерах Светленькое и Малый Валдай преобладают метанотрофные прокариоты. В озере Светлое были идентифицированы археи и доминирующими выявлены цианобактерии, метанотрофные

и серные бактерии. Основное разнообразие прокариот озера Мертвое представлено зелеными и пурпурными серобактериями.

Меромиктические озёра представляют собой уникальные водные экосистемы, характеризующиеся разделением на несмешивающиеся слои с различными окислительно-восстановительными условиями и химическим составом. В структуре таких озер выделяют три горизонта: верхний кислородный миксолимнион, придонный бескислородный монимолимнион и переходный хемоклин – слой с резкими изменениями гидрохимических характеристик и сложным микробным сообществом (Gulati et al., 2017).

В сравнительно небольшом слое воды хемоклина активно протекают биогехимические процессы: оксигенный и аноксигенный фотосинтез, хемосинтез, сульфат- и сероредукция, метаногенез и метанокисление. Поэтому хемоклин характеризуется преобладанием специфических видов микроорганизмов, включая анаэробные фототрофные бактерии (зелёные и пурпурные серные бактерии), цианобактерии и археи. Эти организмы адаптированы к условиям с содержанием сульфидов и сероводорода, низкой освещённостью, градиентами физико-химических факторов, растворенных веществ, а также часто имеют смешанный тип питания (Быкова, Уманская, 2012; Khromechek et al., 2021). Исследование особенностей распределения прокариот хемоклина меромиктических озер имеет большое значение для понимания процессов формирования и функционирования в резких редокс условиях.

Объектами исследования являются четыре меромиктических озера Архангельской области: Светлое (Приморский район), Светленькое, Малый Валдай и Мертвое (остров Большой Соловецкий).

Озеро Светлое расположено в бореальной зоне севера европейской части России (Архангельская область) в 70 км от г. Архангельска и относится к водосборному бассейну Белого моря (водосборный бассейн реки Кулой) (Chupakov et al., 2017). На острове Большой Соловецкий для изучения выбраны три меромиктических озера. Два ультрапресных удаленных от побережья водоема Светленькое и Малый Валдай (Климов, Воробьева, 2025; Чупакова и др., 2025). И озеро Мертвое, представляющее собой бывший морской залив, отделившийся в ходе поднятия архипелага от морской акватории. Оно расположено на мысу Карбасный наволок в юго-западной части Долгой губы Соловецкого острова (Стерпул, 1987). Поверхностные воды солоноватые, в летний период их соленость составляла 2,5 psu, в зимний 3,8 – 4,5 psu, ко дну соленость возрастала до 16,5-18,5 psu (Воробьева и др.,2024). Основные физико-химические параметры хемоклинов озер приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные физико-химические параметры хемоклинов озер

Озеро	Глубина хемоклина, м	Температура, С	pH	УЭП, мкСм/см	ОВП, мВ
Светлое	22,0-24,0	4,54-4,29	7,29-7,37	293-408	267-(-49)
Светленькое	15,0–17.0	4,20-4,40	5,04-5,81	54-80	173-(-61)
Малый Валдай	13,0-15,0	4,41-4,39	4,78-5,91	54-77	238-(-90)
Мертвое	2,5-3,5	13,20-7,80	8,00-7,20	10550-18130	-

Исследуемые водоемы различны по содержанию минерализации, pH, содержанию органических веществ, протекающим биогеохимическим циклам и, соответственно, сообществам бактерий и архей. Поэтому целью работы являлось проанализировать состав микробных сообществ хемоклинов островных и материковых озер Архангельской области.

Отбор проб воды для изучения микробных сообществ производился в конце июля 2024 с помощью горизонтального поликарбонатного батометра Aquatic Research

в стерильные емкости. Концентрирование прокариот проводили на фильтрах из смешанных эфиров ацетата и нитрата целлюлозы (GSWP, Millipore). Для этого профильтровали максимальный объем проб с помощью поликарбонатных вакуумных фильтрационных установок с объемом воронки 250 мл (Sartorius). Установки предварительно стерилизовали в автоклаве при 121°C и давлении 0,5 бар 30 минут.

ДНК прокариот воды озер выделяли с помощью набора PureLink Microbiome DNA Purification Kit (Thermo Fisher Scientific). ПЦР проводили с универсальными праймерами F515/R806 на вариабельный участок гена 16SрРНК-V4 (GTGCCAGCMGCCGCGGTAA / GGACTACVSGGGTATCTAAT) (Bates et al., 2011). ПЦР продукты очищали по рекомендованной Illumina методике с использованием AMPureXP (Beckman Coulter). Подготовку библиотек для прибора Illumina MiSeq (Illumina) проводили в ЦКП «Геномные технологии и клеточная биология» ФГБНУ ВНИИСХМ РАСХН (г. Пушкин) с использованием набора реактивов MiSeq ReagentKit (600 cycle) с двусторонним чтением (2*300 н). Обработка полученных данных проводилась аналогично работе (Melnichuk et al., 2019). Вычисление индексов альфа-разнообразия проводили в программе PAST (Hammer et al., 2001).

Для полученных результатов секвенирования проб озер были рассчитаны и оценены индексы альфа-разнообразия и представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения индексов альфа-разнообразия

Озеро	Количество прочтений	Индекс Chao	Индекс Shannon
Светлое	11644	268	3,94
Светленькое	11715	352	4,67
Малый Валдай	21444	490	4,89
Мертвое	48020	322	3,02

В озере Малый Валдай наблюдается большое количество уникальных прочтений гена 16S рРНК, при этом индексы Chao и Shannon в хемоклине этого озера являются наибольшими среди озер, что указывает на высокое прокариотическое разнообразие. Несмотря на то, что в озере Мертвое количество прочтений больше, чем в остальных, индекс Shannon имеет наименьшее значения, указывающие на высокое доминирование какого-либо таксона. Аналогичная ситуация с доминированием единичных таксонов отмечается и в озере Светлое, при том, что количество прочтений гена 16S рРНК в 4 раза меньше. Характер бактериального разнообразия в земоклине озера Светленькое схож с озером Светлое, однако преобладание какого-либо таксона в этом озере, судя по индексу Shannon, выражено слабо.

По результатам секвенирования было получено таксономическое распределение бактерий и архей хемоклинов четырех меромиктических озер по филумам (рис.).

Археи были идентифицированы только в хемоклине озера Светлое. Доля архей семейства *Methanoregulaceae* филума *Halobacterota* составляет 0,22 %.

Доминирующими в хемоклинах озер Светлое, Светленькое, Малый Валдай и Мертвое являются филумы *Proteobacteria* (25,47; 46,33; 43,79 и 9,57 %), *Bacteroidota* (21,65; 5,67; 3,83 и 44,36 %) и *Actinobacteriota* (8,51; 4,64; 5,63 и 6,43 %). Так же в островных озерах Светленькое, Малый Валдай и Мертвое идентифицированы филумы *Verrucomicrobiota* (5,04; 4,09 и 2,12 %) и *Planctomycetota* (0,67; 0,68 и 0,53 %). Филум *Acidobacteriota* обнаружен только в озерах Светленькое (1,31 %) и Малый Валдай (1,96 %). Только в озере Мертвое идентифицированы представители филума *Firmicutes* (2,18 %). Филумы *Cyanobacteria* (19,31 %) и *Patescibacteria* (2,87 %) распространены только в озере Светлое.

Разнообразие доминирующих бактериальных семейств имеют большее сходство в озерах Светленькое и Малый Валдай. Озера имеют схожие физико-химические параметры, следовательно, и одинаковые тенденции протекания биогеохимических

циклов, обуславливающее таксономические разнообразие и распределение прокариот. Так, озера Светленькое и Малый Валдай представлено неклассифицированными представителями порядка *Burkholderiales* (14,57 и 20,99 %), участвующими в окислении метана (Yu et al., 2019). При этом доля семейства *Burkholderiaceae* составляет около 4 % в каждом из этих хемоклинов. Также многочисленным озерах Светленькое и Малый Валдай является семейство *Methylomonadaceae* (10,58 и 4,49 %), осуществлявшее большую часть аэробного окисления метана (Smith et al., 2018). Среди метанотрофных прокариот обнаружены представители семейства *Methylophilaceae* (Doronina et al., 2014), их доля в каждом хемоклине составляет около 2 %. Доли семейств *Comamonadaceae* и *Sporichthyaceae* составляют около 5 % от всех идентифицированных прокариот в этих озерах. Среди преобладающих в хемоклинах озер Светленькое и Малый Валдай идентифицировано семейство *Chitinophagaceae* (3,47 и 2,51 %, соответственно).

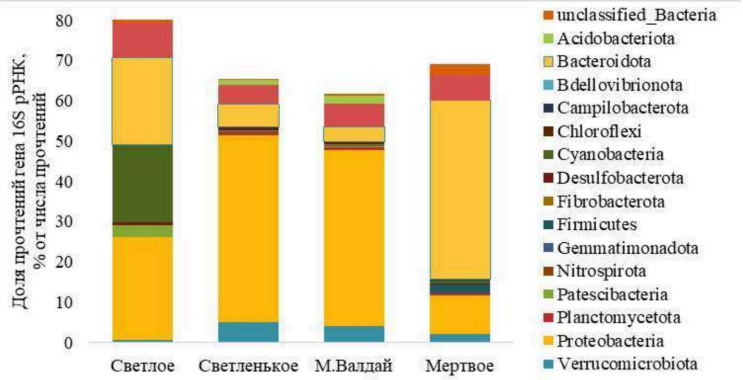


Рис. Распределение бактерий и архей хемоклинов меромиктических озер по филумам

Для хемоклина озера Светлое характерны многие из вышеописанных семейств озер Светленькое и Малый Валдай. Доля семейства *Methylophilaceae* (9,25 %) в материковом озере немного выше, семейства *Sporichthyaceae* (4,96 %) примерно одинакова, а семейства *Methylomonadaceae* (6,82 %) меньше, чем в Светленьком и больше, чем в Малом Валдае. Характерными только для озера Светлое являются семейства Cyanobiaceae (19,14 %), *Chlorobiaceae* (12,32 %), *Saccharimonadaceae* (2,87 %) и *Ilumatobacteraceae* (1,30 %). Как было описано ранее, цианобактерии относятся к роду *Synechococcus* (Забелина и др., 2014; Kallistova et al., 2019) и содержат пигменты – хлорофилл а и фикоэритрин, придающий воде слабо розовую окраску. Присутствие серных бактерий семейства *Chlorobiaceae* связано с высоким содержанием сероводорода в придонных горизонтах озера (Kokryatskaya et al., 2018) .

Таксономическое разнообразие прокариот озера Мертвое имеет мало сходств с другими объектами исследования, что несомненно связано с его природой происхождения. Так, самым доминирующим является семейство зеленых серных бактерий *Chlorobiaceae* (35,57 %), окисляющих сероводород. Известно о высокой концентрации этого газа с 3 метров озера (Стерпул, 1987). Идентифицировано еще два семейства прокариот цикла серы - пурпурных серобактерий *Thiomicrospiraceae* (3,54 %) (Brazelton, Baross, 2010) и *Rhodobacteraceae* (1,79 %) (Cao et al., 2024). Многочисленными также являются представители семейств *Flavobacteriaceae* (5,60 %), *Microbacteriaceae* (4,19 %), и *Crocinitomicaceae* (2,91 %).

Таким образом, в работе проведена таксономическая идентификация прокариот хемоклином меромиктических озер. Несмотря на сходство доминирующих филумов водоемов, в озерах Светленькое и Малый Валдай преобладают метанотрофные прокариоты. В озере Светлое были идентифицированы археи и доминирующими выявлены цианобактерии, метанотрофные и серные бактерии. Основное разнообразие прокариот озера Мертвое представлено зелеными и пурпурными серобактериями.

Работа выполнена при финансовой поддержке (проект 124053000002-7) по соглашению от 17.04.2024 № 8 между ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН и Минэкономпромнауки АО и в рамках выполнения FUUW-2025-0041.

Литература

Быкова С.В., Уманская М.В. Микромасштабное распределение простейших и бактерий в хемоклине меромиктического водоема // Вода: химия и экология. 2012. Т. 9. С. 45-51.

Воробьева Т.Я., Ловдина Т.И., Климов С.И. Микробные сообщества стратифицированных и сезонно стратифицированного озер острова Большой Соловецкий // III Юдахинские чтения. Архангельск: Кира, 2024. С. 110-113.

Стерпул Э. Особенности Мертвого озера (остров Соловецкий) и его население // Труды лаборатории экологии морского бентоса Дворца пионеров им. В. Алексеева. Ленинград, 1987. С. 1-12.

Brazelton W., Baross J.A. Metagenomic comparison of two thiomicrospira lineages inhabiting contrasting deep-sea hydrothermal environments // PLoS ONE. 2010. V. 5. №10. e13530.

Doronina N., Kaparullina E., Trotsenko Y. The Family Methylophilaceae // The Prokaryotes. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. P. 869-880.

Gulati R.D., Zadereev E.S., Degermendzhi A.G. Ecology of Meromictic Lakes: Ecological Studies. Vol. 228. Cham: Springer International Publishing, 2017. 405 p.

Hammer O., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. Vol. 4. №1. P. 1-9.

Khromechek E.B., Barkhatov Y.V., Rogozin D.Y. Community structure and vertical distribution of planktonic ciliates in the saline meromictic lake Shira during breakdown of meromixis // Ecohydrology & Hydrobiology. 2021. Vol. 21. №1. P. 142-152.

TAXONOMIC DIVERSITY OF PROKARYOTES OF CHEMOCLINES OF FRESHWATER MEROMICTIC LAKES IN THE NORTH OF THE ARKHANGELSK REGION

T.I. Lovdina, S.D. Prasolov, T.Ya. Vorobyova, N.S. Prilutskai, A.S. Aksenov

The taxonomic diversity of prokaryotes of the chemocline of four meromictic lakes was assessed: mainland Svetloe, island Svetlenkoe, Maly Valdai, and Mertvoe. The main method used is the 16S rRNA next-generation sequencing (V4 region). The lakes Svetlenkoe and Maly Valdai are dominated by methanotrophic prokaryotes. In Lake Svetloe, archaea were identified and cyanobacteria, methanotrophic and sulphur bacteria were found to be dominant. The main diversity of prokaryotes in Lake Mertvoe is represented by green and purple sulfur bacteria.

МАКРОФИТЫ ОЗЕРА АРХИЕРЕЙСКОЕ (ТАТАРСТАН), ПО МАТЕРИАЛАМ ЭКСПЕДИЦИИ 2024 ГОДА

Д.С. Любарский, Р.П. Токинова, С.В. Бердник
Институт проблем экологии и недропользования АН РТ

На основе материалов экспедиции 2024 г. изучена макрофитная флора озера Архиерейского (Республика Татарстан). Список обнаруженных растений включает 56 видов; настоящие водные растения представлены 19 видами, из которых 5 – водоросли. Растительностью покрыто 37.5% площади дна озера. Основной вклад приходится на гидрофиты – 35.3%. Наибольшее участие в зарастании имеют фитоценозы с доминированием *Ceratophyllum demersum* (20.0%) и *Elodea canadensis* (14.7%).

Особо охраняемые природные территории в силу своего статуса находятся под наблюдением, что особенно актуально для территорий, подвергающихся повышенной антропогенной нагрузке. Озеро Архиерейское (Тарлашинское) является памятником природы регионального значения.

Озеро карстово-суффозионное, водораздельное, расположено в Лаишевском районе Татарстана (N55.55° E49.14°). Имеет вытянутую форму – 2.5 км длиной и до 0.49 км шириной, протяженность береговой линии – 6.6 км; максимальная глубина – 22 м; площадь водного зеркала 67 га. Питание смешанное с преобладанием подземного и грунтового типов (Постановление…, 2009).

Водоём является одним из наиболее глубоких и крупных по площади в республике. Несмотря на его примечательность, очень немногое известно о его растительном покрове. По имеющимся источникам, для озера отмечается присутствие таких макрофитов, как *Nuphar lutea* (Мельникова, 2016; inaturalist.org), *Elodea canadensis*, преобладающей «в ярусе погруженной растительности» на глубинах от 0.5 до 2.6 м, а также *Myosoton aquaticum* и *Hippuris vulgaris* (Набеева, 2022).

Макрофиты, как компонент экосистемы водоёма, имеют важное значение – являясь прямыми конкурентами фитопланктону, препятствуют «цветению воды»; переводят круговорот вещества в более долгие циклы (Мережко, 1977), стабилизируют гидрохимический режим; являются кормовой базой и убежищем для фауны, способствуя разнообразию последней; богатый флористический мир является отражением устойчивости экосистемы.

Гидроботанические исследования озера, проведены в июле – августе 2024 г. Описание водной и прибрежно-водной растительности осуществлено по общепринятым методам (Катанская, 1956; Папченков, 2001). Изучение растительности проведено путем детально-маршрутного обследования.

Исходя из особенностей ландшафта, озеро можно разделить на три части: южную с обширными мелководьями, срединную и северную – с проявлениями карста. Северная часть озера окружена частной застройкой поселка Тарлаши, подходящей вплотную к урезу воды.

Растения исследованы на 63 пробных площадках, расположенных на 8 заложенных профилях, а также вне их. Составлены карты-схемы зарастания озера, на которые нанесены контуры растительных сообществ с обозначением доминантов. Береговая линия, размеры и форма озёр определены по спутниковым фотоснимкам (Yandex.ru, SAS.Планета), с использованием данных батиметрической съёмки ИПЭН АН РТ. Показатели степени зарастания озёр рассчитаны как отношение площади зарослей на водоёме к площади акватории, выраженное в процентах (Папченков, 2001).

Экологические группы растений флоры водоёма выделены в соответствии с

принятой системой (Папченков, 2001). Номенклатура видов приводится по следующим сводкам и определителям (Виноградова и др., 1980; Папченков, 2001; Черепанов, 1981).

Флора озера Архиерейского включает 56 видов (42 родов и 31 семейства (табл.)). Большая часть из них, 50 видов (или 89.3%), относится к высшим сосудистым растениям, ко мхам – 1, к водорослям – 5.

Настоящие водные растения представлены 19 видами, что составляет 33.9% от флоры водоёма. Среди них водоросли – 5 видов, высшие сосудистые растения – 14: папоротник и покрытосеменные (табл.); отсутствуют мхи. Прибрежно-водные – 18 видов (гелофиты – 10 и гигрогелофиты – 8) сосудистых растений; околоводные – 19 (гигрофиты – 15. гигромезофиты и мезофиты – 4).

Комплекс гидрофитов включает в себя растения всех экологических групп данного экотипа. Наиболее крупная из них группа погруженных прикрепленных к почве растений (табл.), в ту же группу входят и наиболее массовые виды.

Наличие всех пяти экологических групп растений в сложении гидрофитного комплекса может свидетельствовать об удовлетворительных и стабильных условиях озера.

Гидрофитами покрыто около 35.3% площади водоёма от уреза до глубин в 2.5–3.3 м. Лидирующее положение в сложении растительного покрова занимают два вида: *E. canadensis* (14.7%), занимающая горизонт от уреза воды до глубины 1–1,4 м, и *C. demersum* (20.0%), располагающийся следующим, более глубоким поясом до глубины 2.5–3.3 м. Отмечается более глубоко заходящий растительный покров в южной – до 3.3 м – части озера в сравнении с северной, где доходит до 2.5 м глубины. Такая тенденция коррелирует с выявленными показателями прозрачности: около 2 м в северной части и до 3–3.3 м – в южной.

Распределение видов флоры по озеру неравномерно. В северной части, в близости от построек, широкое распространение получают водоросли (табл.): *Genicularia* образует здесь густые «дерновины», а сине-зелёные *Lyngbya* встречаются видимыми невооруженным глазом скоплениями. Заливы южной части озера показывают высокое – вдвое, в сравнении с северной и срединной – богатство сосудистых растений (табл.), в частности, все виды рода *Potamogeton* выявлены только здесь и приурочены к зарослям элодеи.

Среди погруженных растений отсутствуют мхи (экогруппа «макроводорослей и мхов» (Папченков, 2001)), однако обнаружены их остатки в донных илах, что может являться свидетельством некоего кризиса, имевшего место в истории озера.

Прибрежно-водными и околоводными растениями занято около 2.2% площади водоёма, преимущественно вдоль береговой линии. Лидирующие положения в сложении растительности приходятся на *Carex cespitosa*, *Phragmites australis* и *Sparganium emersum* (табл.). Распределение видов околоводных и прибрежно-водных по разным частям озера достаточно равное, с незначительным увеличением богатства в южной оконечности.

В результате проведенных исследований установлено, что современное видовое разнообразие водных, прибрежно-водных и околоводных растений в оз. Архиерейское представлено не менее, чем 56 видами макрофитов, в числе которых: сосудистые – 51 вид (мхи – 1, папоротники – 2, хвощ – 1) и водоросли – 5 видов. Основная доля флоры представлена гидрофитами – 33.9%, гелофиты составляют 17.9%, гигрогелофиты – 14.3%, гигрофиты – 26.8%, гигромезофиты и мезофиты – 7.1%.

Растительностью покрыто 37.5% площади дна водоёма. Основной вклад приходится на группу настоящих водных растений (35.3%), а среди них – на *Ceratophyllum demersum* – 20.0% и *Elodea canadensis* – 14.7%.

Таблица. Видовой состав макрофитов озера Архиерейское, занимаемая ими площадь, экологическая приуроченность и встречаемость в северной (С), срединной (Ц) и южной (Ю) частях озера

№	Семейства	Виды	Площадь*		ЭТ	Встречаемость		
			га	%		С	Ц	Ю
	СОСУДИСТЫЕ РАСТЕНИЯ – TRACHEOPHYTA							
	Отдел Цветковые растения – Magnoliophyta							
	Класс двудольные – Magnoliopsida							
1	Apiaceae	*Oenanthe aquatica* (L.)			III	+		+
2	Asteraceae	*Bidens tripartita* L.			IV	+	+	+
3	Ceratophyllaceae	*Ceratophyllum demersum* L.	13.4	20.0	I:3	+	+	+
4	Lamiaceae	*Scutellaria galericulata* L.			IV	+	+	+
5	– “” –	*Lycopus europeus* L.			IV	+	+	+
6	– “” –	*Mentha arvensis* L.			IV		+	
7	– “” –	*Stachis palustris* L.			IV	+	+	+
8	Lythraceae	*Lythrum salicaria* L.			II	+	+	+
9	Nymphaeaceae	*Nuphar lutea* (L.)	0.1	0.2	I:4	+		+
10	Onagraceae	*Epilobium palustre* L.			IV	+	+	+
11	Polygonaceae	*Persicaria amphibia* (L.)			I:4		+	+
12	– “” –	*Rumex hydrolapathum* Huds.			III	+	+	+
13	– “” –	*Rumex aquaticus* L.			III	+	+	
14	Primulaceae	*Lysimachia vulgaris* L.			IV	+	+	+
15	Rosaceae	Filipendula ulmaria (L.)			IV		+	
16	Salicacae	*Salix alba* L.			IV	+		
17	– “” –	*Salix aurita* L.			IV	+	+	+
18	– “” –	*Salix caprea* L.			V	+		
19	– “” –	*Salix euxina* Belyaeva			IV	+	+	+
20	– “” –	*Salix myrsinifolia* Salisb.			IV			+
21	Urticaceae	*Urtica dioica L.*			V	+		
	Класс Однодольные – Liliopsida							
22	Alismataceae	*Sagittaria sagittifolia* L.	0.3	0.4	II	+	+	+
23	Araceae	*Calla palustris* L.			III	+		+
24	Butomaceae	*Butomus umbellatus* L.			II			+
25	Cyperaceae	*Eleocharis acicularis* (L.)			III			+
26	– “” –	*Eleocharis palustris* (L.)			III	+	+	+
27	– “” –	*Carex cespitosa* L.	0.7	1.0	IV	+	+	+
28	– “” –	*Carex pseudocyperus* L.			IV			+
29	Hydrocharitaceae	*Hydrocharis morsus-ranae* L.			I:5	+	+	+
30	– “” –	*Elodea canadensis* Michx.	10.0	14.7	I:3	+	+	+
31	Iridaceae	*Iris pseudacorus* L.			III		+	
32	Lemnaceae	*Spirodela polyrhiza* (L.)			I:5	+	+	+
33	– “” –	*Lemna minor* L.			I:5	+	+	+
34	– “” –	*Lemna trisulca* L.			I:2	+	+	+
35	Poaceae	*Phalaroides arundinacea* (L.)			IV		+	+
36	– “” –	*Glyceria maxima* (Hartm.)			II	+	+	+
37	– “” –	*Agrostis gigantean* Roth			V	+		+
38	– “” –	*Phragmites australis* (Cav.)	0.5	0.7	II	+	+	+
39	Potamogetonaceae	*Potamogeton compressus* L.			I:3			+
40	– “” –	*Potamogéton crispus* L			I:3			+
41	– “” –	*Potamogeton natans L.*	0.3	0.4	I:4			+
42	– “” –	*Potamogeton perfoliatus* L.			I:3			+
43	– “” –	*Potamogeton trichoides* Cham. & Schltdl.			I:3			+
44	Sparganiaceae	*Sparganium erectum* L.			II			+
45	– “” –	*Sparganium emersum* Rehmann			II	+	+	+
46	Typhaceae	*Typha lathifolia* L.			II		+	
47	– “” –	*Typha angustifolia* L.			II	+	+	+

№	Семейства	Виды	Площадь*		ЭТ	Встречаемость		
			га	%		С	Ц	Ю
	Отдел Папоротниковидные – Polypodiophyta							
	Класс Папоротниковые – Polypodiopsida							
48	Salviniaceae	*Salvinia natans* (L.)			I:5	+		+
49	Thelypteridaceae	*Thelypteris palustris* Schott	0.1	0.1	III			+
	Отдел Хвощовые – Equisetophyta							
	Класс Хвощовые – Equisetopsida							
50	Equisetaceae	*Equisetum fluviatile* L.			II	+	+	+
	Отдел Мохообразные – Bryophyta							
	Класс Листостебельные мхи – Bryopsida							
51	Amblystegiaceae	*Hygroamblystegium humile* (P.Beauv.)			V			+
	ВОДОРОСЛИ – ALGAE							
	Тип Харофиты – Charophyta							
	Класс Конъюгаты, или Сцеплянки – Zygnematophyceae							
52	Gonatozygaceae	Геникулярия – *Genicularia sp.*			I:1	+	+	+
	Тип Зеленые – Chlorophyta							
	Класс Ульвофициевые – Ulvophyceae							
53	Cladophoraceae	*Cladophora glomerata* (L.)			I:1	+	+	+
54	– “” –	*Rhizoclonium hieroglyphicum (Ag.)*			I:1	+		
	Тип Цианобактерии, или Сине-зеленые водоросли – Cyanobacteria							
	Класс Cyanophyceae							
55	Oscillatoriaceae	*Oscillatoria* Vauch.			I:1	+		
56	Microcoleaceae	*Lyngbya* sp.			I:1	+		
	Всего:		25.4	37.5	56	38	33	45
	Водные (ЭТ I)				19	13	9	16
	Прибрежно-водные (ЭТ II, III)				18	12	12	15
	Околоводные (ЭТ IV, V)				19	13	12	14

Примечание: * – площадь, занимаемая растениями доминирующих видов. ЭТ – экологические типы водных растений (по Папченков, 2001): V – гигромезо- и мезофиты, IV – гигрофиты, III – гигрогелофиты, II – гелофиты, I – гидрофиты, включая экологическая группы: 1 – водоросли и мхи, 2 – свободно плавающие в толще воды, 3 – погруженные прикрепленные к почве, 4 – укореняющиеся с плавающими на воде листьями, 5 – свободно плавающие на поверхности воды.

Среди гидрофитов присутствуют растения всех экологических групп, что может говорить об удовлетворительных и стабильных условиях, сложившихся в озере.

Из четырех, известных для флоры озера по литературе, видов растений – хвостника, мягковолосника, элодеи и кубышки, первый нами не выявлен, второй присутствует в водоохранной зоне озера, однако, будучи растением влажных лугов, не относится к флоре водоёма.

Литература

Виноградова К.Л., Голлербах М.М., Зауер Л.М., Сдобникова Н.В. Зеленые, красные и бурые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. Л., 1980. Т. 13. 248 с.

Государственный реестр особо охраняемых природных территорий в Республике Татарстан. Казань, 2007.

Катанская В.М. Методика исследования высшей водной растительности // Жизнь пресных вод СССР. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1956. Т. 4, Ч. 1. С. 160–182.

Мельникова А.В. Зообентос озёр Архиерейское и Чёрное Лаишевского района Республики Татарстан // Труды Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника. Казань: Фолиант, 2016. Вып. 7.

Мережко А.И. К вопросу о роли высших водных растений в детоксикации вредных веществ в водоемах // Материалы 1-й Всесоюз. конф. «Высшие водные и прибрежно-водные растения». Борок, 1977. С. 20–22.

Папченков В.Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль: МУБиНТ, 2001. 213 с.

Черепанов С.К. Сосудистые растения СССР. Л.: Наука, 1981. 509 с.

iNaturalist (Электронный ресурс) URL: https: //www.inaturalist.org (Дата обращения: 10.12.2024)

MACROPHYTES OF LAKE ARKHIYEREYSKOYE (TATARSTAN): MATERIALS FROM THE 2024 EXPEDITION

D.S. Lyubarskiy, R.P. Tokinova, S.V. Berdnik

Based on materials from the 2024 expedition, the macrophyte flora of Arkhiyereyskoye Lake (Laishevsky District, Republic of Tatarstan) was studied. The list of identified plants includes 56 species. True aquatic plants are represented by 19 species, 5 of which are algae. Vegetation covers 37.5% of the lake area. The main contribution is attributed to hydrophytes (35.3%). The greatest participation in overgrowth is observed in phytocenoses dominated by *Ceratophyllum demersum* (20.0%) and *Elodea canadensis* (14.7%).

ФИТОПЛАНКТОН ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА В 2020-2023 ГГ.

О.А. Ляшенко[1], Г.Ф. Ляшенко[1], Е.В. Протопопова[2]

[1]Санкт-Петербургский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л.С. Берга»)

[2]Институт озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН

Фитопланктон Ладожского озера исследовали по всей акватории на 25 станциях в июне и августе-сентябре 2020-2023 гг. Состав доминирующего комплекса фитопланктона в исследованные периоды сезонной сукцессии в 2020-2023 гг. был сходен, его основу в начале лета составляли диатомовые и криптофитовые, в летне-осенний период – цианопрокариоты, диатомовые и криптофитовые водоросли. В июне 2020-2023 гг. средние и медианные величины биомассы фитопланктона в целом для акватории озера были сходны и близки к 1 г/м^3, в августе-сентябре межгодовые различия достигали 2-х раз, наибольшие величины также были близки к 1 г/м^3. Результаты исследований показали стабильность как уровня количественного развития фитопланктона, так и структуры его доминирующего комплекса в многолетнем аспекте.

Наиболее крупное в Европе Ладожское озеро – уникальный природный объект. Озеро играет ключевую роль в экономике Европейской части РФ, в том числе – как крупнейший источник водных и рыбных ресурсов. Воды озера практически полностью определяют сток р. Невы, которая оказывает значительное воздействие на формирование вод восточной части Финского залива Балтийского моря, а также является источником водоснабжения г. Санкт-Петербурга (Современное …, 2021).

Морфометрическая неоднородность Ладожского озера определяет значительный диапазон изменения гидрофизических и гидрохимических параметров, формируя специфические условия для развития гидробионтов, в частности фитопланктона – основного первичного продуцента экосистемы Ладожского озера.

Фитопланктон исследовали на 25 стандартных станциях, расположенных по всей акватории озера. Ежегодно проводили две съемки – в июне и августе-сентябре.

Пробы фитопланктона отбирали батометром Паталаса в трофогенном слое (до глубины, соответствующей утроенной прозрачности по диску Секки, через каждый метр). Пробы фиксировали раствором Люголя с добавлением уксусной кислоты и формалина, концентрировали фильтрационным методом с использованием мембранных фильтров с диаметром пор 0,8-1,2 мкм. Подсчёт водорослей проводили в счетной камере объёмом 0,01 мл. Биомассу фитопланктона рассчитывали счетно-объемным методом на основании размеров клеток водорослей, определяемых в процессе камеральной обработки. Таксономический состав фитопланктона определяли в процессе обработки количественных проб. Доминирующими считали систематические группы водорослей или отдельные таксоны рангом ниже рода, составляющие не менее 10% общей численности или биомассы фитопланктона.

В период наблюдений 2020-2023 гг. состав доминирующего комплекса фитопланктона в исследованные периоды его сезонной сукцессии в межгодовом аспекте был сходен.

В июне биомасса фитопланктона изменялась от 0,1 до 5,3 г/м^3 и обусловливалась преимущественно развитием криптомонад и диатомовых, в состав доминантов входили также желтозелёные и цианопрокариоты, в отдельных случаях – золотистые водоросли.

На уровне таксонов рангов ниже рода основными доминантами в июне были криптофитовые рода Cryptomonas и *Komma caudata,* диатомовые *Aulacoseira islandica, A. subarctica, Tabellaria fenestrata,* желтозелёная *Tribonema affine,* золотистая *Dinobryon divergens,* цианопрокариота *Aphanizomenon flosaquae.*

В августе-сентябре биомасса варьировала в диапазоне 0,2–3,9 г/м^3, основу доминирующего комплекса составляли цианопрокариоты, диатомовые и криптофитовые, в отдельных районах в состав доминантов входили зелёные и золотистые водоросли.

На уровне таксонов рангов ниже рода доминировали преимущественно цианопрокариоты *Aph. flos-aquae, Woronichinia naegeliana, W. compacta,* криптофитовые рода Cryptomonas и *K. caudata*, а также *Aulacoseira granulata, A. islandica, A. subarctica*, *T. fenestrata*, *T. affine* и зелёная *Botryococcus braunii.*

В начале лета (июнь) 2020-2023 гг. средние и медианные величины биомассы фитопланктона в целом для акватории озера были сходны и близки к 1 г/м^3. В августе - сентябре межгодовые различия средних и медианных биомасс были более существенны и достигали 2-х раз, наименьшими величинами выделялся 2023 г., а максимальные величины, как и в июне, были близки к 1 г/м^3 (рис. 1).

В июне и августе-сентябре наибольшими величинами биомассы выделялись Волховская и Свирская губы, наименьшими – Шлиссельбургская (рисунок 2). Различия максимальных и минимальных средних величин в июне составили 2,4 раза, в августе-сентябре - 3 раза.

Различия в продуктивности отдельных районов озера определялись спецификой их гидрофизических и гидрологических условий, в отдельных случаях – разными этапами сезонной сукцессии фитопланктона в период проведения съемок.

В целом по данным последних лет наблюдений можно отметить отсутствие заметных изменений биомассы от начала лета к началу осени в 2020-2022 гг., биомасса фитопланктона значительно снизилась за период между двумя съемками только в 2023 г. Сезонные изменения доминирующего комплекса выражались преимущественно в увеличении доли цианопрокариот в биомассе при сохранении значительного содержания диатомовых и криптофитовых.

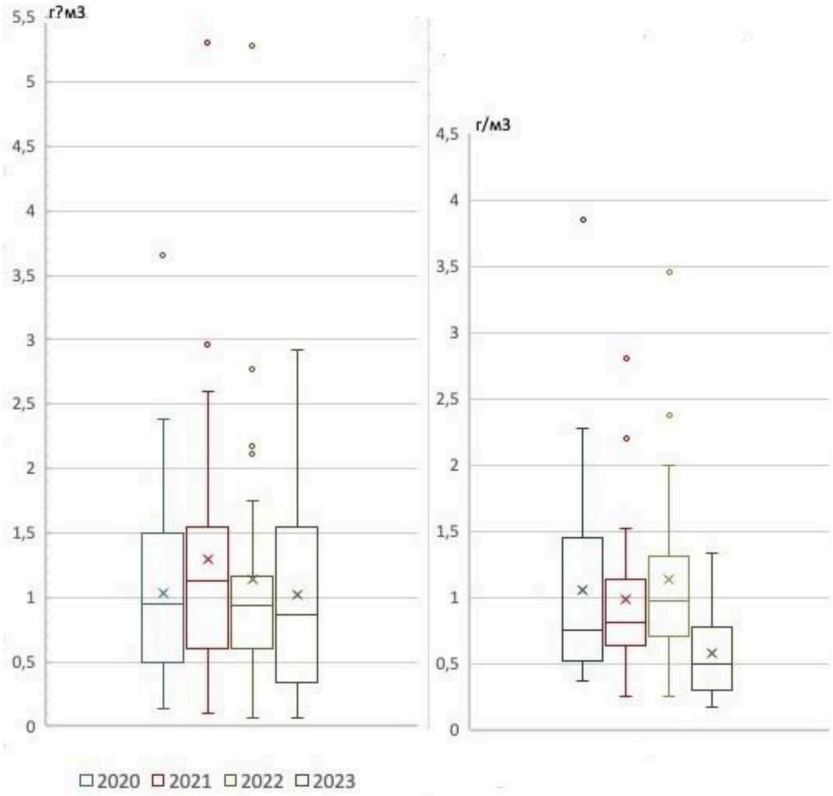


Рис. 1. Биомасса фитопланктона Ладожского озера в июне (слева) и августе-сентябре (справа) в 2020-2023 гг.

С начала XXI века количественные показатели фитопланктона Ладожского озера варьировали в относительно небольших пределах, внутри которых межгодовые вариации в значительной степени определялись погодными условиями (Летанская, 2002; Летанская Протопопова, 2003, 2013; Сухопарова, Терешенкова, 1995; Терешенкова, Ляшенко, 2009; Современное …, 2021). Исследования последних лет также показали стабильность как уровня количественного развития фитопланктона, так и структуры его доминирующего комплекса.

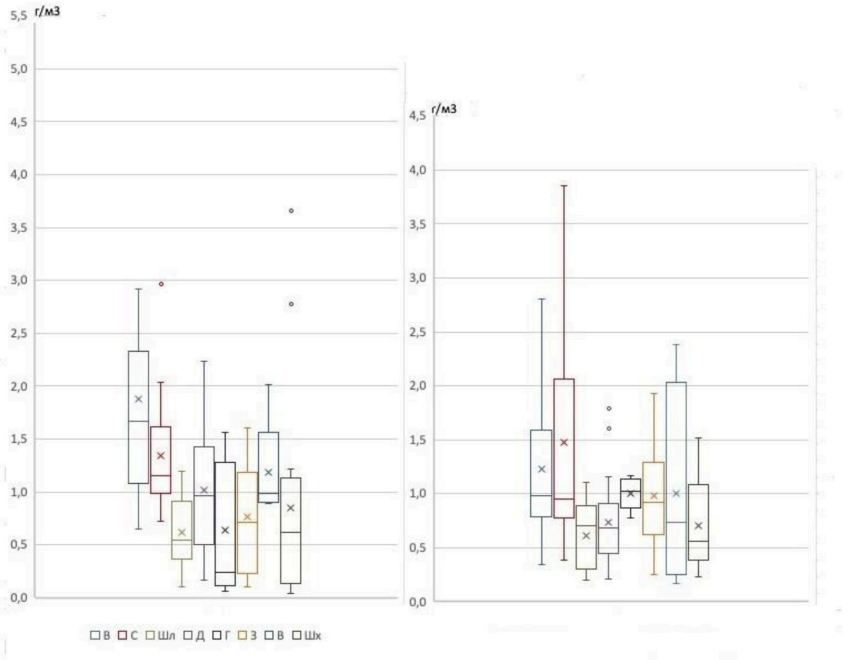


Рис. 2. Биомасса фитопланктона в июне (слева) и августе-сентябре (справа) в различных районах акватории Ладожского озера в 2020-2023 гг.
В – Волховская губа; С – Свирская губа; Шл – Шлиссельбургская губа;
Д – Деклинальный район; Г – Глубоководный район; З – Западный район;
В – Восточный район; Шх – Шхерный район

Литература

Летанская Г.И. Современное состояние фитопланктона и тенденция его изменения в период летней стратификации // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 165–175.

Летанская Г.И., Протопопова Е.В. Осенний мониторинг фитопланктона Ладожского озера (1992-2002 гг.) // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды. Материалы II Международной научной конференции. Минск, 2003. С. 299-301.

Летанская Г.Н., Протопопова Е.В. Фитопланктон Ладожского озера // Ладога. 2013. С. 349-363.

Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. М., 2021. 640 с.

Сухопарова Е.Ю., Терешенкова Т.В. Характеристика фитопланктона южной части Ладожского озера по материалам рыбохозяйственного мониторинга (1989-1992 гг.) // Сб. науч. трудов ГосНИОРХ. 1995. Вып. 314. С. 101-134.

Терешенкова Т.В., Ляшенко О.А. Современное состояние летнего фитопланктона южной части Ладожского озера (по данным рыбохозяйственного мониторинга) //

Рыбохозяйственное исследование больших озер Северо-Запада Европейской части России // Сб. научн. трудов ФГНУ «ГосНИОРХ». 2009. Вып. 334. С. 5-32.

THE PHYTOPLANKTON OF LAKE LADOGA IN 2020-2023

O.A. Liashenko, G.F. Liashenko, E. V. Protopopova

The phytoplankton of Lake Ladoga was studied across the lake at 25 stations in June and August-September from 2020 to 2023. The composition of the dominant phytoplankton complex during the periods of seasonal succession was similar. At the beginning of summer, it was dominated by diatoms and cryptophytes, while in the summer-autumn period the cyanobacteria, diatoms, and cryptophyte algae prevailed. In June and August-September from 2020 to 2023, the average and median values of phytoplankton biomass for the lake were similar and close to 1 g/m³. However, interannual differences in August-September varied up to twofold. The highest values were also close to 1 g/m³. The study results demonstrated the stability of both phytoplankton biomass levels and the structure of its dominant complex from a long-term perspective.

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА ОЗЁРНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ: ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ОТВЕТ ЗООПЛАНКТОНА

А.Б. Медвинский[1], Б.В. Адамович[2], Н.С. Минаев[1], Н.И. Нуриева[1], Н.П. Радчикова[1,3], А.В. Русаков[1], Д.А. Тихонов[1,4], Ю.В. Тютюнов[5]

[1]Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН

[2]Белорусский государственный университет

[3]Московский государственный психолого-педагогический университет

[4]Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Институт математических проблем биологии

[5] Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону

Мы сравнили математические выражения, которые используются при математическом моделировании функционального ответа хищников/потребителей, с результатами анализа функционального ответа зоопланктона в экосистеме Нарочанских озёр. Показано, что те математические выражения, которые учитывают интерференцию зоопланктеров, в большей мере соответствуют функциональному ответу зоопланктона в Нарочанских озёрах.

Целью данной работы является оценка роли интерференции зоопланктеров в динамике планктона экосистемы Нарочанских озёр. Эта экосистема представляет собой три связанных между собой протоками водоёма с различным трофическим статусом: озеро Баторино (эвтрофный водоём), озеро Мястро (мезотрофный водоём) и озеро Нарочь (олиго-мезотрофный водоём).

В качестве инструмента для исследования динамических свойств планктона Нарочанских озёр мы используем KDD-подход, в рамках которого осуществляется прямое включение данных мониторинга экосистемы Нарочанских озёр в математическое описание динамики планктона (Medvinsky et al., 2023).

Сравнение математических выражений, которые широко используются при математическом моделировании функционального ответа хищников/потребителей, с результатами анализа функционального ответа зоопланктона в экосистеме Нарочанских

озёр позволило выявить такие математические выражения, которые лучше всего соответствуют функциональному ответу зоопланктона в Нарочанских озёрах. Ими оказались математические выражения, которые учитывают интерференцию зоопланктеров.

Работа поддержана грантом РНФ 23-24-00408.

MATHEMATICAL ANALYSIS OF LAKE ECOSYSTEM MONITORING RESULTS: FUNCTIONAL RESPONSE OF ZOOPLANKTON

A.B. Medvinsky, B.V. Adamovich, N.S. Minaev, N.I. Nurieva, N.P. Radchikova, A.V. Rusakov, D.A. Tokhonov, Yu.V. Tyutyunov

We compared the mathematical expressions used in the mathematical modeling of the functional response of predators/consumers with the results of the analysis of the functional response of zooplankton in the ecosystem of the Naroch Lakes. It is shown that those mathematical expressions that take into account the interference of zooplankters are more consistent with the functional response of zooplankton in the Naroch Lakes.

ВЛИЯНИЕ ТОВАРНОГО РЫБОВОДСТВА НА РЫБНОЕ НАСЕЛЕНИЕ ОЗЕР КАРЕЛИИ

Н.П. Милянчук, Я.А. Кучко, Н.В. Ильмаст
Институт биологии Карельского научного центра РАН

Отмечено, что активное развитие форелеводства в Карелии оказывает значительное влияние на систему биотических сообществ озерных экосистем и приводит к их перестройке. Изменение условий существования отражается на видовом составе, соотношении таксономических групп, структуре популяций и количественных показателях зоопланктона, бентоса и рыб. В составе рыбного населения водоемов наблюдается сокращение численности ценных видов рыб, преимущество получают виды с весенним нерестом - карповые и окуневые.

Изучение закономерностей формирования и функционирования сообществ гидробионтов в разнотипных водных экосистемах под влиянием природных и антропогенных факторов является одной из фундаментальных задач гидробиологии (Решетников и др., 1982; Алимов, 2000, 2016; Дгебуадзе, 2000; Павлов, Стриганова, 2005; Криксунов и др., 2010; Стерлигова, Ильмаст, 2009; Стерлигова и др., 2016). Наиболее уязвимым компонентом биосферы, которая может существенно изменяться под влиянием хозяйственной деятельности человека является водная среда с населяющими ее организмами. В наибольшей степени антропогенному воздействию подвержены континентальные водоемы, в частности озера, реки и водохранилища. Особенно чувствительны к негативным воздействиям человека геологически молодые водные системы Европейского Севера, к которому территориально относится Республика Карелия (Стерлигова и др., 2018).

Площадь Республики Карелия составляет 172,4 тыс. км^2, и для нее характерно уникальное изобилие озер (более 60 тысяч). В ее пределах находится около 50% акватории Ладожского и 80% – Онежского озер, являющихся крупнейшими пресноводными водоемами Европы. Самую многочисленную группу (более 50 тысяч)

составляют озера от 1 до 9 га. В этой группе преобладают водоемы, не имеющие видимого стока («бессточные»), которые представлены в основном лесными озерками (ламбами). Озер от 10 до 99 га выявлено чуть более 7 тысяч, от 100 до 999 га – 1250, площадью 1000 га и более всего 155 (Озера Карелии, 1959, 2013; Каталог озер Карелии, 2001). Озерность территории республики достигает 21%, этот показатель является одним из самых высоких в мире.

В северных озерах отмечена низкая продуктивность озер (1–3 кг/га). Наблюдаемое значительное сокращение запасов и падение уловов ценных промысловых рыб привело к интенсификации работ, направленных на интродукцию новых видов и разработку биотехники культивирования различных организмов. Как показала практика, самым перспективным и экономически выгодным направлением в Республике Карелия является садковое рыбоводство в естественных водоемах, главным образом выращивание радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum).

Исследования по опытному выращиванию радужной форели в Карелии начали проводиться в 1960–е гг. в основном с целью изучения возможности выживания рыб в озерных условиях (Горбунова, Дмитриенко, 1964; Арендаренко, 1968, 1976). На основании этих работ было установлено, что Карелия является северной границей выращивания радужной форели в озерах с естественным ходом температур.

Товарным производством радужной форели в садках занимаются в республике с 1980–х гг. и за более чем 40–летний период объемы ее выращивания значительно выросли. В настоящее время в Республике Карелия функционирует более 70 фермерских хозяйств, и она является лидером по производству форели в России.

Успешному развитию этого направления способствуют благоприятные климатические условия региона (длительный световой период во время вегетации, оптимальная температура, большие запасы чистой воды и др.), наличие транспортных сетей и квалифицированных кадров. Быстрый темп роста объемов форелеводства обеспечивается благодаря помощи, оказываемой предпринимателям в рамках приоритетного национального проекта «Развитие Агропромышленного комплекса», в который по инициативе Правительства Республики Карелия с 2007 г. включено товарное рыбоводство.

Бурное развитие форелеводства в республике, может и уже оказывает значительное влияние на систему биотических сообществ озерных экосистем и приводит к их перестройке (Рыжков, 2002; Китаев и др., 2003, 2006). Установлено, что основными источниками загрязнения при выращивании радужной форели в садках являются корм, продукты метаболизма, и как показали результаты гидрохимических анализов последних лет, лимитирующими факторами служат биогены (азот и фосфор). Как известно, дополнительное поступление биогенных элементов в водоемы, влечет за собой снижение прозрачности воды, увеличение биомассы первичной продукции фитопланктона, а также других начальных звеньев трофической цепи. Ухудшается кислородный режим, возникают новые ассоциации перифитона, отмечается ежегодное “цветение” воды, усиленное образование детрита и заиление грунтов (Решетников и др., 1982; Комулайнен, 1998 и др.). Изменение условий существования отражается на видовом составе, соотношении таксономических групп, структуре популяций и количественных показателях зоопланктона, бентоса и рыб.

В странах с хорошо развитыми комплексами по выращиванию аквакультуры (Финляндия, Норвегия, Дания, Швеция) уже в конце XX века до 80 % биогенов поступало в моря. В России все поступающие с форелевых ферм биогены остаются во внутренних водоемах. В некоторых озерах с товарным выращиванием радужной форели выявлены структурные перестройки альгофлоры, зоопланктона, бентоса и ихтиофауны. Отличия в структуре альгофлоры могут быть следствием поступления сточных вод с

рыбозавода, обогащенных биогенами (Стерлигова и др., 2018). Значительно возрастает биомасса зоопланктона, в его составе появляются коловратки (*Synchaeta stylata, S. pectinata, Polyarthra luminosa),* принадлежащие к группе индикаторов повышенной трофности. Резко увеличивается биомасса бентоса за счет хирономид, олигохет, моллюсков и бокоплавов, менее чувствительных к воздействию антропогенных факторов. Происходит постепенное изменение трофического статуса некоторых озер.

В составе рыбного населения водоемов с товарным выращиванием рыбы наблюдается значительное сокращение численности ценных видов рыб, очень чувствительных к содержанию кислорода и биогенов в воде (лосось, сиг, палия, кумжа). Преимущество получают виды с весенним нерестом - карповые и окуневые (плотва, лещ, уклейка, окунь, ерш).

Для предотвращения необратимых последствий на водных экосистемах с товарным выращиванием форели необходимо проведение мониторинговых исследований по всем показателям состояния экосистемы. К ним относятся: общий и аммонийный азот, минеральный фосфор, кислород, перманганатная окисляемость, pH, фитопланктон, зоопланктон, бентос, ихтиофауна, количество и качество используемого корма.

При сохранении водоемов с товарным производством форели в садках в природном состоянии, требуется обратить особое внимание на технологию кормления рыб, и расчет необходимого количества корма в зависимости от массы рыбы и температуры воды. Для исключения возможности накопления донных отложений под садками следует проводить хотя бы раз в три года перемещение садковых модулей в пределах отведенной акватории.

На всех водоемах Республики Карелия с товарным выращиванием форели, следует проводить экологическую экспертизу и корректировку объемов производства, как минимум один раз в 5 лет, на что не раз обращали внимание многие исследователи (Бабий и др., 1995; Китаев и др., 2006; Рыжков и др., 2000; Стерлигова и др., 2011, 2015 и др.). Это должно быть обязательным условием в период эксплуатации ферм и отражено в биологическом обосновании при строительстве новых форелевых комплексов.

Литература

Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб.: Наука, 2000. 147 с.

Алимов А.Ф. Еще раз об экологии. М., СПБ.: Товарищество науч. изд. КМК, 2016. 62 с.

Арендаренко Г.А. Опыт создания маточного стада радужной форели в естественном водоеме // Тез. докл. конф. молодых специалистов. Петрозаводск: ПГУ, 1968. С. 154–155.

Арендаренко Г.А. Методические указания по садковому выращиванию радужной форели в водоемах Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1976. 17 с.

Бабий А.А., Авдеева А.Т., Иванова Н.С., Новосельцева Р.И., Климов А.В. Влияние садкового форелевого хозяйства на разнотипные пресноводные экосистемы // Матер. междун. конф. «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера». Петрозаводск: ПетрГУ, 1995. С. 179–190.

Горбунова З.А., Дмитриенко Ю.С. О возможности выращивания радужной форели в малых озерах Карелии // Рыбное хозяйство Карелии. 1964. Вып. 8. С. 82–86.

Дгебуадзе Ю.Ю. Экология инвазий и популяционных контактов животных: общие подходы // Виды-вселенцы в европейских морях России. Апатиты: КНЦ РАН, 2000. С. 35–50.

Каталог озер и рек Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 290 с.

Китаев С.П., Ильмаст Н.В., Стерлигова О.П. Методы оценки биогенной нагрузки от форелевых ферм на водные экосистемы. Петрозаводск. КарНЦ РАН, 2006. 40с.

Комулайнен С.Ф. О реакции альгоценозов на поступление стоков с форелевой фермы // Проблемы лососевых на Европейском Севере. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. С. 100–110.

Криксунов Е.А., Бобырев А.Е., Бурменский В.А. Обеспеченность ресурсами и ее роль в развитии инвазионных процессов // Общая биология. 2010. Т. 71. № 5. С. 436-451.

Озера Карелии. Петрозаводск: Гос. изд. Карельской АССР, 1959. 619 с.

Озера Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

Павлов Д.С., Стриганова Б.Р. Биологические ресурсы России и основные направления фундаментальных исследований // Фундаментальные основы управления биологическими ресурсами. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2005. С. 4–20.

Рыжков Л.П. Состояние и возможности аквакультуры на Европейском Севере // Матер. науч. конф. «Проблемы воспроизводства, кормления и борьбы с болезнями рыб при выращивании в искусственных условиях». Петрозаводск. ПетрГУ, 2002. С. 14–21.

Рыжков Л.П., Кучко Т.Ю., Кучко Я.А. Выращивание форели в садках. Петрозаводск: ПетрГУ, 2000. 56 с.

Стерлигова О.П., Ильмаст Н.В. Виды-вселенцы в водных экосистемах Карелии // Вопросы ихтиологии. 2009. Т. 49. №3. С. 372-379.

Стерлигова О.П., Ильмаст Н.В., Савосин Д.С. Круглоротые и рыбы пресных вод Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. 224 с.

Стерлигова О.П., Ильмаст Н.В., Кучко Я.А., Комулайнен С.Ф., Савосин Е.С., Барышев И.А. Состояние пресноводных водоемов Карелии с товарным выращиванием радужной форели в садках. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. 127 с.

Стерлигова О.П., Ильмаст Н.В., Китаев С.П. Состояние некоторых водоемов Западной Карелии и их использование под садковое форелеводство // Матер. I всеросс. конф. с междун. участием «Современное состояние биоресурсов внутренних водоемов». М.: АКВАС, 2011. С. 733–737.

Стерлигова О.П., Ильмаст Н.В., Кучко Я.А., Савосин Е.С. Состояние пресноводной экосистемы при товарном выращивании радужной форели в озере Верхнее Пулонгское (Северная Карелия) // Вопросы рыболовства. 2015. Т. 16. № 1. С. 126–132.

THE EFFECT OF COMMERCIAL FISH MANAGEMENT ON THE FISH POPULATION OF KARELIA'S LAKES

N.P. Milyanchuk, Y.A. Kuchko, N.V. Ilmast

It has been shown that progress in trout management in Karelia has a considerable effect on the system of biotic communities in lake ecosystems, resulting in their restructuring. Changes in ambient conditions affect the species composition, taxonomic group ratio, population structure and abundance of zooplankton, benthos and fish. The composition of the lake fish population displays a reduction in the number of valuable fish species, so that spring-spawning species get an advantage.

ТЕЛЕЦКОЕ ОЗЕРО (АЛТАЙ, РОССИЯ) И ЕГО ФИТОПЛАНКТОН СРЕДИ КРУПНЫХ И ГЛУБОКИХ ОЗЕР МИРА: ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И ОБИЛИЯ

Е.Ю. Митрофанова

Институт водных и экологических проблем СО РАН

Крупные и глубокие озера являются уникальными природными объектами с большими запасами чистой питьевой воды. В работе проведено сравнение 19 таких озер мира и Телецкого озера по морфометрическим и гидрологическим характеристикам, которые во многом могут определять развитие фитопланктона в них. Отмечено, что Телецкое озеро отличается гидродинамическими условиями, обусловленными морфометрией и величиной бассейна. Выявлено, что его фитопланктон имеет значительные черты сходства по составу водорослей с преобладанием диатомовых на протяжении большей части года, но отличается низкими количественными показателями и преобладанием мелкоклеточных форм центрических диатомей, доминантов по численности.

Крупные озера (площадь более 500 км^2) играют важную роль и используются человеком для многих целей. Это уникальные природные объекты, в которых сосредоточены основные запасы чистой воды на планете – в 253 озерах с площадью свыше 500 км^2 находится более чем 78% пресной воды (Румянцев и др., 2012). Многие крупные озера являются и глубокими (глубина свыше 100 м). Но из 50 самых глубоких озер мира 30 имеют площадь водного зеркала меньше 500 км^2 (Large ..., 1990) и поэтому не классифицируются как крупные. Телецкое озеро, объект нашего исследования, расположенный в горах Алтая на юге Западной Сибири, относится к их числу, так как площадь его водной поверхности 223 км^2 (Селегей, Селегей, 1978). По классификации П.В. Иванова (1948) оно относится к большим водоемам (100,1-1000 км^2).

Ввиду значительного объема экосистемы крупных и глубоких озер более устойчивы во времени и более инертны под воздействием изменяющихся факторов среды и климата. Состояние озерных экосистем в первую очередь зависит от автотрофного звена в трофической цепи, в том числе фитопланктона (ФП). Мы проанализировали состав и обилие ФП в 19 наиболее крупных и глубоких озерах мира и Телецком озере. Выбранные водные объекты расположены в градиенте высот над уровнем моря от 5 (Ладожское) до 3812 (Титикака) м, имеют максимальные глубины в пределах 127 (Онежское)–1637 (Байкал) м, с площадью водной поверхности от 212 (Лаго Маджори) до 82367 (Верхнее) км^2, отношением площади озера к площади водосборного бассейна 4,5/1 (Малави)–1/91 (Телецкое), объемом водной массы в озере от 37,5 (Лаго Маджори) до 23015 (Байкал) км^3 и временем внешнего водообмена от 4,3 (Боденское) до 5500 (Танганьика) лет (табл. 1). Морфометрические и гидрологические особенности водоемов во многом определяют разнообразие и количество водорослей в планктоне. Телецкое озеро отличается от других исследованных озер малой площадью водной поверхности, большим соотношением площади водоема к площади его водосборного бассейна и малым временем внешнего водообмена. Кроме того, средняя высота водосборного бассейна Телецкого составляет 1940 м над ур.м. (Селегей, Селегей, 1978). Максимальная амплитуда колебаний уровня за год в Телецком озере составляет 608 см (средняя - 150 см), в Байкале - 82 см, в глубоководном рифтовом оз.Танганьика - тоже менее 100 см (Edmond et al., 1993). Все это создает особые гидродинамические условия в водоеме с большим поступлением водных масс низкой температуры (среднегодовая температура воды в озере 4,6 $^{\circ}$C (Селегей, Селегей, 1978)), значительным колебанием уровня воды (максимальная амплитуда колебаний уровня за год в Телецком составляет 608 см, средняя - 150 см (Селегей, Селегей, 1978), в Байкале – 82 см до и 94 см после зарегулирования (Байкал., 1993), в глубоководном рифтовом оз. Танганьика – менее 100 см (Edmond et al., 1993)) и постоянным перемешивание водных масс, что может оказывать существенное влияние на развитие водорослей в планктоне.

Диатомовые, зеленые, золотистые водоросли и цианобактерии присутствуют в озерах любого типа на разных широтах, но соотношение отделов в них отличное. В крупных и глубоких озерах наиболее значимы диатомеи, особенно в пелагиали на

протяжении большей части года, а в период наибольшего прогрева воды значительное развитие получают зеленые водоросли, особенно хлорококковые, в более низких широтах и на низких абсолютных высотах к ним присоединяются цианобактерии. Сравнивая состав ФП Телецкого озера с таковым крупных и глубоких озер мира, можно отметить, что по таксономическому разнообразию (около 400 видов) и систематической структуре он является типичным: диатомовые составляют более половины состава ФП – 53,1%, зеленые – 20,8, цианобактерии – 11,6 и золотистые – 8,6%. По соотношению между четырьмя ведущими отделами ФП Телецкого наиболее близок к Байкалу, с которым озеро связано еще и общностью тектонического происхождения, но ФП Байкала своеобразен наличием эндемиков и массовым развитием диатомовых и перидиниевых подо льдом. Хотя в марте 2024 г. подо льдом Камгинского залива в Телецком озере было выявлено развитие перидинеи из р. *Glenjdinium*. В целом, по преобладанию диатомей имеются черты сходства со всеми вышеперечисленными озерами, кроме Танганьики. Наличие в фитопланктоне Телецкого озера криптофитовых и золотистых флагеллят делает его сходным с Байкалом, а по преобладанию криптофитовых в отдельные сезоны года оно сравнимо с Хантайским водохранилищем и озером Верхнее.

Сравнение средних и максимальных величин биомассы фитопланктона глубоких озер мира, расположенных в порядке их удаления от экватора, показывает тенденцию ее увеличения в озерах умеренного пояса, хотя прямой корреляции этих показателей не

отмечено. В целом биомасса фитопланктона скорее зависит от биолимнологического типа водоема, чем от его широтного положения. Если по составу ФП Телецкое имеет значительные черты сходства со многими озерами, то по количеству отличается низкими значениями, которые сравнимы с таковыми для Байкала в малопродуктивные годы. Одной из особенностей ФП Телецкого является преобладание по численности группы мелкоклеточных центрических диатомей *Pantocsekiella teletskoyensis* Genkal et Mitrofanova sp. nov., *Stephanocostis chantaicus* Genkal et Kuzmina, *Stephanodiscus minutulus* (Kütz.) Cl. et Möll. и *S. binatus* Håkansson et H.J. Kling (P+S+S) с диаметром панцирей от 3 до 7-8 мкм. На них приходится до 30% от общей численности в литорали озера и 46% в пелагиали. При этом доля *P. teletskoyensis* составляет до 95% численности в группе P+S+S. Отмечено, что центрические диатомеи родов *Aulacoseira, Hanmannia, Melosira, Pantocsekiella, Stephanodiscus* являются преобладающими в ФП крупных и глубоких озер, но размеры их клеток, как правило, больше, чем в Телецком озере. Так, в Байкале створки таких видов имеют размеры от 6 до 150 мкм. По размерам клеток преобладающего вида Телецкое сравнимо с оз. Верхним, в котором диаметр створок у *Pantocsekiella delicatula* Hust., доминанта ФП, отмечен в пределах 4-15 мкм. Известно, что более крупный ФП способен поддерживать более высокую удельную скорость метаболизма и роста биомассы, чем более мелкие клетки, когда ресурсы в изобилии, и меньше подвергаться выеданию хищниками (Maranon, 2015).

Таким образом, Телецкое озеро выделяется среди крупных и глубоких озер мира своими морфологическими особенностями и гидрологическими характеристиками, имеет значительные черты сходства по составу ФП с преобладанием диатомовых водорослей на протяжении большей части года, но отличается низкими количественными показателями и преобладанием в планктоне мелкоклеточных форм центрических диатомовых водорослей.

Таблица. Основные морфометрические и гидрологические характеристики некоторых крупных и глубоких озер мира

Озеро	Высота над УМ, м	Длина* Ширина, км	H_{max} (H_{mean}), м	$S_{озера}$, км^2	$S_{озера}$/ $S_{бассейна}$	$V_{озера}$, км^3	Время водооб-мена, лет	Трофи-ческий статус
Евразия								
Боденское (Герма-ния, Швейцария, Австрия)	395	63*14	252 (101)	536	1/22	48	4,3	Э
Женевское (Швей-цария, Франция)	372	73*14	310 (172)	582	1/13	86	11,4	Э
Лаго Маджоре (Италия)	193	66*10	370 (178)	212	1/31	37.5	4,1-7	О
Гарда (Италия)	65	54*18	350 (133)	370	1/6	49	26,6	О-М
Ладожское (Россия)	5	219*125	230 (46.9)	17870	1/15	838	11	М
Онежское (Россия)	33	245*91,6	127 (30)	9720	1/6	284	12	О
Байкал (Россия)	457	636*79,5	1637	31722	1/17	23015	89-509	О
Хантайское (Россия)	65,8	80*25	420 (74)	822	1/15	60	-	О-М
Хубсугул (Монголия)	1645	136*37	262 (138)	2760	1/1,8	383	500	О
Телецкое (Россия)	434	77.8*5.2	323.3 (174)	223	1/91	41.1	5.3-5.6	О
Северная Америка								
Большое Мед-вежье (Канада)	186	320*174	446 (71,7)	31153	20,7/1	2236	124	УО
Большое Неволь-ничье (Канада)	156	*19	614 (73)	28568	1/34	2090	-	О
Верхнее (Канада-США)	183	560*260	406 (147)	82367	1/1,5	12230	191	О
Онтарио (США-Канада)	74	311*85	244 (86)	19684	1/4	1640	6	М
Мичиган (США)	176	494*190	281 (85)	58016	1/2	4900	99	М
Гурон (США-Канада)	176	332*295	229 (59)	59570	1/2,2	3543	22	Э
Тахо (США)	1898	35*19	501 (313)	495	1/2,7	157	650	УО
Южная Америка								
Титикака (Боливия-Перу)	3812	190*80	284 (107)	8372	1/6,9	893	1343	О
Африка								
Танганьика (Тан-зания-ДР Конго-Бурунди- Замбия)	773	673*72	1470 (570)	32900	1/7	18750	5500	М
Малави (Ньяса) (Малави-Мозам-бик-Танзания)	472	584*80	706 (292)	29604	4,5/1	8400	114	О-М

Примечание: H_{max} (H_{mean}) – глубина максимальная и средняя; $S_{оз}$ ($S_{бас}$) – площадь озера и водосборного бассейна; $V_{оз}$ – объем озера; трофность: УО – ультраолиготрофный, О – олиготрофный, О-М – олиготрофно-мезотрофный, М – мезотрофный Э – эвтрофный. Серым цветом выделен объект исследования. Использованная литература: Ладожское.., 2002; Румянцев и др., 2012; Селегей, Селегей, 1978; Encyclopedia.., 2012; Gallina et al., 2013; Kouraev et al., 2007; Large ..., 1990; Marchetto, Musazzi, 2001; Salmaso, 2003; Selegei et al., 2001.

Работа выполнена в рамках госбюджетного проекта № 0306-2021-0001 с использованием научного оборудования ЦКП научно-исслед. судами и электронной микроскопии ИВЭП СО РАН.

Литература

Байкал. Атлас. М.: Федеральная служба геодезии и картографии, 1993. 160 с.

Иванов П.В. Классификация озер по величине и по их средней глубине // Бюл. ЛГУ. 1948. №21. С. 29–36.

Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. 327 с.

Румянцев В.А., Драбкова В. Г., Измайлова А. Великие озера мира. СПб: Лема, 2012. 370 с.

Селегей В.С., Селегей Т.С. Телецкое озеро. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 142 с.

Encyclopedia of lakes and reservoirs. Ed. by L. Bengtsson, R.W. Herschy, R.W. Fairbridge. Springer Dordrecht, Heidelberg, New York, London, 2012. 953 p.

Gallina N., Salmaso N., Morabito G., Beniston M. Phytoplankton configuration in six deep lakes in the peri-alpine region: are the key drivers related to eutrophication and climate? // Aquatic ecology. 2013. Vol. 47, Is. 2. P. 177–193.

Kouraev A.V., Semovski S.V., Shimaraev M.N., Mognard N.M., Legresy B., Remy F. The ice regime of Lake Baikal from historical and satellite data: relation tp air temperature, dynamical, and other factors // Limnol. and Oceanogr. 2007. Vol. 52, № 3. P. 1268–1286.

Large Lakes. Ecological Structure and Function. Ed. By M. M. Tilzer, C. Serruyo. Springer-Verlag, 1990. 720 p.

Marchetto A., Musazzi S. Comprison between sedimentary and living diatoms in Lago Maggiore (N. Italy): implications of using transfer functions // J. Limnol. 2001. V. 60, Is. 1. P. 19–26.

Maranon E. Cell size as a key determinant of phytoplankton metabolism and community structure // Annu. Rev. Mar. Sci. 2015. № 7. P. 241–64.

Salmaso N., Morabito G., Mosello R., Garibaldi L., Simona M., Buzzi F., Ruggiu D. A synoptic study of phytoplankton in the deep lakes south of the Alps (lakes Garda, Iseo, Como, Lugano and Maggiore) // J. Limnol. 2003. Vol. 62, Is. 2. P. 207–227.

Selegei V., Dehandschutter B., Klerks J., Vysotsky A. Physical and geological environment of Lake Teletskoye // Annales Sciences Geologiques. 2001.Vol. 105. P. 1–310.

LAKE TELETSKOE AND ITS PHYTOPLANKTON AMONG THE LARGE AND DEEP LAKES OF THE WORLD: FEATURES OF COMPOSITION AND ABUNDANCE

E.Yu. Mitrofanova

Large and deep lakes are unique natural objects with large reserves of clean drinking water. The work compares 19 such lakes of the world and Lake Teletskoye by morphometric and hydrological characteristics, which can largely determine the development of phytoplankton in them. It is noted that Lake Teletskoye is distinguished by hydrodynamic conditions due to the morphometry and size of the basin. It was revealed that its phytoplankton has significant similarities in the composition of algae with a predominance of diatoms for most of the year, but is distinguished by low abundance and a predominance of small-celled forms of centric diatoms, dominant in numbers.

МИКРОБНЫЕ СООБЩЕСТВА ВОДЫ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗ. БОЛЬШОЕ ГОЛУБОЕ И МАЛОЕ ГОЛУБОЕ (ТАТАРСТАН)

О.В. Морозова, С.В. Бердник, Д.С. Любарский
Институт проблем экологии и недропользования АН РТ

Микробные сообщества воды и донных отложений оз. Большое Голубое и Малое Голубое изучались в сезонной динамике. Установлено, что в течение всего периода исследований вода по всем микробиологическим показателям оценивается как «условно чистая», экологическое состояние водоемов по показателям бактериобентоса также в пределах нормы. В озерах создаются благоприятные условия для роста олиготрофных и бесцветных сероокисляющих бактерий, что свидетельствует о низком содержании органического вещества и активных процессах окисления сульфидов и сероводорода за счет жизнедеятельности серобактерий.

Система Голубых озер расположена на территории государственного природного заказника регионального значения «Голубые озера» (Республика Татарстан) и включает три озера: Большое Голубое, Малое Голубое и Проточное. Озера имеют исключительную природоохранную значимость. Вода отличается высокой прозрачностью и необычным аквамариновым цветом, обусловленным мощным притоком холодных подземных вод, насыщенных сульфатами (Уникальные …, 2001).

Цель исследования определить особенности развития микробных сообществ воды и донных отложений озер Большое Голубое и Малое Голубое в сезонной динамике.

Отбор проб воды и донных отложений проводили на 3-х станциях в северной и южной части оз. Большое Голубое, а также на 3-х станциях в северной и восточной части оз. Малое Голубое. Пробы отбирались ежемесячно, в июне пробы отбирались дважды – в начале (I) и в конце месяца (II).

Определяли общее количество бактерий, численность олиготрофных и сапрофитных бактерий, их соотношение (индекс трофности), а также количество микроорганизмов, участвующих в круговороте серы: сульфатредуцирующих, пурпурных и бесцветных сероокисляющих бактерий. Наиболее вероятное число сульфатредуцирующих и серобактерий вычисляли по МакКреди.

Качество воды оценивалось по общей численности бактериопланктона, численности сапрофитных микроорганизмов и по их соотношению, согласно классификации качества вод Росгидромета (РД 52.24.309-2016). Экологическое состояние водоема оценивалось по количеству бактериобентоса, сапрофитных микроорганизмов, соотношению численностей сапрофитных бактерий и бактериобентоса – по шкале экологических модификаций (Дзюбан и др., 2005).

В динамике численности бактериопланктона выделяются небольшие сезонные подъемы численности: ранневесенний, весенний, позднелетний – в озере Большое Голубое и зимний, весенний, летний – в озере Малое Голубое (рис.).

В динамике численности бактериобентоса в озере Большое Голубое выделяются незначительные поздневесенний и позднелетний подъемы численности, в озере Малое Голубое с началом лета происходит заметное снижение показателей общей численности бактериобентоса, которые плавно повышаются к концу лета.

Численность сапрофитных бактерий в воде и в донных отложениях озер Большое Голубое и Малое Голубое очень низкая, в воде их количество составляет от 40 до 140 кл/мл в среднем, в донных отложениях – 6-15 тысяч кл/г, что характерно для чистых открытых водоемов. Показатели соотношения общего количества бактериопланктона и сапрофитных бактерий сохраняются высокими, в основном 10^4, иногда наблюдается

небольшое их снижение до 10^3 на некоторых станциях, что не отражается на качестве воды. В донных отложениях показатели соотношений количества сапрофитных бактерий к общему количеству бактерий остаются очень низкими в течение всего периода исследований.

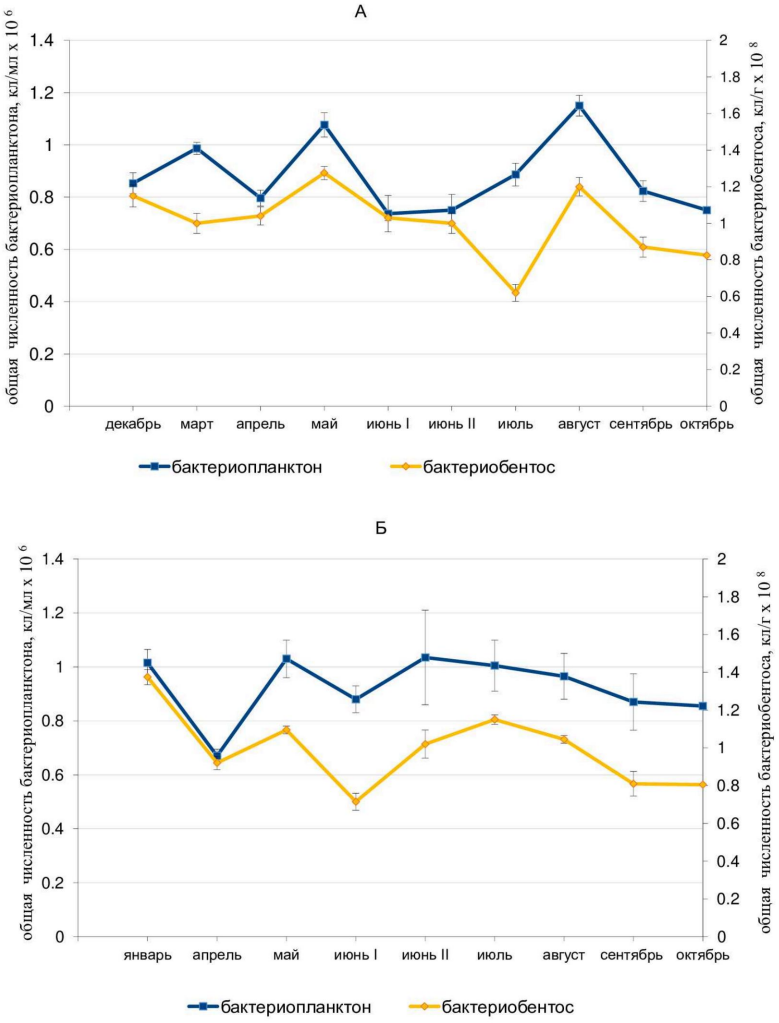


Рис. Динамика численности бактериопланктона и бактериобентоса озер Большое Голубое (А) и Малое Голубое (Б)

В воде и в донных отложениях Голубых озер численность олиготрофных бактерий всегда превышает количество сапрофитных бактерий в несколько раз, что характерно для чистых водоемов с низким содержанием органического вещества. Численность олиготрофных бактерий составляет в воде 170-620 кл/мл в среднем, и 26-62 тысяч кл/г – в донных отложениях (индекс трофности – в среднем 4).

Согласно классификации качества вод Росгидромета, вода по всем показателям оценивается как «условно чистая», а состояние донных отложений по шкале экологических модификаций – в пределах нормы (Дзюбан и др., 2005; РД 52.24.309-2016).

Основную роль в круговороте серы в водоемах с повышенной нагрузкой по сульфатам и сульфидам играют биологические процессы, осуществляемые при участии сульфатредуцирующих и сероокисляющих бактерий.

Сульфатредуцирующие бактерии присутствуют в микрофлоре воды и донных отложений Голубых озер (табл.1, 2). Низкая численность этой группы бактерий в воде обусловлена наличием растворенного кислорода и небольшим количеством органического вещества.

Таблица 1. Численность диагностических групп микроорганизмов, участвующих в круговороте серы, в воде и донных отложениях оз. Большое Голубое

Вода				Донные отложения			
Время отбора	пурпурные серобактерии, кл/мл	бесцветные серобактерии, кл/мл	сульфатредукторы, кл/мл	Время отбора	пурпурные серобактерии, кл/г	бесцветные серобактерии, кл/г	сульфатредукторы, кл/г
декабрь	231	36	0,7	декабрь	702	325	150
март	12,3	50	0,2	март	100	285	50
апрель	12,3	78	1,8	апрель	61	1375	225
май	8	21	2,5	май	18	250	25
июнь I	14	210	0,87	июнь I	25	1375	25
июнь II	2,5	466	1	июнь II	13	2250	137
июль	0,4	1166	2	июль	4	15000	575
август	0	2900	0,58	август	4	25000	400
сентябрь	2,1	333	0,3	сентябрь	25	17000	105
октябрь	10	126	2,5	октябрь	25	2500	425

Таблица 2. Численность диагностических групп микроорганизмов, участвующих в круговороте серы, в воде и донных отложениях оз. Малое Голубое

Вода				Донные отложения			
Время отбора	пурпурные серобактерии, кл/мл	бесцветные серобактерии, кл/мл	сульфатредукторы, кл/мл	Время отбора	пурпурные серобактерии, кл/г	бесцветные серобактерии, кл/г	сульфатредукторы, кл/г
январь	126	57	0,15	январь	103	425	345
апрель	7	8,00	1,4	апрель	13	18,5	250
май	2,5	25	0,3	май	12	31	25
июнь I	17	72	0,45	июнь I	25	160	25
июнь II	1,4	120	0,3	июнь II	25	1375	250
июль	0,45	725	0,45	июль	2,5	10600	500
август	0	4250	0,6	август	12	42500	137
сентябрь	2,5	250	0,45	сентябрь	18	25000	225
октябрь	7	60	0	октябрь	25	1850	250

Численность пурпурных сероокисляющих бактерий зимой и ранней весной в пробах воды и донных отложений озер выше, чем летом (табл. 1, 2). Ближе к лету их количество уменьшается и продолжает снижаться в течение лета. Пурпурные серобактерии способны осуществлять фотосинтез в анаэробных условиях и окислять сероводород, накапливая в своих клетках элементарную серу. Росту данной группы бактерий может препятствовать сильное течение и присутствие кислорода. Пурпурные серобактерии, как правило, развиваются в стоячих заросших водоемах, где мало кислорода и много сероводорода.

Бесцветные серобактерии в аэробных условиях быстро окисляют сульфиды и сероводород, а многие представители этой группы также способны накапливать серу внутри своих клеток. Развиваются бесцветные серобактерии в присутствии кислорода, сероводорода, сульфидов и других соединений серы.

Бесцветные серобактерии населяют воду и донные отложения Голубых озер. Численность их, в отличие от пурпурных серобактерий, напротив, повышается с началом лета, особенно в донных отложениях озер. Развитие бесцветных сероокисляющих бактерий, которые в летний период количественно преобладают над другими группами микроорганизмов, свидетельствует об их важной роли в процессе очищения водоемов от сероводорода.

Литература

Дзюбан А.Н., Косолапов Д.Б., Кузнецова И.А. Микробиологические процессы в донных отложениях Рыбинского водохранилища и озера Плещеево как факторы формирования качества водной среды // Гидробиол. журнал. 2005. Т. 41. № 4. С. 82–88.

РД 52.24.309-2016. Организация и проведение режимных наблюдений за загрязнением поверхностных вод суши.

Уникальные экосистемы солоноватоводных карстовых озер Среднего Поволжья. Казань: Изд-во Казанского университета, 2001. 256 с.

MICROBIAL COMMUNITIES OF WATER AND BOTTOM SEDIMENTS OF BOLSHOE GOLUBOE AND MALOE GOLUBOE LAKES (TATARSTAN)

O.V. Morozova, S.V. Berdnik, D.S. Lyubarsky

Microbial communities of Bolshoe Goluboe and Maloe Goluboe lakes water and sediments were studied in seasonal dynamics. It was found that during the entire research period, water was assessed as «conditionally clean» in all microbiological indicators, and the ecological state of reservoirs was also within the normal range in terms of bacteriobenthos. Favorable conditions are created in lakes for the growth of oligotrophic and colorless sulfur-oxidizing bacteria, indicates a low content of organic matter and active oxidation processes of sulfides and hydrogen sulfide due to the vital activity of sulfur-oxidizing bacteria.

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗООПЛАНКТОНА ОЗЕР ЛИНЕВО И КАРАСИХА ВОЛЖСКО-КАМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА

О.В. Мухортова[1], Р.З. Сабитова[1], Г.Р. Юмагулова[2,3]

[1]*Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН*

[2]*Республиканский инженерный лицей-интернат*

[3]*Уфимский университет науки и технологий*

Проведённые исследования показали, что зоопланктонные сообщества оз. Линево и Карасиха в июле 2022 г. характеризовались высоким таксономическим богатством (52 таксона) с преобладанием ракообразных. В озерах общая численность и биомасса гидробионтов колебалась в широком диапазоне.

Поверхностные воды Раифского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника и его охранной зоны представлены р. Сумка, ее притоком р. Сер-Булак и расположенными в их долинах разнообразными карстово-суффозионными озерами (Труды ..., 2002). Река Сер-Булак протекает через заповедное оз. Линево и оз. Карасиха находящиеся в Зеленодольском районе Республики Татарстан (рис. 1).



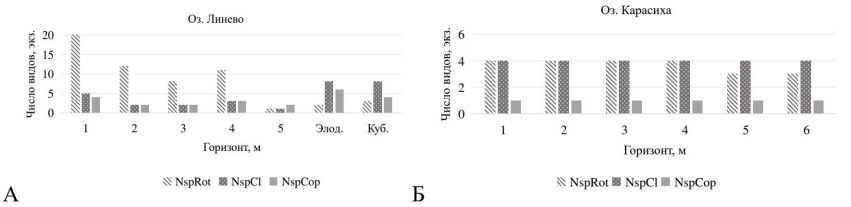
Рис. 1. Карта-схема озер Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника

Озеро Линево (55,904130; 48,791366) имеет форму вытянутого неправильного полуовала с относительно ровной береговой линией с юго-запада, площадь – 6,3 га, максимальная глубина – 6,9 м, прозрачность воды – до 2,5 м (рис. 1). Озеро Карасиха (55,906562; 48,747905) округлой форму, длиной 100 м и шириной в 60 м, площадь – 0,6 га, средняя глубина – 6,5 м, прозрачность – 0,6 м (рис. 1) (Труды ..., 2002).

Исследования зоопланктона проводились в июле 2022 г. на двух озерах (Линево, Карасиха) Раифского участка (рис. 1) Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника (Труды ..., 2002). Отбор проб проводили с учетом вертикального распределения организмов, с шагом в 1 м, а в оз. Линево и в зарослях макрофитов (*Nuphar lutea* (L.) Sm., *Elodea* sp. Michx. (1803)) по стандартной методике (Методика ..., 1975; Методы ..., 2024).

В период с 1983–2000 гг. видовой состав зоопланктона озер колебался в широком диапазоне (6–22 видов), в среднем составлял 12 ± 8 видов, всего выявлено по 37 видов гидробионтов в каждом водоёме (Труды ..., 2002). С 2022 г. всего идентифицировано 52 вида зоопланктона, из них коловраток – 27 (52%), ветвистоусых рачков – 18 (35%), веслоногих 7 (13%). Общее удельное таксономическое богатство организмов также

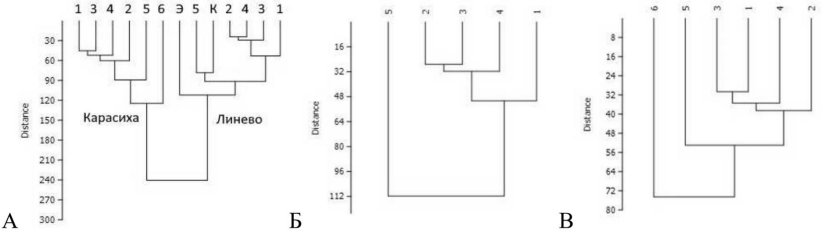
колебалась в широком диапазоне (4–30 видов), и в среднем составлял 12 ± 6 видов (рис. 2). Наибольшее разнообразие отмечалось в оз. Линево, при этом минимальное число организмов зафиксировано в придонном горизонте (4), максимальное – в поверхностном (30 таксонов). В оз. Карасиха на всех горизонтах число таксономических единиц было приблизительно одинаковым, и составляло 8-9 таксонов (рис. 2Б). В зарослях макрофитов было встречено около 16 видов зоопланктеров (рис. 2А).



А Б

Рис. 2. Число видов зоопланктона оз. Линево (А) и Карасиха (Б)

Кластерный анализ показал, что видовой состав зоопланктона озер значительно отличался, не смотря на их территориальную близость (степень сходства составила менее 33% (рис. 3)). Как видно из рис. 3А, по видовому составу организмов в оз. Линево выделяются «макрофитные» станции (*N. lutea*, *Elodea* sp), которые, однако, по составу организмов были близки между собой. Выделялись так же и придонные горизонты (рис. 3Б, В), видовой состав зоопланктеров которых был более близок к таковому в зарослях макрофитов (рис. 3А).



А Б В

1-6 – горизонты озер, К – *Nuphar lutea*, Э – *Elodea* sp.,
Рис. 3. Дендрограммы (А) сходства видового состава зоопланктона станций (коэффициент Серенсена, %) по обилию зоопланктона между оз. Линево (Б) и Карасиха (В)

В обоих озерах по показателям развития преобладали ракообразные (Crustacea). В оз. Карасиха лидирующее положение среди ракообразных занимали ветвистоусые (Cladocera) (61% от общего обилия и 91% общей биомассы), а в оз. Линево доминировали веслоногие ракообразные (Copepoda/Cyclopoida), на долю которых приходилось 59% от общего обилия и 70% общей биомассы.

В период с 1983–2000 гг. средняя численность (≈179, 60 тыс. экз./м^3) зоопланктона оз. Линево была невысокой, однако, в 2000 г. отмечено резкое увеличение её значения – до 2256,11 тыс. экз./м^3 (Труды ..., 2002). В 2022 г. общая численность зоопланктона колебалась в широком диапазоне (147–1035 тыс.экз./м3), в среднем составляла 490 ± 308 тыс. экз./м^3 (рис. 4). Биомасса зоопланктона по прошлым годам (1983–2000 гг.)

изменялась от 0,29 до 4,3 г/м^3, но обычно не превышала 1 г/м^3 (Труды ..., 2002). В 2022 г. биомасса зоопланктона варьировала от 0,45 до 10,64 г/м3 (рис. 4) при средней величине 4,79 ± 4,16 г/м^3. По численности преобладали *Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857) (17%), представители *Bosmina (Bosmina) longirostris* (O.F. Müller, 1785) (15%), *Brachionus diversicornis diversicornis* (Daday, 1883) (13 %) и тд. По биомассе превалировали *Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857) (57 %), *Daphnia (Daphnia) cucullata* Sars, 1862 (57%) и т.д.

Анализ вертикального распределения зоопланктона (рис. 4) показал, что среди всех идентифицированных видов только четыре были встречены на всех горизонтах, т.е. во всей водной толще: средняя численность и биомасса во всей толще *Bosmina (Bosmina) longirostris* (O.F. Müller, 1785) (63 ± 27 тыс. экз/м^3; 0,09 ± 0,03 г/м^3), *Mesocyclops leucarti* (Claus, 1857) (28 ± 26 тыс.экз/м^3; 0,99 ± 0,83 г/м^3), *Thermocyclops oithonoide*s (Sars G.O., 1863) (28 ± 25 тыс.экз/м^3; 0,30 ± 0,25 г/м^3), *Brachionus angularis angularis* Gosse, 1851, (20 ± 14 тыс. экз/м^3; 0,01 ± 0,007 г/м^3). Комплексы доминирующих видов на разных горизонтах имели значительную степень сходства (≈45%).

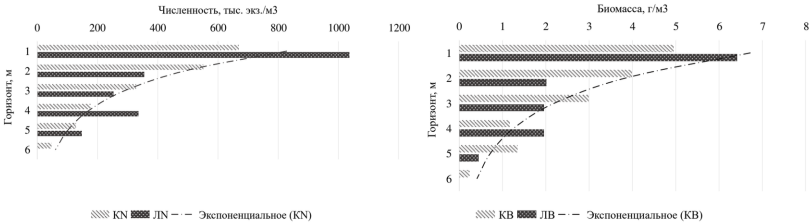


Рис. 4. Численность (N) и биомасса (B) зоопланктона оз. Линево (Л) и Карасиха (К)

В зарослях оз. Линево сформировалось специфическое сообщество гидробионтов. Обилие зоопланктона было выше в зарослях *Elodea* sp. (696 тыс. экз./м^3), чем в *N. lutea* (603 тыс. экз./м^3), а биомасса, наоборот, была больше в *N. lutea* (10,64 г/м^3), чем в *Elodea* sp. (9,72 г/м^3).

По обилию и биомассе в *N. lutea* преобладали *Diaphanosoma brachyurum* (Liévin, 1848) (44%), *Sida crystallina* (O.F. Müller, 1776) (27%) и *Eucyclops macruroides* (Lilljeborg, 1901) (35 %).

В *Elodea* sp. доминировали по численности и биомассе *Scapholeberis mucronata* (O.F. Müller, 1776) (25%), *Simocephalus vetulus* (O.F. Müller, 1776) (25%) и *Eucyclops macrurus* (Sars, 1863) (25%).

В период с 1984–2000 гг. средняя численность (≈67,83 тыс. экз./м^3) зоопланктона оз. Карасиха была низкой, однако, в 1999-2000 гг. регистрировались особенно низкие значения – до 6,38 тыс. экз./м^3 (Труды ..., 2002). С 2022 г. общая численность зоопланктона уже была выше и колебалась в широком диапазоне (47–668 тыс. экз./м^3), в среднем составляя 317 ± 248 тыс. экз./м^3 (рис. 4). Биомасса беспозвоночных по прошлым годам (1983–2000 гг.) также была низкой и изменялась от 0,024 до 0,96 г/м^3 (Труды ..., 2002). В 2022 г. биомасса гидробионтов была выше и варьировала от 0,23 до 4,95 г/м^3 (рис. 4) при средней величине 2,44 ± 1,83 г/м^3. По численности преобладали *Ceriodaphnia reticulata* (Jurine, 1820) (33%) и *Ceriodaphnia quadrangula* (O.F. Müller, 1785) (30%). По биомассе превалировали *Daphnia (Daphnia) longispina* O.F. Müller, 1785) (57%).

Анализ вертикального распределения зоопланктона (рис. 4) показал, что среди всех идентифицированных видов только четыре были встречены на всех горизонтах, т.е.

во всей водной толще: средняя численность и биомасса во всей толще *Ceriodaphnia reticulata* (Jurine, 1820) (41 ± 36 тыс.экз/м3; 0,89 ± 0,54 г/м^3), *Thermocyclops oithonoides* (Sars G.O., 1863) (52 ± 32 тыс. экз/м^3; 0,03 ± 0,03 г/м^3), Nauplii Cyclopoida (36 ± 26 тыс.экз/м^3; 0,07 ± 0,002 г/м^3). Комплексы доминирующих видов на разных горизонтах имели значительную степень сходства (≈65%).

Таким образом, проведённые исследования показали, что зоопланктонные сообщества оз. Линево и Карасиха в июле 2022 г. характеризовались высоким таксономическим богатством (52 таксона) с преобладанием ракообразных. Численность и биомасса зоопланктона также были высокими, но сопоставимыми с показателями, прошлых лет (Труды ..., 2002).

Работа выполнена в рамках государственного задания № 124032500016-4 «Разнообразие, биология и экология водных и околоводных беспозвоночных континентальных вод» (Институт биологии внутренних вод РАН).

Литература

Труды Волжско-Камского государственного природного заповедника. Вып. 5. Казань, 2002. 230 с.

Методы гидробиологических исследований внутренних вод. Ярославль: Филигрань, 2024. 592 с.

Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 240 с.

VERTICAL DISTRIBUTION OF ZOOPLANKTON IN AND KARASIKHA LAKES OF THE VOLGA-KAMA STATE NATURAL BIOSPHERE RESERVE

O.V. Mukhortova, R.Z. Sabitova, G.R. Yumagulova

The conducted studies have shown that zooplankton communities of Lake Baikal. In July 2022, Linevo and Karasikha were characterized by high taxonomic richness (52 taxa) with a predominance of crustaceans. In the lakes, the total abundance and biomass of aquatic organisms varied over a wide range.

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТА НА ТАКСОНОМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ФОТОТРОФОВ В ОЗ. БОЛЬШИЕ ХРУСЛОМЕНЫ

А.С. Нагаева[1], Е.А. Лабунская[1], Ю.Г. Соколовская[1], В.И. Лобышев[1], С.В. Пацаева[1], Д.А. Воронов[2], Е.Д. Краснова[1]

[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
[2]Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

В работе изложена взаимосвязь между спектральными характеристиками света и складывающимся сообществом фототрофных организмов. Измерение спектральных характеристик позволяет строить предположения, какие таксоны фототрофов можно ожидать на разной глубине.

Фитопланктон является одним из важнейших компонентов биосферы, ассимилирующих CO_2. При этом законы функционирования фитопланктонных сообществ изучены недостаточно. Наша работа посвящена исследованию зависимости

между спектральными характеристиками света на разных глубинах и обитающими там фототрофными организмами. Потребности разных представителей фитопланктона в определённых длинах волн, которые используются ими для фотосинтеза, можно представить как «световую нишу» (Лабунская и др., 2024; Holtrop et al., 2020). Из всего видимого диапазона света для фотосинтеза пригодна лишь зона от 400 до 700 нм, называемая ФАР (фотосинтетически активная радиация). Поглощение света молекулами воды и окрашенной фракцией растворённых органических веществ (РОВ), рассеяние света взвешенными частицами могут изменять количественные и качественные характеристики светового излучения и влиять на численный и систематический состав фотосинтезирующих организмов (Stomp et al., 2007). Удобной моделью для изучения световых ниш могут быть меромиктические водоемы: в отсутствие вертикальной циркуляции в них на разной глубине могут формироваться стабильные световые ниши. Объектом данного исследования стало прибрежное меромиктическое озеро Большие Хрусломены на острове Олений в заливе Ковда (Белое море, Кандалакшский залив) (66° 43' 1" с.ш., 32° 51' 34" в.д.). Озеро имеет глубину 21 м и площадь 21 га. Озеро было искусственно изолировано от моря валунным барьером с целью накопления пресной воды, однако изоляция не полная, во время прилива в озеро поступает вода из моря. Соленость воды в миксолимнионе (поверхностном слое, которым ограничена вертикальная циркуляция) 4-7‰, в монимолимнионе 24‰. Галоклин располагается между глубинами 2 и 8 м. Монимолимнион сульфидный. Положение границы анаэробной зоны варьирует от 2,7 м до 4,5 м. 1 июля 2024 года был обнаружен «двойной хемоклин»: в нижнюю часть монимолимниона вклинился пласт анаэробной воды, в результате чего возникла вертикальная последовательность из поверхностного аэробного слоя от 0 м до 2,4 м, прослойки 2,5-2,7 м с отрицательным окислительно-восстановительным потенциалом (–110 мВ) - (–230 мВ), аэробной прослойки 2,8-3,8 м и нижней анаэробной водной массы, начиная с глубины 3,9 м.

Полевая часть исследования была выполнена 14 июля 2024 г. и включала измерение гидрологических параметров (температуры, солености воды, концентрации кислорода, окислительно-восстановительного потенциала и pH), мутности воды, подводной освещенности и спектрального состава света на разной глубине от поверхности до дна с шагом по вертикали 0,5 м, а в градиентной зоне – с шагом 0,1 м. Освещённость измеряли погружным люксметром, спектры света определяли с помощью спектрометра Ocean Optics QE65 Pro с оптоволоконным зондом. В аэробной части водного столба на тех же глубинах отбирали пробы фитопланктона. Для определения таксономического состава фитопланктона использовали световой микроскоп с увеличением в 400 раз. Полученные данные анализировали с помощью программного обеспечения Microsoft Excel 2015 и GrapfPad Prism 8.0.1.

По полученным данным были составлены усреднённые и нормированные спектры света (рис. 1-4).

Диапазон солнечного излучения с глубиной уменьшался. Особенно хорошо заметно ослабление света на переходах от 0,5 до 1-1,5 м в диапазоне длин волн 450-630 нм и от 3 м до 3,5 м (область над вторым хемоклином) на длинах волн от 650 нм до 720 нм. Для дальнейшего удобства мы отдельно построили графики для трех основных водных слоев. Верхний слой – миксолимнион от поверхности до глубины 2,1 м, на которой располагался первый хемоклин (рис. 2). Фиолетовая часть светового спектра доходила только до глубины 0,5 м. Голубая область спектра 450-499 нм значительно ослабевала в первых двух метрах воды, что связано с большим количеством растворённого органического вещества (РОВ) (рис 2). Также заметно ослабление в зелёной 500-569 нм и желтой 570-589 нм частях спектра, это тоже связано с РОВ.

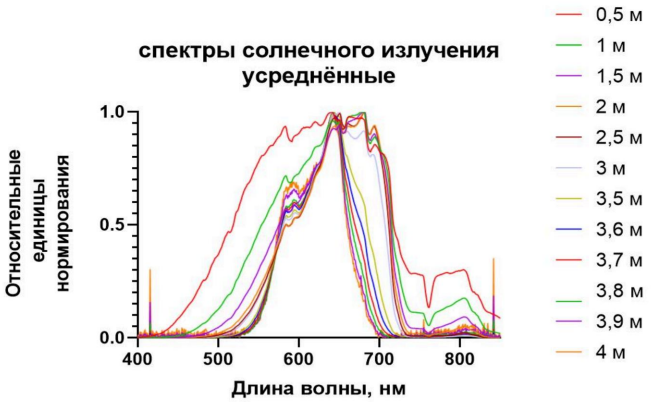


Рис. 1. Спектры солнечного излучения на разной глубине аэробной части водного столба
в оз. Б. Хрусломены

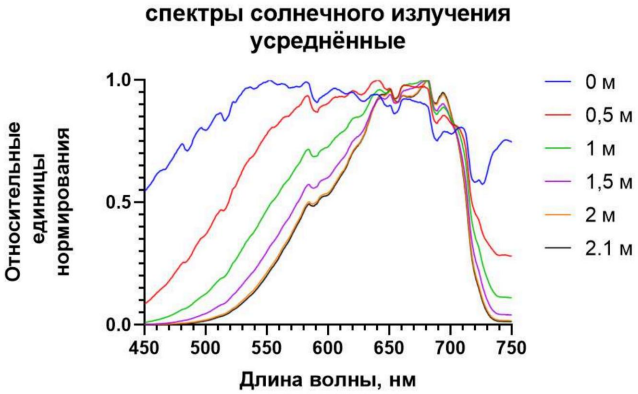


Рис. 2. Спектры солнечного излучения в миксолимнионе оз. Б. Хрусломены

В средней зоне в границах 2,2-2,8 м (рис 3), включающей первую анаэробную прослойку 2,5-2,7 м, спектр света был одинаковым при том, что его интенсивность уменьшалась (рис 3). В фитопланктоне были обнаружены единичные криптофитовые водоросли зеленого цвета (в слое 2,2 м), а также диатомеи, присутствовавшие во всех горизонтах.

Ниже, в аэробной прослойке воды 2,8-3,6 м (рис. 4), заметно значительное ослабление в красной (590-619 нм) и дальней красной (620-750 нм) областях, вызванное, как мы полагаем, криптофитовыми жгутиконосцами с зеленой окраской и прокариотическими фотосинтезирующими организмами – зелёными серными бактериями, наибольшая численность которых наблюдалась в слоях 3,4 м - 3,5 м. Особенно существенно ослабление красного света под переходом в нижнюю анаэробную зону на глубине 4 м.

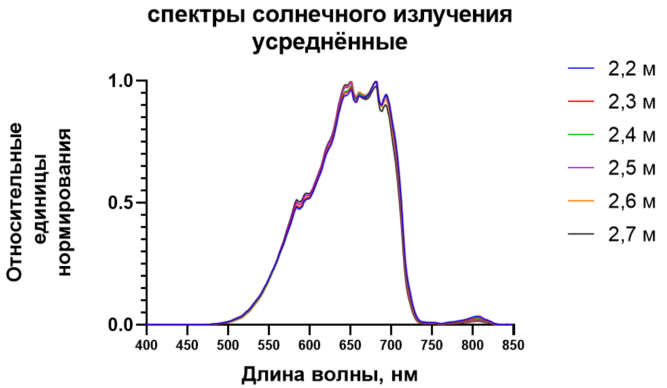


Рис. 3. Спектры солнечного излучения в оз. Б. Хрусломены в диапазоне глубин 2,2-2,7 м

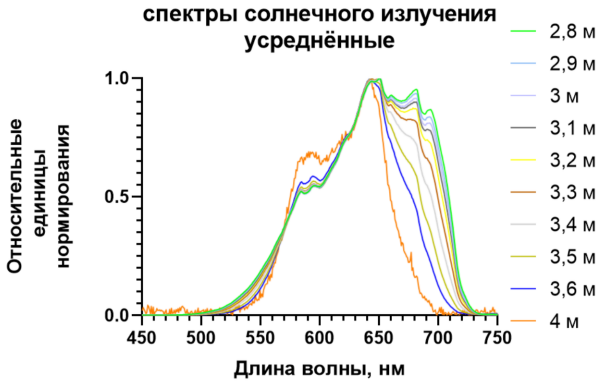


Рис. 4. Спектры солнечного излучения зоны в оз. Б. Хрусломены в средней аэробной прослойке воды (2,8-3,6 м) и под ее границей

Вторым этапом нашей работы стала визуализация пороговых глубин (рис 5), до которых доходит 1%, 0,5% и 0,1% разных частей солнечного спектра. При 1% могут устойчиво существовать эукариотические фотосинтезирующие организмы, при 0,5%-0,1% фототрофные прокариоты, при условии, что они обладают соответствующими фотосинтетическими пигментами.

Данные о спектральном составе света на разной глубине согласуются с результатами таксономического анализа планктонных фототрофов: высокая численность эукариот из клад Diatomaphycea и Dinophycea наблюдалась в горизонтах до 2 м, в пределах до 0,1% обитают представители эукариотической клады Cryptophyta, некоторые из которых способны переходить на гетеротрофное питание. До глубины 3,7 м встречались прокариотические фототрофы: цианобактерии и пурпурные серные бактерии.

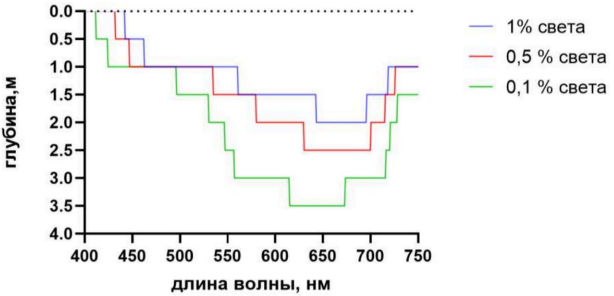


Рис. 5. Моделирование световых ниш для оз. Б. Хрусломены

Анализ спектров и моделирование световых ниш позволяет заключить, что в июле 2024 г. в оз. Б. Хрусломены сформировалось два сообщества фототрофов. Одно, с доминированием диатомовых водорослей и динофлагеллят, обитало в верхней части водной толщи до глубины 2 м, где разные части спектра представлены в количестве более 1% от их интенсивности на поверхности. Второе сообщество, с преобладанием криптомонад и фототрофных прокариот, населяло глубины, где интенсивность света по разным длинам волн в пределах ФАР составляет меньше 1%.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-24-00008).

Литература

Лабунская Е.А., Воронов Д.А., Лобышев В.И., Краснова Е.Д. Подводные измерения спектров проходящего света в стратифицированных водоемах беломорского побережья как ключ к пониманию пигментного состава фототрофов в зоне хемоклина // Биофизика. 2024. Т. 69, №3. С. 627–646.

Holtrop T., Huisman J., Stomp M., Biersteker L., Aerts J., Grébert T., Partensky F., Garczarek L., Woerd H. J. V. D. Vibrational modes of water predict spectral niches for photosynthesis in lakes and oceans // Nature Ecology and Evolution. 2020. V. 5, №1. P. 55–66.

Stomp M., Huisman J., Stal L.J., Matthijs H.C.P. Colorful niches of phototrophic microorganisms shaped by vibrations of the water molecule // The ISME Journal. 2007. V. 1, №4. P. 271–282.

INFLUENCE OF SPECTRAL LIGHT COMPOSITION ON THE TAXONOMIC STRUCTURE OF PHOTOTROPHIC ORGANISMS IN LAKE BOLSHIE KHRUSLOMENY

A.S. Nagaeva, E.A. Labunskaya, Yu.G. Sokolovskaya, V.I. Lobychev, S.V. Patsaieva, D.A. Voronov, E.D. Krasnova

This study outlines the relationship between the spectral characteristics of light and the composition of phototrophic communities. Measuring spectral characteristics allows for the estimation of the depth distribution and concentration of phototrophs belonging to different taxonomic groups.

ИЗУЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИММУНИТЕТА БАЙКАЛЬСКИХ АМФИПОД В ОТВЕТ НА ПОТЕНЦИАЛЬНО НЕГАТИВНЫЕ ФАКТОРЫ СРЕДЫ

А.А. Назарова, С.С. Седова, Ж.М. Шатилина, М.А. Тимофеев
Иркутский государственный университет

Озеро Байкал — это крупный источник жидкой пресной воды в мире. В экосистеме озера амфиподы занимают важное положение, так как представляют кормовую базу рыб и последующих трофических уровней. Иммунитет амфипод может быть показателем их жизнедеятельности при воздействии потенциально негативных факторов среды. Однако для байкальских амфипод не до конца ясны наиболее чувствительные параметры, которые могут отражать функционирование иммунитета. В данной работе приведена оценка параметров общего числа гемоцитов (ОЧГ), выживаемости гемоцитов и клеток гепатопанкреаса в условиях повышения температуры среды. Также изучена интенсивность инкапсуляции гемоцитами чужеродных объектов, ОЧГ и процентное соотношение разных типов гемоцитов при заражении пиявками и инъекции симбиотическими микроорганизмами.

Иммунная система беспозвоночных представляет собой комплекс врожденных механизмов защиты организма, включающие фагоцитоз, инкапсуляцию и др., выполняемые гемоцитами - иммунными клетками, циркулирующими в гемолимфе. У ракообразных есть разные типы гемоцитов предположительно выполняющих разные функции в иммунитете. Эти процессы сопровождаются распознаванием чужеродного объекта с помощью паттерн-распознающих белков, например лектинов. Данные белки располагаются на цитоплазматической мембране гемоцитов, или могут экспрессироваться в гемолимфу клетками гепатопанкреаса (Cao et al., 2021). Кроме того, важным механизмом защиты, который происходит в процессе инкапсуляции, является активация фермента фенолоксидаза. Этот фермент катализирует реакцию окисления полифенолов, в результате чего образуется эумеланин, который обладает противомикробным эффектом. К показателям функционирования иммунитета зачастую относят общее число гемоцитов (ОЧГ), процентное соотношение разных типов гемоцитов, активность фенолоксидазы, фагоцитоз и др.

Озеро Байкал – гигантский пресноводный водоём, в котором важным компонентом трофических сетей являются амфиподы. Поэтому изучение иммунного ответа этой группы эндемичных организмов представляет значительный интерес.

В целом, иммунные показатели амфипод при отклонении разных параметров среды изучены слабо. В литературе можно найти данные по другим группам, например десятиногим ракам (Mengal et al., 2023) и другим беспозвоночным, таким как мидии (Ladhar-Chaabouni, Hamza-Chaffai, 2016). Исследования, проведенные на амфиподах *Gammarus pulex* (Linnaeus, 1758) показали, что при отклонениях температуры от оптимальных значений способность подавлять инфекцию снижается (Labaude et al., 2017). На представителях же байкальской фауны амфипод исследования в области иммунного ответа при изменениях параметров среды ранее не проводили. Целью данной работы являлась оценка влияния паразитических пиявок, симбиотических микроорганизмов и повышенной температуры на показатели иммунитета байкальских эндемичных амфипод.

Основным объектом данного исследования являлся массовый литоральный вид амфипод озера Байкал *Eulimnogammarus verrucosus* (Gerstfeldt, 1858). В работе оценивали ОЧГ, интенсивность реакции инкапсуляции гемоцитов у заражённых и незаражённых амфипод пиявками *Baicalobdella torquata* (Grube, 1871). Также ОЧГ и

процентное соотношение разных типов гемоцитов при искусственном заражении пиявками и совместной инъекции микроорганизмами *Pseudomonas* sp, которые были ранее выделены из гемолимфы исследуемого вида амфипод. Известно, что оптимум температуры *E. verrucosus* состоит в приделах 6°C (Axenov-Gribanov et al., 2016). Нами был проведён физиологический эксперимент по повышению температуры от 6°C до 18°C на 1°C в сутки. Эксперимент был проведён в июне (летний период) и октябре (осенний период). В летнее время были оценены показатели ОЧГ, выживаемость гемоцитов и клеток гепатопанкреаса в культуре *in vitro* сразу после выделения и через сутки содержания изолированных клеток. В осенний период было проведено только измерение выживаемости гемоцитов и клеток гепатопанкреаса после содержания клеток *in vitro* при температуре акклимации организма.

Показано, что пиявки действительно питаются гемолимфой амифпод, что предположительно может напрямую снижать ОЧГ в гемолимфе хозяина. Было выдвинуто предположение, что сезон года может влиять на показатель ОЧГ из-за цикла жизни пиявок. Однако, суммарная ширина тела пиявок на одном животном, которая отражает обилие питания не коррелировала со снижением ОЧГ. Искусственное заражение пиявками в соотношении 1:1 с амфиподами также не влияло на данный показатель. Искусственное заражение амфипод штаммом *Pseudomonas* sp. показало значимое снижение ОЧГ и изменение соотношения гранулоцитов и плазмоцитов в сторону повышения гранулоцитов. В то время как взаимодействие между бактериальной инъекцией и заражением пиявками, напротив, привело к статистически значимому снижению доли фракции гранулоцитов на 12%, но не вызвало статистически значимых изменений концентрации гемоцитов. Интенсивность инкапсуляции чужеродных объектов гемоцитами заражённых и незаражённых пиявками амфипод статистически значимо не отличалась.

Статистически значимых изменений ОЧГ в процессе градиентного повышения температуры и экспериментальной экспозиции обнаружено не было. Гемоциты после градиентного повышения температуры продемонстрировали низкую способность к выживанию в условиях *in vitro* по сравнению с гемоцитами амфипод, которые содержали в оптимальных температурных условиях. Однако выживаемость гемоцитов восстановилась после содержания при повышенной температуре в течение длительного времени, что может указывать на их адаптацию к температурным изменениям. Клетки гепатопанкреаса не отреагировали на градиентное изменение температуры, однако после долгосрочного содержания часть популяции клеток могла погибнуть ещё в тканях организма.

Таким образом, заражение пиявками не влияло ни на один из исследуемых параметров. Показатель выживаемости гемоцитов, но не ОЧГ, может отражать влияние температуры на состояние иммунитета организма амфипод. При этом о повышении концентрации симбиотических микроорганизмов в гемолимфе амфипод может свидетельствовать снижение ОЧГ и изменение в количестве гранулоцитов.

EFFECTS OF POTENTIAL NEGATIVE FACTORS ON THE IMMUNE SYSTEM PARAMETERS OF THE BAIKAL AMPHIPODS

A.A. Nazarova, S.S. Sedova, Zh.M. Shatilina, M.A. Timofeev

Lake Baikal is the world's largest freshwater reservoir. In the lake ecosystem, amphipods are important position due to their participation in food webs. The immunity of amphipods may be an indicator of their vitality under potentially adverse environmental conditions. However, there are no data on the most sensitive immune parameters in Baikal amphipods, which represent the

function of immunity. In this study, total hemocyte count (THC), viability of hemocyte and hepatopncreatic cells were assessed under elevated temperatures. Incapsulation intensity, THC and granulocyte percentage were also measured in infected / uninfected by leech amphipods and after bacterial injection.

ФАУНИСТИЧЕСКИЕ АССОЦИАЦИИ РЕЦЕНТНЫХ СООБЩЕСТВ CLADOCERA В ТУНДРОВЫХ ОЗЕРАХ ДЕЛЬТЫ Р. ПЕЧОРЫ (НЕНЕЦКИЙ АО)

Н.М. Нигматуллин[1], Л.А. Фролова[1,2], Г.Р. Нигаматзянова[1,2]
[1] Казанский (Приволжский) федеральный университет
[2]Институт археологии и этнографии Сибирского отделения РАН

Исследован таксономический состав и структура рецентных сообществ ветвистоусых ракообразных (Cladocera) из поверхностных донных отложений 47 тундровых озер в дельте реки Печоры (российская Арктика). В общей сумме идентифицирован 41 таксон ветвистоусых ракообразных, принадлежащих к 8 семействам, среди которых по таксономическому богатству лидирует Chydoridae (68% от общего числа видов). Определены локальные фаунистические ассоциации Cladocera исследованных озер. При уровне значимости $p \leq 0.01$ были выделены три кластера взаимосвязанных таксонов ветвистоусых ракообразных в исследованном регионе.

Водоемы северных широт, будучи чувствительными к глобальному изменения климата и антропогенному влиянию являются хорошими индикаторами состояния арктических экосистем (Frolova et al., 2014). Одной из ключевых особенностей как современного, так и исторического глобального изменения климата является арктическая амплификация. Это явление выражается в более быстром повышении температуры воздуха в Арктике по сравнению с более широкой эталонной областью, такой как средняя температура в Северном полушарии (Davy et al., 2018). В полярных регионах Северного полушария находится множество озёр, различающихся по происхождению и форме. Их нетронутые донные отложения представляют собой природные архивы, содержащие информацию об изменениях климата, ландшафтов и гидрологических условий в плейстоцене и голоцене (Subetto et al., 2017). Наиболее распространённым типом водоёмов в Арктике, в том числе и в дельте реки Печоры, являются неглубокие термокарстовые озера, возникающие вследствие оттаивания многолетнемерзлых пород (Wetzel, 2001).

Изучение пресноводных экосистем северных широт остается фрагментарным: сведения о фауне беспозвоночных, обитающих в отдельных арктических регионах, зачастую разрознены или охватывают лишь определенные таксономические группы (Sweetman et al., 2010). Данные о ветвистоусых ракообразных дельты реки Печоры основаны на отдельных исследованиях зоопланктонных сообществ, проведенных в последние годы (Sadyrin, 2000; Черевичко и др., 2011; Фефилова, Кононова, 2018). При этом изучение рецентных и субфоссильных кладоцерных сообществ ранее не проводилось. В связи с этим есть необходимость в получении новых актуальных данных о фауне ракообразных арктических регионов. В рамках нашего исследования была поставлена цель выявить таксономический состав рецентных Cladocera и изучить взаимосвязи между отдельными таксонами в кладоцерных сообществах в ряде озер дельты р. Печоры.

В ходе летних экспедиций сотрудниками Казанского федерального университета были отобраны образцы поверхностных донных отложений 47 озер с помощью

стратифицированного дночерпателя Экмана-Берджа в 2017-2020 гг. Большинство исследованных озер оказалось неглубокими, со средней глубиной менее 2 м (максимальная глубина – 9 м) и небольшой площадью (средняя площадь – 0,22 км²). Озера имеют термокарстовое происхождение, за исключением трех ледниковых озер. Воды исследованных озер отличались низкой степенью минерализации (отнесены к группе ультрапресных). По водородному показателю (pH) исследованные водоемы меняются в диапазоне от слабокислых до слабощелочных. Как относительное, так и абсолютное содержание кислорода в период исследований характеризовалось высокими значениями.

Для палеолимнологического анализа донных отложений использовали методику, разработанную А. Корхолой и М. Раутио (Korhola, Rautio, 2001). Подготовленные образцы просматривались под световым микроскопом Axio Lab.A1 при увеличении x100-400 раз. Обнаруженные в образце остатки ветвистоусых ракообразных были подсчитаны и идентифицированы до минимально возможного таксономического ранга. Идентификация встреченных остатков осуществлялась при помощи специализированных определительных ключей субфоссильных и современных Cladocera (Szeroczynska, Sarmaja-Korjonen, 2007; Котов, 2010; Коровчинский и др., 2021).

В общей сложности из 47 исследованных озер был идентифицирован 41 таксон ветвистоусых ракообразных, принадлежащих к 8 семействам, среди которых по таксономическому разнообразию лидирует Chydoridae (68% от общего числа видов). В составе исследованных сообществ Cladocera преобладал холодноводный олигосапробный таксон *Bosmina (Eubosmina) longispina* (44,43% от общего числа выявленных экземпляров), в роли субдоминанта выступал *Chydorus* cf. *sphaericus* (28,36%), преимущественно обитающий в прибрежных зонах (Котов, 2010). Среди второстепенных видов отмечены прибрежные таксоны *Alonella nana* (4,48%) и *Biapertura affinis* (3,65%).

Для определения взаимной приуроченности или несовместимости таксонов Cladocera в поверхностных донных отложениях озер дельты Печоры было рассчитано гипергеометрическое распределение (Seleznev et al., 2024). Расчеты выполнялись в веб-приложении SAA (Species Association Analysis). При уровне значимости $p \leq 0.01$ были четко идентифицированы три кластера взаимосвязанных таксонов Cladocera в исследованном регионе (рис.). В ядро локальных фаунистических ассоциаций вошли 10 таксонов кладоцера из вошедших в анализ 34 таксонов. Были выявлены как положительные, так и отрицательные зависимости между таксонами.

Кластер 1 включает в себя два таксона *Alonela nana* и *Alonella excisa*. Эта группа таксонов предпочитает кислые, гумидные мелкие озера с органическими осадками и имеет северо-бореальную–субарктическую климатическую привязанность (Nevalainen et al., 2019). В литературе также есть упоминания об их сосуществовании в одних и тех же водоемах (Fryer, 1968). Эта взаимосвязь ранее не была статистически подтверждена. Описываемый кластер, характеризует олиготрофные водоемы со слабокислой активной реакцией среды, которые были обнаружены на территории типичной тундры.

Кластер 2 включает наибольшее количество таксонов ветвистоусых ракообразных, ядро которого составляют ассоциированные с макрофитами виды *Pleuroxus uncinatus* и *Pleuroxus aduncus* (Frey, 1993), и обитатель илов *Alona quadrangularis* (Duigan, 1992). Эти водоемы характеризуются относительно высоким уровнем трофности с мягкими илистыми грунтами. Также были выявлены отрицательные взаимосвязи между таксонами кластера 1 и 2. Обитатель песчаных грунтов *Alonopsis elongata* (Alonso, 1996) вероятнее всего не будет встречаться вместе с *Alona quadrangularis*, *Pleuroxus uncinatus* и *Pleuroxus aduncus* в одном водоеме, также как

и *Bosmina longirostris* будет избегать кислых водоемов, где обитают *Alonella nana* и *Alonella excisa* (Смирнов, 1971).

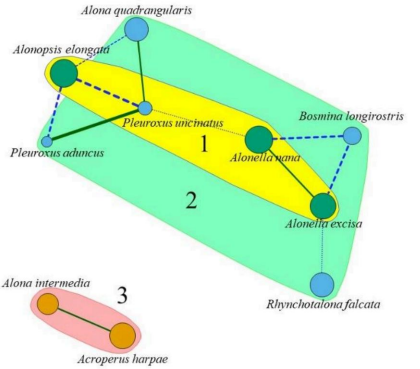


Рис. Граф положительно и отрицательно ассоциированных таксонов Cladocera в поверхностных донных отложениях озер дельты р. Печоры ($p \leq 0.01$). Размер маркера логарифмически пропорционален частоте встречаемости таксона в образцах, а толщина края отражает силу взаимосвязи между таксонами.

Кластер 3 при уровне достоверности $p \leq 0.01$ включает в себя *Alona intermedia* и *Acroperus harpae* – основные таксоны с наибольшей взаимозависимостью. Они обитают в озерах, прудах, пойменных водоемах и в прибрежье рек с медленным течением, ассоциированы с макрофитами, часто с мхами (Sphagnum sp.) (Błędzki, Rybak, 2016). В литературе описываются как холодолюбивые таксоны, в палеоэкологических исследованиях считаются индикаторами похолодания климата (Harmsworth, 1968; Rautio, 2007). Мы полагаем, что описанный кластер характерен для небольших и мелководных озер с наличием макрофитов в литоральной зоне.

Исследования рецентных сообществ Cladocera выполнены при поддержке гранта РНФ 25-17-00174.

Литература

Коровчинский Н.М., Котов А.А., Синёв А.Ю., Неретина А.Н., Гарибян П.Г. Ветвистоусые ракообразные (Crustacea: Cladocera) Северной Евразии. М.: Т-во научных изданий КМК, 2021. 544 с.

Котов А.А., Синев А.Ю., Глаголев С.М., Смирнов Н.Н. Ветвистоусые ракообразные (Cladocera) // Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон. М.: Т-во научных изданий КМК, 2010. С. 151-276.

Фефилова, Е.Б. О.Н. Кононова Новые данные по составу зоопланктона дельты реки Печора // Результаты «комплексной печорской экспедиции - 2016». Известия Коми республиканского отделения Русского Географического общества. Сыктывкар, 2018. Вып. 2 (18). С. 56-64.

Черевичко А.В., Мельник М.М., Прокин А.А., Глотов А.С. Современное состояние зоопланктона и макрозообентоса низовий р. Печора (Ненецки АО) // Вода: химия и экология. 2011. №9. С. 53-59.

Alonso M. Crustacea Branchiopoda Fauna Iberica. Madrid: Museo Nacional de Ciencias Naturales CSIC. 1996. V. 7. 486 p.

Błędzki L.A., Rybak J.I. Freshwater Crustacean Zooplankton of Europe, Cladocera and Copepoda (Calanoida, Cyclopoida) // Key to species identification, with notes on ecology, distribution, methods and introduction to data analysis. Germany: Springer, 2016. 918 p.

Davy R., Chen L., Hanna E. Arctic amplification metrics // International Journal of Climatology. 2018. V. 38. 6139.

Duigan C.A. The ecology and distribution of the littoral freshwater Chydoridae (Branchiopoda, Anomopoda) of Ireland, with taxonomic comments on some species // Hydrobiologia. 1992. V. 241. P. 1-70.

Frey D. Species of Pleuroxus (Anomopoda, Chydoridae) from the subantarctic islands and southernmost South America: a partial unravelling of the Pleuroxus aduncus problem // Hydrobiologia. 1993. V. 262. P. 145-188.

Frolova L., Nazarova L., Pestryakova L., Herzschuh U. Subfossil Cladocera from surface sediment in thermokarst lakes in northeastern Siberia, Russia, in relation to limnological and climatic variables // Journal Paleolimnology. 2014. P. 107-119.

Fryer G. Evolution and Adaptive Radiation in the Chydoridae (Crustacea: Cladocera): A Study in Comparative Functional Morphology and Ecology // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences. 1968. V. 254, №795. P. 221-385.

Harmsworth R.V., Whiteside M.C. Relation of Cladoceran remains in lake sediments to primary productivity of lakes // Ecology. 1968. V. 49. P. 998-1000.

Nevalainen L., Kivilä E.H., Luoto T.P., Rantala M.V., Van Damme K. A hidden species becoming visible: biogeography and ecology of Rhynchotalona latens (Cladocera, Anomopoda, Chydoridae) // Hydrobiologia. 2019. V. 837. P. 47-59.

Rautio M. The use of Cladocera in paleolimnology // Encyclopedia of Quaternary Sciences. Elsevier, Amsterdam. 2007. P. 2031-2039.

Sadyrin V.M. Zooplankton // Pechora Delta. Structure and dynamics of the Pechora Delta ecosystems (1995-1999). Lelystad: Henk Bos, RIZA, 2000. P. 115-119.

Seleznev D.G., Prokin A.A., Kurina E.M. Methodology for the identification and analysis of species associations in biological communities using statistical distributions. Preprint. 2024.

Subetto D.A., Nazarova L.B., Pestryakova L.A., Syrykh L.S., Andronikov A.V., Biskaborn B., Diekmann B., Kuznetsov D.D., Sapelko T.V., Grekov I.M. Paleolimnological Studies in Russian Northern Eurasia: A Review // Sibirskii Ekologicheskii Zhurnal. 2017. №4. P. 369-380.

Sweetman J.N., Rühland K.M., Smol J.P. Environmental and spatial factors influencing the distribution of cladocerans in lakes across the central Canadian Arctic treeline region // J. Limnol. 2010. V. 69(1). P. 76-87.

Szeroczyńska K., Sarmaja-Korjonen K. Atlas of Subfossil Cladocera from Central and Northern Europe // Friends of the Lower Vistula Society. 2007. 84 p.

Wetzel, R.G. Limnology. Lake and River Ecosystems. Academic Press, 2001. 1014 p.

FAUNISTIC ASSOCIATIONS OF RECENT CLADOCERA COMMUNITIES IN TUNDRA LAKES OF THE PECHORA RIVER DELTA (NENETS AUTONOMOUS OKRUG)

N.M. Nigmatullin, L.A. Frolova, G.R. Nigamatzyanova

The taxonomic composition and structure of recent Cladocera communities from surface sediments of 47 tundra lakes in the Pechora River delta (Russian Arctic) were studied. A total

of 41 Cladocera taxa belonging to 8 families were identified, with Chydoridae being the most taxonomically rich, accounting for 68% of the total species number. Local faunistic associations of Cladocera in the studied lakes were determined. At a significance level of $p \leq 0.01$, three clusters of interrelated Cladocera taxa were identified in the study region.

НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЗООБЕНТОСЕ БАССЕЙНА РЕКИ ГОЛОУСТНАЯ (ЗАПАДНОЕ ПОБЕРЕЖЬЕ ОЗ. БАЙКАЛ)

Н.А. Никулина, И.А. Бутусин
Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского

В сообщении представлены характеристика зообентоса водоемов бассейна р. Голоустная, которая впадает в оз. Байкал на западном побережье в одном из распадков Приморского хребта. Большая часть сборов проводилась в реках Нижний и Верхний Кочергат, а также непосредственно в дельте самой реки. На основании проведенных исследований установлено присутствие представителей разных систематических групп гидробионтов. Чаще всего зарегистрированы поденки, ручейники, веснянки (Ephemeroptera, Trichoptera, Plecoptera). Обнаружены несколько видов моллюсков, плоские, малощетинковые черви и пиявки.

Исследования гидрофауны различных водоемов Восточной Сибири имеет важное народно-хозяйственное значение. Особенно это касается многочисленных рек, впадающих в озеро Байкал.

Одной из крупных рек, протекающей в распадках Приморского хребта (западное побережье), является река Голоустная, имеющая общую протяженность более 100 км с площадью водосборного бассейна 2300 км^2. В дельте реки располагается село Большое Голоустное. Помимо постоянно живущего населения, в весенне-летне-осенний периоды здесь находится большое количество туристов.

Экосистемы дельты р. Голоустная представлены уникальным лугово-степным комплексом растительных сообществ, свойственным локальным реликтовым формациям западного побережья Байкала. Отличаясь крупными размерами, дельта включает комплекс сочетающихся переувлажненных и заболоченных лугов с сообществами шлейфовых литофильных мелко-дерновиннозлаковых и низкоразнотравных степей (Беркин и др., 1993).

Цель – выяснить систематическую принадлежность зообентоса в нижнем течении р. Голоустная.

Сбор зообентоса проводился в 2022-2024 гг. по общепринятой методике с последующим определением систематической принадлежности (Хейсин, 1962; Шиленков, 2012). В р. Голоустная впадают реки Средний и Верхний Кочергат. Всего собрано около 2000 экземпляров беспозвоночных животных в реках Нижний и Верхний Кочергат и в дельте р. Голоустная (Бутусин, Никулина, 2023; Никулина и др., 2019; Раимжонова, Никулина, 2023).

Установлено, что зообентос в бассейне нижнего течения р. Голоустная включает представителей 4-х типов беспозвоночных животных, среди которых доминируют личинки стадии насекомых: ручейники, поденки, веснянки. Реже встречаются полужесткокрылые, плоские, кольчатые черви и моллюски. Наибольшее разнообразие среди беспозвоночных животных отмечено в отряде Ручейники – 38,1%, в равных долях отмечены поденки и моллюски – 14,3%, менее всего плоские, кольчатые черви, полужесткокрылые и стрекозы – 4,8%.

Систематический перечень собранных беспозвоночных:
Тип Плоские черви – Plathelminthes
Класс Ресничные черви – Turbellaria
Planaria torva OF Muller,1773 (имаго)
Тип Кольчатые черви – Annelida
Herpobdella octoculata L., 1758 (имаго)
Род Олигохеты – Oligoheta (имаго)
Тип Членистоногие – Arthropoda
Класс Насекомые – Insecta (ларвальные стадии)
Отряд Ручейники – Trihoptera
Hydroptila Dalman, 1819
Goera Stephens, 1829
Leptocerys Brewster, 1815
Limnophilus Brewster, 1815
Stenophylax Kolenati, 1848
Chaetopteryx Stephens, 1829
Molanna Curtis, 1834
Policentropus Curtis, 1835
Отяд Поденки – Ephemeroptera
Heptogenia Walsh, 1863
Leptophlebia Westwood, 1840
Ecdyonurus Eaton, 1868
Отряд Стрекозы – Odonata (ларвальные стадии)
Leucorrhinia Brittinger, 1850
Отряд Веснянки – Plecoptera (ларвальные стадии)
Отряд Полужесткокрылые – Hemiptera
Род Водомерки – Geris *(*имаго*)*
Тип Моллюски – Mollusca (имаго)
Valvata piscinalis O.F. Muller, 1774
Lymnaea (*Radix) ovata* Drapamaud, 1805
L. stangalis L., 1758
L. truncatula O.F. Muller, 1774

На сегодняшний день территория нижнего течения р. Голоустная подвергается активному освоению. От г. Иркутска достроена хорошая автомобильная трасса, которая завершается в с. Большое Голоустное.

Постоянное население и приезжающие туристы из разных регионов занимаются рыбной ловлей, т.к. в указанных выше реках обитают такие рыбы, как например, хариус, ленок, а дельте р. Голоустная зарегистрированы мальки омуля.

Все это свидетельствует о том, что необходимо проводить постоянные круглогодичные исследования по зообентосу рек, впадающих в р. Голоустная и формировать базу данных, которая позволит достоверно оценивать беспозвоночных животных, как кормовую базу для ценных видов рыб.

Литература

Беркин Н.С., Филиппова С.А., Бояркин В.М., Наумова А.М., Руденко Г.В. Иркутская область (природные условия административных районов). Иркутск: Изд-во ИГУ, 1993. 304 с.

Бутусин И.А., Никулина Н.А. Некоторые сведения о моллюсках в дельте реки Голоустная // Матер. национальной научно-практ. конф. «Чтения, посвящ. 100-летию со дня рождения Н.С. Свиридова. Молодежный: ИрГАУ. 2023. С. 88-91.

Никулина Н.А., Демидович А.П., Никулин А.А., Додоева Н.С. Исследования гидрофауны в нижнем течении р. Голоустная (Западное побережье оз. Байкал) // Вестник ИрГСХА. 2019. Вып.95. С. 69-76.

Раимжонова Р.Р.К., Никулина Н.А. Группы гидробионтов, зарегистрированные в среднем и нижнем течении р. Нижний Кочергат // Матер. нац. науч.-практ. конф. «Чтения, посвящ. 100-летию со дня рождения Н.С. Свиридова» // Молодежный: ИрГАУ, 2023. С. 98–101.

Хейсин Е.М. Краткий определитель пресноводной фауны. М: Изд-во Мин-ва просвещения РСФСР, 1962. 92 с.

Шиленков В.Г. Учебная полевая практика по зоологии беспозвоночных: учебно-методическое пособие. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. 49 с.

SOME INFORMATION ON ZOOBENTHOS OF THE GOLOUSTNAYA RIVER BASIN (WEST COAST OF LAKE BAIKAL)

N.A. Nikulina, I.A. Butusin

The report presents original materials on zoobenthos collected by the authors during 2022-2024 in different water bodies of the Goloustnaya River basin, which flows into Lake Baikal on the western coast in one of the decays of the Primorsky Ridge. Most of the collections were made in the Nizhny and Verkhny Kochergat rivers, as well as directly in the delta of the river itself. The presence of representatives of different systematic groups of hydrobionts, predominantly larval stages, was established on the basis of the surveys conducted. The most frequently recorded species were mayflies, broodworms, paddlefish (Ephemeroptera, Trichoptera, Plecoptera). Several species of molluscs, flatworms, bristleworms and leeches were found.

ВИДОВОЙ СОСТАВ, ТАКСОНОМИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ИХТИОФАУНЫ И БИОЛОГИЯ СИГОВЫХ РЫБ В ОЗЕРАХ БАССЕЙНОВ РЕК СОЯНЫ И МЕГРЫ (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ)

А.П. Новоселов

ФИЦ комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН

Уточнен современный состав ихтиофауны озер бассейнов рек Сояны и Мегры, располагающихся на Беломорско-Кулойском плато Архангельской области. Выявлена видовая структура ихтиоценозов с выделением доминирующих групп. Определен систематический статус видов и их принадлежность к различным фаунистическим комплексам. Рассмотрены экология обитания и состав различных групп рыб в зависимости от характера их питания и естественного воспроизводства, а также хозяйственный статус видов.

При анализе процессов, происходящих в водных экосистемах под воздействием природных и антропогенных факторов, необходимо знание видового состава рыб, особенностей их распространения, экологии и биологических параметров. В условиях длительного ухудшения среды обитания проблема инвентаризации рыбного населения становится особо актуальной, а информация о составе ихтиофауны может быть использована при разработке общероссийских и региональных программ по изучению и сохранению биологического разнообразия (Решетников, Шатуновский, 1997; Соколов, Решетников, 1997; Шатуновский, 1997). Кроме того, уточненные данные по составу ихтиофауны водных бассейнов в различных регионах (разработка региональных

каталогов рыб) могут служить основой при составлении полного списка рыб в континентальных водоемах России.

В связи с развитием алмазодобывающей отрасти (месторождение им. В. Гриба) и необходимостью получения фоновых материалов для последующей оценки воздействия на окружающую среду была проведена рекогносцировочная съемка озер бассейнов рек Сояны (озера Ернозеро и Черное) и Мегры (Волчьи озера). В ходе работ определялся видовой состав ихтиофауны и основные биологические показатели рыб. Работы проводились в один и тот же сезон в конце июня. Сбор полевого ихтиологического материала проводился с помощью ставных жаберных сетей с размером ячеи от 15 до 50 мм, выставлявшихся на различных озерных биотопах. По результатам контрольного лова уточнен современный состав ихтиофауны озер, а также структура ихтиоценозов с выделением доминирующих групп.

Состав ихтиофауны обследованных озер представлен 7 видами рыб – сигом, ряпушкой, щукой, окунем, плотвой, налимом и ершом. В озере Черном в контрольных орудиях лова были отмечены все вышеуказанные виды, кроме ряпушки. В Волчьих озерах в пробах отсутствовал сиг, в оз. Ернозеро – ерш (табл. 1).

Таблица 1. Состав ихтиофауны обследованных озер

Семейства и виды рыб	Бассейн р. Сояны		Бассейн р. Мегры
	оз. Черное	оз. Ернозеро	Озера Волчьи
Сем. Сиговые - Coregonidae			
1. Европейская ряпушка - C. albula (Linnaeus, 1758)	-	+	+
2. Сиг - C. lavaretus (Linnaeus, 1758)	+	+	-
Сем. Щуковые - Esocidae			
3. Щука - E. lucius Linnaeus,1758	+	+	+
Сем. Карповые - Cyprinidae			
4. Плотва – R. rutilus (Linnaeus, 1758)	+	+	+
Сем. Налимовые - Lotidae			
5. Налим - L. lota (Linnaeus, 1758)	+	+	+
Сем. Окуневые - Percidae			
6. Ерш - G. cernuus (Linnaeus, 1758)	+	-	+
7. Окунь - P. fluviatilis Linnaeus, 1758	+	+	+
В с е г о:	6	6	6

В систематическом плане обитающие в озерах рыбы относятся к 4 отрядам и 5 семействам. Отряд лососеобразных включает семейства *сиговых* (европейская ряпушка и сиг) и щуковых (щука обыкновенная). По одному семейству входят в отряды карпообразных (семейство *карповых* - плотва) и трескообразных (семейство *налимовых* - налим). В отряде окунеобразных семейство *окуневых* включает окуня и ерша. В количественном отношении семейства сиговых и окуневых включают по два вида, семейства карповых, щуковых и налимовых – по одному (табл. 1).

По классификации Г.В. Никольского (1980) всех рыб, обитающих в озерах бассейнов рек Сояны и Мегры, можно отнести к 2 пресноводным фаунистическим комплексам. Они состоят из примерно одинакового количества входящих в них видов. Четыре вида (или 57,1%) относятся к бореальному равнинному комплексу. Он представлен щукой, окунем, ершом и плотвой. Три вида (или 42,9%) включает арктический пресноводный комплекс - сига, европейскую ряпушку и налима (табл. 2).

По принадлежности к экологическим группам, все обследованные нами озерные рыбы являются пресноводными туводными видами, жизненный цикл которых полностью приурочен к определенным озерным биотопам.

Таблица 2. Видовой состав и соотношение пресноводных фаунистических комплексов в озерах рек бассейнов Сояны и Мегры

Фаунистические комплексы	Количество видов	Доля в %	Виды рыб
Бореальный равнинный	4	54,2	Щука, окунь, ерш, плотва
Арктический пресноводный	3	42,9	Сиг, европейская ряпушка, налим
В с е г о:	7	100	

По характеру питания всех рыб можно отнести к четырем группам – бентофагам, планктофагам, эврифагам и хищникам (рис. 1). Типично бентосное питание имеет только сиг, исключительно планктонное – только европейская ряпушка. В численном выражении они составляют по 14,3% от всего состава ихтиофауны. Хищным питанием характеризуются около половины (42,8%) озерных рыб, представленных щукой, окунем и налимом. Два вида (28,6%) составляют эврифаги, т.е. рыбы со смешанным характером питания. В обследованных нами озерах эта трофическая группа рыб представлена плотвой и ершом.



Рис. 1. Распределение видов рыб по характеру питания в обследованных озерах бассейнов рек Сояны и Мегры

По типу размножения все озерные рыбы относятся к двум группам в зависимости от отношения к нерестовому субстрату (рис. 2). В численном отношении доминируют литофилы, составляющие более половины (57,1%) обитающих в озерах рыб. На каменисто-галечниковых грунтах откладывают икру осенне-нерестующие сиг и ряпушка, а также размножающийся в зимний период налим. Порционно откладывающий икру ерш нерестится на песчано-галечниковых грунтах. Фитофилы в озерах численно составляют примерно такое же количество – 42,9%, и представлены только весенне-нерестующими видами - плотвой, щукой и окунем.

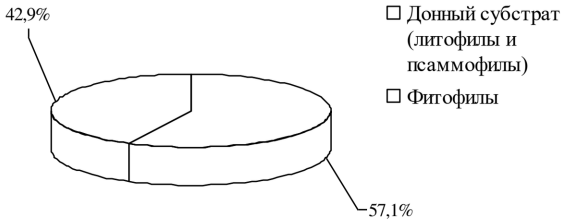


Рис. 2. Распределение видов рыб по типу размножения в обследованных озерах бассейнов рек Сояны и Мегры

Хозяйственный статус видов рыб, населяющих озера бассейнов рек Сояны и Мегры, различен. Сиг и европейская ряпушка относится к ценным промысловым видам, но малочисленны. Окунь, ерш и плотва, составляющие в озерных экосистемах так называемые «ядра ихтиоценозов» (Жаков, 1984), относятся к второстепенным промысловым рыбам и наиболее массовым объектам при любительском лове. Щука и налим - одиночные хищники, привязанные к определенной территории местообитания, вследствие чего их роль в промысле и любительском лове относительно невелика.

Соотношение видов в контрольных орудиях лова, характеризуя видовую структуру исследуемых водоемов, позволяет выделить доминирующие комплексы рыб, а также отнести озера к тем или иным типам в соответствии с их рыбохозяйственной классификацией. Проведенный анализ видового состава и структуры ихтиоценозов обследованных озер свидетельствует о следующем. В озерах как Соянского, так Мегорского бассейнов преобладают частиковые виды рыб (94-95% от всех видов рыб). Среди них ядро ихтиоценозов составляют такие массовые виды как плотва (63-65%) и окунь (10-20%). Сиговые рыбы малочисленны и представлены в оз. Черном лишь сигом (6%), в Волчьих озерах – лишь ряпушкой (4,3%). Согласно рыбохозяйственной классификации озер они относятся к плотвично-окуневому типу с господством в составе их ихтиофауны плотвы и окуня (Жаков, 1984; Китаев, 1984). При дальнейшем возрастании дистрофикации плотвично-окуневые озера могут превратиться либо в щучьи, либо в чисто окуневые.

Сиг. Средняя длина (по Смитту) составляла 25,4 см, средняя масса 249 г, при этом самки сига имели несколько большие значения линейно-весовых параметров. Возрастная структура популяции была представлена возрастным рядом от 4+ лет до 8+ лет с доминированием рыб в возрасте 5+ и 6+ лет. Они были отмечены в равном количестве и в сумме составляли 64% от всех выловленных рыб. В значительно меньшем количестве встречались особи в возрасте 4+ (12%), 7+ (16%) и 8+ (8%) лет. Средний возраст сига за три года исследований составил 5,7 лет. Соотношение полов характеризовалось преобладанием самцов (52,0%) над самками (48,0%). Из проанализированных половозрелых особей сига в весенне-летние периоды 2002-2004 гг. более четверти из них (28,0%) имели II стадию зрелости гонад. Лишь незначительное их количество (16%) находились в переходной II-III стадии, а более половины (56,0%) характеризовались донерестовой III стадией зрелости половых продуктов. Среднегодовые линейные приросты сига в оз. Черном изменялись в пределах от 2,1 см/год на пятом году жизни до 1,5 см/год на восьмом году. Среднегодовые весовые приросты увеличивались с 31,6 г/год в возрасте 4+ -5+ лет до 43,5 г/год в возрасте 7+-8+ лет.

Ряпушка. Средняя длина (по Смитту) проанализированной ряпушки составила 13,4 см, средний вес 34,1 г. Возрастная структура популяции была представлена возрастным рядом от 2+ лет до 5+ лет с доминированием рыб в возрасте 3+ (32,5%). Следует отметить относительно равномерное распределение особей в пределах возрастного ряда. Рыбы в возрасте 2+ лет составляли 17,5%, в возрасте 4+ лет – 22,5%, и в возрасте 5+ лет – 27,5%. Средний возраст ряпушки за весь период исследований составил 3,6 лет. Половой состав был представлен самцами (47,5%) и самками (52,5%). Более половины (62,5%) проанализированных половозрелых особей ряпушки в весенне-летний период находились в III стадии зрелости гонад. Лишь незначительное количество рыб (по 15,0%) находились во II и переходной II-III стадии, единичные особи (7,5%) – в переходной III-IV стадии.

Мониторинг водных экосистем на подверженных хозяйственной деятельности территории предполагает анализ изменений, происходящих в фауне как в пространственном, так и во временном аспектах. В этой связи, исследования должны

проводиться на всех наиболее важных в хозяйственном отношении водоемах с необходимой периодичностью (ежегодно, раз в три или пять лет).

Литература

Жаков Л.А. Формирование и структура рыбного населения озер Северо-Запада СССР. М.: Наука,1984. 144 с.

Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М., 1984. 207 с.

Никольский Г.В. Структура вида и закономерности изменчивости рыб. М.: Пищевая промышленность, 1980. 182 с.

Решетников Ю.С. Шатуновский М.И. Теоретические основы и практические аспекты мониторинга пресноводных экосистем // Мониторинг биоразнообразия. М., 1997. С. 26-32.

SPECIES COMPOSITION, TAXONOMIC DIVERSITY OF ICHTHYOFAUNA, AND BIOLOGY OF WHITEFISH IN LAKES OF THE SOYANY AND MEGRA RIVER BASINS (ARKHANGELSK REGION)

A.P. Novoselov

The modern composition of the ichthyofauna of lakes in the basins of the Soyana and Megra rivers located on the Belomorsko-Kuloysky plateau of the Arkhangelsk region has been clarified. The species structure of ichthyocenoses with the allocation of dominant groups has been revealed. The systematic status of the species and their belonging to various faunal complexes have been determined. The ecology of the habitat and the composition of various groups of fish are considered, depending on the nature of their nutrition and natural reproduction, as well as the economic status of the species.

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА ОЗЁРНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ: ФУНКЦИЯ СКОРОСТИ РОСТА ФИТОПЛАНКТОНА

Н.И. Нуриева[1], Б.В. Адамович[1,2], А.Б. Медвинский[1]

[1]Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН

[2]Белорусский государственный университет

С помощью KDD-подхода на основе данных по биомассам фито- и зоопланктона, полученных в результате мониторинга экосистемы Нарочанских озер, мы получили функцию роста фитопланктона в виде рядов данных. Функция роста фитопланктона, вычисленная таким образом, оказалась довольно близка к P/B-коэффициентам, рассчитанным по валовой первичной продукции (GPP). Было показано, что функция роста фитопланктона синхронизуется по фазе с колебаниями температуры воды в широком диапазоне параметров модели, при этом, однако, динамика биомассы фитопланктона с температурой не синхронизуется.

Фитопланктон играет определяющую роль в усвоении питательных веществ, попадающих в толщу воды. Удельная продукция (отношении продукции к биомассе) или скорость роста фитопланктона представляет существенный интерес и регулируется множеством факторов: светом, температурой, содержанием биогенных элементов, внутривидовой и межвидовой конкуренцией. Существует множество моделей динамики

биомассы фитопланктона, учитывающих лимитирование одним из биогенов или освещенностью, различие температурных оптимумов для систематических групп, трофические взаимоотношения с консументами. Однако подобная детализация приводит к тому, что модель содержит огромное количество параметров и функциональных зависимостей, адекватная оценка которых для конкретного водоема представляет некоторые трудности. Предлагаемый подход (knowledge-and data-driven (KDD) modeling) (Medvinsky et al., 2023) позволяет избежать оценки большого числа параметров за счет включения в модель непосредственно данных экологического мониторинга. В результате такого подхода в виде временных рядов могут быть получены функции, в частности скорость роста фитопланктона, измерения которых в ходе мониторинга не проводились. В данной работе гибридное моделирование использовано при исследовании динамики планктонных сообществ Нарочанских озёр.

В рамках KDD-подхода мы рассматриваем модель типа хищник-жертва (1)-(2). В уравнении (1) показано, что изменении биомассы фитопланктона P зависит от биомассы на предыдущем шаге, скорости размножения G(t) и интенсивности выедания фитопланктона зоопланктоном f(t)Z(t).

$$\frac{P(t+1)-P(t)}{P(t)} = G(t) - f(t)Z(t) \quad (1)$$

$$\frac{Z(t+1)-Z(t)}{Z(t)} = \beta f(t)P(t) - \alpha \quad (2)$$

При этом предполагается (ур-е 2), что прирост биомассы зоопланктона обеспечивается за счет перехода части потребленной биомассы фитопланктона (β) в биомассу зоопланктона. Параметр α отвечает за смертность зоопланктона в результате выедания его рыбой и других причин. Варьируя параметр α, мы получаем функции скорости роста фитопланктона G(t) и скорости выедания фитопланктона f(t) в виде рядов данных. β примем равным 10% согласно правилу Линдемана (Lindeman, 1942) (при вычислениях будем варьировать значение этого параметра от 0 до 0.4). Параметр α оценили, исходя из P/B-коэффициентов для зоопланктона Нарочанских озер (Винберг и др., 1971). Шаг модели по времени составляет один месяц, что соответствует частоте проводимых на озерах наблюдений. Варьируя параметр α, мы получаем функции скорости роста фитопланктона G(t) (рис. 1) и скорости выедания фитопланктона f(t) в виде рядов данных.

Полученные таким образом оценки скорости роста фитопланктона сравнивали с P/B коэффициентами фитопланктона, рассчитанными из валовой первичной продукции. Валовую первичную продукцию планктона (gross primary production, GPP) измеряли скляночным методом в кислородной модификации. Интегральные пробы (2 светлые и 2 темные склянки) воды экспонировали в озере на глубине оптимального фотосинтеза (30-40 см) в течение суток. Содержание кислорода определяли методом Винклера. В качестве оценки продукционных возможностей фитопланктона использовали значения P/B коэффициентов фитопланктона, т.е. отношение продукции фитопланктона за сутки к его биомассе, измеренные в одинаковом объеме воды. Для расчета P/B коэффициентов величины продукции и биомассу пересчитывали в калории, использую следующие пересчетные коэффициенты: 1 мг O_2 при измерении продукции эквивалентен 3,38 кал, калорийность 1 мг сырой биомассы фитопланктона равна 0,8 кал. При расчете P/B коэффициентов также принимали, что собственное дыхание фитопланктона составляет 20% от его продукции и эту часть вычитали из GPP (Винберг, 1960; Михеева, 1970; Обозначения …, 1972; Wetzel, Likens, 2000). Рассчитанные таким образом суточные P/B коэффициенты умножали на 30 и получали месячные значения для наглядности и сравнения абсолютных величин P/B коэффициентов с скоростью роста фитопланктона – phytoplankton growth rate (G).

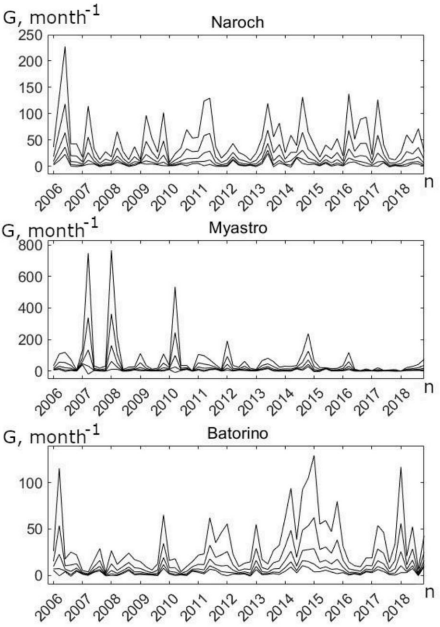


Рис. 1. Полученные временные ряды скорости роста фитопланктона G(n) α(месяц$^{-1}$) = 0.5, 1, 2, 4, 8 (снизу вверх); β = 0.1

GPP статистически значимо отличилась во всех трех озерах. Продукционные способности фитопланктона (P/B и G) статистически значимо отличались только в эвтрофном озере Баторино, где они были значительно ниже, чем в менее продуктивных озерах Мястро и Нарочь. В озерах отмечено снижение фосфорной нагрузки и валовой первичной продукции (GPP) за 40-летний период наблюдений (рис. 2).

Мы смогли рассчитать P/B коэффициенты фитопланктона начиная с конца 1980-х годов для озер Нарочь и Мястро и начиная с 1990-х для озера Баторино, т.е. в тот период, когда у нас имеются данные одновременно для GPP и биомассы фитопланктона. В озерах Нарочь и Мястро значения P/B коэффициентов значимо увеличиваются до конца 1990-х и потом также значимо снижаются с начала до конца 2000-х (рис. 3). В озере Баторино не отмечено значимых изменений P/B коэффициентов в течение всего периода наблюдений. В отличие от P/B коэффициентов значения скорость роста фитопланктона (G) мы можем рассчитать за весь период исследований, когда имеются данные о биомассе фитопланктона и зоопланктона. Значения G показывает статистически значимую тенденцию изменений только в озере Мястро, которая схожа с изменением в этом озере значений P/B коэффициентов, с той лишь разницей, что статистически значимое увеличение G отмечено с самого начала наблюдений в конце 1970-х, а значимое снижение продолжается до настоящего времени. В озерах Нарочь и Баторино не выявлено значимых изменений G в течение всего периода наблюдений. В целом тенденция изменение продукционных способностей фитопланктона (P/B коэффициенты и функция роста фитопланктона G) отличается как от концентрации общего фосфора, так и продукции фитопланктона.

Функция роста фитопланктона G, вычисленная с помощью KDD-подхода, оказалась довольно близка к P/B-коэффициентам, рассчитанным по валовой первичной продукции (GPP). Коэффициент корреляции между G и P/B довольно высок и равен 0.7.

Было показано, что функция роста фитопланктона синхронизуется по фазе с колебаниями температуры воды в широком диапазоне параметров модели, при этом, однако, динамика биомассы фитопланктона с температурой не синхронизуется (Medvinsky et al., 2023).

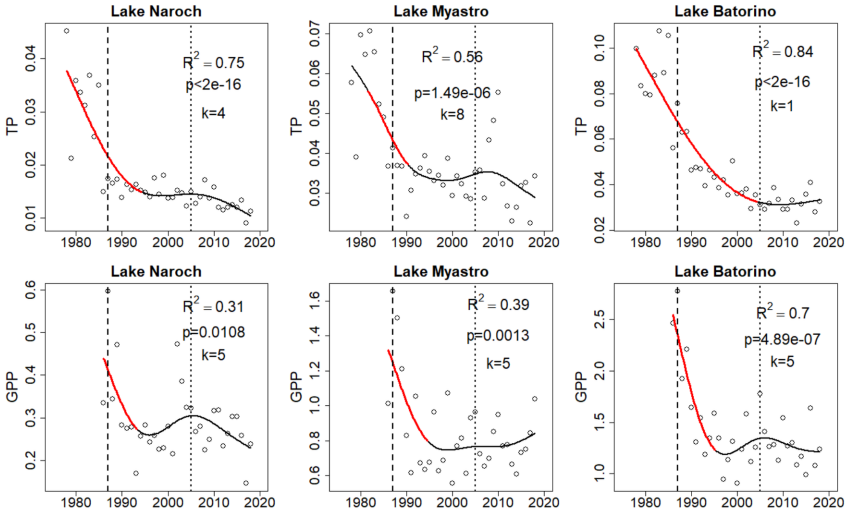


Рис. 2. Многолетние изменения концентрации общего фосфора (TP, мг/л) и суммарной первичной продукции фитопланктона (GPP, мгО $л^{-1}$·сут)

Синий цвет линий обозначает статистически значимое увеличение, красный цвет – статистически значимое снижение, черный цвет – отсутствие статистически значимых изменений. R2 обозначает долю общей дисперсии, объясняемую подобранными моделями, kx – базовый размер (максимальную гладкость) подобранных сплайнов. Пунктирная линия – граница между периодом высокой фосфорной нагрузки и промежуточным периодом, точечная линия – граница между промежуточным периодом и периодом низкой фосфорной нагрузки

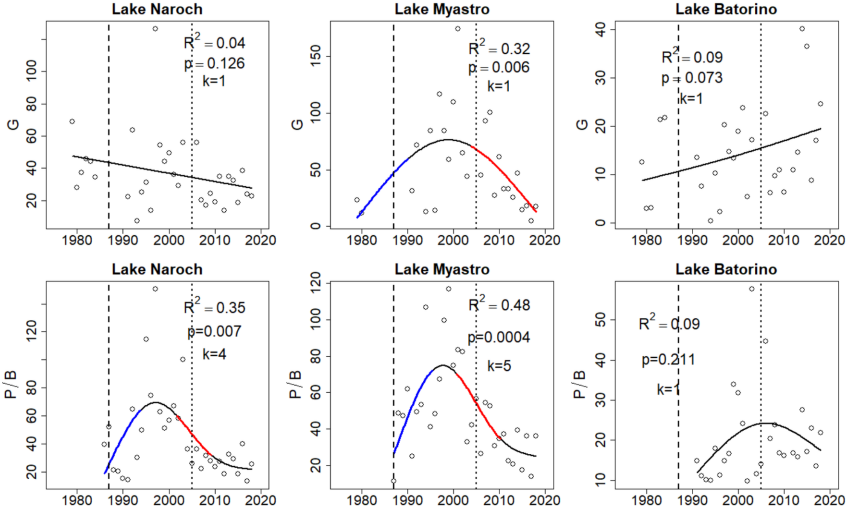


Рис. 3. Многолетние изменения скорости роста фитопланктона (G, α=4, β=0.1) и удельной месячной продукции фитопланктона (P/B) в озерах Баторино, Мястро и Нарочь. Цвета и формы линий, R2 и kx – как на рис. 2

Работа поддержана грантом РНФ 23-24-00408.

Литература

Винберг Г.Г., Бабицкий В.А., Гаврилов С.И., Гладкий Г.В., Захаренков И.С., Ковалевская Р.З., Михеева Т.М., Невядомская П.С., Остапеня А.П., Петрович П.Г., Потаенко Ю.С., Якушко О.Ф. Биологическая продуктивность озер разного типа // Биопродуктивность озер Белоруссии. Минск, 1971. С. 5-33.

Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.

Михеева Т.М. Оценка продукционных возможностей единицы биомассы фитопланктона // Биологическая продуктивность эвтрофного озера. М.: Наука, 1970. С. 50-70.

Обозначения, единицы измерения и эквиваленты, встречаемые при изучении продуктивности пресных вод. Л.: Советский комитет по МБП, 1972.

Lindeman R.L. The trophic-dynamic aspect of ecology // Ecology. 1942. 23. P. 399–417.

Medvinsky A.B., Nurieva N.I., Adamovich B.V., Radchikova N.P., Rusakov A.V. Direct input of monitoring data into a mechanistic ecological model as a way to identify the phytoplankton growth-rate response to temperature variations // Sci. Rep. 2023. 13. 10124.

Wetzel R.G., Likens G.E. Limnological analysis. Springer-Verlag. New York, 2000.

MATHEMATICAL ANALYSIS OF LAKE ECOSYSTEM MONITORING RESULTS: THE PHYTOPLANKTON GROWTH RATE FUNCTION

N.I. Nurieva, B.V. Adamovich, A.B. Medvinsky

Using the KDD approach, based on the data on phyto- and zooplankton biomasses resulted from monitoring of the Naroch Lakes ecosystem, we obtained the phytoplankton growth function in the form of data series. The phytoplankton growth function turned out to be close to the P/B coefficients calculated based on the gross primary production (GPP). It is shown that the phytoplankton growth function is phase-locked with water temperature variations over a wide range of model parameters, while the dynamics of phytoplankton biomass is not synchronized with temperature.

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БАЙКАЛЬСКОЙ НЕРПЫ (*PUSA SIBIRICA* GM.) В РЕКРЕАЦИОННЫХ ЦЕЛЯХ НА ПРИМЕРЕ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА (ОЗ. БАЙКАЛ)

М.Е. Овдин[1,2], Е.А. Петров[2]
[1]*ФГБУ «Заповедное Подлеморье»*
[2]*Байкальский музей СО РАН*

Описан опыт использования байкальской нерпы (*Pusa sibirica* Gm.) в целях рекреации на оз. Байкал. В период с 2013 по 2023 гг. количество людей, посетивших лежбище байкальской нерпы на острове Долгий (архипелаг Ушканьи острова), увеличилось в 7 раз. Высказана озабоченность ростом фактора беспокойства и обоснована необходимость изучения поведения байкальской нерпы на лежбищах как в отсутствии, так и при наличии различных факторов беспокойства антропогенного генезиса. Сведения о реакции байкальской нерпы на наиболее часто возникающие стрессоры различной интенсивности в условиях растущего потока туристов, приобретают особую

ценность для выработки управленческих решений, направленных на минимизацию негативного влияния человека на диких животных.

Озеро Байкал обладает значительным количеством природных достопримечательностей и относительно хорошо развитой инфраструктурой, благодаря чему является главным туристическим объектом в индустрии гостеприимства Республики Бурятия. В соответствии с Распоряжением Правительства РФ от 20.09.2019 г. №2129-р «О Стратегии развития туризма в РФ на период до 2035 г.», наша страна рассматривается как перспективная территория для развития экологического туризма и Байкалу отводится заметная роль в таком приоритетном направлении, как рекреационный и просветительский туризм. Забайкальский национальный парк, находящийся под управлением ФГБУ «Заповедное Подлеморье», занимает ключевое место в развитии этого сектора туризма на северо-восточном побережье Байкала, где практически в первозданном виде сохранились природные ландшафты, ценные в биологическом и рекреационном плане урочища, и редкие и находящиеся под угрозой уничтожения виды животных. К последним в первую очередь относится байкальская нерпа (*Pusa sibirica* Gmelin, 1778).

Этот небольшой тюлень, имеющих морские корни, удивительным образом проник в пресноводное озеро в центре Евразии и занял в нем верхнюю позицию в трофической цепи водоёма, оказывая прямое влияние на функционирование его экосистемы. В то же время популяция байкальской нерпы служит маркером состояния пелагической части байкальского гидробиоценоза, а опосредовано и всей экосистемы. Времена, когда использование этого вида ограничивалось исключительно его промыслом (Пастухов, 1993), прошли, отношение человека к животным изменилось и популярность нерпы, как рекреационного объекта, и сегмента эколого-просветительского туризма только увеличивается. Байкальская нерпа для наблюдения доступна в основном в летнее время, когда часть популяции выходит на береговые лежбища, главные из которых расположены на архипелаге Ушканьи острова (территория Забайкальского национального парка). Три Малых Ушканьих острова (рис. 1) сами по себе пользуются огромной популярностью среди туристов, а морфо-геологическое строение островов создаёт идеальные условия для лежбищ байкальской нерпы. В настоящее время не менее 35% протяжённости береговой линии трёх малых Ушканьих островов в той или иной степени используются нерпой под залёжки (Петров и др., 2023). Однако острова архипелага Круглый, Тонкий и частично Большой имеют заповедный статус, т. е. на них запрещена любая экономическая деятельность, и только о-в Долгий и юго-восточная часть Большого острова отнесены к особо охраняемой зоне, где допускается ведение туристической деятельности без создания мест размещения и ночлега (рис. 1 *В*).

В работе использованы результаты, полученные с помощью стационарной видеосистемы, установленной на смотровой площадке на о-ве Долгий (рис. 1*А*), фотоловушек, размещенных на малых островах, и БПЛА, а также статистически данные ФГБУ «Заповедное Подлеморье».

Показано, если фактор беспокойства, возникающий в результате деятельности людей, становится чрезмерным, это нарушает нормальные условия летнего местообитания байкальских нерп (Купчинский и др., 2023), количество которых на береговых лежбищах увеличивается год от года в связи с глобальным потеплением. На Байкале уже много лет наблюдаются изменения ледового режима в негативную для байкальской нерпы сторону: меняются сроки становления и вскрытия ледового покрова, толщина льда уменьшается, в отдельные годы динамика ледолома приобретает экстремальный характер –ледовый покров быстро разрушается, а плавающие льды

исчезают значительно раньше обычных сроков. Негативное влияние этих процессов на тюленей, для которых лед является средой обитания на протяжении 5–6 месяцев в году, разностороннее, но нагляднее всего оно проявляется на линьке. Байкальские нерпы не успевают вылинять на льду, и чтобы завершить этот важный физиологический процесс вынуждены выходить на берег (Петров и др., 2023). По этой причине на лежбищах скапливаются тысячи зверей, для которых спокойное пребывание в адекватных для линьки условиях очень важно.

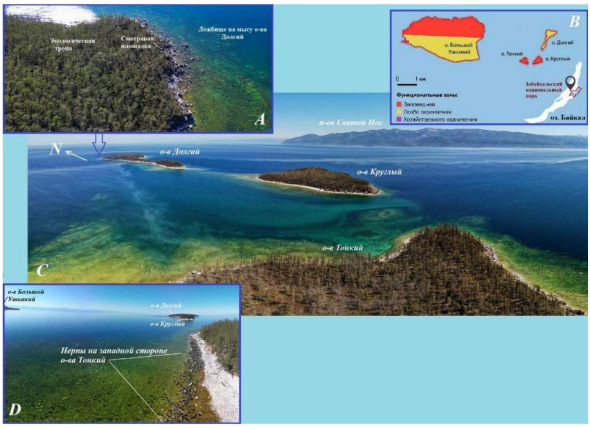


Рис. 1. Архипелаг Ушканьи острова: *A* – северная оконечность о-ва Долгий (тропа, площадка, лежбище); *B* – схема функционального зонирования Забайкальского национального парка; *C* – вид с БПЛА на малые острова; *D* – лежбище на западной стороне заповедного о-ва Тонкий

Наблюдения на о-ве Долгий, показали, что в случае не добровольного схода нерп в воду, т. е. когда в результате возникновения какого-либо фактора беспокойства паттерн «повышенная бдительность (обеспокоенность)» перерастает в паттерн «побег», нерпы могут переходить с одного участка лежбища на другой, более спокойный, но, по-видимому, не переходят или почти не переходят с одного острова на другой. Вероятно, так же поступают звери, залегающие на других островах (рис. 1 *D*). Поэтому, если по вине туристов происходит массовый сход нерп, залегающих на том или ином лежбищном участке (особенно, если сход приобретает черты панического бегства), то звери на этот участок подолгу не возвращаются, а иногда уходят вовсе и лежбище пустует сутки-двое.

Выявить оформленную суточную динамику численности зверей на лежбищах не удалось (отмечены шесть её вариаций), однако летом в благоприятную погоду большое количество нерп отмечается чаще всего в утренних сумерках (минимум с 4–5 ч) и утром, и к 12–14 ч численность достигает максимальных значений, после чего обычно снижается, а к вечеру чаще вновь растёт. Однако эти сведения противоречат прежним представлениям, согласно которым до 6–7 ч нерп на лежбищах обычно не бывает, первые залёжки возникают в 9, редко с 8 ч, до 11 ч численность нерп увеличивается, днём колеблется, а к 20–21 ч сокращается до нуля (Иванов, 1938). Причины столь резких перемен в поведении байкальской нерпы остаются непонятными, но мы не склонны думать, что они отражают вновь приобретённую адаптацию к высокой интенсивности антропогенного воздействия в светлое время суток, направленную на минимизацию

контактов с человеком, как отмечали для некоторых тюленей, обитающих в урбанизированной местности (например, Grigg et al., 2002; London et al., 2012).

Результаты наблюдений, проводимых в режиме онлайн с помощью стационарной видеокамеры (с 2016 г.), а также с помощью фотоловушек (2022–2023 гг.) показали, что наибольшее количество зверей посещали лежбище сразу после исчезновения плавающих льдов в северной части озера, т. е. в конце мая или в июне в зависимости от ледовой обстановки в тот или иной год. В июле численность нерп на лежбищах оставалась обычно высокой, а в августе сокращалась примерно вдвое. Байкальская нерпа использовала береговые лежбища и осенью, вплоть до наступления морозов и обледенения прибрежных глыб, однако интенсивность посещения береговых лежбищ резко снижается (рис. 2). В немалой степени выходу нерп на берег препятствовали неблагоприятные гидрометеорологические условия, которые естественно ухудшаются от августа к ноябрю, и нерпы выходили на берег только в промежутках между ненастными днями и то не всегда. По этой причине официальное посещение лежбища туристами заканчивается в сентябре.

Наши оценки численности байкальских нерп, посещающих лежбища, расположенные на малых Ушканьих островах, показали, что больше всего животных залегают не на о-ве Долгий, а на соседних островах Круглый и Тонкий. То есть наиболее зрелищные лежбища находятся на островах с заповедным режимом и уже по этой причине не могут использоваться в рекреационных целях. Надо отметить, что и сама природа охраняет нерп на этих островах: их окружает обширна мелководная платформа (Петров и др., 2023), делающая невозможным незаметный подход водного транспорта к берегам.

На о-ве Долгий, напротив, имеется место, куда непосредственно к берегу и достаточно скрытно от нерп могут подходить все маломерные суда и большинство более крупных судов, имеющихся в настоящее время на Байкале. В этом месте с 2014 г. был обустроен визитно-информационный центр, от которого, прослушав базовую информацию о байкальской нерпе и консультацию о правилах поведения, группы туристов по оборудованной настильной экологической тропе протяжённостью 350 м организовано попадают на смотровую площадку. Площадка замаскирована под окружающий ландшафт, она вмещает до 15 человек; туристы могут наблюдать за животными и делать замечательные съемки через специальные «бойницы», в идеале, не нарушая их естественного поведения. Экскурсионные группы сопровождает сотрудник национального парка.

Ежегодный рост потока туристов на Байкальской природной территории провоцирует усиление интереса к байкальской нерпе. Анализ имеющихся данных о посещаемости экологической тропы (лежбища) показывает устойчивую положительную динамику (рис. 3). С 2013 г. количество туристов, побывавших на лежбище байкальской нерпы, возросло более чем в 7 раз и в 2024 г. превысило 5,8 тыс. человек, т.е. в среднем по 1400 человек в месяц (июнь – сентябрь).

Учитывая «приемную емкость» смотровой площадки, количество туристов можно оценить как критическое. Очевидно, что посетители о-ва Долгий являются фактором беспокойства и потенциальным источником угрозы для тюленей, поскольку результатом неадекватного общения человека с тюленями является не только нарушение естественного поведения животных, но и более серьезные последствия, включая нарушения гормонального статуса (Petrov, Kupchinskii, 2023).

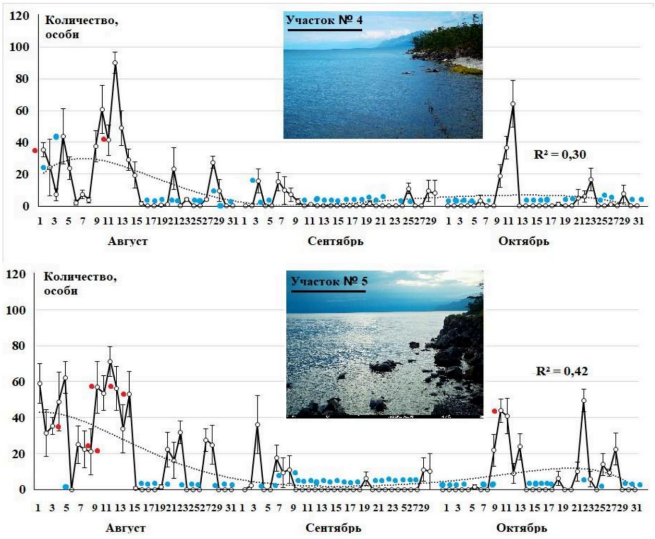


Рис. 2. Динамика численности байкальских нерп на лежбищных участках №№ 4 и 5 на о. Долгий в августе, сентябре и октябре 2022 г.

Красными точками обозначены дни, в которые отмечены массовые сходы нерп в воду, предположительно вызванные беспокойством; синими точками отмечены дни с неблагоприятными гидрометеорологическими условиями

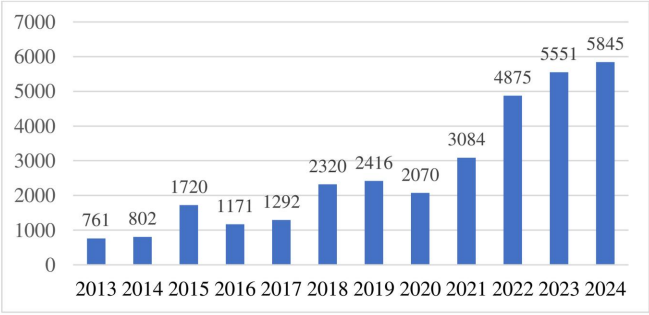


Рис. 3. Динамика количества посетителей (ось «у») лежбища байкальской нерпы на о-ве Долгий в период 2013–2023 гг.

Растущий интерес к байкальской нерпе требует более детального изучения поведения зверей на береговых лежбищах и их реакций на различные виды антропогенного воздействия (включая водный транспорт и БПЛА). Например, режим посещения лежбища может учитывать такие особенности поведения байкальской нерпы как суточную динамику заполняемости лежбища (численность зверей), неполное восстановление численности зверей после их схода (чаще всего под влиянием фактора беспокойства антропогенного характера), разную реакцию зверей на тот или иной

фактор (стрессор) и т.д. Также требуется изучить поведение самих посетителей, чтобы определить оптимальное время нахождения на смотровой площадке, численность групп. Например, длительное пребывание на площадке может понизить уровень осторожности человека и, соответственно, увеличить фактор беспокойства; следует предупреждать излишне эмоциональное поведение туристов на смотровой площадке.

Подобные работы только начаты, но очевидно, что их результаты помогут определить предельно допустимую рекреационную нагрузку и разработать соответствующие природоохранные управленческие решения.

Литература

Иванов Т.М. Байкальская нерпа, её биология и промысел // Известия Биолого-географического НИИ при Восточно-Сибирском государственном университете. 1938. Т. 8. Вып. 1–2. С. 5–119.

Купчинский А.Б., Овдин М.Е., Петров Е.А. Антропогенное влияние на байкальскую нерпу (*Pusa sibirica* Gm.) в береговой период ее жизни (по материалам 2022 года) // Биосфера. 2023. Т. 15, №3. С. 56–60.

Овдин М.Е. Интенсивность рекреационного использования берегового лежбища Байкальской нерпы *Pusa sibirica* Gm. на о. Долгий (Ушканьи острова, оз. Байкал) // Вестник Бурятского госуниверситета, 2024. №1. С. 20-24.

Пастухов В.Д. Байкальская нерпа: биологические основы рационального использования и охраны ресурсов. Новосибирск: ВО Наука, Сибирская издательская фирма, 1993. 272 с.

Петров Е.А. Купчинский А.Б., Сыроватский А.А. Ушканьи острова (оз. Байкал), их роль и значение в жизни байкальской нерпы (*Pusa sibirica* Gmelin, 1788, Pinnipedia) в современных условиях // Зоологический журнал. 2023. Т. 102. №12. С. 1421–1438.

Grigg E. K., Green D. E., Allen S. G., Markowitz H. Nocturnal and diurnal haul-out patterns of harbor seals (*Phoca vitulina richardsi*) at Castro Rocks, San Francisco Bay, California // Calif. Fish Game. 2002. V. 88. №1. P. 15–27.

London J.M. Ver Hoef J.M., Jeffries S.J., Lance M., Boveng P.L. Haul-out behavior of harbor seals (*Phoca vitulina*) in Hood Canal, Washington // PLoS One. 2012. Vol. 7(6). e38180.

Petrov E.A., Kupchinskii A.B. Extended Molting against the Back-ground of Climate Warming Explains the Emergence of the Baikal Seal (*Pusa sibirica*, Pinnipedia) onto Coastal Rookeries // Biol. Bull. 2023. V. 50. №8. P. 2050–2062.

EXPERIENCE AND PROSPECTS OF USE OF BAIKAL SEAL (PUSA SIBIRICA GM.) FOR RECREATIONAL PURPOSES ON THE EXAMPLE OF TRANSBAIKAL NATIONAL PARK (LAKE BAIKAL)

M.E. Ovdin, E.A. Petrov

The article describes the experience of using the Baikal seal (*Pusa sibirica* Gm.) for recreational purposes on Lake Baikal. In the period from 2013 to 2023, the number of people visiting the Baikal seal rookery on Dolgy Island (Ushkany Islands archipelago) increased 7 times. Concern is expressed about the growth of the disturbance factor and the need to study the behavior of the Baikal seal at rookeries both in the absence and in the presence of various disturbance factors of anthropogenic genesis is substantiated. Information about the reaction of the Baikal seal to the most frequently occurring stressors of varying intensity in the context of a growing flow of tourists is of particular value for developing management decisions aimed at minimizing the negative impact of humans on wild animals.

РАССЕЛЕНИЕ, СОСТОЯНИЕ И ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ МЕТАПОПУЛЯЦИИ ДВУСТВОРЧАТОГО МОЛЛЮСКА-ОБРАСТАТЕЛЯ *DREISSENA POLYMORPHA* В ВОДОЕМАХ-ОХЛАДИТЕЛЯХ АЭС РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: НА ПРИМЕРЕ ОЗЁР УДОМЛЯ И ПЕСЬВО

М.И. Орлова[1], Е.В. Строгова[1,2], В.В. Кузьмин[2]
[1]Санкт- Петербургский научный центр РАН
[2]ООО Научно-технический центр «ТЕХНОЭКОТОН»

Приведены сведения о современном приобретённом ареале представителя инвазионной понто-каспийской фауны беспозвоночных – дрейссены речной, её совместном обитании с другими Dreissenidae, расселяющимися по Евразии и Северной Америке, в техногенно-трансформированных пресных, высокоминерализованных и солоноватоводных водоемах, служащих источниками водоснабжения и охлаждения для объектов энергетики (АЭС). Результатами многолетних наблюдений за локальной популяцией *D polymorpha*, населяющей в течение полувека озёра Удомля и Песьво (Калининская АЭС), выявлены высокие адаптивные возможности вида, позволившие ему выжить и реколонизировать естественные и колонизировать новые, техногенные, местообитания в течение нескольких лет после резкой термификации озёр на фоне погодных флуктуаций, следствием чего явилась наблюдаемая смена паттерна пребывания личинок в планктоне.

Водоемы-охладители тепловых и атомных объектов энергетики чаще всего представляют собой исходно естественные озера, мелководные участки морских заливов и озеровидные (наливные, отсечные) искусственные водоемы, трансформация и эволюция которых, протекающая под воздействием техногенного фактора, способствует натурализации чужеродных видов донных беспозвоночных из числа талассоидов, отличающихся от типичных пресноводных групп наличием в жизненном цикле пелагической личиночной стадии (рис. 1).



Рис. 1. Личинки представителей сем. Dreissenidae - слева велигер *D. polymorpha*, в центре велигер *M. leucophaeata* – оба с развитыми макушками, справа велигер *M. leucophaeata* D-стадия (идентфикация и фотографии Л.П. Флячинской)

Наличие личинки, при всех ограничениях, которые налагает на такой жизненный цикл пресноводная среда, способствует колонизации вселенцами талассоидами не только доступных местообитаний в пределах водоема-реципиента, но также и систем водоснабжения и охлаждения самих объектов энергетики. Это делает таких вселенцев источниками биопомех и придает им практическое значение, в силу чего они становятся объектами многочисленных и разносторонних научных исследований. Типичным примером инвазионной фауны беспозвоночных, способных к освоению техноэкосистем, является понто-каспийская, в составе которой одно из известных в инвазионной биологии семейств - Dreissenidae (*Dreissena polymorpha, D. bugensis*). Разорванный нативный (доголоценовый) ареал семейства охватывает и отдельные участки эстуариев атлантического побережья (из Мексиканского залива ведет свое происхождение *Mytilopsis leucophaeata*).

Наиболее широкое распространение в исследованной выборке водоёмов (в 8 из 10) (рис. 2) получили упоминавшиеся выше двустворчатые моллюски-обрастатели семейства дрейссеновых (*D. polymorpha* (7 водоёмов, до 2010-х – 8), *D. bugensis* (4 водоёма), *Mytilopsis leucophaeta* (1 водоём)). Все 3 представителя семейства продолжают расселяться по пресным и солоноватым водоёмам Голарктики, включая техогенно-трансформированные, где становятся с одной стороны важным компонентом живых сообществ, с другой проблемой при эксплуатации технических объектов (Nalepa, Schloesser 2014).

Несмотря на очевидную изученность расселения, репродуктивной биологии, экологической физиологии и эдификационной роли в экосистемах-реципиентах наиболее известного инвазионного вида дрейссенид – *D. polymorpha* (zebra mussel, дрейссена речная) (Протасов, 1984; Дрейссена …, 1994), многолетняя динамика её популяций в водоёмах-охладителях АЭС имеет ряд недостаточно объяснённых особенностей, требующих дальнейших исследований. Так освоение ряда водоёмов, несмотря на множественные естественные заносы, может иметь отложенный характер, вплоть до нескольких десятилетий, при сформированности подходящих для натурализации условий уже через несколько лет после создания водохранилища (такова наиболее восточная локация приобретённого ареала – бассейн р. Пышма, Белоярская АЭС). Возможно и быстрое вымирание (вместе с другими, в том числе нативными, видами двустворчатых и брюхоногих моллюсков) через несколько лет после обычного расселения по водоему и массового развития на всей его акватории (наливной водоём в долине р. Сейм (Курская АЭС), при том что, в водоёме подпитки водохранилища (сама р. Сейм) признаки угнетения вида отсутствуют. В выборке водоёмов рисунка 2 имеется и вариант «пульсирующего во времени» состояния метапопуляции, которое не может быть объяснено только динамикой, характерной для прохождения чужеродным видом различных стадий процесса инвазии (Орлова, 2022) (озёра Удомля и Песьво (Калининская АЭС), рассмотренные ниже). В ряде случаев (рис. 2) отмечено сосуществование *D. polymoprha* как с чужеродными таксонами, принадлежащими к тому же семейству, так и таксономически далекими талассоидами, а также с пресноводным обрастателем – покрыторотой мшанкой р. *Plumatella,* оказывающимся, возможно, более успешным в освоении искусственных местообитаний в пределах электростанций в сравнении с талассоидами (Орлова и др., 2022).

Оценить долгосрочное воздействие эксплуатации объекта энергетики на динамику метапопуляции вселенца с двухфазным жизненным циклом оказалось возможно на *D. polymorpha* из озёр Удомля и Песьво. Для исследования личиночной (планктонной) популяции озёр Удомля и Песьво использованы данные за 2005-2007, 2010-2011, 2015, 2021-2023. гг., собранные на участках, расположенных в зоне циркуляции, обеспеченной работой станции. Перечисленные годы приходятся на периоды, когда термическая нагрузка и охват акватории озёр обогревом и циркуляцией вод существенно различались. В конечном итоге перемены в термическом режиме, актуальные и в настоящее время, привели к распространению тёплого пятна на большую часть акватории обоих озёр, пролонгации вегетационного сезона (с температурой воды выше 15-18°С) на значительную часть года (апрель-декабрь), отсутствию выраженной стратификации водной массы в течение всего года за исключением самого глубокого участка тектонического озера Удомля.

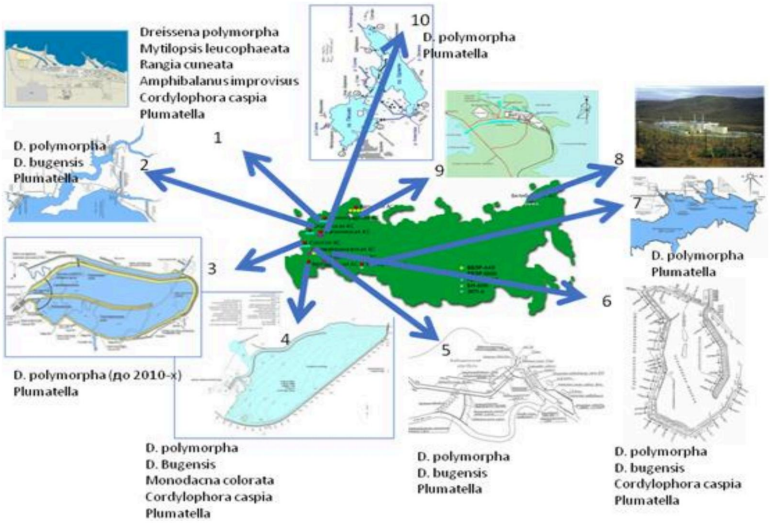


Рис. 2. Выборка водных объектов – источников водоснабжения АЭС Российской Федерации и распространение в них чужеродных унитарных (двустворчатые моллюски (сем. Dreissenidae: *Dreissena polymopra*, *D. bugensis*, *Mytilopsis leucophaeata*; сем. Mactridae: *Rangia cuneata*; сем. Cardiidae: *Monodacna colorata*, усоногие ракообразные – *Amphibalanus improvisus*) и модульных (колониальные гидроидные полипы – *Cordylophora caspia*, мшанки – род *Plumatella* (среди представилей данного рода имеются и чужеродные и аборигенные виды) водных беспозвоночных, способных к быстрой колонизации систем технического водоснабжения объектов промышленности и энергетики

1. Копорская Губа (восточная часть Финского залива Балтийского моря); 2 – водохранилище в русле р. Десна; 3 – наливной водоём в русле и долине р. Сейм; 4 – отсечной водоем, Цимлянское водохранилище; 5 – р. Дон и наливной искусственный водоём, запитывающийся из р. Дон; 6 – отсечной водоём, Саратовское водохранилище; 7 - водохранилище в русле р. Пышма; 8 – водохранилище в русле ручья Поннеурген; 9 - оз. Имандра; 10 – Система озёр Удомля (тектоническое) Песьво (термокарстовое) (бассейн р. Мста)

Размножение *D. polymorpha* обычно начинается при повышении температуры воды до 12-15°С, а массовый нерест происходит при температуре 18-20°С. Как правило, в естественных водоемах появление личинок в планктоне приходится на май-июнь, исчезновение - на конец лета-начало осени, весь период размножения длится 3-5 месяцев, пик численности личинок летом. Такой паттерн можно рассматривать как исходный («Исх.» на рисунке 3). При антропогенном подогреве сезон размножения может начинаться не в мае – июне, а уже в апреле (Дрейссена…, 1994) и заканчиваться в середине осени, кривая, отражающая динамику численности личинок при этом, может иметь прерывистый характер. Подобный паттерн динамики личиночного мероопланктона был зарегистрирован для 2005-2006 гг. В 2005 г. личинки единично были зарегистрированы вплоть до ноября. Их численность во все даты наблюдений была ниже критической (менее 1000 экз./м^3 по Claudi, Mackie, 1994). Отсутствие регистрации личинок в планктоне в 2007 году и резкое снижение численности донной части метапопуляции было расценено как вымирание этого моллюска в озёрах, в связи с чем наблюдения прекратились.

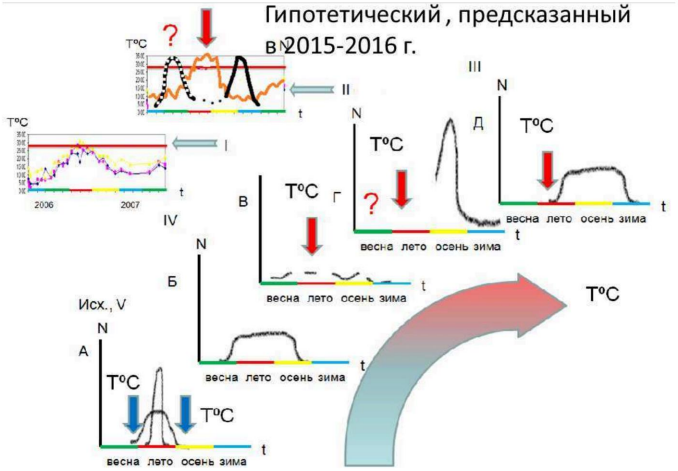


Рис. 3. Реконструкция гипотетической последовательности(А-Г) смены паттернов сезонной динамики личинок дрейссенид в процессе адаптации к меняющимся условиям под воздействием техногенной трансформации водоема на примере термификации

А- условно интактный водоем; водоем с умеренным влиянием гидротехнического объекта создающим благоприятный температурный и гидродинамический режим для низкобореального или субтропического вида обрастателя-фильтратора; В-нарастание воздействия и постепенное вымирание популяции; Г-реколонизация водоема за счет смены паттерна сезонной динамки личинок (с I на II); Д – фаза экспансии водоема популяцией «адаптированной» к новым условиям. Дополнительные диаграммы: парная к В – сезонный ход температуры воды на различных участках акватории озер в 2006 и 2007 гг, красная горизонтальная линия – верхний предел толератности взрослых особей дрейссены к повышению температуры; парная к Г – условная схема динамики температуры перегретого водоема и возможный гипотетический дизруптивный паттерн (не выявленный в ходе наблюдений), способствующий быстрой реколонизации водоема. Синие вертикальные стрелки – лимитирование развития низкими значениями температуры воды, вертикальные красные стрелки – то же относительно повышенных значений температуры

Однако, несмотря на возросший нагрев водоемов, а также на погодные условия летом в 2010-2011 гг.), уже осенью 2010 г., было отмечено массовое присутствие в озёрах планктонных личинок дрейссены (персональные сообщения), и в 2011 г. на фоне дальнейшей термификации наблюдения за *D. polymorpha* были возобновлены. Паттерн 2011 г. был кардинально иным, нежели в 2005-2006 гг. (рис 3, тип II). Основные его особенности: отсутствие прерывистости; краткосрочность– около 1.5 месяца против 6; сдвиг периода размножения на осень - массовое присутствие личинок (выше критического уровня) было характерно для начала-середины осени и вплоть до ноября их численность превышала критические значения (9914 экз./м^{3}для «средних» суток), что почти на два порядка выше, чем в 2005-2006 гг. На мелководьях основной акватории сформировались в этот год плотные донные поселения.

В целом «возобновившаяся» метапопуляция фактически реколонизировавшая бенталь, отличалась от «прежней» по (1) паттерну сезонной динамики личинок в планктоне и по (2) размерно-возрастному составу донных поселений - в сентябре 2011 г. особи старше года в донных поселениях встречены единично, основная масса особей имела размер 12-17 мм и, скорее всего, осела в конце 2010 г. Следующий период интенсивных наблюдений пришелся на 2015 г., когда популяция вступила в фазу

существования при постоянном перегреве и дополнительном усилении циркуляции водных масс после полного ввода в действие одной из очередей электростанции. Паттерн 2015 г. сходен с таковым 2011 отсутствием разрывов и смещенным на осень пиком численности личинок. В 2016 г. (Орлова и др., 2016, рис. 3) была предсказана возможность дальнейшей эволюции периодичности размножения дрейссены в условиях перегрева, что нашло бы своё отражение в паттерне динамики меропланктона с двумя выраженными пиками – весенним и осенним, то есть приходящимися на периоды вегетационного сезона, соответствующие температурному оптимуму развития личинок (тип «гипотетический» на рисунке 3).

Данный прогноз можно считать сбывшимся - в последнее время (в 2021-2023 гг.) для дрейссены озёр Удомля и Песьво характерны два пика выхода личинок в планктон с периодом покоя в наиболее жаркое летнее время, при этом первый пик обычно приходится на апрель-май, второй остается в пределах паттерна II (фондовые материалы ООО НТЦ «ТЕХНОЭКОТОН»).

Для исследованных популяций дрейссенид из озёр Удомля и Песьво и различных по термическому режиму участков Финского залива (Орлова и др., 2016) выявлены в общей сложности шесть (включая предсказанный) основных паттернов сезонной динамики личинок (рис. 3). Проявление этих паттернов скорее всего отражает результаты приспособления вида к условиям обитания, меняющимся под влиянием объекта энергетики и погодных ситуаций отдельных лет.

DISPERSAL, STATE AND PECULIARITIES OF POPULATION DYNAMICS OF THE FOULING MUSSEL *DREISSENA POLYMORPHA* IN COOLING RESERVOIRS OF NUCLEAR POWER PLANTS OF THE RUSSIAN FEDERATION: ON THE EXAMPLE OF LAKES UDOMLYA AND PES'VO

M.I. Orlova, E.V. Strogova, V.V. Kuzmin

The contribution presents information on the modern range extension of the representative of the invasive Ponto-Caspian invertebrate – zebra mussel, its co-occurrence to other dreissenids, invading Eurasia and North America, in technogenically transformed fresh, highly mineralized and brackish water bodies, serving as sources of water supply and cooling reservoirs for energy facilities (NPP). The results of long-term observations under the local population of *D. polymorpha*, inhabiting lakes Udomlya and Pesvo (cooling ponds of the Kalinin NPP) for half a century, revealed high adaptive capabilities of the species, which allowed it to survive and to recolonize natural and colonize new technogenic habitats within few years after a dramatic change in the thermal regime along with climatic oscillations due to a severe shift in the pattern of larval presence in plankton.

ДИАТОМОВЫЕ СОВРЕМЕННЫХ ДОННЫХ ОСАДКОВ ОЗЕР ЛЕСНОЙ ЗОНЫ ВЕРХНЕГО И СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

О.В. Палагушкина[1], Н.Г. Баянов[2], Л.А. Фролова[3], Е.Н. Унковская[4]
[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет,
[2]Государственный природный биосферный заповедник «Керженский»
[3]Институт археологии и этнографии Сибирского отделения РАН
[4]Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник

Изучены диатомовые комплексы современных донных осадков озер лесной зоны, трех – в Верхнем Поволжье и одного – в Среднем Поволжье. Переход лесной зоны от Верхнего Поволжья к Среднему Поволжью провоцирует смену состава доминирующих видов, появление створок мезогалобных видов Gyrosigma spenceri (Quek.) Griff. et Henfr. и Navicula digitoradiata (Greg.) Ralfs in Pritchard и исчезновение створок планктонного, бореального, холодолюбивого Aulacoseira islandica (O. Müll.) Simons., что можно считать проявлением региональных климатических особенностей.

Палеоэкологические и палеолимнологические исследования могут способствовать изучению проявления глобальных процессов на региональных уровнях. Недостаточное количество, либо отсутствие в литературе данных о таких исследованиях в регионах Поволжья делает изучения подобного рода актуальными.

Ценными архивами о региональных климатических особенностях могут стать донные осадки озер, расположенных на территориях, где антропогенные воздействия минимальны. Изучение современных донных осадков озер лесной зоны, находящихся, в том числе и на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) различного уровня, дает возможность выделить именно влияние климата на формирование сообществ диатомовых водорослей. Целью проведенного исследования стало выявление региональных особенностей видового состава диатомовых водорослей современных донных осадков озер лесной зоны Верхнего и Среднего Поволжья.

В качестве архивов палеоэкологической информации использовались современные донные осадки четырех озер лесной зоны – трех озер Верхнего Поволжья в Нижегородской области – Черное, Пустое, Светлояр (памятник природы федерального значения) и одного озера Среднего Поволжья – Раифское, самого большого по площади и объему карстового озера Раифского участка Волжско-Камского заповедника в Республике Татарстан (Палагушкина и др., 2024). Озера Черное и Пустое расположены вблизи Керженского государственного природного заповедника на заболоченной равнине в междуречье Керженца (притока р. Волги) и Люнды (притока р. Ветлуги), в бассейне р. Люнды располагается также и оз. Светлояр. Озера Черное и Раифское имеют карстовый генезис, происхождение оз. Светлояр имеет несколько гипотез, среди которых указывается и карстовое происхождение, мелководное оз. Пустое суффозионного происхождения (Палагушкина, Баянов,2020). Вода исследуемых озер обладает малой (Раифское, Светлояр и Пустое) и средней минерализацией (Черное). По химическому типу вода в озерах Черное, Раифское и Светлояр гидрокарбонатно-кальциевая с нейтральной реакцией среды (Сапелко, Баянов, 2009, Палагушкина и др., 2024). Озеро Пустое отличается водой сульфатного класса группы натрия и кислой реакцией среды (Баянов, Юлова, 2001).

Донные осадки озёр Чёрное и Пустое были отобраны в 2018 г., на оз. Светлояр – в 2008 г. (координаты места отбора - 56^{0}49’с.ш., 47^{0}07’в.д.) дночерпателем Экмана-Берджа на глубинах 3.0–3.5 м за границей распространения высшей водной растительности. На оз. Раифское в июне 2023 г. с помощью пробоотборника UVITEC в самой глубокой точке (19 м, 55°54.375’ N, 048°43.680’E) была взята колонка донных отложений длиной 130 см. В работе анализируются верхние сантиметры донных осадков указанных озер. Техническая обработка образцов донных отложений на диатомовый анализ проводилась с использованием метода водяной бани (Battarbee, 1986) в лаборатории Палеоклиматологии и палеомагнетизма Института геологии и нефтегазовых технологии Казанского (Приволжского) федерального университета. Для изготовления постоянных препаратов использовалась высокопреломляющая смола Naphrax. При определении видового состава использовались отечественные и зарубежные определители. При

составлении систематического списка использована общепринятая в России классификация диатомовых водорослей (Глезер и др., 1988).

Подсчет створок диатомей проводился в постоянных препаратах по параллельным трансектам до 500 штук с использованием светового микроскопа МБИ-3 и иммерсионной среды. Общее число створок принималось за 100%. Доминирующими считались виды, составляющие 10% и более от общего числа створок в препарате, субдоминантами – виды, число створок которых колебалось от 5 до 10%. Эколого-географическая характеристика диатомовых давалась по отношению к местообитанию, солености, pH воды, по географическому распространению, температурной приуроченности и реофильности (Баринова и др., 2006).

Степень сходства видового состава диатомовых комплексов исследуемых озер вычислялась по формуле:

$$K = \frac{2c}{a+b} \cdot 100\ \%,$$

где a и b – число видов в озерах a и b, а c – число сходных видов (Sorensen, 1948).

По результатам исследования в пробах современных донных осадков четырех озер был определен 71 таксон диатомовых водорослей рангом ниже рода, принадлежащих к 2 классам, 29 родам.

В общем видовом составе по местообитанию преобладали бентосные виды (54,9%), самая высокая доля створок этих видов была свойственна озеру Светлояр с доминантами *Fragilaria pinnata* Ehrb., *F.capucina* Desm. (табл.1), для озера Раифское доля бентосных видов была минимальна. Планктонно-бентосные виды составляли 29,6%, высокие доли створок этой экологической группы отмечались в оз. Черное с доминантом *Cyclotella stelligera* (Cleve et Grun. in Cleve) Van Heurck) и в оз. Пустое, где доминировал *Eunotia sudetica* O. Müll.. Меньше всего было отмечено планктонных видов – 11,3%. Самая высокая доля створок планктонных видов была свойственна оз. Раифское (доминанты *Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) Haworth и *Cyclotella radiosa* (Grun.) Lemm.), чуть меньше створок планктонных видов отмечалось в оз.Черное с доминантом *Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) Haworth. Самая низкая доля створок видов этой экологической группы была зафиксирована в оз. Пустое, где были встречены створки только *Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Simons., этот же вид на уровне субдоминанта отмечается в озерах Черное и Светлояр. В оз. Раифское створок этого вида в современных донных осадках не обнаружено.

По отношению к фактору солености преобладали индифференты, составляя 60,6%, самая высокая доля створок индифферентных видов отмечалась в оз.Черное (доминанты – *Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) Haworth, *Cyclotella stelli*gera (Cleve et Grun. in Cleve) Van Heurck), а меньше всего – в оз.Светлояр (доминанты *Fragilaria capucina* Desm., *F.construens* (Ehrb.) Hust.). Галофобные виды были менее многочисленны и составляли 18,3% общего видового состава. Самая высокая доля створок галофобов (37,8%) отмечалась в оз. Пустое (доминанты *Frustulia rhomboides* (Ehrb.) De Toni и *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kütz.), самая низкая доля – в оз.Раифское. Галофилы составляли 12,8% видового состава и лучше всего их створки были представлены в озерах Светлояр (доминант *Fragilaria pinnata* Ehrb.) и Раифское (доминант *Cyclotella meneghiniana* Kütz.)., полное отсутствие створок галофильных видов отмечалось в маломинерализованном с кислой реакцией воды оз.Пустое. Также было отмечено 2 мезогалобных вида – *Gyrosigma spenceri* (Quek.) Griff. et Henfr. и *Navicula digitoradiata* (Greg.) Ralfs in Pritchard., створки которых были представлены только в оз. Раифское.

По отношению к pH среды в видовом составе преобладали алкалифильные виды (36,5%). Самая высокая доля створок этой экологической группы была представлена в

оз. Светлояр (с доминантами *Fragilaria pinnata* Ehrb., *F. construens* (Ehrb.) Hust.), самая низкая – в оз.Пустое. Доля индифферентных видов была меньше – 22,5%, большее число створок индифферентных видов отмечалось в оз. Пустое (доминант *Pinnularia mesolepta* (Ehrb.) W. Sm.). Ацидофилы давали 14,1% видового состава, самая большая доля створок видов этой группы отмечалась в оз. Пустое (доминанты *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kütz., *Eunotia sudetica* O. Müll., *Frustulia rhomboides* (Ehrb.) De Toni) , меньше всего створок ацидофильных видов было в оз. Раифское. Алкалибионты составляли 9,9% общего видового состава, высокая доля створок видов этой группы отмечалась для оз. Раифское (с доминантами *Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) Haworth и *Cyclotella radiosa* (Grun.) Lemm.). Створки единственного ацидобионтного вида *Eunotia subarcuatoides* Alles, Norpel et Lange-Bert. были представлены только в оз. Пустое.

По географическому распространению в видовом составе преобладали космополитные виды – 25,4%, большая доля створок этой группы отмечалась в оз.Пустое (с доминантом *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kütz.), меньше всего створок космополитных видов отмечалось в оз.Светлояр. Бореальные виды составляли 11,3% видового состава, самые высокие доли створок бореальных видов отмечались в озерах Пустое (доминант *Eunotia sudetica* O. Müll.) и Черное (субдоминант *Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Simons.), меньшая доля створок этой группы встречалась в оз.Раифское. Аркто-альпийские виды были самыми немногочисленными 2,8% и представлены только в озерах Черное и Раифское с общим доминантом *Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) Haworth).

Таблица 1. Виды – доминанты диатомовых в современных донных осадках озер лесной зоны Верхнего и Среднего Поволжья

Название озера	Название вида
Верхнее Поволжье	
Светлояр	*Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Simons.), *Fragilaria pinnata* Ehrb., *Fragilaria construens* (Ehrb.) Hust.
Пустое	*Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Simons.), *Eunotia sudetica* O. Müll., *Eunotia subarcuatoides* Alles, Norpel et Lange-Bert *Frustulia rhomboides* (Ehrb.) De Toni *Pinnularia mesolepta* (Ehrb.), *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kütz
Черное	*Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Simons.), *Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) Haworth *Cyclotella stelligera* (Cleve et Grun. in Cleve
Среднее Поволжье	
Раифское	*Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) Haworth *Cyclotella meneghiniana* Kütz. *Cyclotella radiosa* (Grun.) Lemm.) *Gyrosigma spenceri* (Quek.) Griff. et Henfr. И *Navicula digitoradiata* (Greg.) Ralfs in Pritchard.

По отношению к температурному фактору разнообразнее были представлены виды умеренных температурных условий, составляя 18,3% общего видового состава, большие доли створок видов данной экологической группы отмечались в оз.Светлояр (доминанты *Fragilaria pinnata* Ehrb., *F. construens* (Ehrb.) Hust.), меньше всего створок было в донных осадках оз. Пустое. Холодолюбивые виды были представлены только в донных осадках озер Верхнего Поволжья, составляли 7,04% общего видового состава, самая высокая доля створок зафиксирована в оз.Черное с субдоминантом *Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Simons.). Эвритермные виды давали 4,2% общего видового состава, самая высокая доля створок видов этой группы была представлена в оз. Пустое (доминант *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kütz.), в оз. Раифское створки эвритермных видов не обнаружены. Во всех 4 озерах был встречен теплолюбивый вид *Achnanthes lanceolata* (Bréb.) Grun, высокие доли створок которого отмечались в озерах Пустое и Светлояр. По фактору течения наибольшее число видов индифференты (45,1%), больше всего створок видов этой группы было в донных осадках оз.Светлояр (с доминантами *Fragilaria pinnata* Ehrb., *F. construens* (Ehrb.) Hust.). Виды стоячих вод давали 19,7% общего видового состава, самая высокая доля створок отмечалась в оз.Раифское (доминант *Cyclotella*

meneghiniana Kütz.). Виды текучих вод были самыми немногочисленными (14,1% общего видового состава). Наибольшая доля створок видов этой экологической группы зафиксирована в донных осадках оз. Пустое (доминант *Eunotia sudetica* O. Müll.), меньше всего их было в оз. Раифское.

Сравнение видовых составов диатомовых комплексов исследуемых озер показало, что самыми высокими коэффициентами сходства обладают озера Верхнего Поволжья – Пустое, Светлояр, Черное (табл. 2). Видовой состав оз. Раифское имеет больший коэффициент сходства с комплексом диатомовых карстового оз. Черное и меньший – с диатомовыми донных осадков оз. Светлояр.

Таблица 2. Коэффициенты сходства видового состава диатомовых исследуемых озер, %

Озера	Светлояр	Пустое	Черное	Раифское
Светлояр	100	43,5	25	11,3
Пустое	43,5	100	39	18,9
Черное	25	39	100	24
Раифское	11,3	18,9	24	100

Сравнение диатомовых комплексов современных донных осадков озер Верхнего и Среднего Поволжья показало различие видового состава. Можно предположить, что переход лесной зоны Верхнего Поволжья к лесной зоне Среднего Поволжья провоцирует изменения диатомовых сообществ, которые выражаются в смене состава доминирующих видов, появлении створок мезогалобных видов *Gyrosigma spenceri* (Quek.) Griff. et Henfr. и *Navicula digitoradiata* (Greg.) Ralfs in Pritchard и исчезновении створок планктонного, бореального, холодолюбивого *Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Simons., что можно считать проявлением региональных климатических особенностей.

Исследования Фроловой Л.А. выполнены при поддержке проекта НИР FWZG-2025-005.

Литература

Баринова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: PiliesStudio, 2006. 498 с.

Баянов Н.Г., Юлова Г.А. К вопросу о происхождении и современном экологическом состоянии некоторых озер Нижегородского Заволжья // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Биология. 2001. Т.1, №2. С. 91–102.

Глезер З.И., Караева Н.И., Макарова И.В., Моисеева А.И., Николаев В.А. Классификация диатомовых водорослей. Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 2, вып.1. Л.: Наука, 1988. С. 31–35.

Палагушкина О.В., Баянов Н.Г. Диатомовые водоросли из голоценовых осадков озер Пустое и Черное (Нижегородская область) // Вопросы современной альгологии. 2020. №3. С. 32–41.

Палагушкина О.В., Унковская Е.Н., Назарова Л.Б. Влияние климатических изменений на структуру летнего фитопланктона озера лесной зоны (Раифское, Волжско-Камский заповедник) // Сибирский экологический журнал. 2024. №2 С. 187–199,

Сапелко Т.В., Баянов Н.Г. Палеолимнологическое исследование озера Светлояр // V Международная научная конференция «Теоретические и прикладные аспекты современной лимнологии» / Тезисы докладов. Минск, 2009. С. 48-50.

Battarbee R.W. Diatom analysis // Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. J. Wiley & Sons, 1986. P. 527–570.

Sorensen T. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species and its application to analyses of the vegetation on Danish commons // Biologiske Skrifter. 1948. №5. P. 1–34.

DIATOMES OF MODERN BOTTOM SEDIMENTS OF LAKES IN THE FOREST ZONE OF THE UPPER AND MIDDLE VOLGA REGION

O.V. Palagushkina, N.G. Bayanov, L.A. Frolova, E.N. Unkovskaya

Diatom assemblages of modern bottom sediments of lakes in the forest zone, three in the Upper Volga region and one in the Middle Volga region, were studied. The transition of the forest zone from the Upper Volga to the Middle Volga region provokes a change in the composition of dominant species, the appearance of valves of the mesohalobic species *Gyrosigma spenceri* (Quek.) Griff. et Henfr. and *Navicula digitoradiata* (Greg.) Ralfs in Pritchard and the disappearance of valves of the planktonic, boreal, cold-loving *Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Simons., which can be considered a manifestation of regional climatic features.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ХЛОРОСОМНЫХ БАКТЕРИОХЛОРОФИЛЛОВ В ХЕМОКЛИНЕ МЕРОМИКТИЧЕСКОГО ОЗЕРА ТРЕХЦВЕТНОЕ В РАЗНЫЕ СЕЗОНЫ 2024 ГОДА

С.В. Пацаева[1], Ю.Г. Соколовская[1], А.А. Жильцова[1], Д.А. Воронов[2], Е.Д. Краснова[1]
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[2]Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

Оптические методы широко используются для мониторинга концентрации хлорофилла водорослей или цианобактерий в водных экосистемах, однако для мониторинга бактериохлорофилла аноксигенных фототрофов применяются очень ограниченно. В работе описаны методы количественного анализа хлоросомных бактериохлорофиллов, основных фотосинтетических пигментов зеленых серных бактерий, с использованием измерений спектров поглощения, проведенных как на исходных пробах природной воды, так и для экстрактов пигментов в ацетон-этаноловой смеси. Приведены распределения концентрации хлоросомных бактериохлорофиллов в хемоклине оз. Трехцветное, одного из прибрежных меромиктических водоемов Кандалакшского залива Белого моря, в разные сезоны 2024 года.

Отличительной чертой многих прибрежных озер Беломорского региона является устойчивая вертикальная стратификация воды, возникающая из-за разницы плотности ее слоев – меромиксия.

В таких водоемах можно выделить поверхностный пресный слой воды, насыщенный кислородом, и придонный соленый, где присутствует большое количество сероводорода. В переходном слое, или хемоклине, при достаточном освещении может наблюдаться массовое развитие аноксигенных фототрофных бактерий, чаще всего зеленых серных бактерий (ЗСБ, *Chlorobiaceae*). В хлоросомах ЗСБ локализованы светособирающие комплексы, содержащие хлоросомные бактериохлорофиллы (Бхл) (Blankenship, 2004; Overmann, 2001). Присутствие ЗСБ в водоемах напрямую зависит от внешних условий – освещенности, солености, концентрации сероводорода и др. Это позволяет использовать оценку содержания пигментов ЗСБ в природной воде в качестве одного из индикаторов эволюционного состояния водоема. Распределение по глубине

этих и других бактерий может дать представление о микробных биогеохимических циклах серы и углерода в водоеме.

Оптические методы широко используются для мониторинга концентрации хлорофилл-содержащих организмов – водорослей и цианобактерий в водных экосистемах. Однако оптические методы мониторинга фототрофных аноксигенных микроорганизмов в природной воде пока применяются очень ограниченно. Важной характеристикой природного водоема является распределение пигментного состава различных групп фотосинтезирующих организмов по глубине и его изменения в разные сезоны. До недавнего времени для подсчета суммарной концентрации хлоросомных Бхл применялся метод экстрагирования пигментов из природной воды ацетоном или смесью ацетона и метанола, измерение спектров поглощения экстрактов и расчет по эмпирической формуле (Overmann, Tilzer, 1989), в которой использовались величины оптической плотности при длинах волны 651 и 663 нм для ацетоновых экстрактов. Однако, упомянутая формула разрабатывалась на образцах воды, содержащих помимо Бхл большую концентрацию хлорофилла (Хл) *a*, что не характерно для хемоклина беломорских меромиктических озер. Кроме того, желательно было заменить метанол в растворителе менее токсичным этанолом.

Задача мониторинга таких водоемов, проходящих через меромиктическую стадию развития при изоляции от моря, является актуальной, так как позволяет реконструировать ход их гидрологической и экологической эволюции и делать прогнозы для искусственно создаваемых меромиктических водоемов (Краснова, 2021; Краснова, Мардашова, 2020). Далее мы опишем новые подходы количественной оценки хлоросомных Бхл в пробах воды, которые основаны на многолетних исследованиях спектральных свойств ЗСБ отделяющихся водоемов Белого моря.

Образцы природной воды отбирали из зоны хемоклина меромиктического оз. Трехцветное (66°35′33″ N, 32°58′43″ E) разработанным Д.А. Вороновым многошприцевым батометром в разные сезоны 2024 г. Сероводородная зона в этом водоеме начинается на глубине 2,0 м. В диапазоне глубин 1,7-2,3 м с шагом по глубине 2,5 см одновременно отбирали 23 образца воды. Так как объем каждой пробы был ограничен 5 мл, то метод концентрирования ЗСБ на фильтрах не применялся. Вместо этого мы использовали подход, применявшийся ранее для определения Хл *a* в пробах фитопланктона. Для получения экстрактов к 1 мл пробы природной воды с ЗСБ добавляли 4 мл смеси ацетона с этанолом (7:2), пробирки заворачивали в фольгу и выдерживали в холодильнике не менее 24 часов. Спектры оптической плотности регистрировали на спектрофотометре Solar PB2201 в кварцевых кюветах с длиной оптического пути 1, 2 или 3 см. В дальнейшем все данные приводили к 1 см. Спектры поглощения проб воды или суспензий клеток в воде регистрировали по отношению к дистиллированной воде, спектры поглощения экстрактов – по отношению к растворителю.

Спектры поглощения образцов воды с ЗСБ с разных горизонтов оз. Трехцветное и приготовленных из них экстрактов пигментов приведены на рисунке 1.

До горизонта 1,8 м (выше хемоклина) спектры имеют вид полосы с монотонно уменьшающейся при возрастании длины волны оптической плотностью – типичные спектры поглощения растворенного органического вещества (РОВ) природной воды. Начиная с глубины 1,9 м в воде присутствуют клетки бактерий с Бхл, поглощение которого возрастает и достигает своего максимального значения в длинноволновой полосе на глубине около 2 м, после чего наблюдается спад концентрации клеток с Бхл.

Полосы поглощения Бхл имеют главные максимумы в коротковолновой (поглощение света молекулами Бхл *d* и каротиноидами) и длинноволновой областях спектра (где поглощают свет молекулы Бхл *d* и Бхл *a*). Максимумы коротковолновых полос поглощения проб воды, содержащих клетки зеленоокрашенного типа ЗСБ,

приходятся на длины волн 427 и 450 нм, а длинноволновой – на 726-729 нм, что соответствует поглощению света Бхл *d*. У всех образцов в районе 800 нм присутствует небольшое плечо, соответствующее поглощению света Бхл *a*.

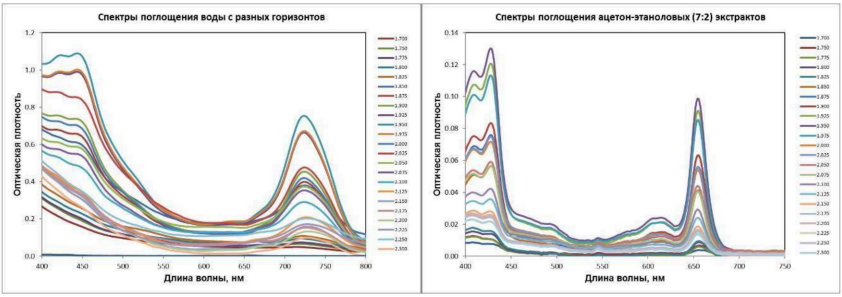


Рис. 1. Спектры поглощения воды с разных горизонтов оз. Трехцветное (слева) и приготовленных из них ацетон-этаноловых экстрактов (справа). Отбор 29.08.2024

Разработанный ранее нашей группой метод позволяет вычислить концентрацию Бхл, используя площадь длинноволновой полосы поглощения в абсорбционных спектрах клеток бактерий непосредственно в воде, без пробоподготовки (Емельянцев и др., 2020). Для вычитания светорассеяния клетками ЗСБ используется линейное приближение базовой линии, как самое простое и удобное. Исходя из пропорциональной зависимости между площадью длинноволновой полосы поглощения Бхл (с вычтенным пьедесталом рассеяния) и его концентрацией был вычислен коэффициент пропорциональности A (мг/(нм·м^3)), позволяющий записать формулу для расчета концентрации Бхл (в мг/м^3) следующим образом: C (Бхл d) $= A \cdot \Sigma D$, где ΣD - площадь длинноволновой полосы поглощения Бхл в пробах воды с вычтенным пьедесталом рассеяния (нм), A= (336±9) мг/(нм·м^3) – эмпирически найденный коэффициент пропорциональности (Емельянцев и др., 2020). Данный метод удобен тем, что не требует никакой обработки проб. Однако он может быть применен только на свежих пробах, и его применимость ограничена пробами с высокой концентрацией хлоросомных Бхл и не слишком высоким светорассеянием.

Спектры поглощения ацетон-этаноловых экстрактов, приготовленных из образцов воды с ЗСБ, также имеют две основные полосы поглощения: в синей области спектра и длинноволновую полосу поглощения Бхл с максимумом при 655 нм. В спектрах наблюдается сужение длинноволновой полосы поглощения Бхл *d* и сдвиг ее в коротковолновую область спектра на величину порядка 70 нм по сравнению с полосами поглощения клеток ЗСБ в исходной природной воде. Данное явление связано с тем, что при экстрагировании происходит разрушение плотно упакованных хлоросом клетки, внутри которых располагаются фотосинтетические пигменты, вследствие чего Бхл переходит из высоко агрегированной формы, в которой он находился в хлоросомах, к мономерной.

С помощью полученного в работе (Жильцова и др., 2024) коэффициента экстинкции для смеси ацетон-этанол в соотношении 7:2 и формулы расчета концентрации Бхл по оптической плотности в максимуме длинноволновой полосы поглощения были произведены расчеты концентрации Бхл *d* в слоях природной воды из оз. Трехцветное в 2024 гг. На рисунке 2 показаны распределения концентрации Бхл *d* в зависимости от глубины в оз. Трехцветное в разные сезоны 2024 г.

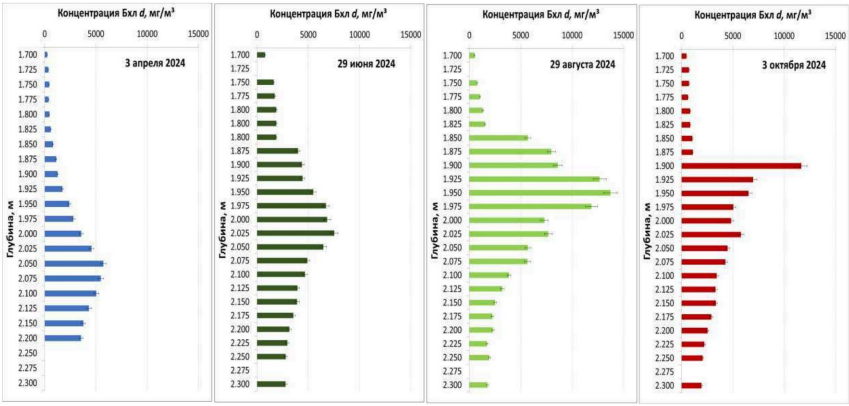


Рис. 2. Распределение концентрации Бхл *d* в зависимости от глубины в оз. Трехцветное в разные сезоны 2024 г.

В таблице приведены характеристики слоя ЗСБ в толще хемоклина оз. Трехцветное в разные сезоны 2024 года (глубина с максимальной концентрацией Бхл, концентрация Бхл в данном слое и суммарное количество Бхл *d* в толще хемоклина на один кв. метр.

Таблица. Характеристики слоя ЗСБ в хемоклине оз. Трехцветное в разные сезоны 2024 года

Дата отбора проб	Горизонт с макс. конц. Бхл *d*, м	Концентрация Бхл *d*, мг/м³	Суммарное количество Бхл *d* в толще хемоклина выше 2,3 м, мг/м²
03.04.2024	2,050	5 700	29 400
29.06.2024	2,025	6 800	53 000
29.08.2024	1,950	13 700	67 000
03.04.2024	1,900	11 700 *	46 200

*Возможно, концентрация Бхл на горизонте 1,9 м завышена из-за отсутствия учета в спектре поглощения экстрактов Хл-содержащих микроорганизмов.

По распределениям на рисунке 1 и данным таблицы можно проследить, как трансформировалась бактериальная пластина в хемоклине оз. Трехцветное с апреля по октябрь 2024 г., и как менялась максимальная концентрация Бхл *d*. В конце зимнего периода подо льдом распределение ЗСБ было более широким по глубине. Максимальная концентрация Бхл приходилась на глубину 2,050 м и составляла менее 6000 мг/м^3. К концу июня произошло массовое развитие ЗСБ в более верхних горизонтах, максимальная концентрация Бхл возросла до 6800 мг/м^3 на горизонте 2,025 м, а ниже численность бактерий практически не изменилась по сравнению с концом зимнего сезона – это неактивные слои бактериальной пластины с большой концентрацией сероводорода. К концу августа максимум численности сместился вверх к горизонту 1,95 см и в слоях 1,85-2,00 м увеличилась численность ЗСБ почти до 14000 мг/м^3.

Если мы сравним концентрации Бхл, полученные в начале октября, с предыдущими распределениями 2024 г., то заметим явное отличие осеннего сезона: распределение Бхл *d* по глубине становится очень резким: концентрация Бхл *d* скачком увеличивается более, чем на порядок, от 1100 до 11700 мг/м^3 на протяжении 2,5 см. Уменьшение концентрации бактериохлорофилла над горизонтом 1,9 м отражает снижение численности ЗСБ в верхней части хемоклина. Оно может быть связано с осенним усилением циркуляции из-за понижения температуры и усиления ветров. По

данным гидрологических измерений миксолимнион (зона вертикального перемешивания) в октябре 2024 г. охватывал слой от поверхности до глубины 1,8 м (включительно) с температурой +6°С и электропроводностью 472-494 мкСм/см. Во всем этом слое присутствовал кислород; на нижней границе его концентрация была 1,1 мг/л. Резкая граница проходила между горизонтами 1,8 и 1,9 м: вдвое возросла соленость (910 мкСм/см или 0,4 ‰), до 6,9°С повысилась температура, а главное – не стало кислорода. ЗСБ – строгие анаэробы, и последнее обстоятельство для них особенно важно. В июне граница однородной зоны находилась на 20 см выше, а в августе на 10 см.

Таким образом, в прибрежном меромиктическом озере Трехцветное охарактеризованы спектральные свойства воды в толще хемоклина с применением многошприцевого батометра, позволяющего раздельно анализировать слои воды с дискретностью по вертикали 2,5 см. Спектры указывают на присутствие клеток зеленоокрашенного типа ЗСБ, начиная с глубины 1,9 м. На основании оптической плотности в максимуме длинноволновой полосы поглощения Бхл в ацетон-этаноловых экстрактах проб из разных слоев хемоклина рассчитана суммарная концентрация Бхл в хемоклине и его количество на 1 м^2 площади озера в разные сезоны. Количественные показатели возрастали от апреля (5700 мг/м^3 и 294000 мг/м^2) к августу (13700 мг/м^3 и 67000 мг/м^2). В октябре при остывании водоема зарегистрирована эрозия верхней части бактериального слоя и уменьшение в 1,5 раза суммарного количества бактериохлорофилла под единицей площади озера.

Авторы благодарят администрацию Беломорской биологической станции имени Н.А. Перцова МГУ имени М.В.Ломоносова за поддержку экспедиционных работ.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-24-00008).

Литература

Емельянцев П.С., Жильцова А.А., Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Рымарь В.В., Пацаева С.В. Определение концентрации хлоросомных бактериохлорофиллов по спектрам поглощения клеток зеленых серных бактерий в пробах природной воды // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2020. №2. С. 25–30.

Жильцова А.А., Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Соколовская Ю.Г., Пацаева С.В. Коэффициенты экстинкции бактериохлорофиллов *d* и *e* в органических растворителях для количественного спектрофотометрического определения пигментов фототрофных зеленых серобактерий // Оптика и спектроскопия. 2024. Т. 132. Вып. 3. С. 238-246.

Краснова Е.Д. Экология меромиктических озер России. 1. Прибрежные морские водоемы // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. №3. С. 322-333.

Краснова Е.Д., Мардашова М.В. Как морской залив превращается в озеро // Природа. 2020. №1. С. 16-27.

Blankenship R.E., Olson J.M., Miller M. Antenna Complexes from Green Photosynthetic Bacteria // Anoxygenic Photosynthetic Bacteria. Ch. 20. 2004. P. 399-435.

Overmann J. Green sulfur bacteria // Encyclopedia of Life Sciences. John Wiley & Sons, Ltd. 2001.

Overmann J., Tilzer M.M. Control of primary productivity and the significance of photosynthetic bacteria in a meromictic kettle lake Mittlerer Buchensee, West-Germany // Aquatic Sciences. 1989. V. 51. P. 261-278.

QUANTIFICATION OF CHLOROSOMAL BACTERIOCHLOROPHYLLS IN THE CHEMOCLINE OF MEROMICTIC LAKE TREKHTZVETNOE

S.V. Patsaeva, Yu.G. Sokolovskaya, A.A. Zhiltsova, D.A. Voronov, E.D. Krasnova

Optical methods are widely used to monitor chlorophyll concentrations of algae or cyanobacteria in aquatic ecosystems, but have had very limited use for monitoring bacteriochlorophyll (BChl) of anoxygenic phototrophs. The paper describes methods for the quantitative analysis of chlorosomal bacteriochlorophylls, the main photosynthetic pigments of green sulfur bacteria, using measurements of absorption spectra carried out either on initial samples of natural water or on pigment extracts in a mixture of acetone and ethanol (7:2). The distributions of the bacteriochlorophylls concentration in water within the chemocline in different seasons in 2024 are presented for the lake Trekhtzvetnoe, one of meromictic reservoirs of the Kandalaksha Bay of the White Sea.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИХТИОФАУНЫ КИЖСКИХ ШХЕР В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

В.Р. Погосян[1,2], В.Н. Коваленко[1,3]
[1]Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
[2]Петрозаводский государственный университет
[3]Карельский филиал ФГБНУ «ВНИРО»

Исследования проводились в Кижских шхерах Онежского озера, испытывающих антропогенную нагрузку. В данной работе представлены данные, полученные за 2023 год. Размерно-весовой и возрастной состав ихтиофауны, присутствующей в улове, показал её современное состояние. Всего отловлено 4 вида рыб характерных для данной местности: окунь (53%), лещ (27%), щука (17%), судак (3%). У окуня преобладают самки (84%), у леща –самцы (60%). У щуки (63%) и судака (67%) также больше самок, чем самцов. Среди щук преобладают особи в возрасте 4–6 лет, судаки в возрасте 4–8 лет. Основная масса окуней – в возрасте 8–11 лет, лещей – в возрасте 6–9 лет.

Онежское озеро – второе по величине пресноводное озеро Европы, около 80% его акватории находится на территории Республики Карелия. Северные берега озера скалистые, сильно изрезанные, южные – преимущественно низкие, нерасчленённые (Онежское …, 2010). Остров Кижи находится в северной части Онежского озера, близко к полуострову Заонежье. В 1989 году там был основан Государственный природный заказник федерального значения «Кижский». Ежегодно заповедник посещает более 360 тыс. туристов из России и зарубежья (Отчет …, 2023). Воды озера в районе Кижских шхер подвергаются значительному антропогенному влиянию из-за активного использования водного транспорта и бытовых стоков.

Исследования проводили в мае, августе и сентябре 2023 года. Для проведения исследования размерно-весового состава ихтиофауны Кижских шхер были выбраны 7 станций, 3 в районе о. Малый Леликовский и о. Большой Леликовский, 4 в районе о. Кижи. Вылов осуществлялся набором жаберных сетей в литоральной и пелагиальной зонах озера, камеральная обработка материала, а именно измерение длины и массы проводилась по стандартным методикам (Дгебуадзе, 2009; Правдин, 1966; Чугунова, 1959).

Во время экспедиций были отловлены судак, щука, лещ и окунь. Судак (Sander lucioperca L.) широко распространен по всей акватории озера, но в наибольших количествах встречается в северных и северо-восточных районах (Биоресурсы…,2008). При научном облове в сети попало только три экземпляра (табл. 1), такая небольшая выборка нерепрезентативна. Сравнивая полученные результаты с литературными источниками (табл. 2) (Стерлигова, 2012), можно отметить, что размерно-весовые

характеристики находятся в пределах средних значений, характерных для возраста отобранных особей.

Таблица 1. Размерно-возрастные показатели судака

№	Характеристика				
	Длина ad, см	Масса, г	Пол	Стадия зрелости	Возраст
1	46,0	1300	самка	2	8+
2	34,5	630	самка	2	4+
3	40,0	1060	самец	4	6+

Таблица 2. Средняя длина (ad) и масса онежского судака (Стерлигова, 2012)

АД, см	Масса, г	Возраст
40	800	5+
42	1000	6+
44	1300	7+
54	2100	10+

Таблица 3 Сравнительные данные по линейному росту щуки

Водоем, автор	Возраст, лет					
	3+	4+	5+	6+	7+	8+
Ладожское (Мохов, 1979)	38,1	44,2	53,1	65,2	70,2	80,3
Каменное (Первозванский, 1986)	35,3	40,7	46,7	54,5	59	66,4
Самозеро (Стерлигова, 2002)	31,0	41,1	48,2	55	60,5	66
Нюкозеро (Первозванский, 1986)	38,7	43,2	51,0	55,4	59,0	64,3
Энгозеро (Потапова, 1958)	35,5	40,7	47,4	52,9	60,7	70,6
Гимольское (Зыков, 1950)	29,7	25,2	40,9	48,8	54,3	58,5
Суккозеро (Стерлигова, 2018)	30,8	37,3	45,3	52,0	58,0	66,0
Кедрозеро (Стерлигова, 2018)	35,3	40,7	46,6	54,5	60,0	62,0
Онежское (наши данные)	*	43,0	48,0	54,5	*	61,0

Щука (*Esox lucius* L.) обитает преимущественно в проливах, заливах и местах прилегающих к устьям рек. Район Кижских шхер является благоприятным по кормовой базе и гидрологическому режиму для обитания щук. Однако в период проведения контрольных обловов присутствие щуки в уловах было скромным. В улове было насчитано 5 возрастных групп, от пяти (4+) до двенадцати (11+) лет. Доминировали половозрелые особи пяти (4+) и шести (5+) лет. Можно заметить значительные колебания размеров и массы щуки в одновозрастной группе. Предположительно это вызвано присутствием в улове как береговой, так и глубинной форм, различающихся темпом роста. Всего было отобрано 16 экземпляров: из них 12 штук (75%) самки, остальные самцы (25%). Сравнительный анализ полученных материалов (Таблица 3) с данными по росту щуки из других Карельских озер показал, что щука Кижских шхер не сильно отличается от одновозрастных особей из других водоемов.

Предварительный анализ размерно-возрастных показателей щуки свидетельствует об активном росте рыбы, достаточной для нее кормовой базе. Это можно заметить по различиям в возрастных группах.

Лещ (*Abramis brama* L.) в основном обитает в эвтрофированных заливах и губах. За счет мелководности и некоторой изолированности от открытых вод озера эти районы лучше прогреваются, имеют повышенные кормовые запасы и хорошо подходят для размножения лещей. Все это как раз отмечено на территории Кижских шхер. Всего было отобрано 47 экземпляров: из них 20 штук (43%) самки, остальные самцы (57%). В улове было насчитано 9 возрастных групп, от пяти (4+) до тринадцати (12+) лет. Доминировали неполовозрелые особи семи (6+) и восьми (7+) лет. Это связано с высокой численностью леща младших возрастных групп на благоприятном для нагула участке. В целом

размерно-весовые характеристики находятся в пределах средних значений для леща Онежского озера (Георгиев,2014). Лещ, обитающий на территории Кижских шхер, в целом не сильно отличается от показателей линейного роста (таб. 4) в сравнении с данными по другим озерам. Небольшой скачек роста есть только у 5+(шестилетних) особей, но это можно списать на благоприятные условия обитания для данной возрастной группы, так как далее рост идет более ровно. Для подтверждения необходимы дальнейшие исследования.

Таблица 4 Сравнительные данные по линейному росту леща

Водоем, автор	Возраст, лет					
	3+	4+	5+	6+	7+	8+
Пяозеро (Савосин, 2018)	*	15,8	18,0	20,0	22,6	26,5
Кедрозеро (Стерлигова, 2018)	11,5	15,7	17,1	20,5	23,3	28,2
Онежское (наши данные)	*	17,5	22,3	23,4	25,0	27,1

Окунь (*Perca fluviatilis* L) широко распространен по всей акватории Онежского озера и встречаются в виде двух экологических форм – крупный, сравнительно быстрорастущий, распространенный преимущественно в открытых участках, и мелкий – относительно медленно растущий, населяющий береговую зону. Мелководные участки шхер подходят для нереста и снабжают окуней в период активного роста доступной кормовой базой. Сеголетки окуня питаются вначале микробентическими формами, затем, на втором году жизни, молодь переходит к смешанному питанию бентосом и планктоном. Трехлетки окуня полностью переходят на питание бентосом, но достигнув размеров 10–12 см, молодь начинает хищничать (Лобанова, 2017). В улове было насчитано семь возрастных групп, от шести (5+) до двенадцати (11+) лет. Доминировали половозрелые особи девяти (8+) лет. Согласно литературным источникам, выловленные экземпляры в среднем имеют стандартные биологические показатели для окуней Онежского озера (Широков, 2019). Всего было отобрано 72 экземпляра: из них 61 штука (85%) самки, остальные самцы (15%). На рост окуня большое влияние оказывает температура воды и длина светового дня (Биология …, 1993). Так же часто наблюдаются отличия в росте одновозрастных групп, которые могут достигать значительных величин (до 15 см в 10+) за счет доступности кормовой базы (Стерлигова, 2016). В улове присутствовал только уже перешедший на хищничество окунь (4+ о старше), его стабильный рост указывает на наличие хорошо доступной кормовой базы в виде молоди рыб. Сравнительный анализ полученных материалов (табл. 5) с данными по росту окуня из других Карельских озер показал, что он не сильно отличается от одновозрастных особей из других водоемов.

Таблица 5. Сравнительные данные по линейному росту окуня

Водоем, автор	Возраст, лет								
	3+	4+	5+	6+	7+	8+	9+	10+	11+
Ладожское (Биология …, 1993)	13,0	14,0	17,0	20,0	23,0	25,0	28,0	29,0	*
Сямозеро (Вебер, 1962)	12,1	14,2	16,5	20,3	21,0	24,5	26,6	28,3	30,0
Нюкозеро (Дятлов, 2002)	11,2	13,0	15,4	18,9	20,4	21,4	23,5	25,0	26,0
Тулос (Вебер, 1962)	11,5	13,3	15,0	16,4	18,1	19,7	20,8	22,0	23,4
Суоярви (Вебер, 1962)	11,2	13,1	15,1	17.8	20,1	22,4	25,4	26,3	*
Суккозеро (Стерлигова, 2018)	12,1	13,5	15,7	18,6	19,1	20,0	21,0	22,0	*
Кедрозеро (Стерлигова, 2018)	12,4	14,2	16,5	19,0	21,0	23,0	26,1	28,0	*
Онежское (наши данные)	*	*	17,0	22,0	21,6	21,6	24,3	26,4	29,3

Таким образом, проведенные в 2023 г. исследования показали, что в районе Кижских шхер Онежского озера доминирующем видом рыб является окунь (53%). Это стало возможно за счет гидрохимических особенностей района и широкой кормовой базы. Его популяция относительно стабильна. Лещ (27%) представлен в основном

молодыми особями, еще не достигшими половой зрелости (10-13 лет). Такие скопления характерны в периоды нагула. Щука (17%) отмечена молодыми половозрелыми особями (4-5 лет), более старшие представители присутствовали в меньших количествах. Судак (3%) был выловлен в единичных экземплярах. Результаты проведенных исследований показали, что морфологические показатели выловленных на территории Кижских шхер особей находятся в пределах характерных для сообществ рыб в этой местности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-20018, https://rscf.ru/project/23-17-20018/», проводимого совместно с органами власти Республики Карелия с финансированием из Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия (ФВИ РК).

Литература

Биология речного окуня. М.: Наука, 1993. 188 с.

Биоресурсы Онежского озера / Под ред. В.И. Кухарева, А.А. Лукина. Петрозаводск, 2008. 272 с.

Вебер Д.Г., Кожина Е.С., Потапова О.И., Титова В.Ф. Материалы по биологии основных промысловых рыб Сямозера // Труды Сямозерской комплексной экспедиции. — Петрозаводск: Гос. изд-во Карел. АССР, 1962. Т. 2. С. 82–113.

Георгиев А.П. Роль рыб семейства окуневых (Percidae) в рыбохозяйственном отношении в условиях Онежского озера // JSRP. 2014. №11.

Георгиев А.П. Рыбохозяйственная роль семейства карповые (Cyprinidae) в условиях Онежского озера // JSRP. 2014. №11.

Дгебуадзе Ю.Ю., Чернова О.Ф. Чешуя костистых рыб как диагностическая и регистрирующая структура. М.: Т-во научных изданий КМК, 2009. 315 с.

Дятлов М.А. Рыбы Ладожского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2002. 281 с.

Зыков П. В. Рыбы Гимольского озера и его бассейна: Автореф. дис. … канд. биол. наук. Петрозаводск, 1950. 19 с.

Лобанова А.С., Сидорова А.И., Георгиев А.П., Шустов Ю.А., Алайцев Д.П. Роль инвазионного вида Gmelinoides fasciatus (Stebbing) в питании речного окуня Perca fluviatilis L. литоральной зоны Онежского озера // Российский журнал биологических инвазий. 2017. Т. 10, №2. С. 81–86.

Мохов Г.М. Размерно-возрастная структура щуки Ладожского озера // Сборник научных трудов ГосНИОРХ. 1979. Вып. 141. С. 126–130.

Онежское озеро. Атлас / под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

Отчет о деятельности Государственного историко-архитектурного и этнографического музея-заповедника «Кижи». 2022 год. Петрозаводск: Изд. центр музея-заповедника «Кижи», 2023. 94 с.

Первозванский В.Я. Рыбы водоемов района Костомукшского железорудного месторождения (экология, воспроизводство, использование). Петрозаводск: Карелия, 1986. 216 с.

Потапова О.И., Соколова В.А. Тикшозеро и Энгозеро как промысловые угодья // Труды Карельского филиала АН СССР. 1958. Вып. 13. С. 3–32.

Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб (преимущественно пресноводных). М.: Пищевая промышленность, 1966. 376 с.

Савосин Д.С., Ильмаст Н.В. Ихтиофауна озера Пяозера (Северная Карелия) // Балтийский морской форум / Материалы VI Международного Балтийского морского форума. Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2018. Т. 3. С. 135–147.

Стерлигова О.П., Ильмаст Н.В., Милянчук Н.П. Рыбное население малых водоемов бассейна Онежского озера и перспективы их использования // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Экологические исследования. 2018. №10. С. 96–104.

Стерлигова О.П., Ильмаст Н.В., Савосин Д.С. Окунь Perca fluviatilis (Percidae) разнотипных водоемов Карелии // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2016. №2. С. 57–62.

Стерлигова О.П., Рюкшиев А.А., Ильмаст Н.В. Сравнительная биологическая характеристика судака Sander lucioperca (L.) озер Онежского и Выгозера // Биология внутренних вод. 2012. №2. С. 55–60.

Чугунова Н.И. Руководство по изучению возраста и роста рыб: метод. пособие по ихтиологии. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 165 с.

Широков В.А., Черепанова Н.С., Георгиев А.П. Рыбохозяйственная характеристика окуня (Perca fluviatilis L.) в некоторых водоемах Республики Карелия // Известия Самарского научного центра РАН. 2019. №2.

CURRENT STATE OF THE ICHTHYOFAUNA OF THE KIZH SKERS UNDER ANTHROPOGENIC LOAD

V.R. Pogosyan, V.N. Kovalenko

The studies were conducted in the Kizhi Skerries of Lake Onega, which are experiencing anthropogenic load. This paper presents data obtained for 2023. The size-weight and age composition of the ichthyofauna present in the catch showed its current state. A total of 4 species of fish typical for this area were caught: perch (53%), bream (27%), pike (17%), and pike-perch (3%). Perch are predominantly female (84%), while bream are predominantly male (60%). Pike (63%) and pike-perch (67%) also have more females than males. Among pike, individuals aged 4–6 years predominate, while pike-perches are predominantly aged 4–8 years. The majority of perches are aged 8–11 years, while breams are aged 6–9 years.

ДИНАМИКА ЗООПЛАНКТОНА ВОДОЕМОВ РЕЧНОЙ ПОЙМЫ (НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ СУРА)

В.Н. Подшивалина
Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова
Государственный природный заповедник «Присурский»

Изучена структура зоопланктона водных экосистем в бассейне нижнего течения р. Сура, образующих генетический ряд: речной поток, придаточные водоемы, пойменные озера. Обнаружено относительно высокое сходство планктонных сообществ между собой, что может отражать постепенность сукцессионных перестроек при трансформации участка реки. Средняя индивидуальная масса организма увеличивается в этом ряду. Уровень трофности и сапробность при этом уменьшаются.

Пойма реки представляет собой динамический ландшафт, развивающийся под действием абиотических и биотических факторов. В пойме средних и крупных рек влияние гидродинамических процессов на участок реки приводит к формированию проток, заливов и самостоятельных озер. Эволюция последних далее приводит к

состоянию болота и происходит при преобладающем влиянии биотических факторов (Иоганзен, 1966).

Естественное развитие непойменных озер от стадии молодости до угасания и сопровождающие его изменения котловины, физико-химических свойств воды, трансформация биоты относительно подробно описаны (Абросов, 1982; Рогозин, 2001; Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990; Bernardi, Soldaini, 1976). Для изучения сукцессии в водоемах поймы возможно изучение водных экосистем, образующих генетический ряд: речной поток – придаточные водоемы – пойменные озера – непойменные озера, – и расположенных в одном ландшафте (Сукцессии…, 1981). Это было показано на примере поймы реки Оби (Сукцессии…, 1981). Вопрос эволюции сообществ пойменных водоемов по-прежнему актуален. Анализ зоопланктоценозов водных объектов бассейна нижнего течения р. Сура (правый приток р. Волга в среднем течении) позволяет дополнить имеющиеся сведения о сукцессии водных сообществ.

Обобщены результаты изучения зоопланктона в водоемах поймы нижнего течения р. Сура в июне–августе 2011–2012 г. Пробы отобраны стандартными методами на проточных участках р. Сура выше и ниже г. Ядрин (S1, S2), в районе Красного яра (S3), а также в устьевой зоне правого притока – р. Выла (SV); в заливах (SZ, 1ZI); в затонах (придаточных непроточных водоемах) (2ZO, 2ZS), в пойменных озерах: близко расположенных к руслу реки, относительно недавно отделившихся, имеющих связь через узкую протоку (оз. Сомовое (Сомовское) (3S)), в более отдаленных (оз. Сосновское (4S) и Степное (4St)), а также в успевших практически полностью зарасти макрофитами (оз. Кривель (5K)). Перечисленные водоемы образуют генетический ряд (степень их «зрелости» отражена в цифровом обозначении), что позволяет на их примере изучать особенности сукцессии сообществ гидробионтов.

Произведен анализ следующих характеристик развития зоопланктонного сообщества: средняя индивидуальная масса организма (Андроникова, 1996), показатель трофии (Hakkari, 1972), коэффициент трофии (Мяэметс, 1980), индекс разнообразия Шеннона, вычисленный на основе данных о численности (Shannon, Weaver, 1965). Для определения степени сходства между собой сообществ зоопланктона отдельных водоемов применены методы канонического корреляционного анализа (CCA) с использованием программы Canoco for Windows 4.5 (ter Braak, 1988). Доминирование видов (их значимость в сообществе) оценивалось на основе обилий с использованием функции рангового распределения (Федоров и др., 1877).

На исследованном участке р. Сура в число доминант входили обычные для относительно крупного водотока таксоны *Asplanchna priodonta* Gosse, *Bosmina longirostris* (O.F. Muller), *Filinia longiseta* (Ehrenberg), *Keratella quadrata* (O.F. Muller), *Brachionus calyciflorus* Pallas, *B. angularis* Gosse, *B. diversicornis* (Daday). В целом, фауна коловраток р. *Brachionus* относительно разнообразна, отмечены также *B. quadridentatus* Hermann, *B. rubens* Ehrenberg, составляющие не более 8% численности сообщества. В заливах реки сходный состав фауны, также доминируют *Bosmina longirostris*, обычны *K. quadrata*, Brachionus diversicornis, а также более характерные для стоячих водоемов *Scapholeberis mucronata* (O.F. Muller) и *Ceriodaphnia quadrangula* (O.F. Muller). В затонах ветвистоусые *S. mucronata* также входят в состав доминирующего комплекса наряду с ювенильными веслоногими и коловраткой *Euchlanis dilatata* Ehrenberg, обычны коловратки *B. diversicornis* и *K. quadrata* и весьма разнообразны представители зарослевой фауны из р. *Trichocerca*. Вествистоусые *Eurytemora caspica* Sukhikh et Alekseev, 2013 (ранее указывались как *E. affinis* Poppe (Сухих и др., 2019)) обычны в заводях и составляют не более 5% численности в затонах. В оз. Сомовое, расположенном в 1 км от русла р. Сура, летом основу численности составляют ювенильные циклопоиды, коловратки *B. calyciflorus*, также разнообразны зарослевые виды *T. brachiura* (Gosse), *T.*

capucina (Wierzejski et Zacharias), *T. cylindrica* (Imhof), *T. pusilla* (Lauterborn), *T. similis* (Wierzejski), *T. tenuior* (Gosse), при этом представители типичного для р. Сура комплекса из р. *Brachionus* составляют менее 1%. В оз. Степное по численности летом преобладают ювенильные стадии развития веслоногих, коловратки *A. priodonta*, *B. angularis* Gosse, *Anuraeopsis fissa* (Gosse). Сообщество оз. Сосновское также характеризуется преобладанием ювенильных циклопид по численности, при этом обычными являются *B. diversicornis*, *Daphnia cucullata* Sars, *Diaphanosoma brachyurum* (Lievin). В оз. Кривель веслоногие *Mesocyclops leuckarti* (Claus) (взрослые и ювенильные) составляют основу численности сообщества, при этом разнообразны зарослевые формы из числа ветвистоусых, среди которых чаще отмечены *Camptocercus rectirostris* Schoelder, *Alona quadrangularis* (O.F. Muller).

Характерные для р. Сура веслоногие *E. caspica* обнаружены только в самой реке и затонах. Обычные для пойменных водоемов Присурья (Подшивалина, 2016), обитающие в заводях и на течении рек (Коровчинский и др., 2021) ветвистоусые *Bosminopsis zernowi* Linko (ранее упоминавшиеся как *B. deitersi* Richard (Коровчинский и др., 2021)) встречаются только в оз. Сосновское.

Фауна планктонных беспозвоночных местообитаний, в разной степени связанных с руслом р. Сура, в целом, не является уникальной, характерной только этому типу водоемов. Вероятно, при трансформации сообществ вследствие возникающего ограничения и утраты участком реки связи с водотоком происходит постепенная смена структуры сообществ, выражающаяся в изменении роли (степени участия) в ценозе отдельных видов, при этом появление новых таксонов, вероятно, выражено в меньшей степени. Сходство между планктонными сообществами р. Сура, ее затонов и недавно отделившихся водоемов достаточно велико, сами группы (объединены на рисунке изолиниями) не обособлены (рис.). В этом отношении показательно разнообразие и обилие коловраток р. *Brachionus*. В речных сообществах высока (15.9–39.5% суммарной численности) доля *B. calyciflorus*, она резко снижается в заводях (менее 5%) и крайне незначительна (менее 1%) в озерах поймы.

Четко отличается от речного состав сообществ зоопланктон оз. Кривель (рис.), испытывающего незначительное влияние речных вод при разливе р. Сура весной в годы с интенсивным половодьем, зарастаемость которого приближается в летний период к 100%, и устьевой части правого притока – р. Выла, фауна которого формируется преимущественно из расположенных выше по течению сообществ и лишь отчасти – за счет смешения с водами из р. Сура.

Средняя индивидуальная масса организма имеет тенденцию (с некоторыми колебаниями) нарастания при переходе участка реки к зарегулированному состоянию и трансформации в озеро (табл.). Одновременно происходит некоторое уменьшение сапробности и уровня трофности (оцененного с помощью показателя трофии (E) и коэффициента трофии (E/O)). Все эти показатели отражают изменения параметров бывшего участка русла реки (гидрологического режима, морфологии, увеличение роли автохтонного вещества в круговороте, аккумуляции вещества в целом) и следующие за этим структурные перестройки в сообществе. Наряду с составом зоопланктоценозов они свидетельствуют о постепенности и направленности смены сообществ в ходе снижения влияния речных вод, уменьшения проточности и формирования самостоятельных водоемов.

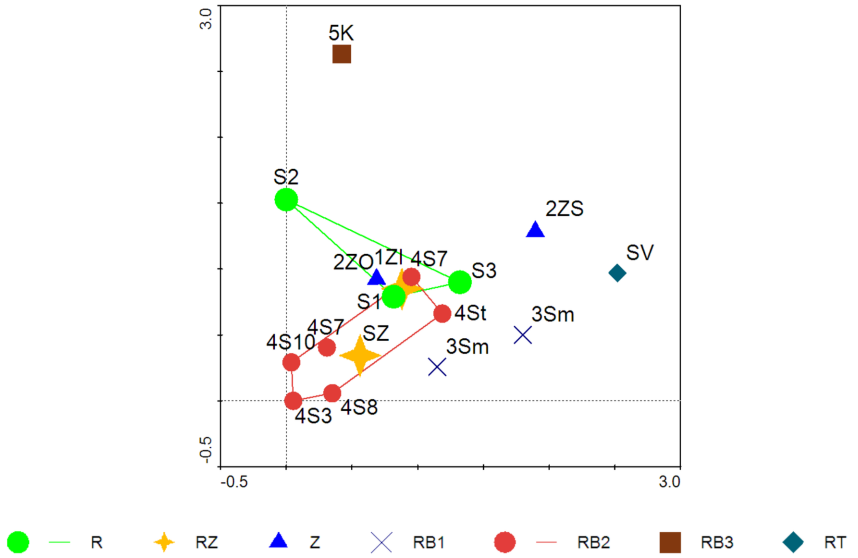


Рис. Ординация сообществ зоопланктона по уровню сходства их состава (обозначения водоемов см. в тексте; водоемы одного типа по степени связи с р. Сура (см. в тексте) объединены изолинией)

Таблица. Показатели структуры зоопланктона водоемов поймы нижнего течения р. Сура

Водоем	Средняя индивидуальная масса организма, $\times 10^{-3}$ мг	Индекс Шеннона по численности	Сапробность	Трофность*
р. Сура	0.47–2.09	2.20–3.40	1.61–1.80	г
Устьевая зона притока р. Сура	2.61	1.75	1.50	г
Заливы	1.89–3.15	2.26–3.81	1.53–1.57	э–г
Затоны	0.69–2.37	3.00–3.64	1.75–1.76	э
Пойменное озеро с протокой	0.35	1.55–2.32	1.47–1.49	г
Пойменные озера без протоки	0.87–2.96	2.23–3.20	1.49–1.70	э
Пойменное зарастающее озеро	5.15	3.48	1.32	м

* уровень трофности по совокупности значений показателя трофии (E) и коэффициента трофии (E/O): г – гипертрофный, э – эвтрофный, м – мезотрофный.

Процесс эволюции озерной экосистемы в направлении от молодого состояния к зрелости соответствует трансформации от олиготрофного к эвтрофному и гипертрофному типам (Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990). При этом наблюдается уменьшение средних размеров зоопланктонных организмов (Крючкова, 1987). При переходе от зрелого состояния к угасающему напротив – происходит нарастание средних размеров организмов за счет увеличения роли крупных К-стратегов (Подшивалина, 2011, 2017, 2019). В ходе эволюции речного русла наблюдается его преобразование в придаточные водоемы, пойменные, а затем (после отступания основного русла) – непойменные озера (Сукцессии …, 1981). Как показали исследования в бассейне нижнего течения р. Сура, экосистема речного потока соответствует гипертрофному типу

(табл.) (зрелому состоянию, согласно классификации озер (Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990)). Таким образом, эволюция экосистемы речного русла начинается с уже зрелого статуса и в конечном итоге приводит к угасанию водного объекта до заболоченного состояния, что сопровождается снижением минерализации и уменьшением содержания тонкой фракции взвешенного органического вещества (Сукцессии…, 1981). Выявленное увеличение средней индивидуальной массы планктонного организма свидетельствует о снижении уровня трофности (Макарцева, 1986; Андроникова, 1988) при трансформации речных экосистем. Показатель трофии и коэффициент трофии (табл.) также подтверждают тенденцию. Эти индексы свидетельствуют об эволюции сообществ речных экосистем в направлении приобретения сходства параметров с более молодыми сообществами. Все перечисленное соответствует установленным ранее закономерностям при угасании озер и подтверждает предположение о развитии сукцессионных процессов в озерах по спирали (Подшивалина, 2019).

Автор выражает признательность Осмелкину Е.В. и Исакову Г.Н. за помощь в сборе полевого материала.

Литература

Абросов В.Н. Зональные типы лимногенеза. Л.: Наука, 1982. 144 с.

Андроникова И.Н. Использование структурно-функциональных показателей зоопланктона в системе мониторинга // Гидробиологические исследования морских и пресных вод. Л., 1988. С. 47–107.

Андроникова И.Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб.: Наука, 1996. 189 с.

Иоганзен Б.Г. Принцип единства биоценоза и биотопа // Вопросы географии Сибири. Сб. 6. Томск, 1966. С. 142–154.

Коровчинский Н.М., Котов А.А., Синев А.Ю., Неретина А.Н., Гарибян П.Г. Ветвистоусые ракообразные (Crustacea: Cladocera) Северной Евразии. Т. 2. Систематическая часть. М.: Товарищество научных изданий КМК. 2021. 544 с.

Крючкова Н.М. Структура сообщества зоопланктона в водоемах разного типа // Продукционно-гидробиологические исследования водных экосистем. Л.: Наука, 1987. С. 184–198.

Макарцева Е.С. Оценка общей стабильности зоопланктонного сообщества и его отдельных показателей при антропогенном эвтрофировании водоемов // Гидробиол. журн. 1986. Т. 22, №5. С. 33–37.

Мяэметс А.Х. Изменения зоопланктона // Антропогенное воздействие на малые озера. Л., 1980. С. 54–64.

Подшивалина В.Н. Материалы по фауне зоопланктона озёр в пределах охранной зоны государственного природного заповедника «Присурский» // Научные труды Государственного природного заповедника «Присурский». 2009. Т. 21. С. 31–34.

Подшивалина В.Н. Индикация стадий онтогенеза малых озер по зоопланктону // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем / Сб. тез. докл. II Междунар. конф. СПб., 2011. С. 128.

Подшивалина В.Н. Зоопланктон болотных озер на разных этапах развития // Труды ИБВВ РАН. 2017. Вып. 79(82). С. 141–146.

Подшивалина В.Н. Некоторые особенности сукцессии сообществ зоопланктона в ходе эволюции малых озер / В. Н. Подшивалина // Озера Евразии: проблемы и пути их решения / Материалы II Международной конференции. Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2019. Ч. 2. С. 313–317.

Сукцессии животного населения в биоценозах поймы реки Оби. Новосибирск: Наука, 1981. 264 с.

Рогозин А.Г. Об измерении скорости сукцессии водных экосистем // Известия Челябинского научного центра. 2001. Вып. 4 (13). С. 73–76.

Федоров Е.Д., Кондрин Е.К., Левич А.П. Ранговое распределение фитопланктона Белого моря // Доклады АН СССР. 1977. Т. 236. № 1. С. 264–267.

Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х.Р. Умирающие озера. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 279 с.

Bernardi R., Soldaini E. Long-term fluctuations of zooplankton in lake Mergozzo, Northern Italy // Mem. Ist. Ital. Idrobiol. 1976. 33. P. 345–375.

Hakkari L. Zooplankton species as indicators of environment // Aqua fennica. Helsinki, 1972. P. 46–54.

Shannon C.E., Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana: Univ. Illinois Press, 1965. 117 p.

ter Braak C.J.F. CANOCO – a FORTRAN program for canonical community ordination. Microcomputer Power, Ithaca, NY, 1988.

ZOOPLANKTON DYNAMICS IN RIVER FLOODPLAIN RESERVOIRS (ON THE EXAMPLE OF THE SURA RIVER LOWER COURSE)

V.N. Podshivalina

The zooplankton structure in the aquatic ecosystems in the basin of the Sura River lower course, forming a genetic series: river stream, tributary reservoirs, floodplain lakes, has been studied. A relatively high similarity of planktonic communities was found, which may reflect the gradual succession of changes during the transformation of the river section. The average individual body weight increases in this range. The trophic level and saprobicity decrease at the same time.

МАЛЫЕ ОЗЕРА ЗАПАДНОГО МАКРОСКЛОНА ПРИПОЛЯРНОГО И ПОЛЯРНОГО УРАЛА И ИХ РОЛЬ В СОХРАНЕНИИ РАЗНООБРАЗИЯ РЫБНОГО НАСЕЛЕНИЯ

В.И. Пономарев

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН

В работе выполнен краткий обзор ледниковой истории уральского хребта. Дана общая характеристика многочисленных малых горных озер западных склонов Приполярного и Полярного Урала. По результатам многолетних полевых исследований составлены списки ихтиофауны озер основных европейских речных бассейнов, имеющих водоразделы с сибирскими речными системами. Рыбное население изученных озер на треть представлено семейством лососевых. Горные озера крайнего европейского северо-востока России представляют собой уникальную модель для изучения естественных процессов формирования структуры и функционирования водных экосистем и сохранения разнообразия рыбного населения. Это связано с близким к нетронутому состоянием экосистем и включением обширных территорий и акваторий в систему федеральных и региональных особо охраняемых природных территорий.

Урал представляет собой крупнейший континентальный горный пояс общей протяженностью более 2 тыс. км. Он расположен между Восточно-Европейской и Западно-Сибирскими равнинами, от приаральских пустынь до Карского моря. Формирование хребта шло с девона до юры и закончилось 170-200 млн. лет назад (Юдин, 1996). Новейшие геологические открытия показали, что современный Урал образовался значительно позже, в результате позднеплиоценовых-четвертичных поднятий (Пучков, 2010). В настоящее время Уральские горы рассматриваются как новообразованные горные сооружения (Рождественский, 2000).

Кроме продолжающихся процессов орогенеза ключевое влияние на ландшафты северных областей Урала оказали периодические изменения климата, сопровождавшиеся покровными оледенениями (Астахов, 2008). Максимальное из них доходило до района истоков р. Печора (Пучков, 2010). Карские ледяные потоки огибали уральские горы с запада и заполняли горные долины на высоте до 250-600 м н.у.м. Скандинавские покровные оледенения не достигали Урала (Astakhov, 2017).

Важно отметить, что широко распространенная ранее точка зрения о последнем оледенении в поздневалдайском (30-10 тыс. лет назад) возрасте не подтвердилась. Оказалось, что это оледенение происходило минимум 60-50 тыс. лет назад. Карово-долинные оледенения способствовали массовому формированию каров и цирков, трогов, морен, снежников и ледниковых озер (Оледенение …, 1966).

Уральский хребет по структурно-геологическим, геоморфологическим, климатическим и почвенно-ботаническим особенностям четко подразделяется на пять частей: Южный Урал, Средний, Северный, Приполярный и Полярный (Долгушин, 1951). Наиболее сложной конфигурацией характеризуется рельеф Приполярного Урала, с его расширением до 150 км и максимальными для всего хребта средними (порядка 1400 м) и предельными (более 1700 м) высотами (Долгушин, 1951).

Для западных склонов Приполярного и Полярного Урала характерно наличие огромного количества малых озер, приуроченных к перевальным седловинам, карам, трогам и циркам (Долгушин, Кеммерих, 1959). Только в горном поясе здесь учтено свыше 4250 водоемов. При этом на западном макросклоне этих двух уральских областей общие суммарная площадь и количество озер в пять с лишним раз больше, чем на восточных склонах. На Приполярном Урале большинство горных озер расположено на высоте 500-1000 м над уровнем моря, тогда как на Полярном – в основном соответственно на высоте 200-500 м.

По своему происхождению озера западных склонов Урала в большинстве своем относятся к числу ледниковых, тогда как пойменные и термокарстовые имеют лишь ограниченное распространение (Долгушин, Кеммерих, 1959). Кроме того, здесь в виде исключения описаны ледниково-тектонические озера (Голдина, 1973).

По нашим данным, площадь ледниковых озер рассматриваемой области Приполярного и Полярного Урала, как правило, варьирует от 1 до 100 га, крайне редко превышая 150 га. При этом их глубина часто достигает нескольких десятков метров. Берега обычно образованы каменистыми россыпями и скалами, а дно – валунно-галечными грунтами, со скальными выходами. Горные озера слабо минерализованы и принадлежат к сульфатному или гидрокарбонатному классу (Долгушин, Кеммерих, 1959). Они существенно различаются по степени развития водной растительности, в особенности макрофитов и мхов (Патова, Демина, 2008; Патова и др., 2016).

Информация об ихтиофауне многочисленных горных озер западных склонов Приполярного и Полярного Урала до появления наших публикаций практически полностью отсутствовала. Имеющиеся в литературе сведения ограничены тремя предгорными озерами бассейна р. Большой Паток, где указано наличие сига, пеляди, щуки и окуня (Голдина, 1973), и озером Нярмато из бассейна р. Кара, населенном

арктическим гольцом и сибирским хариусом (Мельниченко, 2008). Кроме того, на основании опросных данных предполагалось обитание в некоторых горных водоемах гольца-палии, а также озерной ряпушки в бассейне р. Лемва (Кучина, 1962).

В 1994-2024 гг. при проведении ихтиофаунистического изучения более 180 горных и предгорных озер Приполярного и Полярного Урала, расположенных на водосборах рек Печора и Кара, впервые охарактеризован состав их рыбного населения (Ponomarev, Loskutova, 2006; Мельниченко, 2008; Пономарев, 2008, 2009, 2019; Пономарев, Лоскутова, 2020 и др.). Всего выявлено 15 видов рыб из семи семейств (таблица). Оказалось, что большое количество горных водоемов, имеющих сток в речные системы, полностью лишены рыбного населения.

По классификации Г.В. Никольского (1980), преобладают представители бореального равнинного ихтиофаунистического комплекса (шесть видов). Еще пять видов рыб относятся к бореальному предгорному, и четыре вида – к арктическому пресноводному комплексам.

Установлено, что в озерах всех исследованных горных речных бассейнов западных склонов Приполярного и Полярного Урала обитают обыкновенный гольян и налим, а европейский хариус – почти во всех, кроме озер лишь одного из водосборов, верховьев р. Косью. Щука и окунь также населяют горные водоемы большинства речных бассейнов, за исключением Торговой и Кары.

Реже остальных видов в малых озерах встречаются золотой карась (только в бассейнах рек Лемва и Кожим) и усатый голец (Войвож-Сыня и Вангыр). В водоемах трех водосборов (рек Войвож-Сыня, Косью и не вошедшего в таблицу озера Мичаты из бассейна р. Щугор) обнаружен озерный гольян.

Особое внимание привлекают пять ценных видов рыб из семейства лососевых – обыкновенный сиг, пелядь, сибирский и европейский хариусы и арктический голец, образующие в озерах Приполярного и Полярного Урала озерные и озерно-речные формы. Наиболее массовый из них – европейский хариус. Остальные виды семейства распространены весьма спорадически.

Обыкновенный сиг образует относительно многочисленную группировку во многих водоемах озерно-речной системы бассейна р. Малый Паток, единично отмечен в озере Пономаревское (бассейн р. Вангыр) и в отдельных водоемах бассейнов рек Малая (озеро Проточное) и Большая (озеро Естото) Уса, а также Кара (озеро Коматы).

Жилая форма пеляди выявлена в двух предгорных озерах бассейна р. Большой Паток, трех озерах, связанных с р. Вангыр, трех озерах бассейна р. Большая Уса, озере Плаунты бассейна р. Малая Уса и озерах Гнетьты и Коматы в бассейне р. Кара.

Сибирский хариус обнаружен в 14 ледниковых озерах западных склонов Полярного и Приполярного Урала – Нярмато (Мельниченко, 2008), Гнетьты, Коматы, Хойлаты, Форельное, Падежаты, Паток, Номты, Торговое, Длинное и еще четырех безымянных горных водоемах, на водосборах р. Кара и печорских притоков II-III порядка рек Юнъяха, Лимбекою, Паток и Торговая.

Местообитания арктического гольца зарегистрированы в озере Сыняты и безымянном озере в бассейне р. Войвож-Сыня, трех безымянных озерах в бассейне р. Озерная (бассейн р. Войвож-Сыня), безымянном озере в бассейне р. Леввож-Сыня, озере Пономаревское (бассейн р. Вангыр), два безымянных озера в истоках р. Бол. Вангыр и среднем течении р. Вангыр, трех Межгорных озер бассейна р. Косью и двух безымянных озерах на водосборе этого водотока, безымянном озере в истоках р. Хамболъю (бассейн р. Кожим), озерах Большое Балбанты, Малое Балбанты, Верхнее Балбанты, Падежаты и Форельное в бассейне р. Кожим, озера Усваты с соседним безымянным озером, Чаньты (бассейн р. Мал. Уса), а также озере Гнетьты в бассейне р. Кара. Всего нами описано 24 горных озера Приполярного и Полярного Урала,

населенных жилой формой арктического гольца. Еще одно озеро – Нярмато (бассейн р. Кара), в котором обитает этот вид, выявлено И.П. Мельниченко (2008).

Таблица. Ихтиофауна горных и предгорных озер бассейнов уральских рек западных склонов Приполярного и Полярного Урала

Вид рыб	Мал. Уса	Бол. Уса	Лемва	Кожим	Косью*	Вангыр	Войвож-Сыня	Бол. Паток	Мал. Паток	Торговая	Кара
Семейство CYPRINIDAE											
Золотой карась *Carassius carassius* (Linnaeus, 1758)	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Озерный гольян *Phoxinus perenurus* (Pallas, 1814)	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-
Обыкновенный гольян *Phoxinus phoxinus* (Linnaeus, 1758)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Плотва *Rutilus rutilus* (Linnaeus, 1758)	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	-
Семейство BALITORIDAE											
Усатый голец *Barbatula barbatula* (Linnaeus, 1758)	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-
Семейство ESOCIDAE											
Обыкновенная щука *Esox lucius* (Linnaeus, 1758)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-
Семейство SALMONIDAE											
Обыкновенный сиг *Coregonus lavaretus* (Linnaeus, 1758)	+	+	-	-	-	+	-	-	+	-	+
Пелядь *Coregonus peled* (Gmelin, 1789)	+	+	-	-	-	+	-	+	-	-	+
Сибирский хариус *Thymallus arcticus* (Pallas, 1776)	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+
Европейский хариус *Thymallus thymallus* (Linnaeus, 1758)	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
Арктический голец *Salvelinus alpinus* (Linnaeus, 1758)	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+
Семейство LOTIDAE											
Налим *Lota lota* (Linnaeus, 1758)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Семейство COTTIDAE											
Обыкновенный подкаменщик *Cottus gobio* (Linnaeus, 1758)	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	+
Семейство PERCIDAE											
Обыкновенный ерш *Gimnocephalus cernuus* (Linnaeus, 1758)	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	+
Речной окунь *Perca fluviatilis* (Linnaeus, 1758)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-
Всего видов	10	9	9	9	7	9	10	9	9	5	9

Примечание: **+** постоянно обитающий вид; **-** вид отсутствует или нет данных; * бассейн р. Косью без водосборов притоков Вангыр и Кожим.

Таким образом, озера европейской части Приполярного и Полярного Урала обладают ценнейшим составом местного рыбного населения, на треть представленного семейством лососевых. Этот уникальный по своему физико-географическому расположению на границе Европы и Сибири район крайнего европейского северо-

востока России представляется исключительно перспективным с позиций изучения и сохранения водной фауны, причем по целому ряду причин.

Во-первых, водные и наземные экосистемы горной части западных склонов рассматриваемой области Урала большей частью сохраняют близкий к естественному режим. Здесь никогда не проводили сплошные рубки и акклиматизационные работы. Водосборные площади полностью свободны от постоянных населенных пунктов. Территории практически лишены инфраструктуры и по-настоящему труднодоступны.

Во-вторых, значительная часть водосборов горных областей рек Печора и Кара включена в систему особо охраняемых природных территорий Республики Коми. Здесь располагается национальный парк «Югыд ва» – один из крупнейших федеральных резерватов России, практически полностью охватывающий западные склоны Приполярного Урала. С севера к нему примыкает целый ряд региональных резерватов.

Наконец, экосистемы многочисленных относительно изолированных малых озер представляют собой исключительно удобную модель для изучения естественного разнообразия популяций рыб и амфибиотических беспозвоночных высоких широт при преимущественно низких температурах среды и коротком вегетационном периоде.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Литература

Астахов В.И. Начала четвертичной геологии. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2008. 224 с.

Голдина Л.П. Озера бассейна реки Большой Паток (Приполярный Урал), их значение и охрана // Изв. Всесоюз. геогр. общества. 1973. Т. 105. Вып. 5. С. 463–465.

Долгушин Л.Д. Некоторые особенности рельефа, климата и современной денудации в Приполярном Урале. М.: Изд-во АН СССР, 1951. 206 с.

Долгушин Л.Д., Кеммерих А.О. Горные озера Приполярного и Полярного Урала // Известия АН СССР. Сер. географическая. 1959. №5. С. 76–84.

Кучина Е.С. Ихтиофауна притоков р. Усы // Рыбы бассейна р. Усы и их кормовые ресурсы. М.-Л. : Изд-во АН СССР, 1962. С. 176–211.

Мельниченко И.П. Рыбные ресурсы полярной части Урала и западного Ямала: Автореф. дис. … канд. биол. наук. Екатеринбург: 2008. 23 с.

Никольский Г.В. Структура вида и закономерности изменчивости рыб. М.: Пищевая промышленность, 1980. 184 с.

Оледенение Урала. М.: Наука, 1966. 307 с.

Патова Е.Н., Демина И.В. Водоросли водоемов Полярного Урала, не подверженных антропогенному воздействию // Биология внутренних вод. 2008. №1. С. 58–67.

Патова Е.Н., Стерлягова И.Н., Бришкайте Р. Альгофлора. Водоросли других отделов // Флоры, лихено- и микобиоты особо охраняемых ландшафтов бассейнов рек Косью и Большая Сыня (Приполярный Урал, национальный парк «Югыд ва»). М.: Т-во научных изданий КМК, 2016. С. 282–317.

Пономарев В.И. Рыбы предгорных озер водосбора реки Пага (бассейн реки Лемва, Полярный Урал) // Вестник Оренбургского гос. ун-та. 2008. №87. С. 96–100.

Пономарев В.И. Рыбное население горных озер верховьев реки Уса (бассейн реки Печора, Полярный Урал) // Животный мир горных территорий. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2009. С.421–427.

Пономарев В.И. Фауна водоемов бассейна р. Малый Паток (Приполярный Урал). I. Рыбы // Биология внутренних вод. 2019. №4. Вып. 1. С. 14–24.

Пономарев В.И., Лоскутова О.А. Влияние высотного градиента на структуру водных сообществ бассейна реки Вангыр (Приполярный Урал) // Экология. 2020. №1. С. 62–71.

Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.

Рождественский А.П. Новейший орогенез и формирование Уральских гор // Геологический сборник. 2000. №1. С. 22–24.

Юдин В.В. Орогенез севера Урала и Пай-Хоя. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1996. 286 с.

Astakhov V.I. A New Model of Pleistocene Glaciation in the Northern Urals // Doklady Earth Sciences. 2017. V. 476. P. 1200–1202.

Ponomarev V., Loskutova O. Diversity of zoobenthos and fish communities of lakes in the Kara Sea basin // Verh. Internat. Verein. Limnol. Stuttgart, 2006. V. 29. P. 1715–1718.

SMALL LAKES OF THE WESTERN SLOPES OF THE PREPOLAR AND POLAR URALS AND THEIR ROLE IN CONSERVATION THE FISH DIVERSITY

V.I. Ponomarev

The paper gives a brief review of the history of formation of numerous small mountain lakes of the Western slopes of the Subpolar and Polar Urals and their general characterization. Based on the results of long-term field studies, a content of ichthyofauna of lakes in a number of European river basins with watersheds with Siberian river systems was compiled. The fish population of the studied lakes is represented by one third by the salmonid family. Mountain lakes of the extreme European North-East of Russia represent a unique model for studying natural processes of formation of the structure and functioning of aquatic ecosystems and conservation of fish communities. This is due to the near pristine state of the region's ecosystems and the inclusion of vast territories and water areas in the system of federal and regional Nature reserves.

МАКРОЗООБЕНТОС АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ КАРЕЛИИ В УСЛОВИЯХ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Е.С. Савосин

Институт биологии Карельского научного центра РАН

В статье представлены результаты изучения состояния бентофауны трех пресноводных водоемов Республики Карелия (Верхнее Пулонгское, Верхнее Куйто и Толпанъярви) при различных уровнях антропогенного воздействия. Приведены структурно-биологические показатели сообществ макрозообентоса в водоемах, используемых для садкового выращивания радужной форели и в условиях ненарушенной экосистемы приграничного водоема. Отмечены основные особенности донной фауны северных олиготрофных водоемов, расположенных в Арктической зоне РФ. Результаты исследования показали, что необходимо проводить регулярный мониторинг пресноводных экосистем для оценки изменений в их гидробиоценозах под влиянием различных факторов.

Одним из наиболее развитых направлений в рыбоводстве на северо-западе России, в частности в Карелии, является садковое форелеводство, в настоящее время это одна из самых перспективных отраслей аквакультуры. В РК выращиванием радужной

форели (*Parasalmo mykiss* Walbaum) в промышленных объемах занимаются более 40 лет. Для оценки текущего состояния экосистемы в водоемах, используемых в рыбоводстве, крайне важен постоянный мониторинг основных гидрохимических показателей воды и состояния сообществ гидробионтов. По результатам исследований возможно корректировать товарную мощность форелевых хозяйств, что, в свою очередь, влияет на количество поступающих биогенных веществ в водоем, снижая скорость сукцессионных процессов в результате изменения трофического статуса используемого водоема. Динамика гидробиологических показателей при мониторинге водных объектов в условиях антропогенного загрязнения играет ключевую роль. Как правило, процесс эвтрофикации водной среды характеризуется количественными и качественными изменениями в экосистеме. Традиционными биологическими индикаторами качества воды в гидробиологии являются представители макрозообентоса. Организмы донной фауны характеризуются широким экологическим спектром, достаточно крупными размерами, приуроченностью к конкретному местообитанию, значительной продолжительностью жизни, позволяющей им аккумулировать загрязняющие вещества. Все это делает их очень удобным объектом для мониторинга пресноводных экосистем (Баканов, 1997; Баканов,2000; Яковлев, 2005).

С целью контроля состояния окружающей среды разработана система методов и форм мониторинга водных экосистем, которая успешно применяется в условиях Севера. При промышленном садковом рыбоводстве, акватории водоемов испытывают негативное воздействие, выражающееся в изменении структуры донных отложений. Напрямую связанные с ними биоценотическими связями донные гидробионты не способны полностью трансформировать отходы садкового производства, что, в конечном итоге приводит к изменению качественного и количественного состава макрозообентоса.

Для отбора количественных проб зообентоса использовали дночерпатель Экмана - Берджа (площадь захвата 0,025 м^2), по два подъема на пробу. Грунт промывали с помощью сита (размер ячеи 0,5 мм), полученный материал фиксировали 8%-ным раствором формалина. Камеральную обработку проводили в лаборатории с помощью бинокулярного микроскопа Микромед МС-2-ZOOM, беспозвоночных сортировали по таксономическим группам и взвешивали на весах DA-124C (BEL ENGINEERING) с точностью 0,1 мг. Виды определяли с использованием современных руководств (Определитель…,2001; Timm, 2009; Определитель…,2016). Названия видов приведены на основе базы данных Global Biodiversity Information Facility (GBIF.org) и Fauna Europea (De Jong et al., 2014). Трофический статус водоема определяли по шкале С.П. Китаева (Китаев, 2007).

Для оценки степени загрязнения вод использован хирономидный индекс (К), предложенный Е.В. Балушкиной (1997). Работа на исследованных водоемах проводилась в разные годы, в рамках мониторинга влияния форелевых хозяйств на состояние пресноводных экосистем (Верхнее Пулонгское, Вехнее Куйто) и изучения биоразнообразия водоемов Зеленого пояса Фенноскандии (Толпанъярви). Все озера расположены в северной Карелии и принадлежат к бассейну Белого моря. На оз. Верхнее Пулонгское с 2007 года эксплуатировался форелевый комплекс с проектной мощностью 600 т, на оз. Вернее Куйто с 2007 года 625 т соответственно. Озеро Толпанъярви находится в границах охранной зоны, включающей запреты на все виды деятельности человека (охота, рыбная ловля, промысловый сбор грибов и ягод, рубка леса и др.), что характерно и для заповедных территорий.

Основные гидрологические параметры исследованных водоемов представлены в таблице.

Таблица. Основные гидрологические показатели исследуемых озер

Показатель	В. Пулонгское*	В. Куйто*	Толпанъярви
Высота над уровнем моря, м	7,2	102	261,9
Площадь водоема. км^2	28,4	198	4,2
Площадь водосбора, км^2	601	7150	42
Длина озера, км	16	42	10,5
Ширина средняя, км	-	5,7	0,4
Ширина максимальная, км	3,4	19,6	-
Глубина средняя, м	15	8,7	4,5
Глубина максимальная, м	50	44,0	10
Показатель условного водообмена	0,45	1,3	0,47

* по данным: Озера Карелии …, 2013

Зообентос озера *Верхнее Пулонгское* характеризуется низкими количественными показателями, характерными для холодноводных олиготрофных водоемов бореальной зоны. За период исследования донная фауна водоема в зоне работ была сформирована, главным образом, личинками хирономид (Chironomidae), ракообразными (Amphipoda), двустворчатыми моллюсками (Bivalvia), изредка в пробах встречались малощетинковые черви (Oligochaeta). Анализ полученных данных показал, что значительных изменений в структуре донного сообщества на таксономическом уровне не выявлено как непосредственно в зоне садков, так и на незначительном удалении. Однако, отмечены изменения концентрации донных организмов по мере удаления от модуля более 800 м. Так, установлено, что происходит снижение показателей биомассы Chironomidae и Amphipoda в несколько раз, а численность почти в 4 раза соответственно.

По уровню количественного развития зообентоса озеро можно отнести к β-олиготрофному водоему, к группе амфиподо-ортокладииновых (Китаев, 2007). Особую ценность водоему в отношении придает наличие реликтовой амфиподы - *Monoporeia affinis* (Lindström, 1855).

Сведения о зообентосе озера *Верхнее Куйто* опубликованы в ряде источников (Герд, 1935; Рябинкин, Хазов, 1984, 1989; Озера Карелии, 2013). В составе донной фауны за многолетний период отмечены представители 67 таксонов, в том числе: Chironomidae, Oligochaeta, Hirudinea, Crustacea, Hydrachnella, Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, Megaloptera, Coleoptera, Ceratopogonidae. Для оз. Верхнее Куйто, как и для большинства крупных озер Карелии, характерным является наличие каменистой, каменисто-валунной и каменисто-песчаной литорали. В связи с этим, значительное развитие получает литореофильный комплекс организмов (Рябинкин, 2003).

На незначительных глубинах до 5 м в зоне литорали и сублиторали наблюдаются скопления организмов макрозообентоса, с продвижением на глубину количественные показатели донной фауны (биомасса, численность) резко падают. Также значительно обедняется видовой состав, и в зоне профундали, на серо-зеленых илах, основу донной фауны составляют исключительно хирономиды, олигохеты и нематоды (Хазов, Рябинкин, 1989, Рябинкин, 2003). Средняя биомасса макрозообентоса за период исследований в районе форелевого хозяйства составила 1,84 г/м^2 при численности 224 экз./м^2. По мере удаления от садков прослеживается снижение биомассы макрозообентоса при одновременном увеличении количества таксономических групп.

Сравнение наших данных с литературными данными (Хазов, Рябинкин, 1989; Рябинкин, 2003; Озера Карелии, 2013) показало резкое увеличение количественных показателей бентофауны водоема в районе расположения форелевого хозяйства по сравнению со средними по озеру (1,84 и 0,40 г/м^2).

Озеро *Толпанъярви,* благодаря своему географическому положению, можно отнести к водоемам, находящимся практически в естественном состоянии, т.к. оно расположено в границах «Зеленого пояса Фенноскандии» (Зеленый …, 2014). В озере

еще сохранилось естественное разнообразие гидробионтов, и оно может выступать основой для оценки состояния водных экосистем при значительном антропогенном воздействии.

Для водоема характерен илисто-песчаный тип донных отложений. Общий список донных организмов, обнаруженных в исследуемый период, насчитывал 16 видов. Доминирующий комплекс зообентоса был сложен личинками двух подсемейств Chironomidae: Tanypodinae (*Procladius* sp.) и Orthocladiinae (*Psectrocladius* sp., *Psectrocladius sordidellus* (Zetterstedt, 1838), *Psectrocladius barbatipes* (Kieffer, 1923), *Psectrocladius psilopterus* (Kieffer, 1906) а также малощетинковыми червями (*Lumbriculus variegatus* (Muller, 1774). В прибрежных районах Толпанъярви отмечены представители поденок, ручейников, пиявок и ракообразных (*Asellus aquaticus* (Linnaeus, 1758)). Величина средней биомассы макрозообентоса составляла 0,44 г/м^2 при численности 530 экз./м^2. Основу биомассы формировали личинки хирономид – 0,24 г/м^2 при численности 360 экз./м^2. Доминантным видом служат олигохеты, на долю которых приходилось около 50% всей биомассы. В целом, количественные показатели зообентоса варьировали от 120 экз./м^2 и 0,08 г/м^2 в профундальной зоне до 1200 экз./м^2 и 0,86 г/м^2 – в затишной литорали.

Макрозообентос исследованных водоемов характеризуется низкими показателями численности и биомассы. По уровню количественного развития донной фауны озера *Верхнее Пулонгское, Верхнее Куйто и Толпанъярви* соответствуют – олиготрофным, типичным для пресноводных экосистем таёжной зоны средней и северной Карелии. (Китаев, 2007). Для таких экосистем обычен стабильный видовой состав и структура сообщества макрозообентоса на протяжении ряда лет. Доминирующий комплекс водоема формируется из видов-индикаторов олиго- и олиго-бета-мезосапробных условий. Видовой состав донной фауны является типичным для олиготрофных водоемов средней и северной Карелии.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания Карельского научного центра РАН.

Литература

Баканов А.И. Использование характеристик разнообразия зообентоса для мониторинга состояния пресноводных экосистем // Мониторинг биоразнообразия. М., 1997. С. 278-283.

Баканов А.И. Использование зообентоса для мониторинга пресноводных водоемов (обзор) // Биология внутренних вод. 2000. №1. С. 68–82.

Балушкина Е.В. Применение интегрального показателя для оценки качества вод по структурным характеристикам донных сообществ // Реакция озерных экосистем на изменение биотических и абиотических условий. СПб.: ЗИН АН СССР, 1997. С. 266–292.

Герд. С.В. Бентос озёр Верхнего, Среднего и Нижнего Куйто в связи с вопросом о питании рыб // Тр. карельской науч.- исслед. рыбохозяйственной станции. Л., 1935. Т. 1. С. 103-153.

Зеленый пояс Фенноскандии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. 116 с.

Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.

Озера Карелии: Справочник. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Высшие насекомые (ручейники, чешуекрылые, жесткокрылые, сетчатокрылые, большекрылые, перепончатокрылые). СПб: Наука, 2001. Т. 5. 836 с.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 2. Зообентос. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 457 с.

Рябинкин А.В., Хазов А.Р. О донной фауне озер Куйто // Исследование Онежской губы и водоемов бассейна Белого моря. Петрозаводск. 1984. С. 43

Рябинкин А.В. Макрозообентос водоемов бассейна р. Кеми (Карелия) и его динамика в условиях антропогенного влияния: Автореф. дисс. … канд. биол. наук. Петрозаводск, 2003. 25 с.

Хазов А.Р., Рябинкин А.В. Современное состояние и особенности распределения донной фауны озер Куйто // Современный режим природных вод бассейна р. Кеми. Петрозаводск, 1989. С.109-121.

Яковлев В.А. Пресноводный зообентос северной Фенноскандии (разнообразие, структура и антропогенная динамика). Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2005. В 2-х частях. Ч. 1. 161 с. Ч. 2. 145 с.

Timm T. A guide to the freshwater Oligochaeta and Polychaeta of Northern and Central Europe // Lauterbornia. V. 66. 2009. P. 1–235.

MACROZOOBENTHOS OF THE ARCTIC ZONE OF KARELIA UNDER ECONOMIC ACTIVITY

E.S. Savosin

The article presents the results of studying the state of the benthic fauna of three freshwater reservoirs of the Republic of Karelia (Upper Pulongskoye, Upper Kuito and Tolpanyarvi) under different levels of anthropogenic impact. Structural and biological indicators of macrozoobenthos communities in reservoirs used for cage farming of rainbow trout and in the conditions of an undisturbed ecosystem of a border reservoir are given. The main features of the benthic fauna of northern oligotrophic reservoirs located in the Arctic zone of the Russian Federation are noted. The results of the study showed that it is necessary to conduct regular monitoring of freshwater ecosystems to assess changes in their hydrobiocenoses under the influence of various factors.

РЫБОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ МАЛЫХ ВОДОЕМОВ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ КАРЕЛИИ

Е.С. Савосин

Институт биологии Карельского научного центра РАН

Представлены результаты инвентаризации видового состава ихтиофауны и условий обитания рыб озера Толпанъярви (Лоухский район). Проанализированы гидрологические, гидрохимические и гидробиологические параметры водоема. Рыбное население Толпанъярви представлено 8 видами рыб, относящимися к 5 семействам. В уловах преобладают окунь, плотва и сиг. Толпанъярви может служить эталоном для оценки состояния водных экосистем Арктической зоны республики, в виду его сохранения практически в естественном состоянии. Малые озера при минимальном комплексе воздействующих на экосистему факторов и низким уровнем изменений среды, являются перспективными для развития экологического туризма, любительского и спортивного рыболовства.

Озерность территории Республики Карелия составляет 12 процентов, а с учетом карельской части Онежского и Ладожского озер этот показатель достигает уже 21 %, что является одним из самых высоких значений в мире. Особенностью гидрографической сети можно назвать преобладание водоемов с площадью водной поверхности менее от 1 до 10 км^2. Рыбохозяйственный водный фонд республики обеспечен преимущественно несколькими десятками крупных и средних по площади озер и водохранилищ. В то же время, именно крупнейшие пресноводные водоемы Карелии на протяжении многих лет испытывают усиленную антропогенную нагрузку, вызывающую перестройку структуры водных сообществ, изменение условий обитания рыб (нагула и воспроизводства), трофических и продукционных характеристик отдельных гидробионтов. Роль небольших водоемов, практически не фиксируется статистикой. Нетронутые хозяйственной деятельностью экосистемы с высоким для северных широт уровнем биоразнообразия являются основой для сохранения генофонда популяций отдельных видов гидробионтов. Малые водоемы Арктической зоны Карелии могут выступать основой для оценки состояния уязвимых северных водных экосистем, поскольку ответные реакции в таких водных объектах формируются быстрее по сравнению с крупными по площади водными объектами.

К таким водоемам можно отнести и Толпанъярви (Лоухский район), где проводились наши исследования. Озеро удалено от населенных пунктов и промышленных предприятий, акватория не используется для рыбоводства.

Основой работы послужили сборы на озере Толпанъярви (65^{0}59′43′′ с.ш., 30^{0}09′00′′ в.д.) в летний и осенний период 2019-2020 гг. Сбор ихтиологического материала проводили с использованием разноячейных жилковых сетей (длина 30 м, высота-1,5-3,0 м, ячея 10-60 мм). Сетные порядки устанавливали в разных участках озера и на различных глубинах на срок до 12 часов. При лабораторной обработке рыб использовали общепринятые методики (Дгебуадзе, Чернова, 2009; Методическое…, 1974; Правдин, 1966; Стерлигова, 2016). У выловленных сигов для определения внутривидовых форм просчитывалось число жаберных тычинок на жаберной дужке. Возраст рыб определяли по чешуе, жаберным крышкам и отолитам. Латинские названия рыб приведены по книге «Рыбы в заповедниках России» (2010). Общий объем собранного и проанализированного материала составил 475 рыб.

Толпанъярви - озеро на территории Кестеньгского сельского поселения Лоухского района Республики Карелии. Водоем имеет лопастную, продолговатую форму, он вытянут с северо-запада на юго-восток на десять километров. Площадь озера составляет 4,2 км^2, площадь водосборного бассейна 42 км^2, средняя глубина 4,5 м, максимальная - 10 м. Из озера вытекает один безымянный ручей, впадающий в озеро Еноярви. В озере расположено около двух десятков небольших безымянных островов, рассредоточенных по всей площади водоёма.

Гидрохимические показатели Толпанъярви обеспечивают благоприятные условия для обитания рыб, общая минерализация не превышает 20 мг/л, насыщенность водной среды кислородом близка к максимальной. Концентрации биогенов (азот и фосфор) в пробах воды озер очень низкие, качество вод не нарушено (Лозовик, Ефременко, 2017).

Среди макрофитов в водоеме представлены тростник обыкновенный, рдест, хвощ, кубышка камыш озерный, осоки. Степень зарастания акватории невысока. В водоеме выделяется значительная зона мелководий, активно используемая для нагула молоди рыб и для размножения хищными видами (щука, окунь).

В исследуемом водоеме сложились благоприятные условия для развития кормовой базы рыб. По уровню количественного развития зоопланктона озеро Толпанъярви можно отнести к олиготрофным водоемам с биомассой до 1 г/м^3 с

отдельными участками с чертами мезотрофии в прибрежной зоне. При этом кладоцеры являются абсолютно доминирующей группой зоопланктона по численности и биомассе для глубоководной части озера и мелководья. В целом планктонный комплекс Толпанъярви представлен обычными представителями северных водоемов с добавлением ряда эвритопных организмов, характеризующихся повышенными адаптационными свойствами.

Анализ донных отложений озера Толпанъярви позволил выявить доминирующий комплекс видов зообентоса, который сформировали представители Chironomidae и Oligochaeta. Хирономидный индекс водоема (К – 2.00) позволяет отнести его к чистым водным объектам (Стерлигова и др., 2023). Биомасса бентоса в озере Толпанъярви в среднем составляла 0,44 г/м^2 при численности 530 экз./м^2., что также характеризует Толпанъярви как олиготрофным водоемам (Китаев, 2007).

Материалы по рыбному населению Толпанъярви незначительны, в связи с труднодоступностью и удаленностью от районных центров. В озере обитает 8 видов рыб, относящихся к 5 семействам (окунь, плотва, сиг, ряпушка, язь, щука, налим, ерш). Промышленный лов на озере не ведется, запасы водных биоресурсов не определены. Зарыбления не проводились, что оставляет открытым это направление потенциального повышения рыбопродуктивности водоема, в первую очередь, это касается холодолюбивых видов.

В близлежащих озерах обитает до 15 видов рыб (голец *Salvelinus lepechini* (G.), хариус *Thymallus thymallus* (L.), корюшка *Osmerus eperlanus* (L.), гольян *Phoxinus phoxinus* (L.), ручьевая форель *Salmo trutta* L.) (Лукин и др., 2013; Мельянцев, 1974; Стерлигова, Ильмаст, 2014). Очевидно, их можно встретить и в Толпанъярви, но за пределами ограниченной для лова из-за близости государственной границы зоны.

В уловах преобладали сиг, плотва и окунь, для озера характерно распределение видов рыб по отдельным участкам, приуроченным к концентрациям кормовых организмов. Реже в уловах отмечался обитатель мелководья язь, в контрольном улове обнаружен налим. Наличие старшевозрастных групп (табл.) самого распространенного вида в озере, окуня, свидетельствует о достаточной кормовой базе при ограниченном вылове. Таким образом, этот вид выступает одним из основных объектов коммерческого и любительского рыболовства. Плотва в Толпанъярви - типичный эфврифаг, включающий в свой рацион зоопланктон, различные бентосные организмы (личинки ручейников, хирономид, поденок, моллюсков, червей и т. д.), детрит, нитчатые водоросли, растительные остатки, икру и молодь рыб. Является важным объектом питания хищных рыб в озере, например, щуки.

В относительно небольшом по площади водоеме нами были выявлены две формы сига - малотычинковая (18–24) и среднетычинковая (28–36), отличающиеся по биологическим показателям (возрастной структуре, размерам и массе, плодовитости и питанию). Присутствие такой дифференциации в пределах одного вида увеличивает сложность структуры ихтиоценозов, обеспечивает полноту освоения кормовой базы водоема и повышает общую устойчивость к факторам среды. К тому же, сиг является общепризнанным индикаторным видом для оценки состояния северных экосистем (Кащулин и др., 1999; Решетников, 1995).

Ряпушка, типичный планктофаг северных водоемов, в исследованной части Толпанъярви малочисленна, обнаружена, наряду с ершом, только в желудках щуки и окуней. Группу бентофагов образуют младшие возрастные группы окуня, малотычинковая форма сига, язь, ерш. Хищное питание (рыбой) с 2 – 3 лет и далее до достижения максимального возраста характерно для щуки, налима и окуня.

Отсутствие повреждений внешних тканей выловленных рыб (язвы, опухоли, вздутия), жабр и внутренних органов (почки, печень, гонады), подтверждает

стабильность экосистемы озера и его чистоту в отношении патогенных организмов. По своему рыбохозяйственному статусу озеро Толпанъярви относится к высшей категории водоемов, на обследованных участках отмечены ценные виды рыб (сиг, ряпушка). Можно предполагать обитание в озере хариуса, форели, гольяна, которые не были отмечены в контрольных уловах, но присутствуют в ихтиофауне близлежащих озер.

Таблица. Линейно-весовые показатели основных видов рыб озера Толпанъярви

	Возраст, лет									
	3+	4+	5+	6+	7+	8+	9+	10+	12+	14+
Окунь (n = 65)										
Длина, (AD), см	-	-	-	-	19,0	20,0	22,0	24,0	26,7	29,0
Масса, г	-	-	-	-	120	140	200	260	346	433
Плотва (n = 105)										
Длина (AD), см	-	-	-	-	-	16,8	18,3	19,8	20,3	26,0
Масса, г	-	-	-	-	-	105	130	145	167	280
Сиг (28-36 ж.т., n = 60)										
Длина (AC), см	23,5	24,7	25,8	27,2	-	-	-	-	-	-
Масса, г	145	170	220	260	-	-	-	-	-	-

Полученные данные позволяют отнести озеро Толпанъярви к олиготрофным водоемам с высоким качеством воды, сопоставимым по гидробиологическим и гидрохимическим показателям с карельскими водоемами с природоохранным статусом.

Состояние, структура рыбных запасов и динамика их промысловой эксплуатации имеют в каждом регионе свою специфику и некоторые особенности, связанные как с характеристиками промысловыми водоемами, так и со способами и традициями ведения промысла.

Как было показано С.П. Китаевым (2007), зачастую рыбохозяйственный потенциал и рыбопродуктивность зависят от лимнологических особенностей конкретных водоемов. Средняя ихтиомасса и средняя рыбопродуктивность малых водоемов Карелии с площадью до 10 км^2 находится на сравнимом с более крупными водными объектами уровне. Это, вероятно, связано с большей стабильностью малых экосистем, определяющей качество рыбопромыслового водоема. Малые удаленные озера не испытывают длительно действующих источников загрязнения, что позволяет сохранять условия обитания рыб практически в ненарушенном состоянии.

Отсутствие сточных вод от промышленных и сельскохозяйственных предприятий, равно как и малонаселенность района расположения позволяют рассматривать исследуемый водоем в качестве удобного контрольного объекта для наблюдения за видами. При мониторинговых исследованиях состояния окружающей среды на приграничных территориях Толпанъярви может быть использован как базовая устойчивая природная экосистема.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания Карельского научного центра РАН.

Литература

Дгебуадзе Ю.Ю., Чернова О.Ф. Чешуя костистых рыб как диагностическая и регистрирующая структура. М.: Тов. науч. изд. КМК, 2009. 315 с.

Кашулин Н.А., Лукин А.А., Амундсен П.А. Рыбы пресных вод субарктики как биоиндикаторы техногенного загрязнения. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1999. 142 с.

Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.

Лукин А.А., Первозванский В.Я., Шарова Ю.Н. Ихтиофауна // Озера Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 56–67.

Мельянцев В.Г. Рыбы. Петрозаводск: Карелия, 1974. 120 с.

Лозовик П.А., Ефременко Н.А. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике. СПб: Нестор–История. 2017. 272 с.

Методическое пособие по изучению питания и пищевых отношений рыб в естественных условиях. М., 1974. 254 с.

Правдин И. Ф. Руководство по изучению рыб. М., 1966. 376 с.

Рыбы в заповедниках России. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. Т. 1. 627 с.

Стерлигова О.П., Ильмаст Н.В. Разнообразие водных экосистем Зеленого пояса Фенноскандии (Республика Карелия) // Тр. КарНЦ центра РАН. 2014. №6. С. 115–121.

Стерлигова О.П., Ильмаст Н.В., Кучко Я.А., Савосин Е.С., Савосин Д.С. Сохранившаяся в естественном состоянии экосистема оз. Толпанъярви, западная Карелия // Успехи современной биологии. 2023. Т. 143. №5. С. 512-520.

Стерлигова О.П. Методы определения возраста рыб и его практическое значение. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. 56 с.

FISHERY POTENTIAL OF SMALL WATER BODIES IN THE ARCTIC ZONE OF KARELIA

D. S. Savosin

The results of the inventory of the species composition of the ichthyofauna and the living conditions of fish in Lake Tolpanjärvi (Loukhsky District) are presented. The hydrological, hydrochemical and hydrobiological parameters of the reservoir are analyzed. The fish population of Tolpanjärvi is represented by 8 species of fish belonging to 5 families. Perch, roach and whitefish predominate in catches. Tolpanjärvi can serve as a standard for assessing the state of aquatic ecosystems in the Arctic zone of the republic, due to its preservation in an almost natural state. Small lakes with a minimal set of factors affecting the ecosystem and a low level of environmental change are promising for the development of ecological tourism, amateur and sport fishing.

БИОМАССА И ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФИТОПЛАНКТОНА ОЗ. СЕВАН (АРМЕНИЯ) В 2018–2019 гг.

Е.Г. Сахарова

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

В июле 2018 г. наблюдалось «цветение» озера цианопрокариотами *Dolichospermum lemmermannii* с максимальной биомассой 110.46 мг/л. Наибольшее количественное развитие водорослей регистрировалось в поверхностном слое за счет *D. lemmermannii,* далее их роль снижалась и повышалась таковая зеленых водорослей. Летом 2019 г. в оз. Севан наблюдались низкие биомассы фитопланктона, доминировали зеленые водоросли.

Осенняя биомасса водорослей планктона была значительно выше летней, преобладали диатомовые водоросли, субдоминантом выступала потенциально токсичная цианопрокариота *Nodularia spumigena*. Наибольшую биомассу фитопланктона наблюдали в поверхностном горизонте, однако присутствовали и глубинные максимумы общей биомассы и биомассы некоторых отделов водорослей.

Озеро Севан (Армения) – крупнейший высокогорный водоем Кавказа, располагающийся на высоте ~ 1900 м над уровнем моря. Площадь озера ~1262 км^2, средняя глубина – 44.3 м, максимальная глубина – 98.7 м (Чилингарян, Мнацаканян, 2010). Водоем состоит из двух частей – Большого и Малого Севана, различающихся по времени образования, происхождению и морфометрии. Для сохранения качества воды и биологических ресурсов оз. Севан и прилегающих территорий был создан Севанский национальный парк. Активное хозяйственное использование озера велось с 1930-х гг. В результате произошло существенное снижение уровня воды (~ 20 м), ухудшение качества водоема и сокращение рыбного населения. С 2002 г. для восстановления экосистемы оз. Севан началось активное повышение его уровня (Чилингарян, Мнацаканян, 2010). Такие колебания уровенного режима не могли не сказаться на динамике качественного и количественного состава гидробионтов, трофическом состоянии водоема. В начальный период повышения уровня воды в оз. Севан было отмечено увеличение биомассы и видового богатства зоопланктона, снижение рыбных запасов, что повлекло значительные изменения количественных характеристик фито- и бактериопланктона (Krylov et. al, 2013; Герасимов и др., 2010). Далее, уменьшение браконьерской нагрузки способствовало увеличению ихтиомассы. В результате произошли существенные перестройки в зоопланктоне: снижение его биомассы, выпадение из состава планктонных беспозвоночных *Daphnia magna* Straus, 1820 и, на фоне этого, увеличение количества более мелких видов *Daphnia longispina* O.F. Mueller, 1776 и *Diaphanosoma lacustris* Kořinek, 1981 (Krylov et. al, 2016, 2018). В связи с ослаблением "контроля сверху" и увеличением биогенной нагрузки за счет затопления суши произошло увеличение интенсивности "цветения" оз. Севан цианопрокариотами (Овсепян, Хачикян, 2016; Hambaryan et al., 2020; Asatryan et al., 2022). Цель работы – определить биомассу, особенности структуры фитопланктона и его вертикальное распределение в период повышенного уровня воды оз. Севан летом и осенью 2018–2019 гг.

Исследование фитопланктона проводили в середине июля 2018 и 2019 гг. и в октябре 2019 г. Летом пробы отбирали в Малом и Большом Севане, осенью – лишь на некоторых станциях Большого Севана. Собирали интегральные пробы от поверхности до дна через каждые 1–5 м батометром Молчанова. Для изучения вертикального распределения водорослей планктона на глубоководных станциях (30–80 м) пробы собирали на разных горизонтах столба воды через каждые 5–10 м. Пробы фитопланктона концентрировали путем прямой фильтрации под слабым давлением поочередно через мембранные фильтры с диаметром пор 5 и 1.2 мкм. Далее пробы сгущали до объема 5 мл и фиксировали раствором Люголя с добавлением формалина и ледяной уксусной кислоты. Идентификацию и подсчет клеток проводили с помощью светового микроскопа Carl Zeiss Primo Star в камере “Нажотта” объемом 0.01 мл. Биомассу водорослей вычисляли счетно-объемным методом (Методы ..., 2024).

В 2018 г. летом было отмечено «цветение» оз. Севан цианопрокариотами. Наибольшая биомасса фитопланктона наблюдалась в Малом Севане на мелководной станции (110.46 мг/л). По мере увеличения глубины регистрировалось снижение биомассы фитопланктона с минимальными ее значениями 1.5–2.5 мг/л на глубоководных участках. Основу биомассы фитопланктона озера составляли цианопрокариоты

Dolichospermum lemmermannii (Richter) P.Wacklin, L.Hoffmann & J.Komárek, их доля в общей биомассе варьировала от 30 до 99%. Зеленые водоросли составляли значительную долю в общей биомассе фитопланктона (0–70%). Среди них в число доминантов входила крупноклеточная водоросль *Oonephris obesa* (West & G.S. West) Fott. В июле 2018 г. наблюдалось существенное увеличение летней биомассы фитопланктона в озере по сравнению с 2013–2017 гг. (Овсепян и др., 2010; Овсепян, Хачикян, 2016). По всей видимости, это связано с повышением температуры воды в озере, о чем косвенно свидетельствуют данные по среднесуточной температуре воздуха в июле (Сахарова и др., 2020). Активное развитие цианопрокариот может быть также связано с ослаблением пресса зоопланктона в связи с исчезновением *Daphnia magna* и увеличением фосфорной нагрузки за счет увеличения экскреции максимально представленными в составе зоопланктона *Daphnia longispina* и *Diaphanosoma lacustris* (Krylov et. al, 2016, 2018).

Максимальная биомасса фитопланктона на глубоководных станциях наблюдалась в поверхностном слое воды (3.15–6.51 мг/л). К придонному горизонту биомасса водорослей снижалась (0.17–1.15 мг/л). Основу биомассы фитопланктона на всех горизонтах глубоководных участков составляли цианопрокариоты и зеленые водоросли. В поверхностном слое превалировали цианопрокариоты (50–94% от общей биомассы) за счет *Dolichospermum lemmermannii*. По мере увеличения глубины их биомасса снижалась и повышалась таковая зеленых водорослей за счет доминирования *Oonephris obesa*. На долю других отделов (диатомовых, динофитовых, криптофитовых, золотистых, эвгленовых) суммарно приходилось не более 6% от общей биомассы фитопланктона. Значения средневегетационной биомассы водорослей относят озеро к мезотрофным водоемам (Овсепян и др., 2010; Овсепян, Хачикян, 2016), однако вертикальное распределение фитопланктона в июле отличалось от такового в других глубоководных стратифицированных мезотрофных озерах (Трифонова, 1990). В связи с активным “цветением” воды и низкой прозрачностью, наибольшая биомасса водорослей наблюдалась в поверхностном слое, что характерно для эвтрофных водоемов (Трифонова, 1990).

В 2019 г. летом «цветения» воды цианопрокариотами не наблюдали. Биомасса фитопланктона была не высокой – 0.110–0.851 мг/л. В Малом Севане наибольшая биомасса зарегистрирована на мелководной станции (0.674 мг/л), а на противоположном берегу она была в 4.7 раза ниже. В Большом Севане максимальная биомасса фитопланктона отмечена в пелагиали – 0.851 мг/л, на литоральных участках она была в 3–6 раз меньше. На всех станциях доминировали зеленые водоросли (52–94% от общей биомассы фитопланктона): *Ankyra judayi* (G.M. Smith) Fott, виды рода *Oocystis*; на некоторых участках высокой биомассы достигала также *Ankyra ancora* (G.M. Smith) Fott f. *issajevii* (Kisselev) Fott и *Sphaerocystis schroeteri* Chodat. В Большом Севане на цианопрокариот приходилось 13–44% суммарной биомассы водорослей, в Малом Севане – 1–10%. Преобладали *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs ex Bornet & Flahault. Таким образом, в период наших исследований в конце июля отмечены низкие биомассы фитопланктона и биомассы цианопрокариот в частности. Однако, исследования Л. Гамбарян (Hambaryan et al., 2020), проведенные в середине июля, свидетельствовали о еще большем «цветении» озера, чем мы регистрировали в предыдущий год. Низкие значения биомассы водорослей вероятно связаны с низкими концентрациями растворенного неорганического фосфора и азота, обычно наблюдающиеся в озере после активного “цветения” (Gevorgyan et al., 2020).

Вертикальное распределение фитопланктона летом различалось в зависимости от участка. В Малом Севане биомасса водорослей в придонном слое была в 3 раза меньше (0.058 мг/л), чем в поверхностном (0.166 мг/л). На участке Большого Севана наибольшую биомассу водорослей также отмечали в поверхностном горизонте (0.745 мг/л), а

минимальные ее величины были зарегистрированы на глубине 24 м (0.067 мг/л), далее у дна она снова повышалась в 2 раза. Основу биомассы водорослей на всех исследованных горизонтах составляли зеленые водоросли (65–90%). В поверхностных слоях воды (до 10 м) превалировали цианопрокариоты (7–25%), с увеличением глубины их роль в биомассе фитопланктона снижалась. Диатомовые водоросли вносили наибольший вклад в биомассу фитопланктона на горизонтах 12–40 м (5–25% общей).

Осенняя биомасса фитопланктона в 2019 г. в среднем изменялась от 3.53 до 6.69 мг/л. Основу биомассы составляли диатомовые водоросли (68–90% общей) и цианопрокариоты (7–26%). Среди диатомей доминировала *Cyclotella kuetzingiana* Thwaites, цианопрокариот – *Nodularia spumigena* Mertens ex Bornet & Flahault. В октябре наибольшая биомасса фитопланктона в Большом Севане отмечалась в поверхностном слое воды (7.22–10.68 мг/л), к придонному горизонту она снижалась в 3–12 раз. Основу биомассы во всей водной толще глубоководных участков составляли диатомовые водоросли (59–93%). Высокое количественное развитие диатомовых водорослей осенью характерно для озера (Овсепян и др., 2010; Овсепян, Хачикян, 2016; Asatryan et al., 2022). Субдоминантом выступала цианопрокариота *Nodularia spumigena*, достигающая на некоторых участках до 20% общей численности фитопланктона. Этот вид периодически находили в оз. Севан и его притоках с 1973 г. (Гамбарян, Мамян, 2016; Овсепян, Хачикян, 2016), однако его массового развития не наблюдали. Вид является обычным возбудителем “цветения” воды пресноводных озер, прибрежий морей и солоноватоводных водоемов (Вершинин, Орлова, 2008) и способен вырабатывать гепатотоксин нодулярин и может быть токсичен для человека и животных (Pattanaik et al., 2010). К факторам, определяющим продуцирование токсинов, относят соленость и содержание биогенных элементов (Akcaalan et al., 2009; Silveira, Odebrecht, 2021). Следовательно, необходимо дальнейшее наблюдение за динамикой и количеством *N. spumigena* в оз. Севан.

Работа выполнена при поддержке государственного задания №124032100076-2.

Литература

Вершинин А.О., Орлова Т.Ю. Токсичные и вредные водоросли в прибрежных водах России // Океанология. 2008. Т. 48. №4. С. 568–582.

Гамбарян Л.Р., Мамян А.С. Фитопланктон притоков озера Севан // Озеро Севан. Экологическое состояние в период изменения уровня воды. Ярославль: Филигрань, 2016. С. 61–78.

Герасимов Ю.В., Габриелян Б.К., Малин М.И., Рубенян А.Р. Многолетняя динамика запасов рыб озера Севан и их современное состояние / Экология озера Севан в период повышения его уровня. Махачкала: Наука ДНЦ, 2010. С. 249–278.

Малин М.И., Жданова С.М., Косолапов Д.Б., Малина И.П., Косолапова Н.Г., Сабитова Р.З., Крылов А.В. Нетипичное вертикальное распределение зоопланктона и рыб в пелагиали оз. Севан в период летней стратификации // Трансформация экосистем. 2021. Т. 4. №3. С. 100–114.

Методы гидробиологических исследований внутренних вод. Ярославль: Филигрань, 2024. 592 с.

Овсепян А.А., Гамбарян Л.Р., Оганесян Р.О., Гусев Е.С. Планктонные водоросли озера Севан // Экология озера Севан в период повышения его уровня. Махачкала: Наука ДНЦ, 2010.С. 90–104.

Овсепян А.А., Хачикян Т.Г. Фитопланктон пелагиали озера Севан // Озеро Севан. Экологическое состояние в период изменения уровня воды. Ярославль: Филигрань, 2016. С. 39–60.

Сахарова Е.Г., Крылов А.В., Сабитова Р.З., Цветков А.И., Гамбарян Л.Р., Мамян А.С., Габриелян Б.К., Айрапетян А.О., Хачикян Т.Г. Горизонтальное и вертикальное распределение фитопланктона высокогорного озера Севан (Армения) в период летнего цветения воды цианопрокариотами // Сибирский экологический журнал. 2020. №1. С. 76–88.

Трифонова И.С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона. Л.: Наука, 1990. 184 с.

Чилингарян Л.А., Мнацаканян Б.А. Гидрология бассейна озера Севан // Экология озера Севан в период повышения его уровня. Махачкала: Наука ДНЦ, 2010. С. 28–40.

Akcaalan R., Mazur-Marzec H., Zalewska A., Albay M. Phenotypic and toxicological characterization of toxic *Nodularia spumigena* from a freshwater lake in Turkey // Harmful Algae. 2009. №8. P. 273–278.

Asatryan V., Stepanyan L., Hovsepyan A., Khachikyan T., Mamyan A., Hambaryan L. The dynamics of phytoplankton seasonal development and its horizontal distribution in Lake Sevan (Armenia) // Environmental Monitoring and Assessment. 2022. V. 194. P. 757.

Gevorgyan G., Rinke K., Schultze M., Mamyan A., Kuzmin A., Belykh O., Sorokovikova E., Hayrapetyan A., Hovsepyan A., Khachikyan T., Aghayan S., Fedorova G., Krasnopeev A., Potapov S., Tikhonova I. First report about toxic cyanobacterial bloom occurrence in Lake Sevan Armenia // International Review of Hydrobiology. 2020. V. 105. P. 131–142.

Hambaryan L.R., Stepanyan L.G., Mikaelyan M.V., Gyurjyan Q.G. The bloom and toxicity of cyanobacteria in Lake Sevan // Proceedings of the YSU B: Chemical and Biological Sciences. 2020. V. 54. №2. P. 168–176.

Krylov A.V., Airapetyan A.O., Gerasimov Yu.V., Malin M.I. Changes in the Structural Parameters of the Summer Zooplankton in the Pelagic Zone of Lake Sevan (Armenia) during an Increase in Fish Abundance and Biomass // Inland Water Biology. 2016. V. 9. №1. P. 73–78.

Krylov A.V., Gerasimov Yu.V., Gabrielyan B.K., Borisenko E.S., Hakobyan S.A., Nikogosyan A.A., Malin M.I., Ovsepyan A.A. Zooplankton in Lake Sevan during the Period of High Water Level and Low Fish Density // Inland Water Biology. 2013. V. 6. №3. P. 203–210.

Krylov A.V., Kosolapov D.B., Kosolapova N.G., Gerasimov Y.V., Hovsepyan A.A. The plankton community of Sevan lake (Armenia) after invasion of *Daphnia* (*Ctenodaphnia*) *magna* Straus, 1820 // Biology Bulletin. 2018. V. 45. №5. P. 505–511.

Pattanaik B., Wulff A., Roleda M.Y., Garde K., Mohlin M. Production of the cyanotoxin nodularin – a multifactorial approach // Harmful Algae. 2010. V. 10. P. 30–38.

Silveira S.B., Odebrecht C. 2021. Effects of light intensity and nutrients (N and P) on growth, toxin concentration, heterocyte formation and akinete germination of *Nodularia spumigena* (Cyanobacteria) // Hydrobiologia. 2021. V. 848. P. 4387–4400.

PHYTOPLANKTON BIOMASS AND HORIZONTAL DISTRIBUTION IN LAKE SEVAN (ARMENIA) IN 2018–2019

E.G. Sakharova

In July 2018, a cyanoprokaryotes bloom *Dolichospermum lemmermannii* in the lake was observed with a maximum biomass of 110.46 mg/l. The greatest algae biomass was recorded in the surface layer due to *D. lemmermannii*, then their biomass decreased, and the role of green algae increased. In the summer of 2019, low phytoplankton biomass was observed in Lake Sevan. Green algae dominated in biomass. The autumn biomass of plankton algae was

significantly higher than the summer one, diatoms dominated, and the potentially toxic Cyanoprokaryota *Nodularia spumigena* was a subdominant. The highest biomass of phytoplankton was observed in the surface horizon, but at some stations deep maxima of biomass of some orders were noted.

ВОДНАЯ МАКРОФИТНАЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ КАК ИНДИКАТОР ВНУТРИВЕКОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОЗЕР ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ РАВНИНЫ

Б.Ф. Свириденко
Омский государственный педагогический университет

Для озер Западно-Сибирской равнины характерна значительная внутривековая динамика уровня, в ходе которой происходят существенные изменения режима абиотических факторов. Водная макрофитная растительность как важнейший компонент экосистем озер реагирует на комплексное состояние абиотической среды, изменяя свой состав и структуру. В связи с этим разнотипные группировки водной макрофитной растительности объективно индицируют динамические состояния уровенного режима озер региона.

Распределение гидромакрофитных растительных группировок в озерах определено совместным действием многих факторов, составляющих важные свойства их литорали. Под литоралью континентальных водоемов понимают акваторию от уреза воды до нижней границы распространения гидромакрофитов (Биологический…, 1986). Границы литорали фиксируют по биологическим критериям с учетом характеристик водной толщи, гидрологических факторов и свойств материала, из которого сложен берег (Лабзовский, 1977). В связи с этим весьма перспективен метод выявления общих закономерностей распределения растительных группировок на основе типологии литорали (Распопов, 1985). Ранее нами была предложена типология литорали озер южной части Западно-Сибирской равнины и Казахского мелкосопочника (Свириденко, 2000, 2001). Всего на основании эколого-динамической дифференциации участков акватории установлено 42 типа литорали, которые объединены в 18 групп, 9 подклассов и 3 класса: А – мелководная регрессивно-трансгрессивная литораль; Б – мелководная стабильная литораль; В – глубоководная регрессивно-трансгрессивная литораль. Каждый тип литорали оценивается комплексно по параметрам грунта, термическим условиям, принадлежности к сектору акватории и динамическому состоянию.

Как показали более поздние наблюдения, эта типология применима для всей территории Западно-Сибирской равнины, на которой в основном распространены озера с типами литорали, относящимися к классам А и Б. Мелководные озера со стабильным уровнем (класс Б) преимущественно встречаются в северной части Западно-Сибирской равнины. Динамика их литорали связана с постепенным накоплением наносов, ветровыми и гравитационными течениями, сезонными изменениями физико-химических параметров среды. Типы литорали класса В распространены в горных районах за южными пределами Западно-Сибирской равнины.

Известно, что в связи с многолетними (внутривековыми) колебаниями уровня озер Западной Азии их литораль существует в условиях регрессивно-трансгрессивных циклов (Шнитников, 1963). Каждый цикл включает 3 основных положения уровня воды (Н): I. Н = max; II. Н = средний; III. Н = min; причем к последнему положению также относится пересыхание (Н = 0) (Дружинин, 1975). В ходе изменения уровня озера

последовательно замещаются основные динамические состояния его литорали (I → II→ III). Состояние I возникает в трансгрессивную фазу, состояние II – в первой половине регрессивной фазы, состояние III – во вторую половину регрессии. С началом нового цикла состояние III сменяется состоянием I или II в зависимости от амплитуды трансгрессии. Горизонтальные различия литорали определены динамикой водных масс, геологическим строением и морфологией озерных котловин. В ходе регрессивно-трансгрессивного цикла литораль смещается в зависимости от уровенного режима водоема внутри границ озерной депрессии. Повышение уровня Н (увеличение глубины) обычно сопровождается увеличением акватории и высоты волн при постоянной скорости ветра (Маккавеев, 1937). При этом меняются положение, размеры и экологические параметры литорали. Возрастает кинетическая энергия водной массы и усиливаются динамические процессы: волнение, абразия берегов, перераспределение наносов. Наветренные и затишные участки литорали испытывают разное по силе динамическое воздействие водной массы. Интегральным показателем взаимодействия различных компонентов среды является распределение донных отложений на профиле от уреза воды вниз по подводному береговому склону. В затишных (подветренных) участках создаются более благоприятные условия для гравитационного осадконакопления – седиментации легкого материала: ила органического, растительного детрита или торфа. Наветренные участки отличаются абразионно-аккумулятивными процессами, при которых происходит разрушение берега, боковое перемещение и отложение более тяжелого минерального аллювия разной крупности: крупного и мелкого песка, глинистого ила. При продолжительном пересыхании литорали различные рыхлые наносы (органические и минеральные) трансформируются в почвогрунты. В итоге возникающая асимметрия литорали по румбу преобладающих летних ветров отражается в формировании секторов: седиментационных (подветренных) и аллювиальных (наветренных). В целом в ходе регрессивно-трансгрессивных циклов существенно меняются многие физико-химические факторы водной среды (общая минерализация, общая жесткость, активная реакция), которые в совокупности с динамическими факторами формируют абиотический режим, что отражается на составе и структуре группировок гидромакрофитов. В связи с отмеченной динамикой гидротопической среды и неустойчивым уровенным режимом, характерным для подавляющего большинства озер региона, отмечено широкое распространение кратковременных группировок гидромакрофитов (проценозов). Эти группировки нередко занимают обширные периферические акваторий озер (рис. 1).



Рис. 1. Одновидовой проценоз *Cladophora glomerata* по периферии оз. Еланач (Макушинский район, Курганская область) в трансгрессивную фазу 2017 г. (H = max)

Участие проценозов в сложении растительного покрова водоемов очень существенно и вполне сравнимо по масштабу со стабильными фитоценозами. Проценозы представляют

собой кратковременные инициальные стадии сукцессий или же наблюдаются в крайних экотопических условиях, где нередко составляют единственно возможную форму сосуществования видов. Такие группировки характеризуются случайным систематическим составом, отсутствием сомкнутости в начале вегетации, слабым воздействием на среду, преобладанием эксплерентов и молодых особей в возрастных спектрах ценопопуляций. Проценозы следует рассматривать как особое состояние растительного покрова участков акваторий с неустойчивым уровенным режимом. В озерах Западно-Сибирской равнины отмечены одновидовые (чистые) и многовидовые (смешанные) гидрофильные проценозы. К факторам, влияющим на состав компонентов этих группировок, относятся экологическая емкость местообитаний, продолжительность существования, зависящая обычно от динамики уровенного режима водоемов, а также обеспеченность диаспорами гидромакрофитов (рис. 2).

Поскольку на периферических участках акваторий озер продолжительность существования гидроэкотопов часто не превышает 1-3 лет, то многие проценозы не успевают пройти все стадии развития и трансформироваться в стабильные сообщества. Начальные стадии возобновляются после каждого весеннего подъема уровня воды и прекращают свое существование при летне-осеннем пересыхании мелководий (рис. 3). Первые стадии формирования фитоценозов гидромакрофитов начинаются с появления отдельных экземпляров инициальных видов и отличаются быстрым ростом видовой и экобиоморфной насыщенности, в итоге формируются проценозы, в которых растения испытывают слабые конкурентные отношения. Далее по мере разрастания вселенцев и увеличения конкуренции в проценозах сохраняются только наиболее толерантные виды.

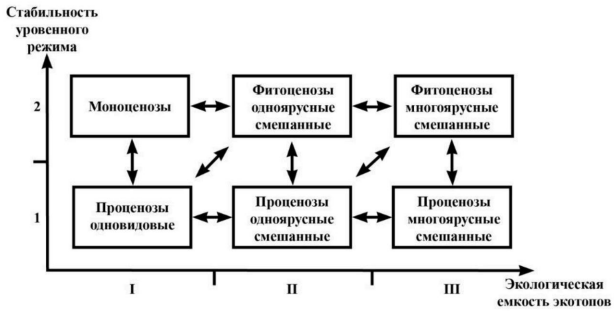


Рис. 2. Ординация структурных типов группировок гидромакрофитов Западно-Сибирской равнины по векторам экологической емкости и стабильности уровенного режима водных экотопов. Экологическая емкость экотопов: I – низкая, II – средняя, III – высокая. Стабильность уровенного режима озер: 1 – периодически пересыхающие, 2 – непересыхающие. Стрелками указаны направления смен структурных типов группировок (Свириденко, 2000)

Начальные стадии формирования проценозов часто завершаются в середине первого вегетационного сезона, когда общее проективное покрытие в них достигает 50-100%. Последующий рост конкуренции между видами приводит к снижению видовой и экобиоморфной насыщенности группировок и к выработке простой вертикальной и горизонтальной структуры устойчивых фитоценозов.





Рис. 3. Растительность котловины оз. Горького (Оконешниковский район, Омская область) в разные фазы регрессивно-трансгрессивного цикла. Вверху – гидрофильный многоярусный смешанный проценоз *Bolboschoenus maritimus* + *Potamogeton pectinatus* + *Chara canescens* + *Cladophora glomerata* (трансгрессивная фаза 2016 г., H = max). Внизу – наземная галофильная группировка *Salicornia europaea* + *Suaeda corniculata* (конец регрессивной фазы 2021 г., H = 0)

При низкой экологический емкости гидроэкотопов и относительно стабильном уровне воды из однородного проценоза развивается единый, простой по структуре и составу фитоценоз (рис. 4). В озерах с более высокой экологической емкостью среды формируются смешанные (относительно многовидовые) одноярусные или многоярусные фитоценозы, способные существовать длительное время после трансгрессии в ходе стадий регрессивной фазы.



Рис. 4. Моноценоз *Nuphar lutea* в озере Онтырлор (Сургутский район, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра) в регрессивную фазу 2015 года (H = средний)

Литература

Биологический энциклопедический словарь / Под ред. М.С. Гилярова. М.: Советская энциклопедия, 1986. 832 с.

Дружинин Г.В. Динамическая типизация озер // Озера Казахстана и Киргизии и их история. Л.: Наука, 1975. С. 72-88.

Лабзовский Н.А. Формирование береговой отмели водоема // Водные ресурсы. 1977. №1. С. 151-157.

Маккавеев В.М. О процессах возрастания и затухания волн малой длины и о зависимости высоты их от расстояния по наветренному направлению // Труды гос. гидролог. ин-та. 1937. Вып. 5(59). С. 3-15.

Распопов И.М. Высшая водная растительность больших озер Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1985. 198 с.

Свириденко Б.Ф. Флора и растительность водоемов Северного Казахстана. Омск: Изд-во ОмГПУ, 2000. 196 с.

Свириденко Б.Ф. Эколого-динамическая типология литорали водоемов Северного Казахстана в целях гидроботаники // Современные проблемы географии и природопользования. Вып. 5-6. Барнаул: Изд-во АГУ, 2001. С. 180-188.

Шнитников А.В. Озера Западной Азии – индикаторы колебаний общей увлажненности их бассейнов // Озера полуаридной зоны. Л.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 4-74.

AQUATIC MACROPHYTIC VEGETATION AS AN INDICATOR OF INTRASPECIFIC CHANGES IN THE HYDROLOGICAL REGIME OF LAKES IN THE WEST SIBERIAN PLAIN

B.F. Sviridenko

The lakes of the West Siberian Plain are characterized by significant intrasecular level dynamics, during which significant changes in the regime of abiotic factors occur. Aquatic macrophytic vegetation, as an essential component of lake ecosystems, reacts to the complex state of the abiotic environment by changing its composition and structure. In this regard, the diverse groupings of aquatic macrophytic vegetation objectively indicate the dynamic conditions of the level regime of the lakes of the region.

ВИДОВОЙ СОСТАВ И КОЛИЧЕСТВЕННОЕ РАЗВИТИЕ ЗООПЛАНКТОНА БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

А.С. Семенова
Атлантический филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО»
Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

Впервые проведены исследования зоопланктона ряда водоемов и водотоков болотных экосистем Калининградской области: крупных верховых болот Целау, Большое и Большое Моховое, а также осушительных каналов и канав 7 торфоместорождений. Всего в исследованных водных объектах отмечено более 130 видов зоопланктона, в том числе ряд новых, редких и уязвимых видов. Наиболее разнообразной и уникальной была фауна зоопланктона малонарушенных экосистем верховых болот, особенно, болота Целау. Тем не менее, зоопланктон нарушенных экосистем дренажных каналов и канав сохранил некоторые черты естественных водоемов, что важно в прикладном отношении и позволяет рассматривать их как рефугиумы, обладающие потенциалом естественного восстановления фауны зоопланктона в ходе реализации программы повторного заболачивания торфяников.

Зоопланктон как малых, так и крупных водоемов и водотоков Калининградской области довольно подробно изучен, между тем зоопланктон водоемов и водотоков болот региона до настоящего времени практически не исследован. Имеются лишь отрывочные сведения о фауне коловраток водоемов и водотоков болота Целау, полученные еще в начале 20 века (Steinecke, 1916), о видовом составе зоопланктона болотных водоемов в целом, а также его количественном развитии сведения практически отсутствуют, при том что фауна других групп в этих водоемах в настоящее время детально изучена. Болота занимают около 6% территории Калининградской области (0,8 тыс. км^2), среди них есть как довольно крупные практически не затронутые хозяйственной деятельностью массивы, так и те, на которых активно ведется добыча торфа (Напреенко, 2000). В связи с этим важность изучения зоопланктона болотных водоемов и водотоков трудно переоценить.

Исследования зоопланктона были выполнены в 2017-2024 гг. на крупных верховых болотах Калининградской области Целау, Большое и Большое Моховое, а также в осушительных каналах и канавах действующих и заброшенных торфоместорождений «Агильское», «Задовское и Тушканенское», «Тарасовское», участок «Полесское II», «Штатгутшер-Моор», «Краснополянское», «Скунгиррер-Моор» и «Виттгирренское». Исследования в ряде водоемов и водотоков, в особенности труднодоступных, были единичны, но в ряде случаев они были выполнены на протяжении нескольких лет или были сезонными и круглогодичными. Зоопланктон отбирали путем процеживания фиксированного объема воды (обычно 30–100 л) через планктонную сеть с размером ячеи 68 мкм. Пробы фиксировали 40%-ным формалином с сахарозой (Haney, Hall, 1973) до конечной концентрации в пробе 2–4%. Обработку и анализ проб проводили по стандартным методикам, в том числе разработанным для болот (Методика..., 1975; Методы, 2024; Филиппов и др., 2017). В работе использовали стереомикроскоп Nikon SMZ800N и бинокулярный микроскоп Микмед-5 (ЛОМО).

Болото Целау расположено в Правдинском р-не Калининградской области на водоразделе рек Прохладная, Гвардейская и Байдуковка, его площадь вместе с прилегающими заболоченными участками леса составляет около 2500 га (25 км^2). Это классическое верховое олиготрофное болото западно-прибалтийского типа с отчетливо выраженным грядово-мочажинным и несколькими озерковыми комплексами, состоящими из более чем 40 крупных и 200 мелких озерков; считается одним из последних сохранившихся в Центральной Европе относительно крупных верховых болот. Природный комплекс болота Целау – один из наиболее ценных в природоохранном отношении участков Калининградской обл., важный для сохранения видового и ландшафтного разнообразия. В его пределах обитает большое количество редких и исчезающих видов растений и животных. Болото Целау является объектом Красной книги Калининградской обл. и перечня ключевых орнитологических территорий России (Красная…, 2010), включено в списки ценных болот России, рекомендуемых к охране по программе “Человек и биосфера” ЮНЕСКО (проект TELMA) и в рамках Рамсарской конвенции (Боч, Напреенко, 1999; Напреенко, 2000; Напреенко-Дорохова, Напреенко, 2015; Неронов, Королева, 2013).

Болото Большое находится в Черняховском районе, в северо-восточной части лесного массива Гремячий, занимает площадь около 600 га (6 км^2). Это хорошо сохранившееся, относительно крупное верховое болото, в пределах которого распространены редкие в области болотные растительные ассоциации: фитоценозы грядово-мочажинного комплекса, “желтых” мочажин, “красных” зыбунов и др. Включено в Красную книгу Калининградской области (Красная …, 2010), рекомендовано к охране по программе TELMA (Напреенко, 2000).

Болото Большое Моховое является самым большим верховым болотом в Калининградской области. Его площадь составляет около 5000 гектаров (50 км^2), а торфяной слой достигает толщины 6-12 метров. Это типичное приморское торфяное болото с крупным озерковым комплексом, возрастом около семи тысяч лет. Располагается в Славском районе, на территории Громовского заказника. Большое Моховое болото и прилегающие к нему лесные участки представляют собой один из наиболее ценных объектов природного и историко-культурного наследия Балтийского региона. Благодаря нескольким уникальным факторам этого болота, а именно эталонным торфяным почвам, большому количеству редких и охраняемых видов и наличию ценных естественных ландшафтов и растительных сообществ. Большое Моховое болото включено в Красную книгу почв России, также как и болото Целау входит в Красную книгу Калининградской области (Красная…, 2010) и списки ценных болот России, рекомендуемых к охране по программе "Человек и биосфера" ЮНЕСКО (проект TELMA) (Напреенко, 2000; Напреенко-Дорохова, Напреенко, 2015; Неронов, Королева, 2013). Тем не менее, статуса ООПТ (особо охраняемых природных территорий) у болот Целау, Большое и Большое Моховое до сих пор нет.

В настоящее время в Калининградской обл. разрабатывают более десяти торфоместорождений, при их освоении проводят осушение торфяной залежи посредством сброса излишней воды через осушительные каналы. Из обследованных нами семи торфоместорожений три (Штатгутшер-Моор, Скунгиррер-Моор и Краснополянское) находятся в Черняховском р-не, два (Агильское и Тарасовское) – в Полесском р-не, два (Задовское и Тушканенское и «Виттгирренское») – в Славском р-не.

Всего в зоопланктоне водоемов и водотоков болот Калининградской области было найдено более 130 видов, около половины видов приходилось на коловраток, меньшее число видов на ветвистоусых и веслоногих ракообразных. В водоемах и водотоках верховых болот наибольшим числом видов были представлены коловратки родов *Lecane* (10) и *Trichocerca* (6), в осушительных каналах – рода *Brachionus* (7). Наибольшее число видов было отмечено в водоемах и водотоках болота Целау.

По численности и биомассе в водоемах и водотоках верховых болот Целау, Большое и Большое Моховое доминировали веслоногие и ветвистоусые ракообразные, в осушительных каналах возрастало значение коловраток, которые в отдельных водотоках доминировали по численности. Численность и биомасса зоопланктона в водоемах и водотоках болота Целау колебались от 41 до 462 тыс. экз./м^3 и от 0,2 до 6,4 г/м^3, болота Большое – от 46 до 643 тыс. экз./м^3 и от 0,2 до 3,3 г/м^3, болота Большое Моховое – от 55 до 257 тыс. экз./м^3 и от 0,5 до 2,8 г/м^3 что характерно для водоемов и водотоков верховых болот Северо-Запада России. Численность и биомасса зоопланктона в осушительных каналах торфоместорождений изменялись от 26 до 281 тыс. экз./м^3 и от 0,1 до 1,4 г/м^3, в целом в этих водотоках количественное развитие зоопланктона было значительно ниже, по сравнению с водоемами верховых болот. Исключением были канавы торфоместорождения «Виттгирренское», где в отдельные периоды количественное развитие зоопланктона достигало более высоких величин до 5-6 млн. экз./м^3 и до 13-15 г/м^3.

В водоемах и водотоках верховых болот Целау, Большое Моховое и Большое большинство видов относились к индикаторам низких значений pH и полигумозных водоемов или встречаются в болотных водоемах, тогда как в осушительных каналах торфоместорождений наряду с видами характерными для болот было отмечено много видов имеющих широкое распространение во всех водных объектах.

Ряд найденных видов был впервые отмечен для Калининградской области, в особенности это касается видов характерных для верховых болот и кислых вод, это например такие виды как *Flavalona rustica* и *Macrothrix rosea* (найдены в болоте

Большое), *Streblocerus serricaudatus* (в болотах Целау и Большое), *Scapholeberis microcephala* (в болоте Целау и каналах торфоместорождений Скунгиррер-Моор и Виттгирренское). Как правило, все эти виды были отмечены в теплое время года поздней весной, летом и в начале осени и в большинстве случаев имели низкое количественное развитие, за исключением *Scapholeberis microcephala,* который достигал в отдельные периоды высокого количественного развития в канавах торфоместорождения Виттгирренское, заросших сфагнумом.

Среди найденных редких видов особенно хочется отметить редкий, уязвимый и охраняемый в ряде областей России вид-ацидофил *Holopedium gibberum (*Подшивалина, 2012; Подшивалина и др., 2012; Błędzki, Rybak, 2016), который впервые обнаружен в области после 1855 года, когда он был впервые описан из пруда в окрестностях Кёнигсберга (сейчас Калининграда) (Zaddach, 1855). *Holopedium gibberum* был встречен в озерках в центральной части болот Целау и Большое Моховое, максимального развития *H. gibberum* (до 50-100 тыс. экз./м^3) достигал в летний период, а в начале осени (в сентябре) в его популяции были отмечены самки с покоящимися яйцами и крайне редко и единично - самцы. В последние годы предпринимались неоднократные попытки обнаружить этот вид в водоемах области, в частности для этой цели было обследовано более 40 разнотипных водных объектов, но, по-видимому, за прошедший период времени условия в нативных для этого вида водоемах настолько изменились, что он смог сохраниться только в нетронутых условиях водоемов болот Калининградской области.

Таким образом, в результате исследований проведенных в болотных экосистемах Калининградской области было установлено, что наиболее разнообразной и уникальной была фауна зоопланктона малонарушенных экосистем верховых болот, особенно, болота Целау, зоопланктон в них также как правило достигал большего количественного развития. Тем не менее, зоопланктон нарушенных экосистем дренажных каналов и канав сохранил некоторые черты естественных водоемов, что важно в прикладном отношении и позволяет рассматривать их как рефугиумы, обладающие потенциалом естественного восстановления фауны зоопланктона в ходе реализации программы повторного заболачивания торфяников.

Литература

Боч М.С., Напреенко М.Г. Болото Целау // Водно-болотные угодья России. Ценные болота. М., 1999. Т. 2. № 49. С. 39-40.

Красная книга Калининградской области. Калининград: Изд-во РГУ им. И. Канта, 2010. 334 с.

Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 240 с.

Методы гидробиологических исследований внутренних вод. Ярославль: Филигрань, 2024. 592 с.

Напреенко М.Г. Болота Калининградской области: их роль в сохранении биоразнообразия и окружающей среды в регионе // Вестник Калининградского государственного университета. 2000. С. 99-105.

Напреенко-Дорохова Т.В., Напреенко М.Г. Развитие природного комплекса Целау (по данным строения торфяной залежи) // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2015. №1. С. 50-64.

Неронов В.В., Королева Е.Г. Биогеографическая уникальность и антропогенная трансформация экосистем верхового болота Целау (Калининградская область) // Изв. РАН. Сер. Геогр. 2013. № 3. С. 55-62.

Подшивалина В.Н., Шевелева Н.Г., Баянов Н.Г. Биология и экология *Holopedium gibberum* (Branchiopoda: Cladocera: Ctenopoda) в Палеарктике // Гидробиол. журн. 2012. Т. 48. №4. С. 22–30.

Подшивалина В.Н. Особенности биологии и распространения *Holopedium gibberum* Zaddach (Crustacea, Cladocera) на территории зоны южной тайги Низменного Заволжья // Поволжский экологический журнал. 2012. №3. С. 295–301.

Филиппов Д.А., Прокин А.А., Пржиборо А.А. Методы и методики гидробиологического исследования болот: учебное пособие. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та. 2017. 207 с.

Błędzki L.A., Rybak J.I. Freshwater Crustacean zooplankton of Europe. Cladocera & Copepoda (Calanoida, Cyclopoida). Key to species identification, with notes on ecology, distribution, methods and introduction to data analysis. Switzerland: Springer. 2016. 918 p.

Haney J.F., Hall D.J. Sugar-coated *Daphnia*: Apreservation technique for Cladocera // Limnology and oceanography. 1973. V. 18. №2. P. 331–333.

Steinecke F. Die Rotatorien und Gastrotrichen des Zehlaubruches // Schriften der physikalisch–ökonomischen Gesellschaft zu Königsberg. Königsberg, Leipzig u. Berlin. 1916. Faunistische Sektion A. 57. S. 84–100.

Zaddach E.G. *Holopedium gibberum*, ein neues Crustaceum aus der Familie der Branchiopoden // Arch. Naturgesh. Jahr. 1855. 21. №1. S. 159–188.

THE SPECIES COMPOSITION AND DEVELOPMENT OF ZOOPLANKTON IN MIRE ECOSYSTEMS OF THE KALININGRAD REGION

A.S. Semenova

The original data on zooplankton fauna in standing-water and stream habitats of mire ecosystems were obtained for the first time in the Kaliningrad region during the research study on large raised bogs (Zehlau, Bolshoye and Bolshoye Mochovoye) and drainage canals of 7 peatlands affected by peat extraction. In the studied wetland ecosystems, more than 130 species of zooplankton were recorded in total, including a number of rare and vulnerable taxa The zooplankton fauna in the intact bog ecosystems, especially the Zehlau raised bog, was the most diverse and unique. Nevertheless, zooplankton in the disturbed ecosystems of drainage canals retained certain features of the natural water bodies. The latter fact is important in applied respect enabling to consider these canals as refugia that have potentials for natural restoration of the zooplankton fauna during the peatland rewetting programme on the Carbon Polygon in the Kaliningrad region.

ПОКАЗАТЕЛИ СМЕРТНОСТИ ЗООПЛАНКТОНА В РАЗНОТИПНЫХ ОЗЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ КАЛИНИНГРАДСКОЙ И ЯРОСЛАВСКОЙ ОБЛАСТЕЙ

А.С. Семенова[1,2], С.М. Жданова[2], М.И. Малин[2], С.И. Сиделев[2,3], А.И. Цветков[2]

[1]Атлантический филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО»

[2] Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

[3]Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

В 2007-24 гг. проведены исследования показателей смертности зоопланктона в ряде озерных экосистем Калининградской и Ярославской областей: Куршской лагуне, крупных озерах Виштынецком, Неро и Плещеево, небольших по площади водоемах, в

основном расположенных либо в черте города Калининграда, либо в окрестностях города Ярославля и вблизи Волги. Максимальные как средние, так и абсолютные показатели смертности были отмечены в высокопродуктивных (эвтрофных и гиперэвтрофных) водоемах в момент цветения цианобактерий, а также в водоемах, подвергающихся значительному антропогенному воздействию. Также одна из причин возрастания показателей смертности зоопланктона в озерных экосистемах – дефицит кислорода. Изучение показателей смертности должно занять важное место в стандартных гидробиологических исследованиях озерных экосистем.

Исследования доли мертвых особей в зоопланктоне, которая является показателем его смертности (Дубовская, 1987; Дубовская и др., 1999), в пресноводных экосистемах немногочисленны, еще меньше таких исследований выполнено для озерных экосистем. При изучении этого показателя в пресноводных экосистемах показано, что в толще воды может находиться значительное количество мертвых беспозвоночных без видимых признаков разложения, определяемых в качестве живых при стандартной обработке проб счетным методом (Гладышев, 1993; Дубовская, 1987, 2009; Дубовская и др., 1999; Семенова, 2011; Смельская, 1995; Tang et al., 2014). Особенно велика доля мертвой фракции зоопланктона в водах, подверженных антропогенной нагрузке (Гладышев, 1993; Кожова, 1991; Сергеева, 1988; Смельская, 1995). Таким образом, вероятность ошибок определения состояния сообщества, качества среды по индикаторным организмам зоопланктона и способности водоема к самоочищению при помощи зоопланктона увеличивается именно в наиболее важных с санитарно-гидробиологической точки зрения местах отбора проб. Игнорирование этого параметра, может приводить к неверным оценкам продуктивности водных объектов, качества воды, ошибкам при расчете ущерба, интерпретации того вреда, который наносится видами-вселенцами, и, в конечном итоге, к отсутствию понимания того, что реально происходит в водных экосистемах.

Целью настоящего исследования было изучение показателей относительной смертности зоопланктона в ряде разнотипных озерных экосистем Калининградской и Ярославской областей.

Исследования зоопланктона проводили в 2007-2024 гг. как в крупнейших водоемах Калининградской и Ярославской областей: Куршской лагуне, озерах Виштынецком, Неро и Плещеево, так и в небольших по площади водоемах, в основном расположенных либо в черте города Калининграда, либо в окрестностях города Ярославля и вблизи Волги. Исследования в ряде водоемов, были единичны, но в ряде случаев они были выполнены на протяжении нескольких лет или были сезонными и круглогодичными. Зоопланктон отбирали путем процеживания фиксированного объема воды через планктонную сеть с размером ячеи 68 мкм. Пробы фиксировали 40%-ным формалином с сахарозой (Haney, Hall, 1973) до конечной концентрации в пробе 2–4%. Обработку и анализ проб проводили по стандартным методикам (Методика..., 1975; Методы, 2024). В работе использовали бинокуляр МБС-10, стереомикроскоп Nikon SMZ800N и бинокулярный микроскоп Микмед-5 (ЛОМО).

С целью дифференциации живых и мертвых особей зоопланктон окрашивали 7,5 % раствором анилинового голубого красителя (Дубовская, 2008; Семенова, 2024; Bickel et al., 2008; Seepersad, Crippen, 1978). В качестве показателей естественной (не связанной с хищничеством) смертности зоопланктона использовали долю численности или биомассы мертвых особей от суммарной численности или биомассы живых и мертвых, выраженную в процентах (Дубовская, 1987; Дубовская и др., 1999).

Наиболее подробные и многолетние исследования доли мертвых особей в зоопланктоне были проведены в Куршской лагуне. Доля мертвых особей в этом водоеме

составляла от 0,1 до 76,2% от численности и от 0,1 до 62,4% от биомассы зоопланктона. Высокие значения доли мертвых особей от суммарной численности и биомассы зоопланктона наблюдались в годы гиперцветений в период массового развития цианобактерий и сразу после него с июля по октябрь (до 21-30%). Минимальные доли мертвых особей были обнаружены на станции, расположенной в центральной зоне водоема и менее других подверженной процессам эвтрофирования и «цветения воды». С помощью показателей смертности удалось выявить неодинаковую чувствительность различных видов и таксономических групп зоопланктона к «цветению» цианобактерий и органическому загрязнению, она возрастает в ряду Cyclopoida→Calanoida→Rotifera→Cladocera. Средняя за вегетационный период доля мертвых особей значительно изменялась от года к году и составляла 2,6-17,4% от численности и 2,3-13,1% от биомассы зоопланктона. Минимальные средние доли мертвых особей в зоопланктоне были отмечены в 2007, 2013, 2022 и 2024 гг. – 2,6-4,6%, когда развитие фитопланктона было на низком уровне, максимальные доли мертвых особей – в 2010-11 и 2014-15 гг. и 2018 г. – 8,5-17,4%, когда было отмечено «гиперцветение» воды и массовое развитие цианобактерий, в том числе токсичных.

Особенно ярко это явление было выражено в июле-августе 2010 г. Лето 2010 г. в России и Европе было аномально жарким, что привело к существенному возрастанию температуры воды Куршского залива. В среднем за июль-август 2010 г. температура воды Куршского залива была самой высокой за более чем 60-ти летний период регулярных гидрометеорологических наблюдений на этом водоеме. В условиях аномально жаркого лета 2010 г. в водоеме наблюдался неблагоприятный кислородный режим и массовое развитие цианобактерий, в том числе токсичных, что приводило к существенному возрастанию доли мертвых особей в зоопланктоне. В июле 2010 г. были зафиксированы максимальные за весь период исследований значения доли мертвых особей в зоопланктоне. В этот период на обширной акватории в западной части Куршской лагуны примыкающей к национальному парку «Куршская коса» отмечалась высокая доля мертвых особей от численности и биомассы зоопланктона, которая была в 3-4 раза выше, чем на оставшейся части акватории водоема. На этом же участке наблюдались минимальные значения численности, биомассы и продукции зоопланктона, при этом численность и биомасса зоопланктона были в 2-3 раза ниже, а продукция в 5-6 раз ниже, чем на остальной части Куршской лагуны. В момент массового развития токсичных синезеленых водорослей доля мертвых особей возрастала не одинаково как среди отдельных видов, так и среди таксономических групп зоопланктона Куршской лагуны. Наиболее чувствительными к влиянию «цветения» воды являются крупные ветвистоусые ракообразные из р. *Daphnia*, некоторые виды мелкоразмерных коловраток, науплии веслоногих ракообразных, более устойчивы мелкоразмерные ветвистоусые ракообразные и каляниды, наиболее устойчивы некоторые виды коловраток, особенно хищные, и циклопы (Семенова, 2011). В 2010 г. доля наиболее чувствительных к «цветению» воды видов снижалась с 76-87% в мае-июне до 7-39% в июле-августе, в то же время отмечалось возрастание доли среднеустойчивых и устойчивых видов от численности и биомассы зоопланктона.

В водоемах города Калининграда прослеживалась четкая зависимость доли мертвых особей в зоопланктоне от содержания в воде органических веществ, определяемому по показателю $БПК_5$, а также степени развития потенциально токсичных цианобактерий. Минимальная доля мертвых особей в зоопланктоне от 0,3 до 2,3 % была отмечена в водоемах расположенных на окраине города и имеющих питьевое или купальное значение – пруд Филиппов, озера Форелевое, Большое Голубое, Шенфлиз, Пилавское, Карповское. Максимальная доля мертвых особей от 5,0 до 16,2 % была в водоемах, расположенных в центре города Калининграда – пруды Верхний, Мельничный, Поплавок, Южновокзальный, Нансенские, Воздушный, Пеньковый,

Нижний, Гвардейский и Школьный, на которые оказывается наибольшая антропогенная нагрузка. При этом в весенний период связь между долей мертвых особей и показателем $БПК_5$ была слабой (R^2=0,3), в летне-осенний период связь была сильной (R^2=0,8). Низкая доля мертвых особей была отмечена в крупнейшем озере Калининградской области - озере Виштынецком, имеющем ледниковое происхождение – 0-6,3%, в среднем 1,6-2,1% и в Синявинском карьере – 0,8-2,2%.

Среди озер Ярославской области, расположенных вблизи Волги, наименьшие доли мертвых особей (1,1-3,6% от численности и 0,4-4,1% от биомассы зоопланктона) были отмечены для озер Иваново, Новое Куреевское, Подкова и Становище, более высокие доли мертвых особей (6,2-8,3% от численности и 2,3-5,5% от биомассы зоопланктона) – для озер Бабье, Рюмниково, Старое Куреевское и Чистое, еще более высокие доли мертвых особей (12,2-12,9% от численности и 7,0-9,3% от биомассы зоопланктона) – для озер Копыто, Шачебол и Яснищевское, максимальные величины доли мертвых особей (48,4% от численности и 28,6% от биомассы зоопланктона) – в озере Заозерье, в котором было отмечено как массовое развитие цианобактерий, так и дефицит кислорода (Жданова и др., 2024).

Для ряда водоемов, расположенных рядом с г. Ярославлем, доля мертвых особей колебалась в пределах 2,8-7,6%, минимальные показатели отмечены в озере Белёвском, более высокие показатели - в озерах Шихромка и Круглое.

В мезотрофном озере Плещеево доля мертвых особей на глубоководной станции в поверхностном слое, как правило, была невелика и в июле 2015 года составляла 1,2% и 0,5%, в сентябре 2022 г. – 5,4% и 2,7%, в июле 2023 г. – 1,7% и 1,4% от численности и биомассы зоопланктона. Максимальные доли мертвых особей (до 63% от численности и до 53% от биомассы) были зафиксированы в придонных горизонтах (16-22 м), на которых был отмечен дефицит кислорода. В среднем для столба воды доля мертвых особей в сентябре 2022 г. составляя 8,9% и 6,0%, в июле 2023 г. - 16,7% и 6,1% от суммарной численности и биомассы зоопланктона.

В эвтрофном озере Неро доля мертвых особей изменялась от 3,6 до 16,2 % от численности и от 1,0 до 8,1% от биомассы зоопланктона, более низкие значения доли мертвых особей были отмечены в южной заросшей макрофитами части озера, в которой не отмечается столь массового развития цианобактерий.

Таким образом, по результатам проведенных исследований максимальные как средние, так и абсолютные показатели смертности были отмечены в высокопродуктивных (эвтрофных и гиперэвтрофных водоемах) в момент цветения цианобактерий и после него, а также в водоемах подвергающихся значительному антропогенному воздействию. Также одна из причин возрастания показателей смертности зоопланктона в озерных экосистемах – дефицит кислорода. Показатели смертности зоопланктона могут успешно использоваться для оценки качества воды, картирования загрязненных районов, оценки влияния «цветения» цианобактерий, гидрологических и гидрохимических факторов, антропогенной нагрузки, при изучении вертикального распределения зоопланктона и его миграций. Изучение показателей смертности должно занять важное место в стандартных гидробиологических исследованиях озерных экосистем.

Литература

Гладышев М.И. Устройство для окрашивания организмов зоопланктона с целью дифференциации живых и мертвых особей в фиксированных пробах // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29. №2. С. 94–97.

Дубовская О.П. Вертикальное распределение живого и мертвого зоопланктона формирующегося Саяно-Шушенского водохранилища // Гидробиологический журнал. 1987. Т. 23. №6. С. 84–88.

Дубовская О.П. Оценка количества мертвых особей рачкового зоопланктона в водоеме с помощью окрашивания проб анилиновым голубым: методические аспекты применения// Журнал Сибирского Федерального университета. Сер. Биология. 2008. №2. С. 145–161.

Дубовская О.П., Гладышев М.И., Губанов В.Г. Сезонная динамика численности живых и мертвых особей зоопланктона в небольшом пруду и некоторые варианты оценки смертности // Журнал общей биологии. 1999. Т. 60. №5. С. 543–555.

Дубовская О.П. Не связанная с хищниками смертность планктонных ракообразных, ее возможные причины (обзор литературы) //Журнал общей биологии. 2009. Т. 70. №2. С. 168–192.

Жданова С.М., Пряничникова Е.Г., Семенова А.С., Сиделев С.И., Беляков Е.А., Соколова А.С. Фитопланктон, зоопланктон и макрозообентос некоторых малых озер (Ярославская область, Россия) // Трансформация экосистем. 2024. 7 (1). С. 85–119.

Кожова О.М. Проблема мониторинга зоопланктона // Мониторинг состояния озера Байкал. Л.: Гидрометеоиздат, 1991.С. 209–222.

Методы гидробиологических исследований внутренних вод. Ярославль: Филигрань, 2024. 592 с.

Семенова А.С. Доля мертвых особей в зоопланктоне Куршского залива Балтийского моря // Биология внутренних вод. 2011. №3. С. 35–44.

Семенова А.С. Методика установления доли мертвых особей в зоопланктоне // Методы гидробиологических исследований внутренних вод. Ярославль: Филигрань, 2024. С. 153–170.

Сергеева В.А. Состояние и распределение зоопланктона в очагах загрязнения Ладожского бассейна // Сб. научных трудов ГосНИОРХ. 1988. Вып. 285. С. 114–128.

Смельская М.В. Использование метода прижизненного окрашивания для оценки соотношения живых и мертвых особей в зоопланктоне озера Галичского // Информ. бюл. Биология внутренних вод. 1995. №98. С. 69–71.

Bickel S.L., Tang K.W., Grossart H.P. Use of aniline blue to distinguish live and dead crustacean zooplankton composition in freshwaters // Freshwater Biology. 2008. V. 54. №5. P. 971–981.

Haney J.F., Hall D.J. Sugar-coated *Daphnia*: Apreservation technique for Cladocera // Limnology and oceanography. 1973. V. 18. №2. P. 331–333.

Seepersad B., Crippen R.W. Use of aniline blue for distinguishing between live and dead freshwater zooplankton // J. Fish. Res. Board Canada. 1978. V.35. №10. P. 1363-1366.

Tang K.W., Gladyshev M.I., Dubovskaya O.P., Kirillin G., Grossart H. Zooplankton carcasses and non-predatory mortality in freshwater and inland sea environments // J. Plankton Res. 2014. V.36. №3. P. 597–612.

PROPORTION OF DEAD ORGANISMS IN ZOOPLANKTON OF LAKES DIFFERENT TYPES IN KALININGRAD AND YAROSLAVL REGIONS

A.S. Semenova, S.M. Zhdanova, M.I. Malin, S.I. Sidelev, A.I. Tsvetkov

The zooplankton mortality rates (proportion of dead organisms in zooplankton) of water bodies in Kaliningrad and Yaroslavl regions: the Curonian Lagoon, large lakes Vishtynetskoye, Nero and Pleshcheyevo, small water bodies, located either within the city of Kaliningrad or in the vicinity of the city of Yaroslavl and near the Volga was investigated in the 2007-2024. The maximum proportion of dead organisms was found in highly productive (eutrophic and hypereutrophic) water bodies in which blooms of toxic cyanobacteria was observed and in water bodies which were under significant anthropogenic pressure. Also, one of the reasons for the increase in zooplankton mortality rates in lake ecosystems is oxygen deficiency. The study of mortality rates should take an important place in standard hydrobiological studies of lake ecosystems.

ОБНАРУЖЕНИЕ ЦИАНОБАКТЕРИАЛЬНЫХ ГЕПАТОТОКСИНОВ И ГЕНОВ ИХ БИОСИНТЕЗА В ФИТОПЛАНКТОНЕ МЕЗОТРОФНОГО ОЗЕРА ПЛЕЩЕЕВО (ЯРОСЛАВСКАЯ ОБЛАСТЬ, РОССИЯ) В ПЕРИОД ВСПЫШКИ ОБИЛИЯ *GLOEOTRICHIA ECHINULATA* (SMITH ET SOWEBRY) RICHTER

С.И. Сиделев[1,2], Л.Г. Корнева[2], Е.Н. Чернова[3], Е.Г. Сахарова[2]
[1]Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова
[2]Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН
[3]Санкт-Петербургский ФИЦ РАН, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН

В докладе представлены данные о цианобактериальных токсинах и генах их биосинтеза в фитопланктоне мезотрофного оз. Плещеево в период “цветения” воды цианобактерией *Gloeotrichia echinulata*. В фитопланктоне озера методом хромато-масс-спектрометрии обнаружено присутствие гепатотоксинов микроцистинов, а в ДНК, выделенной из планктона, методом ПЦР детектирован ген *mcyE* биосинтеза этих цианотоксинов. В 30 колониях *Gloeotrichia echinulata*, изолированных из озера, гены *mcyA* и *mcyE* биосинтеза микроцистинов отсутствовали, что согласуется с их неспособностью к продуцированию цианотоксина. Показана потенциальная способность к биосинтезу микроцистинов цианобактерии *Microcystis aeruginosa* и видов рода *Dolichospermum*, обитающих в озере.

Токсичные цианобактериальные “цветения” воды (англ. cyanoHAB, cyanobacterial Harmful Algae Blooms) характерны для эвтрофных и гипертрофных пресных водоемов, что связано с загрязнением воды соединениями азота и фосфора и усугубляется глобальным потеплением климата (Huisman et al., 2018). В последнее время вызывают научный интерес сообщения о массовом развитии потенциально токсигенных цианобактерий в олиготрофных и мезотрофных водах с низким содержанием биогенных элементов (Lepistö et al., 2005), поскольку они не согласуются с классической концепцией эвтрофирования озер. Одним из таких примеров являются случаи массовых вспышек обилия цианобактерии *Gloeotrichia echinulata* (Smith et Sowebry) Richter, которая часто вызывает цветение воды в олиго- и мезотрофных озерах (Carey et al., 2007).

Цель работы – исследовать присутствие цианотоксинов и определить их вероятных продуцентов молекулярными методами в мезотрофном оз. Плещеево в период массового развития *G. echinulata*.

В июле 2021 г. общая биомасса фитопланктона в поверхностном слое оз. Плещеево варьировала от 0.6 до 68 мг/л. На всех участках доминировала цианобактерия *Gloeotrichia echinulata*, биомасса которой составляла от 23 до 99% суммарной биомассы фитопланктона. Ей сопутствовали миксотрофные фитофлагелляты

из золотистых *Dinobryon divergens* Imhof (4–11%) и динофитовых *Peridinium cinctum* Ehr. (11–22%). В августе 2021 г., наряду с *Gloeotrichia echinulata*, из цианобактерий доминировал *Dolichospermum* sp. В фитопланктоне озера выявлено присутствие опасных для животных и людей гепатотоксинов микроцистинов и генов их биосинтеза. В пробе фитопланктона с большим количеством макроскопических колоний *G. echinulata*, отобранной в августе 2021 г., было детектировано следовое количество наиболее токсичного варианта микроцистинов – MC-LR. Других типов цианотоксинов, в частности, цито- и нейротоксинов, в период исследования не обнаружено.

Поскольку *Gloeotrichia echinulata* традиционно относится к токсичным видам, мы предполагали, что эта цианобактерия могла быть продуцентом микроцистинов в оз. Плещеево. В последние годы здесь отмечают массовые вспышки развития *G. echinulata*, что вызывает тревогу местных жителей, поскольку водоем является источником питьевого водоснабжения г. Переславль-Залесский. Неожиданным результатом оказалось обнаружение лишь следовых количеств микроцистинов в проанализированных образцах сетных проб, что плохо согласовалось с высокой биомассой *G. echinulata*. Молекулярный анализ колоний *G. echinulata* из оз. Плещеево не выявил наличия генов, ответственных за биосинтез микроцистинов. Эти данные противоречили гипотезе о способности этой цианобактерии продуцировать микроцистины в оз. Плещеево. Низкое содержание микроцистинов в биомассе фитопланктона оз. Плещеево, несмотря на массовое развитие *G. echinulata*, могло объясняться сопутствующим присутствием малочисленных популяций других микроцистин-продуцирующих цианобактерий. Это предположение нашло подтверждение при молекулярно-генетическом анализе ДНК, выделенной из фитопланктона. Так, в “планктонной” ДНК был обнаружен ген *mcyE* биосинтеза микроцистинов, принадлежащий видам *Microcystis* и *Dolichospermum*. Это доказывало, что источником гепатотоксинов в оз. Плещеево были цианобактерии из рода *Dolichospermum* и *Microcystis aeruginosa*. Их присутствие в фитопланктоне озера обнаружено в настоящем исследовании.

Микроцистины в биомассе цианобактерий оз. Плещеево были обнаружены лишь в следовых количествах, что не представляет пока серьезной экологической опасности и угрозы здоровью людей. Однако в работе (Carey, Rengefors, 2010) было экспериментально показано, что присутствие колоний *Gloeotrichia echinulata* стимулирует рост *Microcystis* и *Dolichospermum*. Следовательно, необходим мониторинг в оз. Плещеево популяции *G. echinulata*, а также популяций *Microcystis* и *Dolichospermum* как потенциальных продуцентов МС. Возрастание биомассы цианобактерий *Microcystis* и *Dolichospermum* будет служить индикатором увеличения рисков негативного воздействия МС как на экосистему водоема, так и на здоровье людей.

Исследование выполнено при поддержке государственных заданий №124032100076-2 и 122041100086-5.

Литература

Carey C.C., Haney J.F., Cottingham K.L. First report of microcystin-LR in the cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* // Environ. Toxicol. 2007. V. 22. №3. P. 337–339.

Carey C.C., Rengefors K. The cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* stimulates the growth of other phytoplankton // J. Plankton Res. 2010 V. 32. P. 1349–1354.

Lepistö L., Rapala J., Lyra C. Occurrence and toxicity of cyanobacterial blooms dominated by *Anabaena lemmermannii* P. Richter and *Aphanizomenon* spp. in boreal lakes in 2003 // Algological Studies. 2005 V. 118. P. 315–328.

DETECTION OF CYANOBACTERIAL TOXINS AND GENES OF THEIR BIOSYNTHESIS IN THE PHYTOPLANKTON OF THE MESOTROPHIC LAKE PLESHCHEYEVO (YAROSLAVL REGION, RUSSIA) DURING BLOOM FORMATION *GLOEOTRICHIA ECHINULATA* (SMITH ET SOWEBRY) RICHTER

S.I. Sidelev, L.G. Korneva, E.N. Chernova, E.G. Sakharova

The report presents data on cyanobacterial toxins and the genes of their biosynthesis in the phytoplankton of the mesotrophic Lake Pleshcheyevo during the period of cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata*–bloom. In the phytoplankton of the lake, the presence of hepatotoxins microcystins was recorded using chromatography–mass spectrometry; in DNA isolated from plankton, the *mcyE* gene for the biosynthesis of these cyanotoxins was detected using PCR. In thirty colonies of *Gloeotrichia echinulata* isolated from the lake, the microcystin biosynthesis genes *mcyA* and *mcyE* were absent, which is consistent with their inability to produce cyanotoxin. The potential ability to biosynthesize microcystins in *Microcystis aeruginosa* and species of the genus *Dolichospermum* inhabiting in the lake was demonstrated.

РОЛЬ *GMELINOIDES FASCIATUS* (CRUSTACEA: AMPHIPODA) В МАКРОЗООБЕНТОСЕ ЛИТОРАЛИ РАЙОНА О. КИЖИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

С.М. Сидоров[1,3], А.И. Сидорова[1], Ю.Ю. Фомина[1,2]
[1]Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
[2]Карельский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО»
[3]Петрозаводский государственный университет

Представлены результаты исследований донных литоральных биоценозов района Кижские шхеры Онежского озера в 2023 г. Выявлены незначительные различия в пространственном распределении количественных характеристик макрозообентоса. В статье рассмотрены особенности распространения инвазионного вида *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing 1899) (Crustacea: Amphipoda). Полученные нами результаты показывают, что в 50% изученных местообитаниях доминируют по биомассе *G. fasciatus* в литоральных сообществах. Доказано, что данный вид является часто встречающимся в районе Кижских шхер.

Во всем мире изменение климата и инвазионные виды являются наибольшей угрозой естественному биоразнообразию и причиной трансформации среды обитания многих аборигенных видов (Березина и др., 2024).

Gmelinoides fasciatus (Stebbing 1899) – амфипода, естественным ареалом которой является озеро Байкал, была зарегистрирована в Онежском озере с 2001 года (Березина и Панов, 2003).

Высокая экологическая пластичность рачков, доступность и кормовая ценность для многих рыб-бентофагов позволили использовать их в качестве объектов для преднамеренной интродукции в водохранилищах и озерах. В 1960-1970-х гг. с целью обогащения кормовой базы проводили преднамеренную интродукцию водных беспозвоночных, в том числе и *G. fasciatus* в водоемы на р. Волга, а также озера Северо-запада России (Иоффе, 1960; Бекман, 1962; Иоффе, 1968). На данный момент амфипода успешно распространилась в водоемах Северо-запада России (Sidorova, 2024a, Sidorova, 2024b). Однако, ранее не было проведено детальных исследований роли инвазионного вида на литорали района о. Кижи Онежского озера.

Целью исследования является уточнение распространения и роли инвазионной амфиподы *G. fasciatus* в макрозообентосе на литорали Кижских шхер Онежского озера.

В период 1-2 июля 2023 года с целью сбора гидробиологического материала на литорали о. Кижи были отобраны 33 пробы макрозообентоса для выявления стадии натурализации чужеродного вида амфиподы *Gmelinoides fasciatus* и его роли в донном сообществе.

Отбор и обработку проб осуществляли в соответствии с руководствами по сбору пресноводного бентоса (Методы ..., 2024). Идентификация организмов макрозообентоса производилась с помощью микроскопа ЛОМО Микмед-6 (ЛОМО, Россия), в соответствии с определителем (Алексеев, Цалолихин, 2016).

Результаты исследования показали, что макрозообентос литоральной зоны озера района о. Кижи достаточно разнообразен и представлен основными группами донных беспозвоночных. В составе идентифицировано 15 групп различного таксономического ранга, основу которых составляют формы, широко распространенные как в прибрежном мелководье озера в целом, так и в большинстве водоемов Северо-Запада. Наиболее распространенными и многочисленными группами в течение периода исследования являлись малощетинковые черви Oligochaeta (100% встречаемости) и личинки хирономид Chironomidae (100% встречаемости), а также ракообразные бокоплавы Amphipoda (81,8% встречаемости) и личинки поденок Ephemeroptera (72,7% встречаемости). В почти половине станций отмечали личинки амфибиотических насекомых – моркецов Ceratopogonidae (45,5% встречаемости) и личинки ручейников (45,5% встречаемости). Редко отмечены пиявки Hirudenea (27,3% встречаемости), двустворчатые моллюски Bivalvia (18,2% встречаемости) и водяные клещи Hydracarina (18,2% встречаемости), жуки Coleoptera (18,2% встречаемости), а также равноногие раки Isopoda (9,1% встречаемости) и брюхоногие моллюски Gastropoda (9,1% встречаемости).

По нашим данным, в районе о. Кижи численность макрозообентоса и изменялась 1,54-10,63 тыс. экз./м^2, биомасса варьировала 0,48-14,61 г/м^2. Средняя численность составила 5,65 тыс. экз./м^2, средняя биомасса –3,77 г/м^2.

В литоральной зоне всех исследуемых местообитаний амфиподы представлены только одним видом – инвазионным *G. fasciatus.* Кроме того, аборигенный вид *Gammarus lacustris*, который ранее обитал на литорали Онежского озера, нигде не был нами зарегистрирован.

Из малощетинковых червей часто встречались на станциях типично литоральные виды – *Stylaria lacustris* (Linnaeus, 1758), *Chaetogaster diaphanus* Gruithuisen, 1828, редко *Veidovskyella comata* (Vejdovski, 1883). Из личинок поденок Ephemeroptera часто отмечали *Baetis* sp. Личинки ручейников в основном – *Oxyethira* sp. и *Agraylia* sp. Личинки веснянок представлены *Leuctra* sp. Из равноногих ракообразных Isopoda только один вид *Asellus aquaticus* (Linnaeus, 1758) был отмечен на станциях. Брюхоногие моллюски Gastropoda, как правило, – таксоны *Lymnaea stagnalis* (Linnaeus, 1758) и *Planorbis* O.F. Muller, 1773.

По численности на семи литоральных станциях доминировали малощетинковые черви. На некоторых станциях (ZL1 и ZL4) преобладала по численности байкальская амфипода *G. fasciatus* 68 % и 89%, соответственно. Остальные группы давали вклад менее 10% каждая.

По биомассе на пяти станциях (ZL1, ZL2, ZL4, ZL10, ZL11) преобладали амфиподы, представленные *G. fasciatus*, доля которых варьировала от 50 до 93%. На четырех станциях (ZL5, ZL7, ZL8, ZL9) значительный вклад по биомассе составляли малощетинковые черви. Доля личинок хирономид варьировала от 0 до 28%. Доля личинок поденок на точках ZL2, ZL3, ZL5 и ZL6 по биомассе изменялась 8-15%. На станции ZL3 процент пиявок в общей биомассе макрозообентоса достигал 27%.

Таким образом, показано, что инвазионный вид играет ключевую роль в сообществах литоральной зоны шхерного района водоема. Исследования на литорали района Кижские шхеры Онежского озера 2023 г. показали, что встречаемость инвазионного бокоплава составила 82%. Отмечено различие в пространственном распределении количественных характеристик макрозообентоса, которые связаны с разнообразием литоральных местообитаний. Численность и биомасса макрозообентоса варьировали в пределах 1,54-10,63 тыс. экз./м^2, 0,48-14,61 г/м^2, соответственно. Средняя численность составила 5,65 тыс. экз./м^2, средняя биомасса – 3,77 г/м^2. По биомассе на пяти станциях (ZL1, ZL2, ZL4, ZL10, ZL11) из одиннадцати преобладали амфиподы, представленные *G. fasciatus*, составляя от 50 до 93%.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-20018, https://rscf.ru/project/23-17-20018/», проводимого совместно с органами власти Республики Карелия с финансированием из Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия (ФВИ РК).

Литература

Бекман М.Ю. Экология и продукция *Micruropus possolsii* Sow. и *Gmelinoides fasciatus* Stebb. // Труды Лимнологического института Сибирского отделения АН СССР. 1962. Т. 2. Ч. 1. С. 141–155.

Березина Н.А., Панов В.Е. Вселение байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus* (Amphipoda, Crustacea) в Онежское озеро. Зоологический журнал. 2003. Т. 82. №6. С. 731–734.

Березина Н.А., Шаров А.Н., Холодкевич С.В., Кухарева Г.И. Влияние загрязнения воды медью и трибутиловловом на физиологические показатели двух дрессен *Dreissena polymorpha* и *D. bugensis* // Российский журнал биологических инвазий. 2024. №3. С. 27-38.

Иоффе Ц.И. Способы перевозки пресноводных беспозвоночных. Методы перевозки водных беспозвоночных и личинок рыб в целях их акклиматизации. М., 1960С. 25-34.

Иоффе Ц.И. Обзор выполненных работ по акклиматизации кормовых беспозвоночных для рыб в водохранилищах // Изв. ГосНИОРХ. 1968. Т.67. С. 7-29.

Методы гидробиологических исследований внутренних вод. Ярославль: Филигрань, 2024.592 с.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 2. зообентос // М.–СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 457 с.

Sidorova A.I. History of invasion of water bodies in northwestern Russia by amphipods *Gmelinoides fasciatus* (Crustacea) // Ecosystem Transformation. 2024a. 7 (4). P. 219–242.

Sidorova A.I. Role of the invasive amphipod *Gmelinoides fasciatus* (Crustacea: Amphipoda) of littoral macrozoobenthos of the Zaonezhye area of Lake Onego // Limnology and Freshwater Biology. 2024b. № 5. P. 1243-1252.

THE ROLE OF *GMELINOIDES FASCIATUS* (CRUSTACEA: AMPHIPODA) IN THE MACROZOOBENTHOS OF THE LITTORAL ZONE OF THE KIZHI AREA OF LAKE ONEGA

S.M. Sidorov, A.I. Sidorova, Yu.Yu. Fomina

The results of the study of bottom biocenoses of the Kizhi Skerries area of Lake Onego in 2023 are presented. Minor differences in the spatial distribution of quantitative characteristics of

macrozoobenthos are revealed. The article discusses the features of the distribution of the invasive species *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing 1899) (Crustacea: Amphipoda). Our results show that in 50% of the studied habitats, *G. fasciatus* dominates in biomass in littoral communities. It has been proven that this species is often found in the Kizhi Skerries area.

БАКТЕРИОПЛАНКТОН, ФИТОПЛАНКТОН, ЗООПЛАНКТОН И МАКРОЗООБЕНТОС РАЙОНА О. КИЖИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА (ОБЪЕКТ ВСЕМИРНОГО НАСЛЕДИЯ ЮНЕСКО-КИЖСКИЙ ПОГОСТ)

А.И. Сидорова, Ю.Ю. Фомина, Е.М. Макарова, В.С. Смирнова, Ю.Л. Сластина
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Представлены результаты гидробиологических исследований в районе о. Кижи Онежского озера 2023 года. Для западного побережья о. Кижи, характеризующегося слабым водообменом, были отмечены высокие численности условно-патогенных микроорганизмов. Показатели микроводорослей характеризовали данный район как мезотрофный и β-мезосапробный. Видовой состав зоопланктона и доминанты района Кижских шхер и центрального района озера относятся к характерному для крупных озер Северо-Запада России. В вегетационный период показатели уровня трофии по зоопланктону в районе о. Кижи изменялись от олиготрофного (осень) до α-евтрофного (весна). Анализ современного состояния макрозообентоса не выявил различий в количественных показателях района о. Кижи и центральной части. Средняя биомасса бентоса в шхерном районе соответствовала олиготрофному состоянию.

Кижский архипелаг – система островов, располагающихся в северо-западной части Онежского озера, второго по величине пресноводного водоема в Европе. Кижские шхеры отличаются уникальными природными параметрами, такими как климат, геологическое строение, рельеф, почвы, благодаря которым в данном районе сформировались особые условия для формирования наземных и водных экосистем (Дейнес, 2013). Развитие гидробиоценозов в районе Кижских шхер происходят в условиях быстро прогреваемого мелководья, хорошо развитой высшей водной растительности, замедленного водообмена с открытыми участками озера и значительного влияния терригенного стока, поэтому еще в более ранний период исследований (60-70-е гг.) этот район выделялся как наиболее продуктивный (Вислянская и др.,1999).

На одном из островов Кижского архипелага (о. Кижи) располагается Архитектурный ансамбль Кижского погоста. Государственный историко-архитектурный и этнографический музей-заповедник «Кижи», который относится к объектам всемирного культурного наследия ЮНЕСКО. С 1990-х гг. растет антропогенная нагрузка на район, отмечаются высокие концентрации нефтепродуктов (до 0,6 мг/л), общего фосфора (до 25 мкг/л), что характеризовало данный район как мезотрофный (Протасов, 1999; Сабылина и др., 2012). В этот период отмечаются изменения в гидробиоценозах изучаемого района. По уровню развития бактериопланктона, фитопланктона, зоопланктона Кижские шхеры также были отнесены к мезотрофному участку Онежского озера (Вислянская и др., 1999).

В настоящее время количество приезжающих туристов увеличилось более чем в два раза (Отчет …, 2023). Однако, в результате последних гидрохимических исследований (2019-2020 гг.) отмечается уменьшение общего фосфора, нитратов, $БПК_5$ по сравнению с многолетними данными в этом районе (Galakhina et al., 2022).

Планктонные и бентосные организмы в значительной степени зависят от как от природных свойств воды водоемов, так и от привносимых загрязнений с прилегающей территории, поэтому быстро реагируют на изменения условий обитания. Показатели бактериопланктона, фитопланктона, зоопланктона и бентоса используют в системе биомониторинга при оценке современного состояния водного объекта, в том числе качества воды и трофического статуса (Parmar et. al., 2016).

С целью оценки современного состояния экосистемы по гидробиологическим показателям были проведены исследования акватории Кижских шхер Онежского озера (в буферной зоне объекта всемирного наследия «Кижский погост» (С544)) в 2023 г.

Гидробиологические пробы были отобраны в мае, июле–августе и в сентябре 2023 г. на 5 станциях в районе о. Кижи. Глубина станций: ст. Z1 – 5,8 м, ст. Z2 – 5,7 м, ст. Z3 – 10 м, ст. Z4 – 7,4 м, ст. Z5 – 8,5 м. Наибольшая антропогенная нагрузка характерна для станций Z1, Z2 и Z4, отличающихся замедленным водообменом, небольшими глубинами, активным судоходством. Пробы воды отбирали с поверхностного и придонного горизонтов. Всего в районе Кижских шхер было отобрано 36 проб воды. Температура на станциях изменялась в мае от 9,4 до 15,8 °С, в июле – от 12 до 18,5 °С, в сентябре температура в среднем достигала 14,5 °С.

Для сравнения полученных даных в районе Кижских шхер, дополнительно были отобраны пробы в районе акватории Онежского озера, менее подверженом антропогенному влиянию – ст. С2. Глубина станции – 95 м. Всего на ст. С2 было отобрано 9 проб воды. Температура на ст. С2 в период отбора проб изменялась от 2,3 до 15,9 °С.

Бактериопланктон определяли по стандартным в водной микробиологии методикам (Кузнецов, Дубинина, 1989). Оценку качества воды по микробиологическим показателям проводили по В.И Романенко (1985). Отбор и обработку проб фитопланктона, отобранные батометром Руттнера, проводили по стандартной методике (Методы ..., 2024). Отбор зоопланктона производили с помощью сети Джеди (диаметр 18,5 см и 25 см; диаметр пор 100 мкм) по стандартной методике фракционно по слоям. Применялась стандартная методика для сетного отбора и камеральной обработки проб (Методы ..., 2024). Идентификация зоопланктона осуществлялась по (Определитель …, 2010). Количественные пробы бентоса отбирали дночерпателем автоматическим коробчатым (площадью 0,025 м^2). Камеральная обработка включала разбор проб, согласно стандартным методикам сбора и первичной обработки материала (Методы ..., 2024). Таксономическая идентификация проводилась с использованием определителя (Определитель ..., 2016).

Размерно-морфологическая структура бактериопланктона свидетельствовала о более быстром протекании процессов самоочищения на ст. Z4 – в мае, на ст. Z3 – в июле, ст. Z1 и ст. Z3 – в сентябре.

В целом, не удалось выявить значимых отличий в развитие бактериопланктона ($p > 0,05$) между станциями отбора проб по численности эколого-трофических групп бактерий (ГБ, СБ, ФРБ, УОБ).

Коэффициент самоочищения ($К_с$) – отношение СБ/ОМЧ, ниже предельного значения, равного 4, свидетельствовало о незавершенности процессов самоочищения и о возможном наличии в воде условно-патогенных микроорганизмов. Так низкие значения $К_с$, не превышающие 2, отмечались в мае на станциях Z2, Z4, Z5, в июле – на ст. Z2 ($К_с$ = 1.1), в сентябре повсеместно на всех изученных станциях $К_с$ составил 0,1. Вероятно, низкая самоочистетельная способность осенью связана с увеличением содержания легкоминерализуемого органического вещества.

Согласно классификациям (Романенко, 1985; Оксиюк и др., 1993) вода вблизи о. Кижи в летний период, а также в сентябре на ст. Z4, являлась «слабо загрязненной». В

целом, в весенний и осенний периоды вода возле о. Кижи характеризовалась как «чистая». По показателям ОЧБ, СБ и ОКБ (усредненный класс качества), качество воды также изменялось от сезона. Наихудшее качество воды отмечалось в летний период. По численности ФОБ вода на всех станциях возле о. Кижи характеризовалась как «удовлетворительно чистая» (3 класс качества) в весенний период. В летне-осенний периоды качество воды по содержанию ФОБ улучшалось и соответствовало классу «чистых» вод.

Центральная часть Онежского озера, сохраняет статус низкопродуктивного района акватории Онежсского озера. Численность большинства эколого-трофических групп бактериопланктона на ст. С2 на порядок ниже тех же показателей в Кижских шхерах.

В составе фитопланктона в районе Кижских шхер Онежского озера в 2023 году было идентифицировано 204 таксона рангом ниже рода, принадлежащих к 7 систематическим отделам: Bacillariophyta – 76; Chlorophyta – 54; Cyanobacteria – 33; Chrysophyta – 26; Euglenophyta – 5; Cryptophyta – 6; Dinophyta – 4.

Полученные данные в целом сопоставимы с результатами предыдущих исследований и характеризуют данный район как мезотрофный. Исключением, являются высокие показатели развития фитопланктона в летний период, особенно на ст. Z2, расположенной возле причала водного транспорта на о. Кижи.

Высокое видовое разнообразие микроводорослей отмечено во все сезоны наблюдений. В весенний период массово и количественно представлены диатомовые, золотистые водоросли и цианобактерии. Летом интенсивно развивались зеленые, золотистые, диатомовые водоросли и цианобактерии. Осенью вегетировали диатомовые водоросли и цианобактерии, что характерно для данного района в осенний период. В результате сапробиологического анализа фитопланктона в разные сезоны наблюдений, тип вод этого района можно отнести к β-мезосапробной зоне загрязнения (3 класс качества воды, удовлетворительно-чистая).

В отличии от центрального (олиготрофного) района Онежского озера в районе Кижских шхер отмечено более продуктивное развитие фитопланктона.

В вегетационный период 2023 г. состав доминантов зоопланктона района Кижских шхер входили *Eudiaptomus gracilis*, *Eurytemora lacustris* (Poppe, 1887), *Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857), *Thermocyclops oithonoides* (Sars, 1863), *Bosmina longispina* Leydig, 1860, *Bosmina coregoni* Baird 1857, *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1879). Весной комплекс обогащается коловратками *Polyarthra luminosa* Kutikova, 1962, *Asplanchna priodonta* Gosse, 1850, виды родов *Conochilus*, *Synchaeta*. Летом – ветвистоусыми *Limnosida frontosa* Sars 1862, *Diaphanosoma brachyurum* Lievin, 1848. Для зоопланктонного сообщества района отмечено высокое видовое разнообразие. Индекс Шеннона-Уивера по численности варьировал от 3,17 до 3,71, по биомассе – от 2,46 до 3,69.

В центральной части озера среди доминантных видов отмечены *Limnocalanus macrurus* Sars, 1863, *Eudiaptomus gracilis* (Sars, 1863), *Mesocyclops leuckarti*, *Thermocyclops oithonoides, Cyclops kolensis* Lilljeborg, 1901, *Daphnia cristata, Bosmina longispina*, *Kellicottia longispina*, *Notholca caudate* Carlin, 1943. Индекс Шеннона-Уивера по численности составлял 3,05–3,30, по биомассе – 2,18–2,89. В целом за вегетационный период для зоопланктона района Кижских шхер и центрального района озера были характерны высокие показатели видового разнообразия.

Сравнение полученных в 2023 г. данных с литературными сведениями показало, что за последние 60 лет состав доминантных видов зоопланктона района Кижских шхер не изменился (Вислянская и др., 1994). Видовой состав и доминанты относятся к

характерному для крупных озер Северо-Запада России и всей Фенноскандии северному планктонному комплексу видов.

В вегетационный период показатели уровня трофии по зоопланктону в районе Кижских шхер изменялись от олиготрофного (осень) до α-евтрофного (весна). По данным 1994 г. и 1996 г. показатели уровня трофии по зоопланктону увеличились и изменялись от ультраолиготрофного (0,04 г/м^2) до β-мезотрофного (7,49 г/м^2). Требуются дальнейшие исследования, чтобы определить связано ли повышение уровеня трофии с воздействием антропогенного фактора или это межгодовая изменчивость. Уровень трофии в центральной части озера в вегетационный период соответствовал ультраолиготрофному-олиготрофному (около 1 г/м^2) (Китаев, 2007).

Средняя численность макрозообентоса в районе о. Кижи варьировала от 0,12 до 0,70 тыс. экз./м^2. В центральной части водоема средняя численность составила 0,52 тыс. экз./м^2 и достоверно не отличалась от численности донных сообществ шхерного района.

Средняя биомасса бентоса в районе о. Кижи изменялась от 0,44 до 2,5 г/м^2, которая соответствует олиготрофному состоянию, согласно классификации С.П. Китаева (2007). В центральной части средняя биомасса составила 0,99 г/м^2, что соответствует ультраолиготрофному статусу водоема.

Результаты исследования показали, что макрозообентос изученной зоны озера достаточно разнообразен и представлен основными группами донных беспозвоночных. В течение сезонов 2023 г. доля по численности разных групп макрозообентоса менялась. Так, в районе о. Кижи доминировали по численности личинки Chironomidae и малощетинковые черви на большинстве станций. В глубоководной центральной части водоема доминировали бокоплавы за счет, в основном, одного вида *Monoporea affinis.*

Таким образом, в отличии от ультраолиготрофного-олиготрофного центрального района озера Кижские шхеры отличаются более высокой продуктивностью. Для западного побережья о. Кижи, характеризующегося слабым водообменом, были характерны высокие численности условно-патогенных микроорганизмов. Показатели микроводорослей в районе Кижских шхер характеризовали данный район как мезотрофный и β-мезосапробный. Видовой состав зоопланктона и доминанты района Кижских шхер и центрального района озера относятся к характерному для крупных озер Северо-Запада России. В вегетационный период показатели уровня трофии по зоопланктону в районе Кижских шхер изменялись от олиготрофного (осень) до α-евтрофного (весна). Анализ современного состояния макрозообентоса не выявил различий в количественных показателях района о. Кижи и центральной части. Средняя биомасса бентоса в шхерном районе соответствовала олиготрофному состоянию. За последние десятилетия отмечено изменение показателей обилия зоопланктона и макрозообентоса, что требует дальнейшее исследования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-20018, https://rscf.ru/project/23-17-20018/», проводимого совместно с органами власти Республики Карелия с финансированием из Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия (ФВИ РК).

Литература

Вислянская И.Г., Куликова Т.П., Полякова Т.Н., Тимакова Т.М. Современное состояние гидробиоценозов района Кижских шхер Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. «Биогеография Карелии». Вып. 1. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. 113–120.

Дейнес Ю.Е. Геологическое строение острова Кижи по геофизическим данным // Материалы XXIV Молодёжной научной конференции, посвящённой памяти чл.-корр.

АН СССР К.О. Кратца «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии северо-запада России». Апатиты: Изд-во K&M, 2013. С. 43–45.

Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.

Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 288 с.

Методы гидробиологических исследований внутренних вод. Ярославль: Филигрань, 2024. 592 с.

Оксиюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П., Линник П.Н., Кузьменко М.И., Кленус В.Г. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29. №4. С. 62–76.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т.1. зоопланктон. М.–СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 485 с.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т.2. зообентос. М.– СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 457 с.

Отчет о деятельности Государственного историко-архитектурного и этнографического музея-заповедника «Кижи» за 2022 год. Петрозаводск: Издательский центр музея-заповедника «Кижи», 2023.

Протасов Ю.Г. Некоторые актуальные вопросы антропогенного воздействия на территории охранной зоны музея-заповедника «Кижи». Труды Карельского научного центра РАН. Сер. «Биогеография Карелии». Вып. 1. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 126–131

Романенко В.И. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. Л.: Наука. 1985. 295 с.

Сабылина А.В., Ефремова Т.А., Рыжаков А.В., Зобков М.Б. Биогенные элементы и органическое вещество в Онежском озере и его заливах // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах / Материалы V Всероссийского симпозиума с международным участием. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 75-78.

Krambeck C., Krambeck H.J.R., Overbeck J.R. Microcomputer-assisted biomass determination of plankton bacteria on scanning electron micrographs // Applied and Environmental Microbiology. 1981. 42(1). P. 142–149.

Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last htree decades with special reference to nutrient concentrations // Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management. 2022. 17. P. 1-14.

Parmar TK., Rawtani D., Agrawal Y. K. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution. Frontiers in life science. 2016. V. 9. №2. 110–118.

BACTERIOPLANKTON, PHYTOPLANKTON, ZOOPLANKTON AND MACROZOOBENTHOS OF THE KIZHI LAKE ONEGA AREA (UNESCO WORLD HERITAGE SITE - KIZHSKY POGOST)

A.I. Sidorova, Yu.Yu. Fomina, E.M. Makarova, V.S. Smirnova, Yu.L. Slastina

In order to assess the current state of the ecosystem by means of hydrobiological indicators, studies were conducted in the area of Kizhi Island, Onego Lake (in the buffer zone of the World Heritage Site 'Kizhi Pogost' (C544)) during the growing season of 2023. The western coast of Kizhi Island was found to be characterised by poor water exchange, as indicated by the high numbers of opportunistic microorganisms observed. The area in question is characterised by mesotrophic conditions, as evidenced by the quantitative indicators of microalgae. The

classification of the water type in the area of Kizhi Island as a β-mesosaprobic zone is supported by the indicator values of phytoplankton and their quantitative development. The area in question can be referred to as a β-mesosaprobic zone. The analysis of data collected during the growing season of 2023 revealed that the species composition of zooplankton and the dominant species in the Kizhi skerries area and the central area of the lake are characteristic of large lakes in North-West Russia. During the growing period, the trophic level indicators of zooplankton in the Kizhi skerries area exhibited variability from oligotrophic (autumn) to α-eutrophic (spring) states. The trophic level in the central part of the lake during the growing period corresponded to ultra-oligotrophic-oligotrophic thorough analysis of the contemporary state of macrozoobenthos revealed no discernible disparities in quantitative indicators between the Kizhi Island area and the central part.

МАКРОЗООБЕНТОС РАЙОНА О. КИЖИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

А.И. Сидорова[1], Ю.Ю. Фомина[1,2]
[1]Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
[2]Карельский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО»

Представлены результаты исследований донных биоценозов в районе Кижских шхер Онежского озера с 1994 по 2023 г. По биомассе сообщество макрозообентоса района о. Кижи стабильно за последние 30 лет, однако, отмечено достоверное снижение по численности макрозообентоса в последнем десятилетии. Средняя биомасса бентоса в шхерном районе изменялась от 0,44 до 2,5 г/м^2, которая соответствует олиготрофному состоянию. В центральной части водоема средняя биомасса составила 0,99 г/м^2, что соответствует ультраолиготрофному статусу. В 2023 году в шхерном районе доминировали по биомассе личинки хирономид, в основном, за счет *Chironomus* sp. В глубоководной центральной части озера преобладали по биомассе реликтовые амфиподы *Monoporea affinis.*

В рамках российско-финляндской программы развития устойчивого лесного хозяйства и сохранения биоразнообразия на Северо-Западе России в 1990-е гг. научными подразделениями Карельского научного центра РАН проводились исследования и изучение биоразнообразия на территории Республики Карелия (Инвентаризация…, 2000). По данному проекту получены результаты сезонных гидробиологических наблюдений в районе о. Кижи в 1994 г. Гидробиологический режим на акватории Кижских шхер формируется под влиянием экологических условий, которые определяются ландшафтными особенностями района, резко отличающими его от других участков озера. Развитие биоты происходит здесь в условиях быстро прогреваемого мелководья, часто с хорошо развитой высшей водной растительностью, слабого водообмена с открытыми участками озера и значительного влияния терригенного стока. Указанные предпосылки предопределяют формирование бентосных сообществ с индивидуальными характеристиками, сложившимися в процессе естественного лимногенеза. Однако увеличение антропогенной нагрузки приводило к его ускоренному эвтрофированию. Последнее проявляется, прежде всего, в дисбалансе продукционно-деструкционных процессов и сопровождается обогащением экосистемы органическим веществом, вследствие чего происходят структурные и количественные перестройки всех звеньев биоты в этом уникальном районе Онежского озера (Вислянская, 1999).

Для оценки состояния водной экосистемы использовали показатели зообентоса, поскольку организмы донной фауны встречаются повсеместно, имеют достаточно

высокую численность, относительно крупные размеры, что удобно при сборе и обработке материала. Кроме того, зообентос, как наиболее долгоживущий и стационарный компонент гидробиоценоза, наиболее четко отражает степень загрязнения, особенно хронического (Баканов, 2000; Безматерных, 2007).

Таким образом, цель работы – оценить состояние макрозообентоса в 2023 году района Кижские шхеры и центральной части Онежского озера. В задачи входили: оценить количественные показатели донного сообщества, а также проанализировать сезонные изменения количественных показателей на семи станциях, которые совпали с весенним (конец мая), летним (конец июля-начало августа) и осенним (конец сентября) сезонами в годовом цикле развития гидробионтов, сравнить их количественные показатели о. Кижи и центрального плеса Онежского озера, а также оценить состояние макрозообентоса района Кижские шхеры в течение 30 лет.

Характеристика состояния донных сообществ основана на результатах обработки 21 пробы, отобранных в районе Кижских шхер Онежского озера в мае, августе и сентябре 2023 г. Количественные пробы бентоса отбирали дночерпателем автоматическим коробчатым (площадью 0,025 м^2) на каждой станции по две пробы, промывали через сито №23 и фиксировали 4% формалином. Глубина мониторинговых станций 3-11 м, донные осадки представлены серым илом в шхерном районе водоема (станции Z1-Z5, ZSN, ZOT). В центральной части расположена мониторинговая станция С2 с глубиной 86-100м.

Для сравнения современного состояния макрозообентоса в историческом аспекте был проведен анализ 32 проб, отобранных в районе Кижских шхер Онежского озера с 1994 по 2022 гг., в том числе архивных и литературных материалов (Полякова, 2012). Всего проанализировано 53 гидробиологические пробы, отобранные с 1994 по 2023 гг.

Камеральная обработка включала разбор проб, согласно стандартным методикам сбора и первичной обработки материала (Методы …, 2024). Выбор организмов из грунта проводился с использованием микроскопа стереоскопического МСП-2 вариант 2 (ЛОМО, Россия) в модифицированной камере Богорова, специально изготовленной для разборки бентосных проб под микроскопом. Взвешивание организмов поводили в сыром виде с точностью 0,0001 г., используя лабораторные аналитические весы ВЛ-124В (ГОСМЕТР, Россия). Разобранный и взвешенный материал фиксировался 70% этанолом. Таксономический анализ организмов макрозообентоса производился с помощью микроскопа Микмед-6 (ЛОМО, Россия), в соответствии с определителями (Алексеев, Цалолихин, 2016). Статистическую обработку данных выполняли согласно опубликованной методике (Ивантер, Коросов, 2010) в лицензированном пакете Microsoft Office Excel 2007 и PAST 4,03, используя непараметрический критерий Краскела-Уоллиса.

В Онежском озере в 2023 году обнаружено 30 таксономических единиц макрозообентоса. Всего было идентифицировано 8 видов олигохет. Самыми распространенными видами малощетинковых червей в центре стали стенотермные виды *Lamprodrillus isoporus* и *Lumbriculus variegates*. Амфиподы в период исследования были представлены в основном видом *Monoporeia affinis*, единично были отмечены *Pallaseopsis quadrispinosa*. Из личинок хирономид в центральной части озера был обнаружен вид *Limnophyes karelicus*. В районе о. Кижи преобладает по частоте встречаемости эвритопный род из личинок хирономид *Chironomus* sp.

Результаты исследования показали, что макрозообентос изученной зоны района о. Кижи достаточно разнообразен и представлен основными группами донных беспозвоночных. В составе идентифицировано 7 групп различного таксономического ранга. Наиболее распространенными и многочисленными группами в течение периода исследования являлись личинки хирономид Chironomidae (91% встречаемости) и

малощетинковые черви Oligochaeta (87% встречаемости), а также ракообразные бокоплавы Amphipoda (52% встречаемости). Редко отмечены двустворчатые моллюски Bivalvia (35% встречаемости), водяные клещи Hydracarina (26% встречаемости), крайне редко – личинки поденок Ephemeroptera (9% встречаемости) и личинки амфибиотических насекомых – моркецов Ceratopogonidae (9% встречаемости).

Сравнение средней численности макрозообентоса на разных станциях в районе о.Кижи в 2023 году показало, что минимальная 0,12 на станции Сенная губа ZSN, до 0,70 на станции Z4 тыс. экз./м^2. В центральной части водоема средняя численность составила 0,52 тыс. экз./м^2 и, достоверно не отличалась от численности донных сообществ шхерного района.

Средняя биомасса бентоса в районе о. Кижи изменялась от 0,44 на станции Сенная губа ZSN до 2,5 г/м^2 на станции ZOT, которая соответствует олиготрофному состоянию, согласно классификации С.П. Китаева (Китаев, 2007). В центральной части средняя биомасса составила 0,99 г/м^2, что соответствует ультраолиготрофному статусу водоема. Сезонные изменения в бентосе характеризовались значительными колебаниями показателей ценозов. Вылет имаго гетеротопных организмов, которые составляли основу доминирующего комплекса, обусловил сравнительно низкие значения численности и биомассы в летний период.

В течение сезонов 2023 года доля по численности разных групп макрозообентоса менялась. Так, в районе о. Кижи доминировали по численности личинки Chironomidae и малощетинковые черви на большинстве станций. В глубоководной центральной части водоема доминировали бокоплавы за счет, в основном, одного вида *Monoporea affinis.*

В доле по биомассе различных таксономических групп выявлены различия шхерного и глубоководного районов. Так, около о. Кижи практически на всех станциях (Z1, Z3, Z4, Z5, ZSN) доминировали по биомассе личинки хирономид, в основном, за счет *Chironomus* sp. В глубоководной центральной части водоема преобладали по биомассе реликтовые амфиподы *Monoporea affinis.*

Результаты нашего исследования показали, что в исследуемом районе Онежского озера за последние 30 лет средняя численность бентоса достоверно снизилась (уровень статистической значимости не превышает критическое значение 0,05 (p=0,001). Статистически доказанных изменений в динамике биомассы донных сообществ не обнаружено. Согласно классификации С.П. Китаева (2007) данный район озера относиться к олиготрофному типу.

Таким образом, различий в количественных показателях макрозообентоса района о. Кижи и центральной части Онежского озера не выявлено. Средняя биомасса бентоса в шхерном районе изменялась от 0,44 до 2,5 г/м^2, которая соответствует олиготрофному состоянию, согласно классификации С.П. Китаева. В центральной части озера средняя биомасса составила 0,99 г/м^2, что соответствует ультраолиготрофному статусу. Однако, отмечены различия в таксономическом составе макрозообентоса. В шхерном районе доминировали по биомассе личинки хирономид, в основном, за счет *Chironomus* sp. В глубоководной центральной части водоема преобладали по биомассе реликтовые амфиподы *Monoporea affinis.*

За последние 30 лет, как показали наши исследования, в районе о. Кижи Онежского озера средняя численность бентоса составила 1,73±0,34 тыс. экз./м^2, средняя биомасса – 2,35±0,27 г/м^2. Доказано достоверное снижение по численности макрозообентоса в последнем десятилетии, по биомассе донное сообщество района о. Кижи стабильно за последние 30 лет. Согласно классификации, данный район озера относиться к олиготрофному типу.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-20018, https://rscf.ru/project/23-17-20018/», проводимого совместно с органами власти Республики Карелия с финансированием из Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия (ФВИ РК).

Литература

Баканов А.И. Использование зообентоса для мониторинга пресноводных водоемов (обзор) // Биология внутренних вод. 2000. №1. С. 68-82.

Безматерных Д.М. Зообентос как индикатор экологического состояния водных экосистем Западной Сибири: аналит. обзор. Новосибирск. Сер. Экология. 2007. Вып. 85. 87 с.

Вислянская И.Г., Куликова Т.П., Полякова Т.Н., Тимакова Т.М. Современное состояние гидробиоценозов района Кижских шхер Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. «Биогеография Карелии». Вып. 1. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 113–120.

Ивантер Э.В., Коросов А.В. Элементарная биометрия. Петрозаводск, 2010. 104 с.

Инвентаризация и изучение биологического разнообразия на территории Заонежского полуострова и Северного Приладожья (опер.-информ. материалы). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. 344 с.

Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.

Методы гидробиологических исследований внутренних вод. Ярославль: Филигрань, 2024. 592 с.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т.2. зообентос. М.–СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 457 с.

Полякова Т.Н. Макрозообентос Онежского озера. База данных №2012620882. 2012.

MACROZOOBENTHOS IN THE AREA OF ISLAND KIZHI OF LAKE ONEGO

A.I. Sidorova, Yu.Yu. Fomina

The article presents the results of studies of bottom biocenoses in the Kizhi skerries area of Lake Onego from 1994 to 2023. In terms of biomass, the macrozoobenthos community of the Kizhi Island area has been stable over the past 30 years; however, a significant decrease in the abundance of macrozoobenthos has been noted in the last decade. The average benthos biomass in the skerries area varied from 0,44 to 2,5 g/m^2, which corresponds to the oligotrophic state. In the central part of the reservoir, the average biomass was 0,99 g/m^2, which corresponds to the ultraoligotrophic status. In 2023, chironomid larvae dominated in biomass in the skerries area, mainly due to *Chironomus* sp. In the deep-water central part of the lake, relict amphipods *Monoporea affinis* dominated in biomass.

ВИДОВОЙ СОСТАВ ЗООПЛАНКТОНА ЮНОПРИБЕЛОМОРСКОГО БОЛОТА ИЛАССКОЕ (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Е.И. Собко, И.Н. Зубов, Т.И. Пономарева
ФИЦ комплексного изучения Арктики имени Н.П. Лаверова УрО РАН

В работе приведены материалы по таксономическому составу зоопланктона водных объектов (мочажин и озерков) южноприбеломорского верхового болота Иласское. В

составе зоопланктонных сообществ выявлен 81 вид беспозвоночных, относящихся к 29 семействам и 60 родам. Коловратки (Rotifera) в зооценозах представлены 43 видами, ветвистоусые ракообразные (Cladocera) – 31 и веслоногие ракообразные (Copepoda) – 7 видами. Эколого-географический анализ зоопланктона показал, что сообщества болотных водоемов доминировали космополиты (43%), по местообитанию – литоральные (26%), по способу передвижения – ползающе-плавающие (40%) и свободно плавающие (планктонные) виды (34%), по способу питания – вертикатры (29%) и вторичные фильтраторы (21%). Состав и структура планктонной фауны определяются особенностью гидрологических и химических характеристик водных объектов данного типа.

Болотные экосистемы широко представлены на планете. В Архангельской области площадь болот достигает 82 тыс. км^2, что составляет около 14% территории. В регионе преобладают болота верхового (олиготрофного) типа, относящиеся к Печорско-Онежской и Прибеломорской болотным провинциям (Кац, 1971). Для Архангельской области наиболее характерны грядово-мочажинные болота южноприбеломорского типа (Кац, 1948; Пьявченко, 1985), отличающихся от других типов верховых болот видовым составом болотной растительности. Эта группа сфагновых болот расположена вдоль западного и южного берегов Белого моря до реки Мезень (Боч, Мазинг, 1979; Елина, Юрковская, 1965). Прибеломорские болота были неоднократно описаны учеными болотоведами, хорошо изучен видовой состав растительных ассоциаций (Кац и др., 1935; Елина, 1971; Юрковская, 1992). Планктонная фауна болот изучена слабо. В настоящее время имеются единичные сведения по зоопланктону южноприбеломорских верховых болот Поморского берега Карелии (Филимонова, Юрковская, 1971).

Исследования зоопланктонных сообществ олиготрофных болот данного типа в нашем регионе раньше не проводились. В 2021 г. впервые начались работы по изучению планктонной фауны водных объектов Иласского болотного массива. Болотный массив расположен в низовьях реки Северная Двина, в 30 км на юго-юго-западе от г. Архангельска. Общая площадь болота 89 км^2.

Целью данной работы являлось изучение структуры и таксономического состава зоопланктонных сообществ водных объектов грядово-мочажинного (ГМК) и грядово-озеркового (ГОК) комплексов южноприбеломорского верхового болота Иласское.

Исследования зоопланктона проводились в мочажинах и озерках с мая по октябрь 2021–2023 гг. в соответствии с общепринятыми гидробиологическими методиками (Методические ..., 1984; Определитель …, 2010; Песенко, 1982; Филиппов и др., 2017; Чуйков, 1981).

Список планктонной фауны болотных водоемов (мочажин и озерков) грядово-мочажинного и грядово-озеркового комплексов в настоящее время насчитывает 81 вид зоопланктона из 60 родов, 29 семейств, 11 отрядов и 4 классов.

Коловратки (Rotifera) – самая многочисленная и разнообразной группа зоопланктона, представлена в зооценозах 43 видами из 28 родов и 15 семейств, что составило 52 % от всего видового состава. Ветвистоусые ракообразные (Cladocera) составляли 39 % от всего состава зоопланктона в водоемах и были представлены 31 видом из 25 родов и 10 семейств. Веслоногие ракообразные (Copepoda) в сообществах представлены небольшим количеством видов – 7 видами из 7 родов и 4 семейств (табл. 1).

Среди коловраток по числу видов доминировало семейство Brachionidae (7 видов). В семействе Euchlanidae зафиксировано 6 видов, Notommatidae – 5. Семейства Lecanidae и Synchaetidae представлены 4 видами.

Таблица 1. Видовая структура зоопланктона мочажин и озерков Иласского болота (2021-2023гг.)

Таксоны	Rotifera	Cladocera	Copepoda	Всего
Классы	2	1	1	4
Отряды	5	3	3	11
Семейства	15	10	4	29
Роды	28	25	7	60
Виды	43	31	7	81

Наибольшее количество видов зарегистрировано у кладоцер в семействе Chydoridae (13 видов). Семейство Daphniidae – вторая по количеству видов группа, представленная 4 видами.

Копеподы менее разнообразная группа и содержит наименьшее количество видов. В зооценозах наиболее представительным является семейство Cyclopidae (4 вида).

Эколого-географический анализ зоопланктона показал, что сообщества болотных водоемов грядово-мочажинного и грядово-озеркового комплексов состояли из видов, имеющих космополитное (43 %), палеарктическое (35 %) и голарктическое (22 %) распространение. Планктонная фауна представлена в основном ацидофильными, планктонными, зарослевыми и сфагнофильными видами ракообразных и коловраток. Большинство групп зоопланктона представлены литоральными формами (26%), доля планктонных и фитофильных видов составляла 20% и 16%, виды, приуроченные к заболоченным водам, составляли 17% от всего числа таксонов (табл. 2).

Таблица 2. Зоогеографическая и экологическая характеристика зоопланктона Иласского болота

Характеристика таксона	Соотношение к общему числу таксонов, %
Область распространения	
Космополит	43
Голаркт	22
Палеаркт	35
Приуроченность	
Эвритопный	12
Литоральный	26
Планктонный	20
Фитофильный	16
Бентический	9
Заболоченные водоемы	17
Экологическая группа Способ передвижения	
Плавание	34
Плавание и ползание	19
Плавание и прикрепление к субстрату	6
Ползание и плавание	40
Прикрепление к субстрату	1
Способ питания	
Вертикация	29
Вертикация и всасывание	5
Всасывание	6
Активный захват	4
Захват и всасывание	14
Первичная фильтрация/ фильтрация	14
Вторичная фильтрация	21
Фильтрация и захват	2
Собирание	5

В трофической структуре сообществ доминирующими экологическими группами являлись вертикаторы (29% от общего количества видов) и вторичные фильтраторы (21 %) среди, которых преобладали ползающе-плавающие формы, добывающие пищу с поверхности субстрата. В сообществах ползающе-плавающие виды составляли 40 % от общего числа видов. Это представители родов *Euchlanis, Testudinella, Chydorus, Alona.* Доля свободно плавающих видов в сообществах составляла 34%.

Встречаемость видов в озерках и мочажинах неодинакова. В мочажинах наиболее часто встречались коловратки *Euchlanis dilatata* (Ehrenberg, 1832), *Testudinella truncata* (Gosse, 1886), *Lecane luna* (O.F. Müller, 1776), *L. lunaris* (Ehrenberg, 1832), *Trichocerca cylindrica* (Imhof, 1891), а также представители отряда Bdelloidae. Из ветвистоусых ракообразных наибольшую частоту встречаемости в сообществах имели виды – *Chydorus sphaericus* (O.F. Müller, 1785), *Alona quadrangularis* (O.F. Müller, 1785), *Bosmina longirostris* (O.F. Müller, 1785), *Scapholeberis mucronata* (O.F. Müller, 1776), *Ophryoxus gracilis* (Sars, 1862), из веслоногих ракообразных – *Diacyclops nanus* (Sars, 1863) и представители семейства Canthocamptidae.

В озерках часто встречались виды *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1879), *Keratella cochlearis* (Gosse, 1851), *L. luna*, *L. lunaris*, *T. cylindrica*, *Bdelloida sp., Polyphemus pediculus* (Linne, 1778), *Ch. sphaericus*, *Diaphanosoma brachyurum* (Liévin, 1848), *D. nanus*, *Eudiaptomus graciloides* (Lilljeborg, 1888). Анализ сходства видового состава зоопланктонных сообществ мочажин и озерков указывает на заметное таксономическое сходство планктонной фауны (I_{CS} = 0,52).

Следует отметить, что, несмотря на экстремальные условия обитания и специфику гидрологических и химических характеристик исследованных водоемов (колебание уровня вод, низкие значения минерализации, высокая кислотность болотных вод), зоопланктонные сообщества водных объектов южноприбеломорского верхового болота Иласское характеризуются значительным видовым богатством.

Исследования выполнены в рамках темы ФНИР FUUW-2025-0041.

Литература

Боч М.С., Мазинг В.В. Экосистемы болот СССР. Л.: Наука, 1979. 188 с.

Елина Г.А. Типы болот Прибеломорской низменности // Болота Карелии и пути их освоения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1971. С. 51-79.

Елина Г.А., Юрковская Т.К. О прибеломорских болотах Карелии // Ботанический журнал. 1965. Т. 50. №4. С. 486-497.

Кац Н.Я., Кудряшов Л.В., Эпштейн В.М. О торфяниках дельты Северной Двины // Землеведение. 1935. №4. С. 303-320.

Кац Н.Я. Типы болот СССР и Западной Европы и их географическое распространение. М.: ОГИЗ, 1948. 320 с.

Кац Н.Я. Болота Земного шара. М.: Наука, 1971. 295 с.

Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоёмах. Зоопланктон и его продукция. Л.: ГосНИОРХ, 1984. 33 с.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Зоопланктон. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2010. 495 с.

Песенко Ю.А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 287 с.

Пьявченко Н.И. Торфяные болота, их природное и хозяйственное значение. М.: Наука, 1985. 152 с.

Филимонова З.И., Юрковская Т.К. О биоценозах некоторых типов водоемов прибеломорских болот в бассейне реки Нюхчи // Болота Карелии и пути их освоения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1971. С. 80-88.

Филиппов Д.А., Прокин А.А., Пржиборо А.А. Методы и методики гидробиологического исследования болот: учебное пособие. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, . 2017. 207 с.

Чуйков Ю.С. Методы экологического анализа состава и структуры сообществ водных животных. Экологическая классификация беспозвоночных встречающихся в планктоне пресных вод // Экология. 1981. №3. С.71-77.

Юрковская Т.К. География и картография растительности болот европейской России и сопредельных территорий. СПб., 1992. Вып.4. 256 с.

SPECIES COMPOSITION OF ZOOPLANKTON OF THE SOUTH-PRIBELOMORIAN MIRE ILASSKOYE (ARKHANGELSK REGION)

E.I. Sobko, I.N. Zubov, T.I. Ponomareva

The paper presents materials on the taxonomic composition of zooplankton in water bodies (hollows and lakes) of the South-Pribelomorian Mire Ilasskoye. 81 species of invertebrates belonging to 29 families and 60 genera have been identified in zooplankton communities. Rotifera in zoocenoses are represented by 43, of Cladocera – 31 and Copepoda – 7 species. Ecological and geographical analysis of zooplankton showed that the communities of marsh reservoirs were dominated by cosmopolitans (43%), littoral species by habitat (26%), according to the method of movement, crawling–floating (40%) and free-floating (planktonic) species (34%), according to the method of nutrition – verticators (29%) and secondary filters (21%). The composition and structure of planktonic fauna are determined by the specific hydrological and chemical characteristics of water bodies of this type.

ПЕРВАЯ НАХОДКА *RAPHIDIOPSIS RACIBORSKII* (WOLOSZYNSKA) SEENAYYA ET SUBBA RAJU В ОЗ. ЛУНСКОЕ (НИЖНИЙ НОВГОРОД, РОССИЯ)

Н.А. Старцева, Д.Е. Гаврилко

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Впервые для территории г. Нижний Новгород приводится находка токсигенного вида-вселенца *Raphidiopsis raciborskii* (Woloszynska) Seenyya et Subba Raju (Aphanizomenonaceae, Cyanobacteria), обнаруженного в пойменном высокотрофном оз. Лунское, расположенном в селитебной части города и используемом жителями в рекреационных целях. Приведен анализ видового состава, сезонной и межгодовой сукцессии фитопланктона, определена ценотическая роль данного вида в альгоценозе водоема. Охарактеризованы условия обитания и особенности строения трихомов *R. raciborskii*, приведены некоторые биологические и экологические сведения о виде и его оригинальные микрофотографии. *R. raciborskii*, является потенциально опасным видом, способным продуцировать алкалоиды цилиндроспермопсины и сакситоксины.

В последние годы наблюдается активное распространение в водоемы умеренной зоны нитчатой диазотрофной цианобактерии *R. raciborskii,* первоначально описанной

как *Anabaena raciborskii* (Wołoszynska, 1912) для водоемов тропической и субтропической зон (Padisák, 1997). В настоящее время данный вид отмечается как массовый для водоемов Европы (Briand et al., 2004; Padisák, 2003), Северной Америки (Hamilton et al., 2005), России (Протасов, 2013; Сиделев, Бабаназарова, 2014). Особое внимание к виду вызвано его способностью продуцировать опасные для человека и животных токсины – цилиндроспермопсины и сакситоксины из группы алкалоидов (Choru, Bartram, 1999), вызывающие некротические повреждения внутренних органов и нарушающие функции нервной системы (Поляк, Сухаревич, Поляк, 2022). Вид устойчив к воздействию низких температур, турбулентности, самозатенению, выеданию зоопланктоном; обладает способностью к азотфиксации и вертикальной миграции; использует ионы аммония как источник «дешевого» азота, тогда как другие гетероцистные виды фиксируют атмосферный азот; имеет высокое сродство к фосфору и может его запасать больше других (Padisák, 1997; Briand et al., 2004). В целом, *R. raciborskii* обладает высокой экологической пластичностью, что объясняет его широкую экспансию в водоемы умеренной зоны в условиях потепления климата.

Вероятность внедрения *R. raciborskii* в аборигенные альгоценозы и массовое развитие в водоемах умеренной зоны высока в годы с антициклональным типом погоды (Сиделев, Бабаназарова, 2014). Мелководные эвтрофные озера, в том числе расположенные в городской черте, обладают благоприятными условиями (высокое содержание биогенных элементов, низкая прозрачность воды, низкий водообмен) для развития цианобактерий т.н. «планктотрихетового» комплекса. Это нитчатые безгетероцистные цианобактерии, которые согласно функциональной классификации фитопланктона, предложенной К. Рейнолдсом (2002), относятся к кодону S1 («planktotrichetum», планктотрихетовый комплекс). Это *Limnothrix redekei* (Van Goor) Meffert, *L. planctonica* (Wołoszyńska) Meffert, *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anagn. et Kom., *Planktolyngbya limnetica* (Lemmermann) Komárková-Legnerová & Cronberg, *Pseudanabaena* spp. и др.

В оз. Лунское, расположенном в Сормовском районе г. Нижнего Новгорода (56º22´ N; 43º49´ E), ежегодно летом на протяжении десятилетий наблюдается «цветение» воды, связанное с массовым развитием цианобактерий (Старцева, Охапкин, 2003). Водоем активно используется жителями города в рекреационных целях. По происхождению оз. Лунское относится к типу пойменных озер, образовавшихся в результате заноса песчано-илистыми отложениями концевых участков проток, отчленившихся от основного русла реки. Озеро вытянуто вдоль русла Волги. В него впадают несколько ручьев, а от восточной оконечности отходит протока, заключенная в стальную трубу. (Рис. 1) По морфометрическим характеристикам оз. Лунское относится к категории малых-очень малых водоемов: площадь его водного зеркала составляет 0,37 км^2, длина 1188 м, максимальная ширина 438 м, средняя глубина 2,8 м, максимальная – 7,0 м. Грунты дна песчано-илистые. По гидрохимическим показателям воды озера относятся к гидрокарбонатной Ca-Na+K группе I типа, являются мезогумозными, по уровню pH олигощелочными, преимущественно средней минерализации, с высокой степенью обеспеченности биогенными элементами (Гелашвили и др., 2005). Физико-химические параметры воды и уровень количественного развития фитопланктона характеризуют оз. Лунское как высокоэвтрофный водоем.

Отбор проб фитопланктона в 2023 г. на данном водоеме осуществляли ежемесячно с июня по сентябрь на 3-х станцях, расположенных на биотопически разнородных участках (в пелагиали и литорали). Всего было отобрано 12 проб фитопланктона. На глубоководных участках пробы отбирали с помощью батометра Руттнера объемом 3 л путем взятия интегральной пробы с глубины, равной 2-м величинам прозрачности с интервалом в 1 м; на мелководных участках – зачерпыванием

пластиковой ёмкостью объемом 1-2 л с поверхностного горизонта. Одновременно со взятием проб измеряли гидрофизические и гидрохимические параметры воды: глубину, прозрачность по диску Секки, температуру, электропроводность, общее содержание растворенных твердых веществ в воде (TDS) и pH. Обработку альгологического материала вели общепринятыми в гидробиологии методами (Методика…, 1975). Для микроскопической обработки проб использовали световой микроскоп MeijiTechno 4200L (Япония) и камеру Нажотта объёмом 0,01 мл. Идентификацию видов водорослей проводили при 1000-кратном увеличении с использованием масляной иммерсии. Названия таксонов приведены с учетом современных номенклатурных изменений, представленных на сайте Algaebase (Guiry, Guiry, 2025). Функциональные группы фитопланктона выделяли согласно функциональной классификации К. Рейнольдса (Reynolds et al., 2002) с дополнениями Падисак (Padisak et al., 2009), основанной на объединении в ассоциации (кодоны) видов, сходных по толерантности или адаптированных к определенному фактору или группе абиотических факторов среды. Для анализа межгодовых изменений в сообществах фитопланктона также использовали архивные материалы 1996, 2000 и 2017 гг.

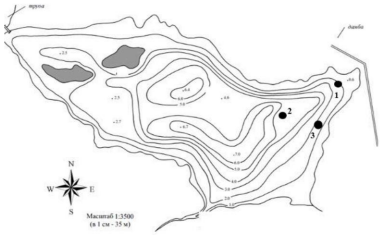


Рис. 1. План оз. Лунское с изобатами. Цифрами обозначены станции отбора проб (по: Гелашвили и др., 2005)

Глубина водоема на различных станциях в период исследований 2023 г. составляла от 0,3 до 5,0 м. Температура воды колебалась от 17,5 до 22,9°С. Прозрачность на пелагических станциях находилась в пределах от 0,9 до 1,1 м. Электропроводность изменялась 292 до 419 мкСм/см, минерализация (TDS) – от 185 до 273 мг/л. Активная реакция среды (pH) в период исследований составляла от 7,0 до 8,7. Концентрация кислорода была высокой (8,4-11,8 мгО/л), стабильно превышающей значения 100 % насыщения во время активной вегетации водорослей.

Альгологические наблюдения на водоеме ведутся с 90-х годов прошлого века по настоящий период. Первые сведения о составе и структуре фитопланктона озера были получены в 1996 г. при составлении экологических паспортов городских водоемов (Розенберг и др., 2001). В таксономическом отношении флора водорослей тогда и в настоящее время характеризуется как зелено-диатомово-эвгленовая с присутствием золотистых водорослей и цианобактерий.

В 1996, 2000 гг. в водоеме отмечалось интенсивное цветение воды цианобактериями. Явным доминантом выступал *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault из кодона H1, наряду с ним вегетировали виды р. *Anabaena*, а также представители кодонов S1 (*L. planctonica*, *P. agardhii*, *Lyngbya sp*.), Lm (*Microcystis spp*., *Gomphosphaeria spp*.). Представители кодона H1 – это диазотрофные виды, толерантные к низкому содержанию азота и углерода, чувствительные к перемешиванию толщи воды, к незначительному содержанию фосфора и низкой освещенности. В кодон S1 включены виды, способные обитать в мутных перемешиваемых водах эвтрофных и

высокоэвтрофных водоемов. Значительный вклад в биомассу наряду с цианобактериями вносили диатомовые водоросли: виды рода *Aulacoseira* (C), *Fragilaria crotonensis* Kitton, *Ulnaria acus* (Kützing) Aboal, *Asterionella formosa* Hassall (D). В планктоне на протяжении всего периода исследований присутствовали представители динофитовых (Lo), зеленых (F, J) и эвгленовых водорослей (W2). (Старцева, Охапкин, 2003).

Появление вида-вселенца *R. raciborskii* в составе фитопланктона оз. Лунское впервые было зафиксировано в июле 2017 г. при разовом отборе проб. Однако его обилие в среднем по водоему не превышало 0,2 г/м^3. Общая биомасса водорослей по акватории водоема в период исследований составляла 14,05 г/м^3, максимальная – 43,22 г/м^3. Доминантом являлся *L. planctonica* (S1) создававший 81,6 % от общей численности и 73% от общей биомассы фитопланктона. В планктоне постоянно встречались, но не достигали значительного уровня развития, виды родов *Microcystis* (Lm), *Planktothrix* (S1), *Anabaena* и *Aphanizomenon* (H1).

В 2023 г. в оз. Лунское общая численность фитопланктона на отдельных станциях достигала 2461,0 млн кл./л, а биомасса 43,0 г/м^3. В доминирующий комплекс входило небольшое число видов, преимущественно цианобактерий из кодона S1, с варьированием биомассы данной группы от 1,21 до 23,68 г/м^3. В июне-июле на всех станциях доминировали *L. redekei* и *P. agardhii*, В августе и сентябре единственным доминантом стал *L. planctonica*, который создавал от 12,8 до 95 % общей численности и от 53,3 до 82,7 % общей биомассы фитопланктона с частотой доминирования до 64,7 %. Степень «цветения» воды в озере в этот период определялась как «интенсивная», а численность цианобактерий превышала пороговые значения, определенные ВОЗ для безопасного использования водоемов в рекреационных целях (2*10^6 кл./л) в 10-120 раз. Биомасса инвазивного вида *R. raciborskii* была низкой, и находилась в пределах от 0,02 до 1,0 г/м^3. Среднелетняя биомасса *R. raciborskii* составила 0,27±0,1 г/м^3. Вид присутствовал во все даты отбора проб по всей акватории озера.

Трихомы *R. raciborskii* популяции из оз. Лунское 3-4 мкм шириной, обычно короткие, не превышающие длину 100 мкм, прямые или слегка изогнутые. Клетки удлиненно цилиндрические, у поперечных перегородок слегка перешнурованные, иногда границы клеток в трихоме не видны. Клетки обычно без газовых вакуолей, иногда газовые вакуоли присутствовали у более старых клеток. Гетероцисты удлиненно-конусовидные 4-7 мкм длиной и 3-3,5 мкм шириной. Акинеты интеркалярные 7-15 мкм длиной и 4-5 мкм шириной, встречались редко, однажды были отмечены две споры рядом (рис. 2).

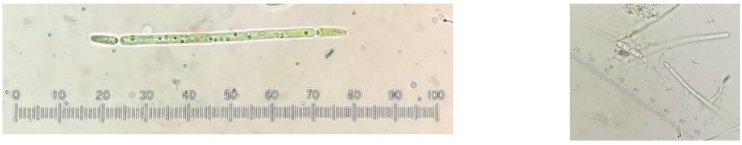


Рис. 2. Микрофотографии *Raphidiopsis raciborskii* из оз. Лунское (цена деления линейки на фотографиях – 1 мкм)

Исследования состава и структуры фитопланктона оз. Лунское, проведенные в 1996, 2000, 2017 (разовая съемка) и 2023 гг., показали, что за более чем 25-ти летний период в альгоценозе водоема произошли серьезные структурные перестройки. Наблюдается замещение доминировавших в конце 90х годов прошлого века функциональных групп H1 и Lm на кодон S1, представители которого способны к конкурентному вытеснению из планктона диатомовых и зеленых хлорококковых водорослей, а также азотфиксирующих цианобактерий. Из числа доминирующих видов

исчезли диатомовые водоросли, а само количество доминантов уменьшилось. В планктоне появился инвазивный пантропический вид кодона SN *R. raciborskii*, который по своим эколого-физиологическим свойствам близок к цианобактериям S1, однако имеет меньшую требовательность к содержанию биогенных элементов, и более высокий температурный оптимум (Padisák, 1997, 2009; Reynolds et al., 2002). Формирование в оз. Лунское высокопродуктивного монодоминантного альгоценоза с преобладанием цианобактерий планктотрихетового комплекса, наличие потенциально токсичных инвазивных видов, позволяют говорить об экологическом неблагополучии водоема и требуют ведения его экологического мониторинга как социально значимого водного объекта города.

Литература

Бабаназарова О.В., Сиделев С.И., Фастнер Дж. Экспансия Cylindrospermopsis raciborskii (Nostocales, Cyanoprocaryota) в северные широты: вспышка развития в мелководном высокоэвтрофном оз. Неро (Россия) // Альгология. 2014. Т. 24, №4. С. 526-537.

Гелашвили Д.Б., Охапкин А.Г., Доронина А.И., Колкутин В.И., Иванов Е.Ф. Экологическое состояние водных объектов Нижнего Новгорода. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2005. 414 с.

Гелашвили Д.Б., Широков А.И., Нижегородцев А.А., Маркелов И.Н. Ядовитые животные и растения России и сопредельных стран: В 2 т. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2020. Т. 1. 528 с.; Т. 2. 547 с.

Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 239 с.

Поляк Ю.М., Сухаревич В.И., Поляк М.С. Цианобактерии и их метаболиты. СПб: Нестор-История, 2022. 328 с.

Протасов А.А., Силаева Л.П., Ярмошенко Л.П., Новоселова Т.Н., Примак А.Б., Савицкий А.Л. Гидробиологические исследования техно-экосистемы Запорожской АЭС // Гидробиол. журн. 2013. Т. 49(2). С. 78-94.

Розенберг Г.С., Гелашвили Д.Б., Зинченко Т.Д., Перешивайлов Л.А. Об экологической паспортизации городских водоемов // Известия Самарского научного центра РАН. 2001. Т. 3, №2. С. 254-264.

Старцева Н.А., Охапкин А.Г. Состав и структура фитопланктона некоторых пойменных озер культурного ландшафта (на примере г. Нижнего Новгорода) // Биология внутренних вод. 2003. №4. С. 35–42.

Briand J.F., Robillot C., Quiblier-Llobe´ras C., Humbert J.F., Coute´ A., Bernard C. Environmental context of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria) blooms in a shallow pond in France // Water Res. 2002. V. 36. P. 3183-3192.

Chorus I., Bartram J. Toxic Cyanobacteria in Water. A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Managment. Chapman & Hall, London. 1999.

Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, University of Galway. https://www.algaebase.org

Hamilton P., Linda M., Stuart D., Pick F.R. The ocurrence of the cyanobacterium Cylindrospermopsis raciborskii in Constance Lake: an exotic cyanoprokaryote new to Canada // Phycologia. 2005. V. 44. P. 17-25.

Padisák J. Cylindrospermopsis raciborskii (Wołoszynska) Seenayya et Subba Raju, an expanding, highly adaptive cyanobacterium: worldwide distribution and review of its ecology // Arch. Hydrobiol. (Suppl.) 1997. V. 107. P. 563-593.

Padisák J. Estimation of minimum sedimentary inoculum (akinete) pool of Cylindrospermopsis raciborskii: a morphology and life-cycle based method // Hydrobiologia. 2003. V. 502. P. 389-394.

Padisák J., Crosesetti L.O., Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates // Ibid. 2009. V. 621. P. 1-19.

Reynolds C.S., Huszar V., Kruk C., Naselli-Flores L., Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton // J. Plankt. Res. 2002. V. 24(5). P. 417-428.

Wołoszynska J. Das Phytoplankton einiger Javanian Seen mit berücksichtigung des Sawa-Planktons // Bull. Int. Acad. Sci. Cracov. Ser. B. 1912. V. 6. P. 649-709.

FIRST FINDING OF *RAPHIDIOPSIS RACIBORSKII* (WOLOSZYNSKA) SEENYYA ET SUBBA RAJU IN LAKE LUNSKOE (NIZHNY NOVGOROD, RUSSIA)

N.A. Startseva, D.E. Gavrilko

For the first time in the territory of Nizhny Novgorod, a finding of a toxigenic alien species *Raphidiopsis raciborskii* (Woloszynska) Seenyya et Subba Raju (Aphanizomenonaceae, Cyanobacteria) is presented. It was discovered in the floodplain high-trophic lake Lunskoye, located in the residential part of the city and used by residents for recreational purposes. An analysis of the species composition, seasonal and interannual succession of phytoplankton is presented, the cenotic role of this species in the algocenosis of the reservoir is determined. The habitat conditions and structural features of *R. raciborskii* trichomes are characterized, some biological and ecological data on the species and its original microphotographs are presented. *R. raciborskii* is a potentially dangerous species capable of producing the alkaloids cylindrospermopsins and saxitoxins.

ЗООПЛАНКТОН КАК КОРМОВАЯ БАЗА РЫБ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

О.Н. Суслопарова, А.Е. Трифонов
Санкт-Петербургский филиал ГНЦ ФГБНУ «ВНИРО»
(«ГосНИОРХ» им. Л.С. Берга»)

Характеристика зоопланктона в аспекте кормового ресурса рыб Ладожского озера дана по материалам 2024 г. Диапазон величин численности сообщества в конце мая составлял 1,24-203,95 тыс. экз./м^3, биомассы - 0,018-0,944 г/м^3, в начале сентября - 3,74-37,34 тыс. экз./м^3 и 0,196-2,546 г/м^3 соответственно. Отмечено что, от 60 до 90% массы зоопланктона содержалось в верхнем 20-метровом слое воды. Обилие мелкоразмерной фракции зоопланктона в южных губах в конце мая обеспечивало необходимые условия для питания ранней молоди рыб, а преобладание в биомассе ракообразных в оба периода исследований создавало благоприятные кормовые условия для рыб-планктофагов.

Ладожское озеро – основной промысловый пресноводный водоем Северо-Запада РФ. Площадь зеркала водоема – 17765 км^2. Наибольшая глубина – 230 м, средняя – 48,3 м (глубины более 100 м характерны для северной части озера), объем водной массы – 848 км^3 (Современное …, 2021).

Средняя величина годового вылова рыбы в Ладожском озере в XXI в. составляет 3052 т, из которых до 90% приходится на южную часть озера (Леонов, Шурухин, 2024). В южном прибрежном районе озера (в Волховской, Свирской, Шлиссельбургской губах) расположены основные зоны нереста и продуктивные пастбища большинства массовых видов промысловых рыб.

Планктофаги преобладают среди промысловых видов рыб. На долю самых хозяйственно значимых пелагических планктофагов – корюшки европейской *Osmerus eperlanus* L. и ряпушки *Coregonus albula* L. – в текущем столетии приходится около половины общего годового улова рыбы в водоеме (в среднем, соответственно, 37 и 11%) (Леонов, Шурухин, 2024). Корюшка тяготеет больше к южной части водоема, ряпушка - к западной и северной, хотя оба вида можно встретить по всему озеру глубже 5-метровой изобаты. В вечерне-ночное время ряпушка и корюшка концентрируются (66,0 и 93,9%, соответственно) в верхнем слое воды (0-8 м), в утренние часы ряпушка спускается на глубину 20-28 м (Суслопарова и др., 2019).

Цель сообщения: дать характеристику зоопланктона Ладожского озера в аспекте кормовой базы основных промысловых рыб.

Оценка состояния кормовой базы молоди рыб и рыб-планктофагов дается по материалам исследований, выполненных в мае (27-31) и сентябре (3-7) 2024 года. Исследования проводили по принятой в «ГосНИОРХ» им Л.С. Берга многолетней сетке из 28 станций, охватывающей всю акваторию Ладожского озера. Выделено 8 районов, отличающихся глубинами, рельефом дна, гидрохимическим и температурным режимами и пр., а также по структурным и количественным характеристикам биоты. Отбор проб зоопланктона выполняли сетью Джеди (диаметр входного отверстия – 18 см., сито № 64) тотально на мелководных участках (глубиной до 30 м) и фракционно (10-0 м, 20-10 м и дно-20 м) – на глубоководных участках.

В составе пелагического зоопланктона Ладожского озера в 2024 г. отмечено 60 видов, из них почти половину составляют коловратки (Rotifera), треть – ветвистоусые ракообразные (Cladocera), на долю веслоногих ракообразных (Copepoda) приходится около 20% от всего списка видов. При этом весной видовой состав сообщества включал 55 видов, а к осени - сокращался до 44, главным образом за счёт снижения числа видов коловраток при некотором увеличении числа видов ветвистоусых ракообразных (рис. 1). По отдельным годам в последнее десятилетие зарегистрировано от 43 до 63 видов, соотношение в видовом составе зоопланктона указанных групп практически не менялось.

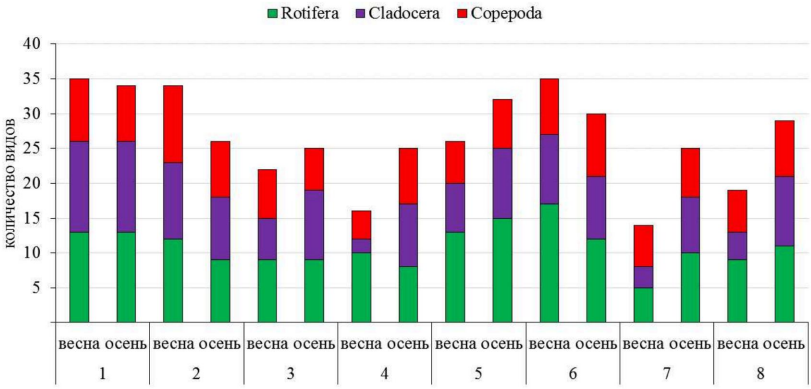


Рис. 1. Распределение таксономических групп зоопланктона в Ладожском озере в 2024 г. (Волховская губа - 1, Свирская губа – 2, Шлиссельбургская губа – 3, восточный район – 4, западный район – 5, склоновый район – 6, центральный район – 7, шхерный район – 8)

Количественные показатели зоопланктона Ладоги варьируют в очень широком диапазоне, как по сезонам, так и по районам озера.

В конце мая численность зоопланктона изменялась от 1,24 до 203,95 тыс. экз./м^3, а биомасса – от 0,018 до 0,944 г/м^3. В начале сентября диапазон величин численности составлял 3,74-37,34 тыс. экз./м^3, биомассы - 0,196-2,546 г/м^3. Высокие концентрации зоопланктона весной и осенью отмечены для южных мелководных губ (Шлиссельбургская, Волховская, Свирская), а также восточного и склонового районов озера (рис. 2). Минимальными значениями характеризовался зоопланктон западного, центрального (глубоководного) и шхерного районов Ладоги.

Величины обилия зоопланктона в 2024 г. соответствовали уровню средне продуктивных лет.

Весной коловратки доминировали по численности в трех губах южной части озера (Волховская – 90,7%, Свирская – 90,3%, Шлиссельбургская – 71,6%), на акватории западного (54,8%) и склонового (47,2%) районов. Основу численности составляли *Conochilus unicornis, Kellicottia longispina, Notolca caudata, Synchaeta stylata*. Веслоногие ракообразные, благодаря большому количеству молоди, формировали значительную долю численности сообщества в остальных районах озера (40-76,3% общей), преобладая в глубоководной зоне. Биомассу зоопланктона почти на всей исследованной акватории Ладоги формировали взрослые веслоногие (42,9-98,2% общей), преимущественно *Thermocyclops oithonoides, Eudiaptomus gracilis* и *Limnocalanus macrurus*, реже *Eurytemora lacustris, Cyclops strenuus, C. abyssorum*, дополнявшие величину биомассы в Волховской губе, западном, центральном и шхерном районах. Ветвистоусые значимую долю в общую биомассу вносили лишь в Волховской губе (15,7% общей), за счет *Limnosida frontosa* и *Polyphemus pediculus*.

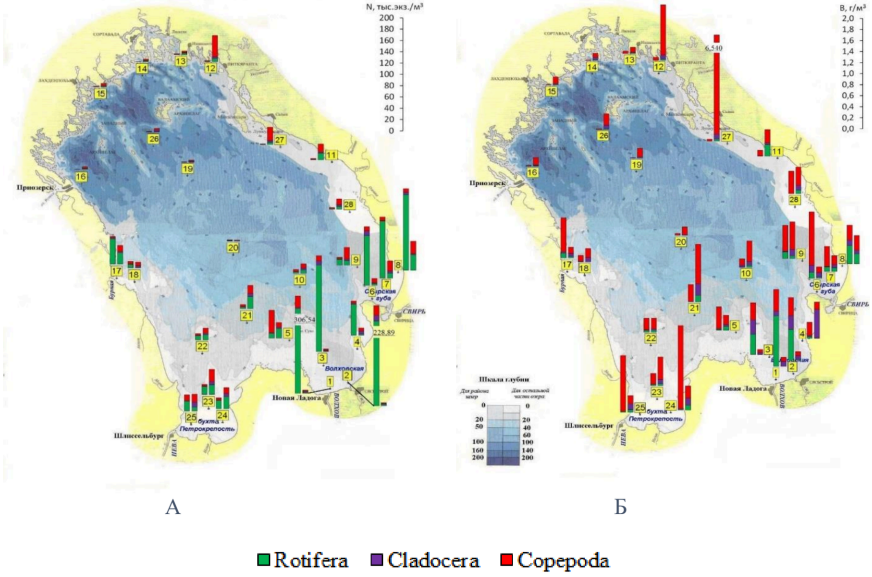


Рис. 2. Численность (А) и биомасса (Б) зоопланктона в Ладожском озере в мае и сентябре 2024 г. (слева направо)

Обилие мелкоразмерной фракции зоопланктона (коловратки, науплии и младшие копеподиты веслоногих) в конце мая обеспечивает благоприятные условия для питания ранней молоди рыб, особенно при переходе личинок на экзогенное питание.

Осенью значительную долю численности по всей акватории озера образовывали веслоногие ракообразные, формируя более 60% ее общей величины в шхерном, восточном и центральном районах. Коловратки дополняли численность зоопланктона в склоновом районе (44,1%), Шлиссельбургской (39,6%) и Свирской губах (37%), чуть меньший их вклад отмечен в шхерном и западном районах (около 30% общей величины). Доля ветвистоусых в общей численности зоопланктона была существенной только в Волховской губе (35,2%) и центральном районе озера (26,4%). Основу биомассы зоопланктона повсеместно формировали веслоногие (43–84% общей), преимущественно *E. gracilis*, *Th. oithonoides*, *M. leuckarti*, а также *L. macrurus*, который определял ее величину на глубоководных участках озера (в склоновом, западном, центральном и шхерном районах) и аномально высокую величину - в восточном районе. Ветвистоусые, преимущественно *Bosmina coregoni*, реже *Leptodora kindtii* и виды из р. *Daphnia*, вносили значимый вклад в общую биомассу зоопланктона в Волховской (53,8%), Свирской (23,6%) и Шлиссельбургской губах (26,6%), а *B. coregoni* – также и в других районах озера. Коловратки дополняли биомассу зоопланктона в Свирской губе (23,7% общей).

Преобладание в общей биомассе зоопланктона ракообразных и значительные ее величины обеспечивают сравнительно высокую продуктивность пастбищ как молоди, так и взрослых рыб на значительной части акватории озера. Снижение биомассы сообщества к сентябрю в южной части Ладоги, вероятно, частично связано с его активным выеданием рыбами.

В 2024 г. весной и осенью в глубоководной зоне Ладоги основное скопление зоопланктона отмечено в верхнем 20-метровом слое воды. Максимум численности и биомассы наблюдался либо в слое 0-10 м, либо в слое 10-20 м. Распределение биомассы зоопланктона по вертикали зависело главным образом от локализации крупных веслоногих рр. *Eudiaptomus*, *Eurytemora*, *Limnocalanus*, из которых первые два совершают вертикальные миграции на большую глубину, а последний в теплое время года держится в пределах гипо- и металимниона. В конце мая биомасса зоопланктона в верхнем 20-метровом слое воды варьировала от 0,03 до 0,55 г/м^3, в начале сентября ее значения выросли, составляя от 0,38 до 2,06 г/м^3. При этом в оба периода в данном слое концентрировалось от 60 до 99% всей массы планктеров (рис. 3).

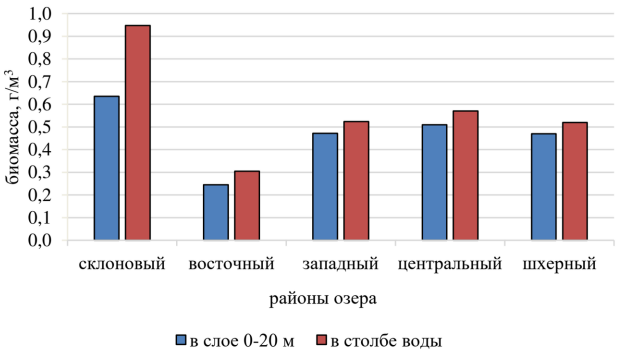


Рис. 3. Соотношение биомассы зоопланктона в верхнем 20-метровом слое и в столбе воды на станциях глубоководной зоны Ладожского озера в 2024 г.

В целом, показатели биомассы зоопланктона в 20 метровом слое воды глубоководной зоны Ладоги сопоставимы с показателями южной мелководной зоны в пределах 10-метровой изобаты, где биомасса весной варьировала в пределах 0,018-0,944 г/м^3, а осенью – от 0,196 до 2,546 г/м^3, за счет локальных скоплений *Limnocalanus.*

Принимая во внимание распределение пелагических рыб-планктофагов, их суточные вертикальные миграции, можно заключить, что в основных зонах их нагула отмечены наибольшие концентрации зоопланктона, которые создают благоприятные кормовые условия.

Зоопланктон Ладожского озера по количественным показателям, структуре и составу группы массовых видов и состоянию их популяций характеризуется как высокопродуктивное полидоминантное сообщество. Отмеченное значительное количество массовых видов, характерное для крупных водоемов с большим видовым богатством, свидетельствует об устойчивости сообщества.

Основные зоны нагула молоди рыб (мелководные губы в южной части озера) и взрослых рыб-планктофагов (верхний 20-метровый слой воды на всей обследованной акватории озера, включая глубоководную зону) характеризовались в 2024 г. высокими показателями биомассы зоопланктона (до 2,06 г/м^3), что обеспечивало благоприятные условия их роста.

В настоящее время планктонные сообщества обеспечивают благоприятные условия для нагула молоди рыб и рыб-планктофагов.

Литература

Леонов А. Г., Шурухин А. С. Состояние рыбных запасов и промысла основных промысловых видов рыб Ладожского озера в XXI в. // Вопросы рыболовства. 2024. Т. 25. №3. С. 1–22.

Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Под ред. С.А. Кондратьева, Ш.Р. Позднякова, В.А. Румянцева. М.: Российская академия наук, 2021. 640 с.

Суслопарова О.Н., Огородникова В.А., Леонов А.Г. Современное состояние зоопланктона как кормовой базы рыб северной и южной части Ладожского озера в сравнительном аспекте // Тезисы докладов XII Съезда Гидробиологического общества при РАН. Петрозаводск, 2019. С. 463–464.

ZOOPLANKTON AS A FOOD RESOURCE FOR FISH OF LAKE LADOGA

O.N. Susloparova, A.E. Trifonov

The characteristics of zooplankton in terms of food resource for fish in the Ladoga Lake are given based on the data of 2024. The range of community abundance values at the end of May was 1.24-203.95 thousand ind./m^3, biomass - 0.018-0.944 g/m^3, at the beginning of September - 3.74-37.34 thousand ind./m^3 and 0.196-2.546 g/m^3, respectively. It was noted that from 60 up to 90% of the zooplankton mass was concentrated in the upper 20-meter water layer. The abundance of small-sized fraction of zooplankton in the southern bays of the lake at the end of May provided the necessary conditions for feeding of early juvenile fish, and the predominance of crustaceans in the biomass in both study periods created favorable feeding conditions for planktophagous fish.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О РАССЕЛЕНИИ ИНВАЗИВНОГО ЧУЖЕРОДНОГО ВИДА РЕЧНЫХ РАКОВ *PACIFASTACUS LENIUSCULUS* (DANA, 1852) (DECAPODA: ASTACIDAE) В ОЗЁРНО-РЕЧНОЙ СИСТЕМЕ РЕКИ ВУОКСА

А.Ю. Тамулёнис, Е.А. Стратаненко
Санкт-Петербургский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ» имени Л.С. Берга)

По результатам проведенных в октябре 2024 г. исследований подтверждён факт наличия чужеродного вида раков (*Pacifastcus leniusculus* или сигнальный рак) в озерно-речной системе р. Вуокса – Светогорском водохранилище. Данные обловов свидетельствуют о промысловых скоплениях этого рака в водохранилище и его успешной акклиматизации в регионе. На основе полученных натурных данных и опросных сведений прогнозируется широкое распространение сигнального рака не только в водоёмах Ленинградской области, но и на Северо-Западе России.

По нашим данным в водных объектах, расположенных в водосборных бассейнах Ладожского озёра и Финского залива в настоящее время обитает пять видов десятиногих ракообразных относящихся к двум семействам (Astacidae: *Astacus astacus* (Linnaeus, 1758), *Pontastacus gr. leptodactylus*, *Pacifastcus leniusculus* (Dana, 1852) и Cambaridae: *Procambarus virginalis* Lyko, 2017, *Faxonius limosus* (Rafinesque, 1817)). Инвазивными из них можно считать следующих – *Pacifastcus leniusculus*, *Procambarus virginalis* и *Faxonius limosus*. Причём первый из перечисленных раков на территорию Ленинградской области проник по рекам со стороны Финляндии (Тамулёнис и др., 2023), а два других – со стороны Эстонии (Aluma et al., 2023). В связи с этим весьма объясним тот факт, что новые инвазивные виды в Ленинградской области отмечаются в основном в приграничных к Финляндии и Эстонии районах, для которых характерно наличие трансграничных водоёмов (реки и водохранилища). Важность изучения интенсивности и масштабов расселения чужеродных видов очевидна. Давно известно, что многие вселенцы способны к «оккупации», пригодных для их обитания зон и вытеснению нативных видов. Так случаи губительного для местной фауны расселения чужеродных видов десятиногих ракообразных уже были рассмотрены во многих работах (Aluma et al., 2023; Bubb et al., 2002; Dragicevic et al., 2020; Hudina et al., 2017; Petrusek, Petruskova, 2007).

В настоящей работе речь пойдёт о сигнальном раке – *Pacifastcus leniusculus*. Американский сигнальный рак – *Pacifastacus leniusculus* (Dana, 1852) – один из нативных видов раков Северной Америки. Распространение сигнального рака как инвазивного чужеродного вида в настоящее время считается самым широким в Европе, его ареал охватывает водоемы 29 стран (Kozak et al., 2015).

Данный вид обладает высокой инвазивной способностью и является потенциальным переносчиком возбудителя «рачьей чумы». По мнению некоторых исследователей, *P. leniusculus* представляет угрозу для аборигенных видов речных раков, в связи с чем основной мерой сдерживания его распространения является контроль его численности (Gherardi, 2006, Gherardi, 2013). Однако существует и противоположное мнение. Так в ряде научных работ на примере водных объектов Финляндии было показано, что сигнальный рак воздействия на аборигенные популяции речных пресноводных раков не оказывает. В этих работах приводятся сведения об озёрах, в которых нативные и чужеродный виды сосуществуют, занимая разные глубины в водоёме (Westman, Pursiainen, 1984).

К сожалению, в настоящее время мы не располагаем достаточными сведениями о распространении этого вида в водоемах Ленинградской области, хотя факт наличия его на территории области уже подтвержден.

На территории Ленинградской области *Pacifastacus leniusculus* (Dana, 1852) впервые был обнаружен в 2021 г. сотрудниками Санкт-Петербургского филиала ФГБНУ Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ГосНИОРХ им. Л.С. Берга). Местом его поимки было оз. Запрудное системы Сайменского канала между оз. Сайма (Финляндия) и Выборгским заливом (Россия). Сайменский канал принадлежит крупной озерно-речной сети, связывающей акватории Финского залива и Ладожского озера (Тамулёнис и др., 2023).

В 2024 г. сотрудниками лаборатории гидробиологи Санкт-Петербургского филиала был осуществлён выезд на Светогорское водохранилище для исследования наличия и распределения раков в озерно-речной системе р. Вуокса, частью которого является это водохранилище. Основной целью данной экспедиции было подтверждение или опровержение опросных данных рыбаков-любителей (2019-2021 г.) о наличии сигнального рака в Светогорском водохранилище (Тамулёнис и др., 2023). Научная экспедиция осуществлялась в рамках Государственного задания.

Светогорское водохранилище расположено на территории России, на границе с Финляндией, относится к Вуоксинскому каскаду водохранилищ (Светогорского и Лесогорского) на реке Вуокса. Введено в эксплуатацию в 1949 году. Целевое назначение: энергетика, водоснабжение. Основные гидрологические характеристики: отметка нормального подпорного уровня (НПУ) – 43,2 м, отметка минимального допустимого уровня в зимний период (УМО) – 39,8 м, площадь зеркала водохранилища при НПУ – 3,18 км^2, площадь зеркала водохранилища при УМО – 2,6 км^2 (https://voda.gov.ru/reservoirs/7332/). Берега водохранилища повторяют берега реки на данном участке. Максимальная глубина достигает~30 м (центральная котловина), средняя глубина~3-4 м. В северо-западной и западной частях водохранилища донные грунты представлены в основном заиленным крупным песком. В центральной части котловины дно сложено илами. Дно северных районов водохранилища покрыто крупным песком, а на урезе воды разбросаны крупные валуны. В середине водохранилища ближе к ГЭС, в районе садкового хозяйства, имеются каменные гряды, глубины около 15-20 метров.

По урезу всего водохранилища отмечены заросли тростника и осоки – *Phragmites australis* ((Cav.) Trin. Ex. Steudel) и *Carex* sp., в воде преобладает элодея (*Elodea canadensis* (Michx.)) и *Potamogeton* sp.

Лов раков проводился в акватории Светогорского водохранилища в октябре 2024 г. на 4 участках – северная, северо-западная, западная и средняя часть водохранилища. В качестве орудий лова применяли стандартные раколовки (70 х 30 х 50 см). Установка раколовок производилась в местах, пригодных для обитания раков (“полезная площадь”) на расстоянии ~10–25 м друг от друга. Экспозицию раколовок осуществляли в ночное время в течение 10-12 ч. Для наживки использовали чеснок и рыбу (замороженную путассу).

Всего было проведено 59 постановок ловушек.

После экспозиции раков вынимали из раколовок и просчитывали. В полевых условиях у каждого экземпляра отловленных раков измеряли общую длину (от конца рострума до конца тельсона) и массу тела, определяли половую принадлежность. Все данные заносили в промысловый журнал и ведомости промеров для их дальнейшей обработки в лаборатории (Раколовство …, 2006).

Выполненный в 2024 г. облов раков в Светогорском водохранилище подтвердил наличие популяции *Pacifastacus leniusculus* в нём.

P. leniusculus был обнаружен на всех четырех выбранных участках облова. Всего по результатам облова в водохранилище было поймано 53 экземпляра этого инвазивного вида раков, общим весом 1690 г. (рис. 1).



Рис. 1. Фотография сигнальных раков, пойманных в Светогорском водохранилище в октябре 2024 года

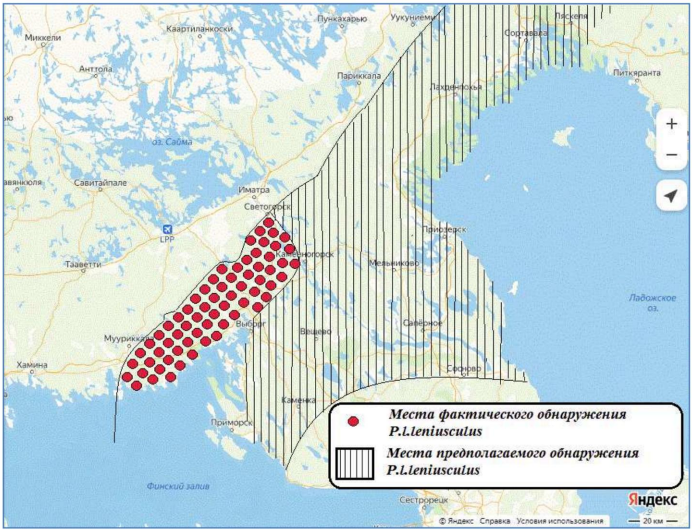


Рис. 2. Ареал масштабного расселения сигнального рака *Pacifastcus leniusculus* в водных объектах Ленинградской области и Республики Карелия

В северной, северо-западной и западной частях водохранилища нами было поймано незначительное количество сигнальных раков (1–6 экземпляров).

Максимальное количество сигнальных раков (промысловое скопление – 42 экземпляра) наблюдалось в средней части водохранилища, ближе к берегу, на каменных грядах (глубина 15-17 метров). По литературным данным глубины около 15 метров, наличие каменных насыпей или гряд наилучшим образом подходят для обитания данного вида.

По данным рыбаков-любителей и промысловиков в ноябре 2024 года промысловые скопления сигнального рака также были отмечены на реках Карельского перешейка (северное побережье Финского залива и на северо-восток вдоль границы с Финляндией): р. Серьга (бухта Чистопольская), р. Песчаная (бухта Дальняя), р. Великая (залив Балтиец), р. Чулковка (бухта Наалахти), р. Полевая (Выборгский залив), р. Ершиха (бухта Ершовая), р. Селезнёвка, р. Петровка, а также озёрах: оз. Дозорное, оз. Бурное и в Гавриловском карьере.

В целом полученные натурные результаты о расселении нового вида десятиногих ракообразных в Светогорском водохранилище в совокупности с опросными сведениями подтверждают его успешную акклиматизацию в регионе. Все имеющиеся на сегодняшний день материалы позволяют прогнозировать в дальнейшем широкое распространение *P. leniusculus* не только в водоемах Ленинградской области, но и на Северо-Западе России. Примерный ареал масштабного расселения сигнального рака в Ленинградской области и республике Карелия представлен на рисунке 2.

Литература

Раколовство и раководство на водоемах европейской части России. Справочник. СПб, 2006.

Тамуленис А.Ю., Стратаненко Е.А., Зуев Ю.А. Находка американского сигнального рака *Pacifastacus leniusculus* (Decapoda: Astacidae) в Ленинградской обл. (Россия) // Биология внутренних вод. 2023. №5. С. 642-646.

Aluma M.O., Pukk, L., Hurt M., Kaldre K. Distribution of Non-Indigenous Crayfish Species in Estonia and Their Impacts on Noble Crayfish (*Astacus astacus* L.) // Populations. Diversity. 2023. 15. P. 474.

Bubb D.H., Thom T.J., Lucas M.C. Movement and dispersal of the invasive signal crayfish *Pacifastacus leniusculus* in upland rivers // Freshwater Biol. 2004.V. 49. P. 357.

Crayfish Biology and Culture. Vodňany: University of South Bohemia in České Budějovice, 2015.

Dragičević P., Faller M., Kutleša P., Hudina S. Update on the signal crayfish, *Pacifastacus leniusculus* (Dana, 1852) range expansion in Croatia: a 10-year report. // BioInvasions Records 2020. 9(4). P. 793–807.

Gherardi F. Bioinvasions in fresh waters and the Nerodilemma // Pol. J. Ecol. 2006. V. 54(4). P. 549.

Gherardi F. Crayfish as Global Invaders: Distribution, Impact on Ecosystem Services and Management Options // Freshwater Crayfish. 2013.V. 19(2). P. 177.

Hudina S, Kutleša P, Trgovčić K, Duplić A (2017) Dynamics of range expancion of the signal crayfish (*Pacifastacus leniusculus*) in a recently invaded region in Croatia // Invations. 12. P. 67-75.

Petrusek A., Petruskova T. Invasive American crayfish *Pacifastacus leniusculus* (Decapoda: Astacidae) in the Morava River (Slovakia) // Biologia. 2007. №63 (3). P. 356.

Westman K., Pursiainen M. Introduction of the American crayfish (*Pacifastacus leniusculus*) in Finland, impact on the native crayfish (*Astacus astacus*) // EIFAC Techn. Pap. 1984. 42. 2.

PRELIMINARY DATA ON THE DISPERSAL OF THE INVASIVE ALIEN SPECIES OF RIVER CRAYFISH *PACIFASTACUS LENIUSCULUS* (DECAPODA: ASTACIDAE) IN THE LAKE-RIVER SYSTEM OF THE VUOKSA RIVER

A.Yu. Tamulyonis, E.A. Stratanenko

According to the results of studies conducted in October 2024, the presence of an alien species of crayfish (*Pacifastcus leniusculus* or signal crayfish) in the lake-river system of the Vuoksa river – Svetogorsk reservoir was confirmed. The catch data indicate commercial concentrations of this crayfish in the reservoir and its successful acclimatization in the region. Based on the obtained field data and survey information, a widespread spread of signal crayfish is predicted not only in the reservoirs of the Leningrad region, but also in the North-West of Russia.

ИЗМЕНЕНИЯ В СООБЩЕСТВЕ ПЛАНКТОННЫХ ОРГАНИЗМОВ ПОЙМЕННЫХ ОЗЕР НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «САМАРСКАЯ ЛУКА» В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Н.Г. Тарасова[1], О.В. Мухортова[1], С.В. Быкова[2], М.В. Уманская[2], Е.С. Краснова[2]
[1]Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН
[2]Институт экологии Волжского бассейна РАН

За 25-летний период произошли значительные изменения в экосистеме пойменного озера, расположенного на территории национального парка: значительно уменьшилась прозрачность воды, возросло значение pH, увеличилась численность бактерио- и фитопланктона. Максимальные показатели численности и биомассы всех компонентов планктонного сообщества отмечено в озере с меньшей площадью, не связанном с водохранилищем. По сравнению с 1999 г., произошли изменения в составе доминирующего комплекса видов водорослей и инфузорий. В фитопланктоне сформировалось монодоминантное сообщество, с преобладанием *Planktothrix agardii* Gomont – высокотоксичного вида водорослей планктотрихетового типа. В трофической структуре инфузорий изменения проявились в уменьшении вклада в общую численность неселективных всеядных инфузорий и увеличении вклада бактерио-детритофагов.

Согласно закону РФ «Об особо охраняемых территориях» (1995), национальные парки – это территории суши и воды, предназначенные для охраны природы, экологического просвещения и научных исследований. Они содержат объекты, представляющие особую экологическую, историческую и эстетическую ценность. Одним из старейших национальных парков РФ является «Самарская Лука», основанный в 1984 г. и расположенный на полуострове, образованным естественным изгибом Волги в районе Жигулевских гор. Самарская Лука – объект мировой научной ценности, что обусловлено особым географическим положением, уникальной историей геологического развития, сложностью морфологической структуры составляющих ее ландшафтов (Обедиентова, 1953, 1988). Неотъемлемой частью разнообразных природных ландшафтов на особо охраняемой территории являются водоемы и водотоки. Пойменные озера и старицы на данной территории занимают площадь 1150 га (Рощевский, 1992), их основная часть сосредоточена в районе Мордовинской и Шелехметской пойм. Изучение планктона пойменных водоемов Самарской Луки было начато сотрудниками ИЭВБ РАН в 1999 г., (Голубая книга …, 2006), и было нами в 2023 г. Глобальное потепление климата оказывает значительное воздействие на водные экосистемы, в том числе и на озера. По прогнозам Woolway et al. (2020)

продолжительность ледостава на них становится меньше, есть риск того, что если температура воздуха повысится на 4°С зимы будут вовсе безледными. Температура воды во всем мире за последнее десятилетие в озерах повысилась на 0,34°. Такие изменения не могут не оказывать влияния на организмы, их населяющие.

Целью работы: проанализировать изменения, произошедшие в планктонном сообществе организмов пойменных озер за 25 лет.

В работе представлены результаты исследований планктонного сообщества (бактерио-, фито-, мета- и протозоопланктона) двух пойменных водоемов Шелехметской поймы: Шелехметское и Большое Островное в летний период. При этом, работы на оз. Шелехметское проводили в 1999 г., а на оз. Б. Островное нами впервые в 2023-24 гг. Исследования отдельных компонентов планктонного сообщества проводили согласно современным гидробиологическим методикам (Методы …, 2024). Некоторые морфологические и гидрохимические и гидробиологические показатели водоемов в июле-августе разных лет приведены в таблице.

За 25 лет произошло значительное изменение абиотических факторов в оз. Шелехметское (табл.). По сравнению с 1999 г. в начале 20-х годов XXI века температура воды увеличилась на 5°, pH – на 1,18 единиц, прозрачность уменьшилась в 2,4 раза. Максимальные показатели pH и минимальные значения прозрачности были зарегистрированы в оз. Б. Островное. По показателям pH можно сделать заключение, что в летний период 2023-24 гг. оз. Б. Островное относилось к содовым, а оз. Шелехметское приближалось к этому состоянию. Как известно, такие озера считаются одними из самых экстремальных сред на Земле (Grant, 2006). В соответствии с критериями OECD по показателю прозрачности оба водоема в начале XXI в. по трофическому статусу относились к гипертрофным (Galvez-Cloutier, Sanchez, 2007), при этом оз. Шелехметское в 1999 г. характеризовалось как эвтрофное.

Численность и биомасса *бактериопланктона* в оз. Шелехметское также значительно увеличились к XXI в. (табл. 1): более чем в 2.5 раз. Максимальные значения этих показателей были зарегистрированы в оз. Б. Островное, и были выше этих показателей в оз. Шелехметском приблизительно в два раза.

Численность *фитопланктона* увеличилась в оз. Шелехметское к XXI в. практически в 10 раз (табл. 1). Максимальные показатели численности и биомассы водорослей отмечены нами в оз. Б. Островное. Изменения произошли и в составе доминирующего комплекса видов водорослей. Если в 1999 г. в его состав входили *Microcystis pulverea* (Wood) Forti emend. Elenk., *Aphanizomenon elenkinii* Kissel.; *Pseudoanabaena limnetica* (Lemmermann) Komárek, то в XXI в. его основу составлял *Planktothrix agardii,* формируя в обоих водоемах 83-95% общей численности и 57-83% от общей биомассы фитопланктона. Этот вид широко распространен в планктоне континентальных водоёмов и опресненных морских акваторий, развивается в широком диапазоне условий, а именно при высоком содержании органических веществ. Может переходить на гетеротрофный рост и считается индикатором гиперэвтрофного состояния водоёмов. Вид является одним из частых возбудителей «цветения» воды, его экзометаболиты чрезвычайно токсичны для рыбы и человека (Белякова и др., 2006). Массовое развитие *P. agardhii* в водоёмах сопровождается такими отрицательными эффектами, как низкая прозрачность и освещенность, повышение pH > 8–9, в структуре альгоценозов – монодоминирование и снижение разнообразия.

Диапазон изменения численности *инфузорий* оз. Шелехметское в 2023-24 гг. (712-904 тыс. экз./м^3) практически совпал с диапазоном в 1999 г. (924-1008 тыс. экз. / м^3) (табл. 1). Отмечена тенденция увеличения числа видов и видового разнообразия в целом за 25 -летний период. В последнее время в составе доминантов важную роль стали играть прикрепленные к планктонным водорослям, в том числе и нитчатым цианобактериям,

инфузории рода *Vorticella* и значительно меньшую – тинтинниды. Изменения в трофической структуре за 25-летний период проявились в уменьшении вклада в общую численность неселективных всеядных инфузорий и увеличении вклада бактерио-детритофагов, что логично, поскольку последние более приспособлены к употреблению все возрастающего количества бактерий и детрита (Wootton, 2017), в отличие от неселективно питающихся инфузорий, которые сильнее других «страдают» от доминирования цианобактерий (Krztoń, Kosiba, 2020).

Таблица. Морфологические, гидрохимические и гидробиологические характеристики озер Шелехметское и Б. Островное

Озеро		Шелехметское	Б. Островное
Координаты		53.248567 49.924283	53.215826 49.984536
Длина, м		4000	2000
Ширина, макс., м		70	1300
Глубина, ср., м		4,70	–
Прозрачность, см.	1999 г.	1,20	–
	2023 г.	0,35	0,30
	2024 г.	0,60	0,20
Температура, пов., ˚С	1999 г.	22,35	–
	2023 г.	25,40	24,10
	2024 г.	29,50	32,60
pH	1999 г.	7,72	–
	2023 г.	8,99	9,60
	2024 г.	8,86	10,32
O_2, мг/л,	1999 г.	10,46	–
	2023 г.	9,46	10,22
	2024 г.	12,93	18,44
Бактериопланктон	численность, млн кл/мл		
	1999 г.	5,25	–
	2023 г.	14,84	18,88
	2024 г.	11,22	22,83
	биомасса, мг/л		
	1999 г.	0,58	–
	2023 г.	1,90	2,11
	2024 г.	1,27	2,38
Фитопланктон	численность, млн кл/л		
	1999 г.	89,85*	–
	2023 г.	1010,17	2366,06
	2024 г.	520,10	1490,02
	биомасса, г/м^3		
	2023 г.	34,48	73,01
	2024 г.	19,82	42,68
Протозоопланктон	численность, тыс. экз./м^3		
	1999 г.	976	–
	2023 г.	712	276
	2024 г.	904	5830
	биомасса, мг/м^3		
	1999 г.	37,25	–
	2023 г.	11,20	4,8
	2024 г.	119,20	89,9
Метазоопланктон	численность, тыс.экз./м^3		
	2023 г.	234,40	446,90
	2024 г.	413,97	413,97
	биомасса, мг/м^3		
	2023 г.	1939,60	3915,61
	2024 г.	699,00	1383,40

*по: Розенберг и др., 2006

Диапазоны варьирования численности и биомассы инфузорий двух исследованных пойменных водоемов в XXI в. во многом перекрываются. Лишь в июле 2024 г. (в условиях высоких температур зарегистрирована высокая биомасса за счет развития колониальных *Epicarchesium pectinatum* (Zacharias, 1897) в оз. Шелехметское (20 колоний, в среднем по 41 зооиду в колонии). Видовой состав инфузорий в каждом их двух однотипных пойменных водоемов – довольно своеобразен: коэффициент сходства Серенсена – всего 44%. В августе 2024 г. в оз. Б. Островное при максимальной температуре воды в период отбора проб в составе доминантов отмечены обычно минорные виды: *Actinobolina smalli* Holt, Lynn & Corliss 1973 и *Hastatella aesculacantha* Jaroski & Jacubowska, эпипланктонные *Vorticella* spp. а также скутикоцилиата *Cinetochilum margaritaceum* Perty, 1852, что указывают на процесс интенсивного «цветения».

Исследования *зоопланктона* проводили только в XXI в. Всего в составе зоопланктона было зарегистрировано 63 таксономических единиц, из них в оз. Б. Островное – 34, в оз. Шелехметском – 28. С 2023 г. регистрировались виды-вселенцы в оз. Б. Островное – *Acanthocyclops americanus* (Marsh, 1892), в оз. Шелехметском – *Heterocope caspia* Sars G.O., 1897, из-за затопления поймы весной и периодической связи с Саратовским водохранилищем. Максимальные показатели количественного развития зоопланктона были отмечены в оз. Б. Островное, где они были в 2 раза выше, чем в оз. Шелехметском (табл. 1). Видовой состав зоопланктона двух однотипных пойменных водоемов – довольно схож: коэффициент сходства Серенсена –59%. По численности в оз. Б. Островное преобладали *Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857) (17%), Nauplii Cyclopoida (21%) *Thermocyclops oithonoides* (Sars G.O., 1863) (13%), *Thermocyclops crassus* (Fischer, 1853) (10%) и представители *Leptodora kindti* (Focke, 1844) (15%); в оз. Шелехметском: *Brachionus calyciflorus* Pallas, 1766 (38%), *Keratella cochlearis* (Gosse, 1851) (13%), Copepodit Cyclopoida (10%) и *Bosmina (Eubosmina) longispina* Leydig, 1860 (6%).

Таким образом, на основании полученных данных можно сделать следующие заключения:

за 25-летний период в экосистеме пойменного озера, расположенного на особо охраняемой территории, произошли значительные изменения, которые отразились на абиотических и биотических факторах;

на сегодняшний день по показателям pH оба озера можно отнести к содовому типу, по прозрачности воды и биомассе фитопланктона – к гипертрофному состоянию;

по сравнению с 1999 г., на сегодняшний день отмечены значительные увеличения численности и биомассы бактерио- и фитопланктона, а также структурные перестройки в сообществе свободноживущих инфузорий;

при сравнении планктона двух пойменных озер, расположенных на одной территории наибольшие показатели количественного развития всех компонентов планктонного сообщества отмечены в более мелководном, не связанном с водохранилищем водоеме.

Работа выполнена в рамках государственных заданий №124032100076-2 гос. темы «Структура, функционирование и разнообразие первичных продуцентов континентальных вод», № 124032500016-4 гос. темы «Разнообразие, биология и экология водных и околоводных беспозвоночных континентальных вод» (Институт биологии внутренних вод РАН), № 1024032600218-3-1.6.20 гос. темы ««Влияние изменений природно-климатических условий на состояние биоразнообразия и функционирование природных и антропогенно-измененных экосистем». Регистрационный номер» (Институт экологии Волжского бассейна РАН).

Литература

Голубая книга Самарской области. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2016. 200с.

Методы гидробиологических исследований внутренних вод. Ярославль: Филигрань, 2024. 592 с.

Обедиентова Г.В. Происхождение Жигулевской возвышенности и развитие её рельефа // Тр. Ин-та географии АН СССР. 1953. Т. 53. 246 с.

Обедиентова Г.В. Из глубины веков: геологическая история и природа Жигулей. Куйбышев, 1988. 216 с.

Розенберг Г.С., Паутова В.Н., Поспелов А.П., Поспелова М.Д., Номоконова В.И., Горбунов М.Ю., Уманская М.В., Малиновская Е.И., Горохова О.Г., Быкова С.В., Жариков В.В., Романова Е.П., Шошин А.А. Комплексная характеристика некоторых водоемов юго-восточной части национального парка «Самарская Лука» // Самарская Лука: Бюл. 2006. №18. С. 38-96.

Рощевский Ю. К. Что такое Самарская Лука? Жигулевск, 1992. 42 с.

Galvez-Cloutier R., Sanchez M. Trophic Status Evaluation for 154 Lakes in Quebec, Canada. Monitorimg and Recommendations // Water Qual. Res. J. Canada, 2007. V. 42. №4, P. 252-268.

Grant W. D. Alkaline Environments and Biodiversity // Extremophiles. Encyclopedia of Life Support Systems. V. 1. Oxford: Eolss Publishers Co, 2006. 18 p.

Krztoń W., Kosiba J. 2020. Variations in zooplankton functional groups density in freshwater ecosystems exposed to cyanobacterial blooms //Science of the Total Environment. Т. 730. P. 139044. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139044

Woolway R.I., Kraemer M.B., Lenters J.D., Merchant C.J., O'Reilly C.M., Sharma S. Global lake responses to climate change // Nature Reviews Earth & Environment. 2020. V. 1, №8. P. 388-403.

Wootton K.L. Omnivory and stability in freshwater habitats: does theorymatch reality? // Freshw. Biol. 2017. 62 (5). P. 821–832.

CHANGES IN THE COMMUNITY OF PLANKTONIC ORGANISMS IN THE FLOODPLAIN LAKES OF THE SAMARSKAYA LUKA NATIONAL PARK IN THE CONTEXT OF GLOBAL WARMING

N.G. Tarasova, O.V. Mukhortova, S.V. Bykova, M.V. Umanskaya, E.S. Krasnova

Over the 25-year period, significant changes have occurred in the ecosystem of the floodplain lake located in the national park: the transparency of the water has significantly decreased, the pH value has increased, and the number of bacterio- and phytoplankton has increased. The maximum abundance and biomass of all components of the plankton community was observed in a lake with a smaller area not connected to a reservoir. Compared to 1999, there have been changes in the composition of the dominant complex of algae and ciliate species. A monodominant community has formed in phytoplankton, with a predominance of *Planktothrix agardii* Gomont– a highly toxic species of algae of the planktotrichete type. Changes in the trophic structure of ciliates were manifested in a decrease in the contribution to the total number of nonselective omnivorous ciliates and an increase in the contribution of bacterio-detritophages.

СООБЩЕСТВА ФИТО- И ЗООПЛАНКТОНА ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ВОДОЕМОВ

Н.А. Ташлыкова, Е.Ю. Афонина
Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения РАН

Цель работы – изучение современного состава и структуры планктонных сообществ в природно-техногенных водоемах (оз. Кенон – водоем охладитель и оз. Умыкейское – пруд накопитель-испаритель). Видовой состав летнего планктона оз Кенон включал 55 видов фитопланктона и 24 – зоопланктона, в оз. Умыкейское – 20 и 12 видов, соответственно. Количественные показатели варьировали в широких пределах. Струкутрообразующий комплекс фитопланктона двух озер различался. В водоеме-охладителе преобладали диатомовые и зеленые водоросли, в пруде-испарителе – цианобактерии. Доминантный комплекс зоопланктона характеризовался сходностью состава (*Keratella quadrata, Daphnia curvirostris* и *Daphnia galeata*, *Neutdodiaptomus incongruens* и *Arctodiaptomus bacillifer, Cyclops vicinus, Mesocyclops leuckarti*).

К категории природно-техногенных водоемов относятся искусственные и естественные водные объекты, в которых функционирование осуществляется путем искусственного регулирования расходов воды. Примерами подобных водоемов на территории Забайкальского края являются озера Кенон и Умыкейское.

Бессточное озеро Кенон (52°02′19″ с. ш., 113°22′50″ в. д.) – природный водоем, включенный в технологическую схему теплоэлектроцентрали и расположенный в черте краевого центра – г. Чита (Забайкальский край). Природные черты режима озера практически утрачены и перешли в природно-антропогенные, определяемые технологическим режимом ТЭЦ (Токарева, 2004). Как водоем-охладитель Читинской ТЭЦ озеро используется с 1965 г. Водосборный бассейн озера расположен в междуречье р. Ингоды и левого притока р. Чита. Площадь водного зеркала — 16,2 км^2, объем водной массы — 77 млн. м^3, средняя глубина — 4,4 м. Для поддержания уровня воды озера организована перекачка воды из р. Ингода, до 15–16 млн. м^3/год. Объем выбрасываемых теплых вод составляет более 109 млн. м^3/год (Чечель, Цыганок 1998).

Умыкейское озеро (49.959128 с.ш., 117.918452 в.д.), образованное в результате слияния соленых озер Умыкий, Кука-Азырга, Цаган, Цаган-Торон, находится в 20 километрах к юго-западу от г. Краснокаменск. Водоем используется как пруд накопитель-испаритель. Площадь озер до слияния составляла 30–365 га, глубина – 0,2–0,5 м. В настоящее время естественный режим этих озер полностью изменен. Преобладающим источником питания является сброс хозяйственно-бытовых сточных вод города и промышленных объектов Приаргунского производственного горно-химического объединения, шахтных вод и промышленных стоков ТЭЦ. Уровень воды в озерах в результате затопления повысился на 5–17 м (Радиоэкологическая …, 2021).

Гидробиологические исследования озер проводились летом 2023 г. Отбор проб на оз. Кенон проводился на четырех станциях, на оз. Умыкейское – на трех. Фитопланктон отбирали из двух-трех горизонтов вод (поверхность, глубина прозрачности, у дна). Зоопланктон собирали тотально (дно-поверхность) с применением сети Джеди (диаметр входного отверстия 25 см и фильтрующий конус из капронового сита диаметром ячеи 0,064 мм). Пробы фиксировали 4%-м раствором формальдегида. Камеральная обработка проводилась в лабораторных условиях с использованием стандартной количественно-весовой методики (Киселев, 1969). Биомассу водорослей определяли по объему отдельных клеток или колоний водорослей, при этом удельный вес принимался равным

единице (Садчиков, 2003), зоопланктеров – по уравнениям связи длины тела и сырой массы (Ruttner-Kolisko, 1977; Балушкина, Винберг, 1979).

Для оценки разнообразия и структуры сообществ водорослей и беспозвоночных использовали индексы видового разнообразия: Шеннона (H_n, по численности), Симпсона (D_s) и Пиелоу (e) (Мэгарран, 1992). Для оценки неоднородности распределения количественных показателей использовали коэффициент вариации (CV) (Плохинский, 1970).

Функциональная характеристика водорослей основана на данных по клеточной организации (нитчатая или одноклеточные) и размере клеток (маленькие, средние, большие и крупные), наличии жгутика (присутствует, отсутствует), типу питания (миксотрофны и гетеротрофный), фиксация азота, хлорофилл *chl-b*, *chl-c* и фикобилипротеины.

Функциональная характеристика беспозвоночных основана на сочетании типов передвижения (локомоции) (плавание, ползание и прикрепление к субстрату) и типу питания (захват, первичная фильтрация, вторичная фильтрация, вертикация, всасывание, собирание) (Чуйков, 2018). Способ передвижения планктонных беспозвоночных является отражением поведения, связанного с процессами добывания пищи. Поэтому преобладание животных с тем или иным способом локомоции является косвенным показателем обилия кормовых объектов в толще воды или у поверхности дна.

Озеро Кенон. Таксономической состав фитопланктона представлен 55 таксонами водорослей рангом ниже рода, относящихся к 8 отделам (Cyanobacteria – 1 таксон, Chrysophyta – 1, Bacillariophyta – 30, Cryptophyta – 1, Dinophyta – 2, Charophyta – 3, Chlorophyta – 16 и Euglenophyta – 1). Наибольшее видовое богатство присуще диатомовым водорослям, в совокупности составляющим 54,5% идентифицированных таксонов. Альгоценозы обследованных станций озера были разнообразны в таксономическом отношении. Количество, выявленных таксонов изменялось от 30 (Центр) до 42 (КСК). Коэффициент вариации между средними значениями общего количества таксонов составил 16–29%. По функциональным характеристикам отмечено, что в озере развивались преимущественно средние по размерам одиночные водоросли, преимущественно без органелл движения, способные к миксотрофному питанию.

Средняя численность фитопланктона по акватории озера составила (здесь и далее, mean±SD) 82,72±34,64 тыс. кл./л, биомасса – 105,25±41,03 мг/м^3. В состав доминантов входило 5 таксонов водорослей из двух отделов – Bacillariophyta (*Asterionella formosa, Aulacoseira granulata*) и Chlorophyta (*Coelastrum microporum, Oocystis lacustris, Tetraëdron minimum*). В центральной части и районе КСК превалировали зеленые водоросли (39,3–60,8% от общей численности), в районе зоны тепловой нагрузки – диатомеи (54–70,8%).

Значения индексов альфа-разнообразия (H_n = 3,48±0,48 бит/экз., D_S = 0,22±0,23, e = 0,96±0,04) соответствовали формированию в озере высоко разнообразных, выровненных альгосообществ.

Видовое богатство зоопланктона определяли 24 вида (Rotifera – 9 видов, Cladocera – 9, Copepoda – 6). Наибольшее разнообразие зарегистрировано в районе КСК и ТЭЦ (16 и 18 видов, соответственно). Среди выявленных представителей фауны доминировали типичные планктонные парящие формы (50%). По способу захвата пищи из числа коловраток преобладали вертикаторы (29%), из ветвистоусых – первичные и вторичные фильтраторы (по 21%), питающиеся бактерио-, фитопланктоном и детритом. Облигатные хищные формы, способные схватить добычу высовывающимся ротовым аппаратом, составляли 12,5%. Принимая во внимание, что первичная фильтрация у ветвистоусых и вертикация у коловраток сходны, то доля форм, улавливающих взвешенные частицы из толщи воды, составляет 50% богатства фауны. Перечисленные

особенности передвижения и питания представителей фауны планктона могут свидетельствовать о выраженности как пастбищной, так и детритной пищевых цепей в озере.

Общая численность зоопланктона в среднем по озеру составила 127,18±25,67 тыс. экз./м^3, биомасса – 3590,55±3267,55 мг/м^3. Структурообразующий комплекс состоял из трех-четырех видов, общим числом семь (*Keratella quadrata, Filinia longiseta, Daphnia galeata, Simocephalus vetulus, Neutdodiaptomus incongruens, Cyclops vicinus, Mesocyclops leuckarti*). Основу биомассы формировали кладоцеры: в обогреваемой зоне – фитофильный рачок-фильтратор *S. vetulus* (44% всей биомассы), на остальной акватории озера – эврибионт *D. galeata* (57–95%).

Если распределение плотности зоопланктеров по озеру достаточно равномерное (CV = 20%), то типичность средней величины биомассы невысока (CV = 91%). Высокие концентрации биомассы, формируемые крупноразмерными особями дафний, регистрировались в центре озера и в районе устья р. Кадалинка.

По трофическому типу, согласно индексам α-разнообразия (H_n = 1,98±0,26 бит/экз., D_S = 0,76±0,12, e = 0,38±0,09), озеро отнесено к эвтрофным с преобладающим доминированием одного-двух видов. Совокупность полученных данных абсолютно однородная (*CV* = 13–16%).

Озеро Умыкейское. В составе фитопланктона отмечено 20 таксонов водорослей рангом ниже рода из 6 отделов (Cyanobacteria – 7 таксонов, Bacillariophyta – 5, Dinophyta – 1, Charophyta – 1, Chlorophyta – 5 и Euglenophyta – 1) По таксономическому составу фитопланктон озера носил хлорофито-диатомово-цианобактериальный характер. На долю цианобактерий, диатомовых и зеленых водорослей приходилось 85% от общего числа обнаруженных таксонов. Распределение видовой насыщенности фитопланктона, оцененной значениями удельного видового богатства, показало, что водоем мало разнообразен в таксономическом отношении (8,25±2,87 видов в пробе). По функциональным особенностям, в озере регистрировались клетки водорослей разного размерного ряда, колониальной клеточной организации, способные к миксотрофному питанию. Среди цианей отмечались виды, способные к фиксации азота. Для водорослей отделов динофитовые и эвгленовые характерно наличие жгутика.

Обилие водорослей по акватории озера варьировало в пределах от 34,52 до 501,82±478,30 тыс. кл./л. Значение биомассы колебалось от 114,27 до 1467,24±2092,05 мг/м^3. Вертикальное распределение фитопланктона в центральной части водоема было неоднородным. Максимум развития водорослей отмечен в приповерхностном слое и на глубине прозрачности. Структуру альгоценозов по численности определяли цианобактерии *Anabaena contorta* и виды рода *Microcystis* (71–98,5 % от общей численности), по биомассе – динофитовые водоросли (*Ceratium hirundinella*) (97,1–99,8 % от общей биомассы).

Средние значения индексов альфа-разнообразия составляли: H_n = 1,61±1,17 бит/экз., D_S = 0,49±0,38, e = 0,65±0,40. Коэффициент вариации составил 12–20%.

В составе зоопланктона идентифицировано 12 видов (по 4 вида у Rotifera, Cladocera и Copepoda). По функциональным характеристикам, в составе планктофауны по типу питания преобладали свободноплавающие (67%) и добывающие пищу с помощью фильтрации (42%) и вертикации (25%) виды.

В среднем по водоему общая численность зоопланктона составила 3169,08±5223,90 тыс. экз./м^3 (CV = 165%), биомасса – 12688,16±11550,00 мг/м^3 (CV = 91%). Доминирующий комплекс зоопланктона формировали семь видов, при варьировании от одного до пяти (*Keratella quadrata, Asplanchna priodonta, Daphnia curvirostris, Coronatella rectangula Arctodiaptomus bacillifer, Cyclops vicinus, Mesocyclops leuckarti*).

По показателям разнообразия (H_n = 1,61±1,17 бит/экз., D_S = 0,49±0,38, e = 0,65±0,40) озеро классифицировалось как эвтрофное. Совокупность полученных данных неоднородная (CV = 61–72%).

Таким образом, видовое разнообразие летнего планктона в водоеме-охладителе выше, по сравнению с таковым в пруде испарителе.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ИПРЭК СО РАН № 121032200070-2.

Литература

Балушкина Е.Б., Винберг Г.Г. Зависимость между массой и длиной тела у планктонных животных // Общие основы изучения водных экосистем. Л.: Наука, 1979. С. 169-172.

Киселев И.А. Планктон морей и континентальных водоемов. Л.: Наука, 1969. Т. 1. 658 с.

Мэгарран Э. Экологическое разнообразие и его измерение. М.: Мир, 1992. 198 с.

Плохинский Н. А. Биометрия. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1961. 364 с.

Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» М., 2021. 555 с.

Садчиков А.П. Методы изучения пресноводного фитопланктона. М.: «Университет и школа», 2003. 157 с.

Токарева О.Ю. Комплексный анализ изменения состояния водоема-охладителя ТЭС и возможные пути его восстановления (на примере озера в г. Чите). Дисс. … канд. техн. наук. Чита, ЧитГУ, 2004. 127 с.

Чечель А.П., Цыганок В.И. Физико-географические условия и уровенный режим оз. Кенон // Экология городского водоема. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. С. 5-13.

Чуйков Ю.С. Трофическая структура сообществ зоопланктона: история и некоторые итоги изучения // Астраханский вестник экологического образования. 2018. № 3. С. 175-185.

Ruttner-Kolisko A. Suggestions for biomass calculation of plankton rotifers // Archiv für Hydrobiologie Beihefte Ergebnisse der Limnologie. 1977. Bd. 8. S. 71-76.

PHYTOPLANKTON AND ZOOPLANKTON COMMUNITIES OF NATURAL-TECHNOGENIC RESERVOIRS

N.A. Tashlykova, E.Yu. Afonina

The purpose of this paper is to study the current composition and structure of planktonic communities in natural and man-made reservoirs (Lake Kenon as cooling reservoir and Lake Umykeyskoye as a storage-evaporator pond). The species composition of summer plankton included 55 phytoplankton species and 24 of zooplankton species in the Kenon Lake while 20 species and 12 species respectively in the Lake Umykeiskoe. The quantitative indicators varied widely. The phytoplankton dominating complex of the two lakes differed while zooplankton complex was characterized by a similarity in composition. The cooling reservoir was dominated by diatoms and green algae, while the storage-evaporation pond was dominated by cyanobacteria. In zooplankton rotifers *Keratella quadrata* and crustaceans *Daphnia curvirostris* и *Daphnia galeata*, *Neutdodiaptomus incongruens* и *Arctodiaptomus bacillifer, Cyclops vicinus, Mesocyclops leuckarti* dominated in both lakes.

СОСТОЯНИЕ РЫБНОЙ ЧАСТИ СООБЩЕСТВ АНТРОПОГЕННО-ПРЕОБРАЗОВАННЫХ ВОДОЕМОВ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

П.М. Терентьев, Е.М. Зубова, И.М. Королева, Н.А. Кашулин
Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН

Изучение состояния фауны рыб антропогенно преобразованных водных экосистем Севера представляет актуальную научную задачу с точки зрения выявления особенностей функционирования сообществ, развития системы мониторинга водных экосистем в особенности в условиях изменений климата и реализации экологической политики промышленных предприятий – крупнейших представителей горнорудной и горнодобывающей отраслей. В работе приведены результаты оценки состояния рыбной части сообществ одного из крупнейших водоемов Мурманской области в условиях длительной нагрузки предприятия цветной металлургии, развитие которого в настоящее время возможно по пути восстановления.

Спецификой Мурманской области является значительный уровень индустриализации территории. Закономерно наибольшее воздействие в экологическом смысле характерно для водных экосистем, расположенных в непосредственной близости от промышленных объектов, приуроченных к основным промышленно развитым агломерациям региона. Индикаторная роль гидробионтов при оценке качества вот трансформированных водоемов и, в частности, рыб широко известна. Однако было отмечено, что, несмотря на высокие требования к качеству вод, рыбы достаточно устойчивы к влиянию разного рода загрязнений, имеющих долговременный характер (Gashkina et al., 2022). Ранее нами было показано, что функционирование рыбных сообществ возможно в антропогенно преобразованных водоемах Севера. Причем даже в условиях высокой токсичности тяжелых металлов и кислотообразующих соединений, сиговые рыбы на фоне серьезных трансформаций на организменном уровне, сохраняли стабильную численность за счет механизмов раннего созревания (Кашулин и др., 1999). Успешное развитие и воспроизводство представителей лососевых видов регистрировалось в водных объектах подверженных влиянию предприятий цветной металлургии и апатитового производства (Терентьев и Кашулин, 2012; Кашулин и др., 2012; Kashulin et al., 2011). Также в последнее десятилетие в структуре рыбной части сообщества отмечаются изменения, связанные с трансформацией структуры рыбной части сообществ и переходом доминирующих комплексов видов от типичных и более ценных лососевых к видам, представляющим меньшую экологическую и ихтиологическую ценность (Терентьев и др., 2017).

Одной из современных тенденций промышленного сектора РФ и, в частности, Мурманской области, является реализация более эффективной экологической политики, модернизация производственных процессов, в целом направленная на снижение негативного воздействия на экосистемы. В условиях снижения нагрузки, могут создаваться предпосылки к восстановлению состояния водных экосистем и их переходу на новый уровень функционирования (Моисеенко и др., 2009). Одним из примеров подобной практики является одна из площадок Кольской горно-металлургической компании в п. Никель. Изучение состояния рыбной части сообществ водоемов в районе недропользования АО «Кольская ГМК» (площадка Заполярный, Никель) ведется на протяжении длительного периода. Основное внимание исследований ранее уделялось оз. Куэтсъярви, отдельным водохранилищам р. Паз и водоемам приграничного района России. Полученные в ходе многолетних исследований материалы о состоянии ихтиофауны, как одного из компонентов комплексного методологического подхода при

оценке качества поверхностных вод, имеют важнейшее значение при выявлении негативных последствий антропогенного воздействия на биоту. Озеро Куэтсъярви на крайнем северо-западе РФ Мурманской области является примером арктического водоема, которое на современном этапе своего функционирования идет по пути восстановления, обусловленного значительным снижением уровня антропогенной нагрузки. В этой связи, изучение состояния водоема по пути восстановления на примере рыбной части сообщества представляет актуальную научную задачу. Ранее на протяжении длительного периода озеро находилось под воздействием многофакторного влияния бытового и промышленного загрязнения, включая органическую составляющую. Последствия многофакторного влияния водоема сказывались на состоянии биоты и, в частности, на представителях фауны рыб. Развитие патологических трансформаций внутренних органов рыб отражало доза-зависимый характер нагрузки тяжелых металлов на экосистему, что также подтверждалось оценкой уровня накопления загрязняющих веществ и в донных отложениях (рис. 1).

Изучению состояния рыбной части сообществ водоема посвящено значительно количество работ, в которых оценивалось состояние представителей фауны рыб от клеточного уровня до уровня сообществ (Денисов и др., 2009; Зубова и др., 2019; Кашулин и др., 1999; Amundsen et al., 2011; Kashulin et al., 2011). Изменения на уровне тканей и органов и выражались в развитии трансформаций костной и мышечной ткани, кожных покровов, выделительной системы, органов дыхания и воспроизводства.

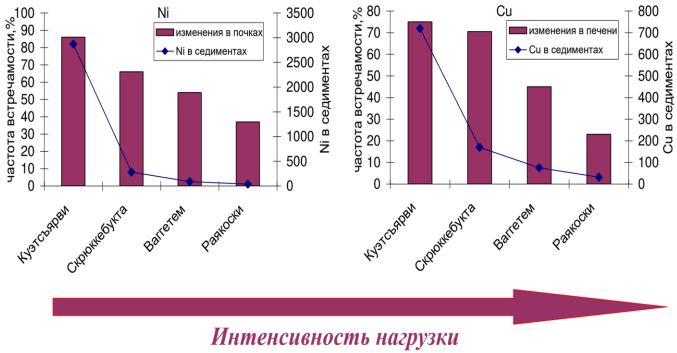


Рис. 1. Зависимость встречаемости патологий почек и печени сига и накопления Cu и Ni в седиментах озер от интенсивности антропогенной нагрузки

В ходе исследований в рамках Большой научной экспедиции (с 2022 г.), организованной компанией «Норникель», совместно с Сибирским отделением РАН, направленной на углубленное изучение биоразнообразия в пределах зоны влиянии объектов компании, получены результаты, характеризующие положительную направленность реализуемой экологической политики предприятия на функционирование экосистемы оз. Куэтсъярви. С момента прекращения работы никелевого цеха (п. Никель Печенгского района), а также снижения влияния бытового сектора с 2020 г., наметились предпосылки к улучшению состояния в структуре рыбной части сообщества. В частности, значительно сократилась встречаемость рыб с ранее отмечаемыми изменениями, отмечена тенденция к росту размерных показателей отдельных видов рыб.

В то же время, на фоне отмечаемых процессов, немаловажным аспектом современного уровня антропогенной нагрузки на водоем является количественная оценка накопления загрязняющих веществ в организмах рыб. В ходе анализа было показано, что на современном этапе уровни накопления меди и никеля в органах и тканях сига (мт – малотычинковый; ст - среднетычинковый) окуня и щуки сохраняются на достаточно высоком уровне. Общей тенденцией является снижение содержания Cu и Ni в жабрах рыб и относительно стабильные показатели накопления металлов в мышечной ткани, в то время как в печени и почках направленность к росту содержания загрязняющих веществ сохраняется (рис. 2).

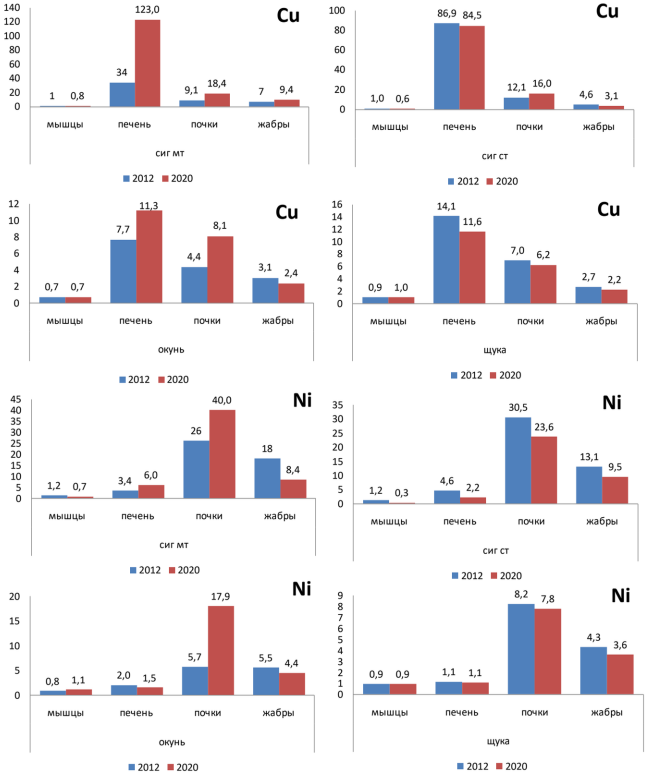


Рис. 2. Сравнительные показатели накопления Cu и Ni в органах рыб оз. Куэтсъярви, мкг/г сухого веса

Кроме того, наметившиеся в последнее десятилетие для водоемов Арктики влияние процессов изменения климата на фоне сохраняющейся нагрузки биогенными элементами, обусловливающей интенсификацию эвтрофирования пресных вод, способно отражаться на процессах преобразования в структуре сообществ рыбной фауны. Состав рыбной части сообщества водоемов исследованного района относительно беден. Закономерно более высокое видовое разнообразие характерно для крупных озер и озерных расширений (водохранилищ) в составе р. Паз. В целом в составе ихтиофауны водных объектов рассматриваемого района может отмечаться 12 видов, относящихся к

6 семействам и 10 родам. Для рыбной части сообщества оз. Куэтсъярви была отмечена возрастающая роль представителей окуневых, как более теплолюбивых видов, приспособленных к водам с широким диапазоном по шкале трофического статуса, конкурирующих с традиционно доминирующими представителями арктических пресноводных комплексов – лососевых и сиговых рыб (рис. 3).

Полученные результаты хорошо согласуются с ранее отмечаемыми данными, в ходе совместного исследовательского проекта России Норвегии и Финляндии по изучению водоемов Северной Фенноскандии за последние 30 лет. Было показано, что доля окуня в исследуемых озерах за оцениваемый период возросла до 70% (с 10%). Одним из ключевых факторов подобного явления, очевидно, является температурный фактор (Smalas et al., 2023). Развитие рыбной части сообществ арктических озер идет по пути о вытеснения более холодолюбивых рыб (сиговых) на фоне более выгодных условий для развития окуневых. В северных водах в условиях климатических изменений большая скорость роста окуня приводит к большим размерам и, как следствие раннему половому созреванию. Оба этих фактора повышают выживаемость особей и способствуют увеличению их численности.

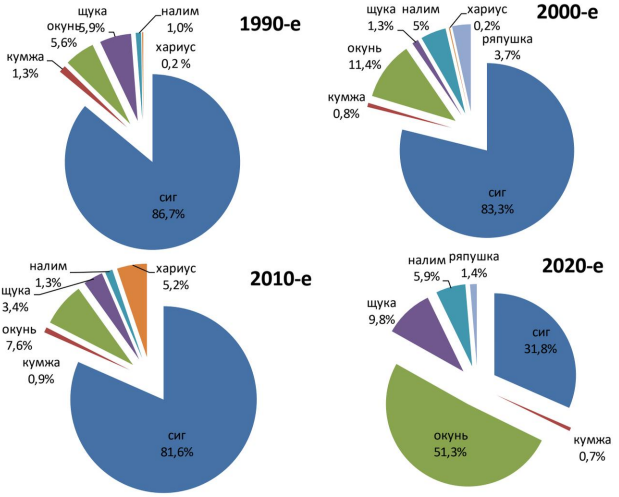


Рис. 3. Динамика соотношения видов в уловах оз. Куэтсъярви за различные периоды исследований

Литература

Денисов Д.Б., Кашулин Н.А., Терентьев П.М., Валькова С.А. Современные тенденции изменения биоты пресноводных экосистем Мурманской области // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12. №3. С. 525-538.

Зубова Е.М., Кашулин Н.А., Терентьев П.М. Биотическая симпатрия сига *Coregonus lavaretus* (L.) оз. Куэтсъярви (система р. Пасвик, Мурманская область) // Принципы экологии. 2019. №2. С. 29–51.

Кашулин Н.А., Денисов Д.Б., Валькова С.А., Вандыш О.И., Терентьев П.М. Современные тенденции изменений пресноводных экосистем Евро-Арктического региона // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. Вып. 1. С. 6-53.

Кашулин Н.А., Лукин А.А., Амундсен П.-А. Рыбы пресноводных вод Субарктики как биоиндикаторы техногенного загрязнения. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1999. 277 с.

Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А., Шаров А.Н., Вандыш О.И., Кудрявцева Л.П. Антропогенная трансформация арктической экосистемы озера Имандра: тенденции к востановлению после длительного периода загрязнения // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. №3. С. 312-325.

Терентьев П.М., Кашулин Н.А. Трансформации рыбной части сообществ водоемов Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. Вып. 2. С. 61-100.

Терентьев П.М., Кашулин Н.А., Зубова Е.М. Роль европейской корюшки *Osmerus eperlanus* (Linnaeus) в структуре ихтиофауны бассейна оз. Имандра (Мурманская область) // Труды ЗИН. 2017. Т. 321. №2. С. 228-243.

Amundsen P-A., Kashulin N.A., Terentjev P.M., Gjelland K., Koroleva I.M., Dauvalter V.A., Sandimirov S.S., Kashulin A.N., Knudsen R. Heavy metal contents in whitefish (*Coregonus lavaretus*) along a pollution gradient in a subarctic watercourse // Environmental Monitoring and Assessment. 2011. V. 182. P. 301-316.

Gashkina N.A., Moiseenko T.I., Shuman L.A., Koroleva I.M. The role of trace elements in the adaptation of fish metabolism under reduced pollution: a case study of the subarctic lake Imandra. Geochemistry International. 2022. V. 60. №2. P. 154–169.

Kashulin N.A., Terentyev P.M., Amundsen P.-A., Dauvalter V.A., Sandimirov S.S., Kashulin A. N. Specific features of accumulation of Cu, Ni, Zn, Cd, and Hg in two whitefish *Coregonus lavaretus* (L.) morphs inhabiting the Inari–Pasvik lacustrine–riverine system // Inland water biology. 2011. V. 4. №3. P. 383-392.

Smalas A., Primicerio R., Kahilainen K.K., Terentyev P.M., Kashulin N.A., Zubova E.M., Amundsen P-A. Increased importance of cool-water fish at high latitudes emerges from individual-level responses to warming // Ecology and Evolution. 2023. V.13 (6). P. 1-11.

STATE OF THE FISH COMMUNITIES OF ANTHROPOGENICALLY TRANSFORMED WATER BODIES OF THE MURMANSK REGION

P.M. Terentjev, E.M. Zubova, I.M. Koroleva, N.A. Kashulin

The investigation of fish fauna status in anthropogenically transformed aquatic ecosystems of the North is an actual scientific task from the point of view of identifying biological features of the functioning of biological communities, developing a system for monitoring aquatic ecosystems, especially in the context of climate change, and implementing the environmental policy of industrial enterprises - the largest representatives of the mining and extractive industries. This paper presents the results of assessing the state of the fish part of communities in one of the largest reservoirs in the Murmansk region under the long-term load of a non-ferrous metallurgy enterprise, the development of which is currently possible through restoration.

МАКРОФАУНА БЕСПОЗВОНОЧНЫХ МАЛЫХ ВОДОЕМОВ УЧАСТКА ОСТРОВЦОВСКАЯ ЛЕСОСТЕПЬ ЗАПОВЕДНИКА ПРИВОЛЖСКАЯ ЛЕСОСТЕПЬ

А.А. Тимофеева

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Сообщества пресноводных беспозвоночных являются ключевым компонентом функционирования водных экосистем. Анализ видового богатства макробеспозвоночных различных типов водоемов необходим для рационального водопользования. Одним из ключевых факторов, влияющим на видовой состав макрофауны беспозвоночных является средопреобразующая деятельность евроазитского бобра (*Castor fiber* Linnaeus, 1758). В июле 2024 года было обнаружено 45 видов беспозвоночных в водоемах каскада бобровых прудов и малом пойменном водоеме, не затронутым деятельностью бобров. Фауна макробеспозвоночных малого пойменного водоема и фауна бобровых прудов обладают низким фаунистическим сходством по индексу Жаккара.

Восстановление популяции евроазиатского бобра (*Castor fiber* Linnaeus, 1758) на территории Европейской части России происходило за счет реинтродукции и последующего саморасселения со второй половины XX века (Данилов, 2009). Успешное возвращение этого вида в места его исторического обитания, многие из которых за прошедшие десятилетия претерпели значительные изменения под влиянием как климатических факторов, так и интенсивной антропогенной деятельности, приводит к тому, что бобры испытывают нехватку местообитаний и вынуждены заселять малые водоемы и водотоки даже на остепненных территориях (Осипов и др., 2017).

Будучи ключевым видом, евроазиатский бобр оказывает значительное воздействие на гидрологию и рельеф малых водоемов. Его активная деятельность, включающая рытье нор и каналов, способствует углублению малых водоемов. Также бобровые плотины перегораживают малые водотоки, превращая их в так называемые каскады бобровых прудов (Завьялов, 2015).

Накопление значительных объемов органического вещества в русле реки и препятствование его естественному выносу из бассейна – еще одно последствие строительства плотин. Замедление скорости течения воды в условиях повышенной концентрации аллохтонной органики приводит к дефициту растворенного кислорода. Это, в свою очередь, вызывает глубокие изменения в структуре и функционировании биоценоза малого водоема (Башинский, Осипов, 2019).

Целью данного исследования является изучение влияния евроазитского бобра как ключевого вида на экосистемы малых водоемов и на видовой состав макрофауны беспозвоночных. Макрофауна беспозвоночных реки Южная (приток реки Хопер) и прилежащих водоемов в условиях зоогенного воздействия изучена недостаточно и в связи с сукцессионными процессами, происходящими в бобровых прудах, данные по видовому составу макрозообентоса требуют актуализации.

Исследование проводили на участке Островцовская лесостепь заповедника Приволжская лесостепь, в Пензенской области. Участок не изобилует водными ресурсами. Протекают 2 малые реки: Селимутка и Южная, на прилегающих территориях имеется несколько искусственных и малых пойменных водоемов. Река Южная значительно зарегулирована бобрами и представляет собой каскад бобровых прудов (Bashinskiy, Osipov, 2018).

Для исследования были выбраны 7 бобровых прудов на реке Южная и не затронутый деятельностью бобров малый пойменный водоем «Старица Круглая». В начале июля 2024 года были отобраны пробы макрозообентоса на 8 станциях. Пробы отбирали гидробиологическим сачком, сборы осуществляли кошением по донной поверхности и зарослям макрофитов, так же ручным методом с камней и затонувших веток.

Макрофауна беспозвоночных была представлена 3 таксономическими группами водных беспозвоночных, включающих 45 видов и форм, не определенных до вида. Данные о видовом составе представлены ниже, в таблице 1.

В комплексе гидробионтов, населяющих исследованные водоемы насекомые включают представителей 8 отрядов: Hemiptera (5 видов), Trichoptera (8 видов), Odonata (4 вида), Diptera (3 вида), Coleoptera (5 видов), Ephemeroptera (2 вида), Lepidoptera (1 вид), и являются преобладающей группой.

Наиболее широко распространенными видами макрофауны беспозвоночных были *Notonecta glauca* Linnaeus, 1758*, Lymnaea stagnalis* Linnaeus, 1758 и *Chironomus plumosus* Linnaeus, 1758, встречающиеся в большинстве исследуемых водоемов.

По видовому составу самой обильной была фауна бобрового пруда Ю12, включающая 13 видов, самой бедной по видовому составу была фауна бобрового пруда Ю8, включающая 3 вида. Среднее количество видов, встречающихся в каскаде бобровых прудов на р. Южная составляет 8 видов.

Таблица 1. Список видов и форм, не определенных до вида, обнаруженных в каскаде бобровых прудов на р. Южная и в малом пойменном водоеме Старица Круглая в июле 2024 года

	Бобровые пруды							Старица
	Ю7	Ю8	Ю9	Ю10	Ю11	Ю12	Ю13	Круглая
Subclass Insecta								
Order Hemiptera								
Notonecta glauca		+		+			+	+
Plea minutissima				+			+	
Corixa dentipes	+			+				
Ilyocoris cimicoides	+							+
Ranatra linearis								+
Order Trichoptera:								
Glyphotaelius pellucidus							+	
Limnephilus rhombicus	+							
Limnephilus stigma	+			+			+	
Limnephilus flavicornis								
Limnephilus sp.						+		
Anabolia furcata						+		
Rhyacophilius nubila			+					
Polycenthropus irroratus				+				
Order Odonata								
Leucorhinia caudalis							+	
Leucorhinia pectoralis				+	+			
Somatochlora metallica						+		
Epitheca sp.								
Order Diptera	+							
Dixella sp.						+		
Chironomus plumosus	+	+		+		+		+
Tabanus bovinus.	+							
Order Coleoptera								
Dytiscus sp. 1						+		
Dytiscus sp. 2						+		
Dytiscus sp. 3								+
Aphelocerus aestivatus			+			+		
Hyphidrus ovatus			+					+
Order Ephemeroptera								
Heptagenia flava								
Baetis cloen	+					+		
Order Lepidoptera								
Cataclysta lemnata	+							
Phylum Molluska								
Class Gastropoda								

	Бобровые пруды							Старица
	Ю7	Ю8	Ю9	Ю10	Ю11	Ю12	Ю13	Круглая
Family Lymnaeidae								
Lymnaea stagnalis		+	+			+		+
Lymnaea truncatula					+			
Family Planorbidae								
Planorbarius corneus						+	+	+
Planorbis planorbis					+			+
Anisus vortex			+				+	+
Anisus contortus								+
Family Physidae								
Physa fontinalis			+				+	
Physella acuta					+			
Aplexa hypnorum								+
Family Viviparidae								
Viviparus viviparus			+			+		
Family Bithynidae								
Bithynia leachii				+				
Class Bivalvia								
Family Sphaeridae								
Sphaerium nitidum						+		
Sphaerium corneum			+					
Euglesa sp.			+	+	+			
Subclass Girudinea								
Family Erpobdellidae								
Erpobdella octoculata				+				
Family Glossiphonidae								
Helobdella stagnalis			+	+				

Фауна малого пойменного водоема Старица Круглая включает 12 видов, также в этом водоеме обнаружено 3 вида, не встречающиеся в реке Южная.

Для оценки сходства видового состава макрофауны беспозвоночных бобровых прудов на р. Южная и макрофауны беспозвоночных малого пойменного водоема Старица Круглая использовали индекс общности Жаккара (табл. 2).

Таблица 2. Значения индекса Жаккара для макрофауны беспозвоночных бобровых прудов и макрофауны беспозвоночных малого пойменного водоема

	Ю7	Ю8	Ю9	Ю10	Ю11	Ю12	Ю13
Старица Круглая	0,09	0,25	0,15	0,095	0,06	0,13	0,17

В целом, все значения индекса меньше 0,5, что может говорить о низком уровне фвунистического сходства макрофауны бобровых прудов на реке Южная и макрофауны малого пойменного водоема Старица Круглая.

Фауна макробеспозвоночных исследованных водоемов представлена обычными видами, широко распространенными в водоемах лесостепной зоны и суммарный список видов макрозообентоса включает 45 таксонов.

В целом макрофауна беспозвоночных малого пойменного водоема и макрофауна бобровых прудов отличается низким уровнем фаунистического сходства. Это может говорить о сукцессионных процессах, протекающих в бобровых прудах и влияющих на видовое разнообразие макрофауны беспозвоночных.

Литература

Башинский И.В., Осипов В.В. Скорость осаждения и химический состав взвешенного вещества в бобровых водоемах на территории заповедника «Приволжская лесостепь» (европейская Россия) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2019. №3. С. 54-66.

Данилов П. И. Новые виды млекопитающих на европейском Севере России: монография. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. 308 с.

Осипов В.В., Башинский И.В., Подшивалина В.Н. О влиянии деятельности речного бобра-*Castor fiber* (Castoridae, Mammalia) на биоразнообразие экосистем малых рек лесостепной зоны // Поволжский экологический журнал. 2017. №1. С. 69-83.

Bashinskiy I.V., Osipov V.V. Distribution and dynamic of *Castor fiber* (Castoridae, Mammalia) population in forest-steppe rivers: a case of the State Nature Reserve Privolzhskaya Lesostep', Penza region, European Russia // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2018. V. 3 (Suppl. 2). P. 110–115.

MACROINVERTEBRATE FAUNA OF SMALL WATER BODIES IN THE OSTROVTSOVSKAYA FOREST-STEPPE AREA OF THE PRIVOLZHSKAYA FOREST-STEPPE NATURE RESERVE

A.A. Timofeeva

Freshwater invertebrate communities are an important component of aquatic ecosystem functioning. Analysis of macroinvertebrate species richness in various water body types is necessary for rational water management. One key factor influencing invertebrate macrofauna species composition is the ecosystem engineering activity of the Eurasian beaver (*Castor fiber* Linnaeus, 1758). In July 2024, 45 invertebrate species were found in water bodies within a beaver pond cascade and a small floodplain pond unaffected by beaver activity. The macroinvertebrate fauna of the small floodplain pond and the beaver ponds exhibited low faunal similarity according to the Jaccard index.

ПЛАНКТОННЫЕ МИКРОРАКООБРАЗНЫЕ (CLADOCERA И COPEPODA) МАЛЫХ ОЗЕР ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ПЛАТО ПУТОРАНА (КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ, РОССИЯ)

М.А. Трухан[1], Е.С. Чертопруд[1,2], П.Г. Гарибян[2]

[1] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

[2] Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН

Микроракообразные малых озер плато Путорана изучены фрагментарно. В частности, исследования пресноводной фауны в районе озера Собачье ранее не проводили. В материалах, собранных в данном районе западной части плато, было идентифицировано 20 видов Cladocera и 25 – Copepoda. Список видов, известных с плато Путорана, расширен на 7% от общего видового богатства. Видовой состав и численные характеристики зоопланктона низкогорных (90 м н.у.м.) и высокогорных (1000 м н.у.м.) озер статистически значимо различались между собой. Кривые накопления видов показали, что фауна высокогорных биотопов выявлена в меньшей степени, чем низкогорных. Отличия видовых комплексов микроракообразных разных районов плато Путорана объясняются действием комплексов географических, гидрологических и гидрохимических факторов среды.

Плато Путорана представляет собой сильно рассеченный горный массив, лежащий на северо-западе Красноярского края (рис. 1а). Этот географический район отличается большим количеством как мелких водоемов, так и крупных озер, лежащих в глубоких долинах (Михайлов, 1947). Ветвистоусые (Cladocera) и веслоногие (Copepoda) ракообразные благодаря своему повсеместному распространению во многом определяют облик сообществ зоопланктона и мейобентоса пресноводных водоемов (Алексеев, Цалолихин, 2010). Несмотря на холодный субарктический климат, разнообразие водной фауны плато Путорана является одним из наиболее высоких среди регионов Евразийской субарктики (Fefilova et al., 2021). На сегодняшний день состав водных беспозвоночных плато Путорана изучен далеко неполно во многом по причине труднодоступности этого региона. К моменту данного исследования было известно 62 вида Cladocera и 63 вида Copepoda (Chertoprud et al., 2022).

Цель исследования – определить видовой состав и особенности высотного распределения микроракообразных (Cladocera и Copepoda) малых водоемов окресностей озера Собачье (западная часть плато Путорана), а также выявить факторы среды, имеющие ключевое влияние на формирование их видовых комплексов.

Пробы зоопланктона были собраны в июле 2024 г. в ходе экспедиции на озеро Собачье в охранной зоне ГПЗ «Путоранский». Всего была отобрана 31 количественная проба из малых озер двух районов: низкогорные болотистые лесотундры (90 м н.у.м.) у истока реки Муксун; высокогорные полярные тундры (1000 м н.у.м.) около озера Бунисяк (рис. 1б). Сбор зоопланктона производили сетью Апштейна (диаметр 18 см, ячея 50 мкм), протаскивая ее горизонтально через толщу воды. Пробы фиксировали 96%-ным этанолом. Помимо этого, для каждого водоема проводили его общее гидрологическое описание и измеряли базовые гидрохимические параметры (t˚, pH, минерализацию). Предварительную идентификацию и подсчет видов ракообразных проводили в камерах Богорова, а точное определение до вида – под микроскопом Olympus CX-41 (Olympus Medical Systems Corporation, Япония).

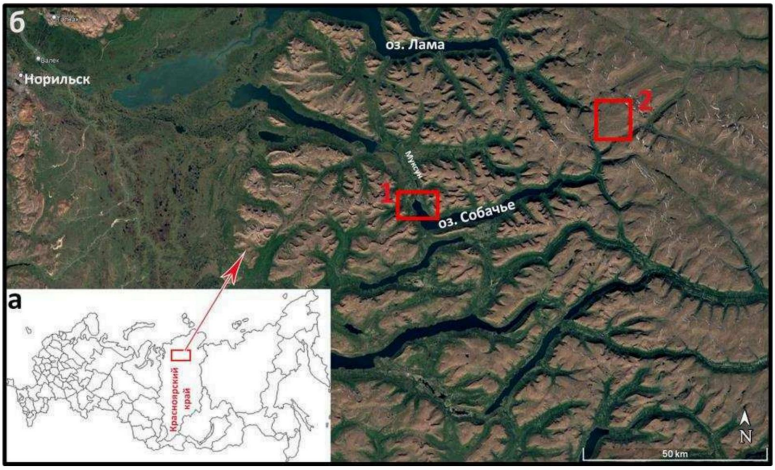


Рис. 1. Район исследований: а – положение плато Путорана на карте России; б – районы сбора материала в окрестностях озера Собачье (1 – исток реки Муксун; 2 – окрестности озера Бунисяк)

Для сравнения видовых комплексов в качестве меры сходства применен индекс Брея-Кертиса). Кривые видового накопления строили в программе PAST (Mao's tau rarefaction). Для оценки влияния факторов окружающей среды на сообщества ракообразных использовали линейную модель на основе расстояний (DistLM) в программе PRIMER7.

Было идентифицировано 45 видов микроракообразных: 20 – Cladocera и 25 – Copepoda. Среди них 8 видов были отмечены впервые для плато Путорана: *Cyclops* cf. *furcifer* Claus, 1857, *Diacyclops crassicaudis crassicaudis* (Sars G.O., 1863), *Diacyclops* sp., *Megacyclops magnus* (Marsh, 1920), *M. gigas gigas* (Claus, 1857), *Mesocyclops leuckarti arakhlensis* Alekseev, 1993, *Microcyclops varicans varicans* (Sars G.O., 1863) и *Eucyclops (Speratocyclops) sibiricus* (Novikov, 2025). Кроме того, был обнаружен один новый для науки вид из отряда Calanoida (Copepoda): *Mixodiaptomus* sp. nov. С таксономической точки зрения интерес представляет обнаруженный подвид *M. leuckarti arakhlensis*, который по результатам экспериментов по гибридизации сейчас предполагают выделить в отдельный вид *M. arakhlensis* (Alekseev, 2021). Кроме того, интересна находка на плато Путорана *E. (S.) sibiricus*, описанного в 2025 году с территории Средней Сибири: дельты реки Лена, Центральной Якутии, Иркутской области, плато Путорана и Анабарского плато (Novikov et al., 2025). В плане экологии интересна находка вида *Macrocyclops albidus albidus* (Jurine, 1820) в низкогорных хорошо прогретых озерах, поскольку этот вид достаточно теплолюбив и характерен для умеренных широт России (Marten, 1994).

Кривые накопления видов для высокогорного (рис. 2а) и низкогорного (рис. 2б) районов не приближаются к асимптоте, что говорит о недоизученности фауны этих двух районов в данном исследовании.

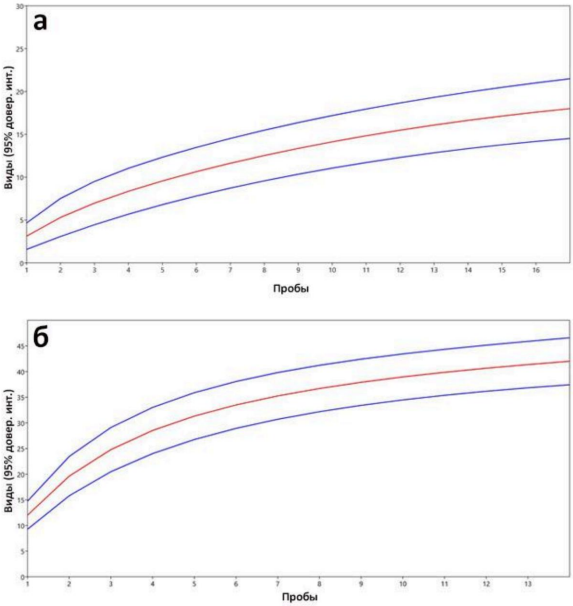


Рис. 2. Кривые накопления видов: а – для района высокогорья (окрестности озера Бунисяк); б – для района низкогорья (исток реки Муксун). Синие линии – 95% доверительные интервалы

Характер накопления новых видов в высокогорных озерах достаточно равномерный, в то время как первые 3-4 пробы низкогорных озер показывают скачкообразное накопление. При этом видно, что угол наклона первой кривой (рис. 2а) по отношению к оси абсцисс больше, чем у второй кривой (рис. 2б), что указывает на больший потенциал накопления новых видов в высокогорных биотопах, чем в низкогорных. Данный факт может объясняться запаздыванием развития микроракообразных в высокогорных озерах. Например, Copepoda в водоемах окрестностей озера Бунисяк были представлены преимущественно копеподитными (ювенильными) стадиями, которые невозможно идентифицировать до вида. Отношение количества таких незрелых особей к общей численности планктона в пробе в высокогорье в среднем составляло 53%. Подобная ситуация объясняется как затяжной весной 2024 года и поздним оттаиванием озер, так и в общем холодным климатом высокогорий, где развитие ракообразных проходит медленнее.

Высокогорные водоемы статистически значимо отличались по видовому и количественному составу зоопланктона от низкогорных ($p<<0,05$, $R=0,6164$). Пробы, собранные в районе низкогорья, имели значительно большее видовое разнообразие (всего 44 вида микроракообразных) по сравнению с пробами из высокогорного района (всего 24 вида). Кроме того, средняя общая численность зоопланктона была почти в 70 раз выше в низкогорных озерах. Так, средняя плотность зоопланктона в малых озерах у истока реки Муксун составила 6994 экз./м^3, а в высокогорных озерах у озера Бунисяк – всего 102 экз./м^3. Такие значительные отличия объясняет комплекс факторов среды: географических (изолированность районов пробоотбора), гидрологических (степень проточности и тип грунта), гидрохимических (кислотность (pH) и общая минерализация) и температуры, а также состав макрофитов. В результате анализа DistLM выделены ключевые из этих факторов, определяющие распределение таксоценов.

В рамках проведенного исследования был увеличен список видов микроракообразных, ранее известных с территории плато Путорана. Ожидается, что новые исследования этого горного массива приведут к значительному числу находок видов, новых как для плато, так и для науки. Это предположение основано на разнообразии биотопов плато, а также на том факте, что эта территория была мало затронута последним оледенением, что указывает на возможность сохранения здесь реликтовых видов (Вершинин, 1960). Выявлены ключевые тренды высотного распределения интегральных характеристик видовых комплексов зоопланктона малых озер плато Путорана, а также основные факторы, влияющие на их изменчивость. В дальнейших исследованиях планируется расширить спектр районов полевых работ, провести биогеографических анализ пресноводной фауны региона, в рамках которого сравнить видовые списки микроракообразных плато Путорана с регионами Сибири, Дальнего Востока и севера Восточно-Европейской равнины.

Авторы благодарят сотрудников ФГБУ «Объединенной дирекции Заповедников Таймыра», а также М.Г. Бондаря за помощь в организации полевых работ.

Исследование поддержано грантом РНФ № 23-24-00054.

Литература

Вершинин Н.В. К вопросу о происхождении реликтовой фауны в Норильской группе озер // Доклады АН СССР. 1960. №3. С. 753-755.

Михайлов Н.И. Геоморфологические наблюдения в западной части гор Путорана // Вопросы географии. 1947. №3. С. 7-26.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России / под ред. В.Р. Алексеева, С.Я. Цалолихина. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2010. Т. 1. 494 с.

Alekseev V.R. Revision of the Genus *Mesocyclops* Sars 1914 (Copepoda, Cyclopidae) of the World Fauna // Biology Bulletin. 2021. V. 48. P. 1210-1230.

Marten G.G., Bordes E.S., Nguyen M. Use of cyclopoid copepods for mosquito control // Ecology and Morphology of Copepods: Proceedings of the 5th International Conference on Copepoda. Springer Netherlands. 1994. P. 491-496.

PLANKTONIC MICROCRUSTACEANS (CLADOCERA AND COPEPODA) OF SMALL LAKES OF THE PUTORANA PLATEAU (KRASNOYARSK KRAI, RUSSIA)

M.A. Trukhan, E.S. Chertoprud, P.G. Garibyan

Microcrustaceans in small water bodies of the Putorana Plateau have been studied fragmentary. In particular, freshwater fauna in the region of Lake Sobachye has never been studied before. In the materials collected in this area of the western part of the plateau, 20 species of Cladocera and 25 species of Copepoda were identified. The species list known from the Putorana Plateau has been expanded by 7% of the total species richness. The species composition and numerical characteristics of zooplankton in mountain valley (90 m a.s.l.) and mountain (1000 m a.s.l.) lakes differed significantly. The species accumulation curves showed that the fauna of mountain biotopes was revealed to a lesser extent than mountain valley fauna. The differences between the taxocenes of microcrustaceans in different areas of the Putorana Plateau are explained by the complex influence of geographical, hydrological and hydrochemical environmental factors.

РАЗНООБРАЗИЕ ПЛАНКТОННЫХ ПРО- И МИКРОЭУКАРИОТ В ПОЙМЕННЫХ ВОДОЕМАХ Р. ВОЛГИ ВБЛИЗИ Г. САМАРА

М.В. Уманская[1], М.Ю. Горбунов[1], Е.С. Краснова[1], С.В. Быкова[1], Н.Г. Тарасова[1,2], О.В. Мухортова[1,2]

[1]Институт экологии Волжского бассейна РАН

[2]Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

Проведен анализ филогенетической структуры планктонного микробного сообщества восьми озер поймы р. Волга. В семи из них наблюдалось интенсивное цианобактериальное цветение с преобладанием Planktothrix agardhii. Среди прокариот доминировали различные OTE отряда Chthoniobacterales (Verrucomicrobiota), что является редким явлением в пресных континентальных водоемах. Среди протистов, в порядке убывания, в цветущих озерах доминировали инфузории, Cryptista и Ochrophyta, в нецветущем – Ochrophyta, динофлагелляты, криптофиты и Chlorophyta. На структуру микробного сообщества озер явно оказали влияние как экологические особенности района исследований, так и аномальные погодные условия в период отбора проб, однако степень влияния этих факторов невозможно оценить на основе однократного наблюдения.

Пойменные водоемы, несмотря на различие их генезиса, имеют многочисленные общие черты, связанные с их расположением в периодически или нерегулярно затопляемых участках с высокой наземной продуктивностью водосборов (Ferencz et al., 2023). В результате, они подвержены интенсивному заиливанию и естественной

эвтрофикации. В настоящее время, к этому добавляется и антропогенная эвтрофикация и токсификация, обусловленная ростом прилегающих поселений, а также происходящее глобальное изменение климата, вызывающее многосторонние долго- и кратковременные изменения как в экосистемах самих водоемов, так и в пределах их водосборных территорий.

Гидробиологическое обследование восьми пойменных водоемов р. Волга на территории Самарской области было проведено нами 2-4 июля 2024 г. Два из этих водоемов, оз. Шелехметское и Большое Островное, расположены в Рождественской пойме напротив г. Самара, на резком повороте течения Волги с восточного направления на западное. Шесть оставшихся принадлежат к участку поймы между устьями р. Самара и Безенчук, в пределах расположенной здесь системы проток и озер, связанной с руслами этих рек и р. Чапаевка.

Максимальные глубины в исследованных озерах не превышали 6 м, а прозрачность в большинстве не превышала 0,4 м. Озера сильно различаются по уровню минерализации (табл.). В период наших исследований в регионе наблюдались экстремально высокие температуры, достигшие, несмотря на смягчающее влияние крупной реки, 34-35 °С в тени. В результате, температура воды в поверхностном слое исследованных озер за несколько дней увеличилась с 25-26 до 27-33 °С. В эпилимнионе концентрация растворенного кислорода была очень высокой, а pH щелочным (табл.). Это не могло не оказать определенного влияния на состояние планктонных сообществ.

Концентрация хлорофилла *a* (Хл *a*) превышала 20 мкг/л во всех водоемах, за исключением оз. Березовое (табл.), что свидетельствует об интенсивном развитии фитопланктона, вплоть до «цветения» в них. По данным микроскопического анализа общая численность цианобактерий в исследованных водоемах составляла 2,0-3196 млн кл./л, эукариотических водорослей – 0,8-20 млн кл./л, гетеротрофного бактериопланктона – 4,5-22 млн кл./мл, планктонных инфузорий – 612-5830 инд./л, ракообразных – 70-286 инд./л и коловраток – 78-368 инд./л.

Таблица. Физико-химические условия и концентрация хлорофилла *a* в озерах

Озеро	Ильмень	Б. Ильмень	Лебяжье 1	Лебяжье 2	Березовое	Чапаевка	Шелехметское	Б. Островное
Дата	2.7.24	3.7.24	3.7.24	3.7.24	3.7.24	3.7.24	4.7.24	4.7.24
Температура, °С	27,39	26,71	29	32,69	28,97	31,93	29,51	32,64
pH	9,28	10,1	9,6	9,72	8,7	10,28	8,86	10,32
Электропроводность, µS/cm	2007	538	1197	349	525	1530	459	340
O_2, мг/л	23,36	19,43	17,71	11,95	8,82	20,08	12,93	18,44
Прозрачность, м	0,3	0,2	0,4	0,4	1	0,2	0,6	0,2
Хл *a*, мкг/л	109,7	218,9	96,3	94,1	3,1	419,1	26,0	145,2

Таксономический состав микробного планктонного сообщества был определен с помощью высокопроизводительного секвенирования в компании «Синтол» (Москва) на секвенаторе MiSeq (Illumina, США) с использованием праймеров для прокариот по (Walters et al., 2015) и для эукариот по (Hugert et al., 2014). Биоинформатическая обработка полученных данных проводилась с использованием программы Usearch 11.0.67 (Edgar, 2013) по стандартной схеме. Таксономическую принадлежность выделенных операционных таксономических единиц (OTE) определяли с

использованием баз данных SILVA SSU v. 138.2 и PR2 v. 4.14. (Quast et al., 2013, Guillou et al., 2013).

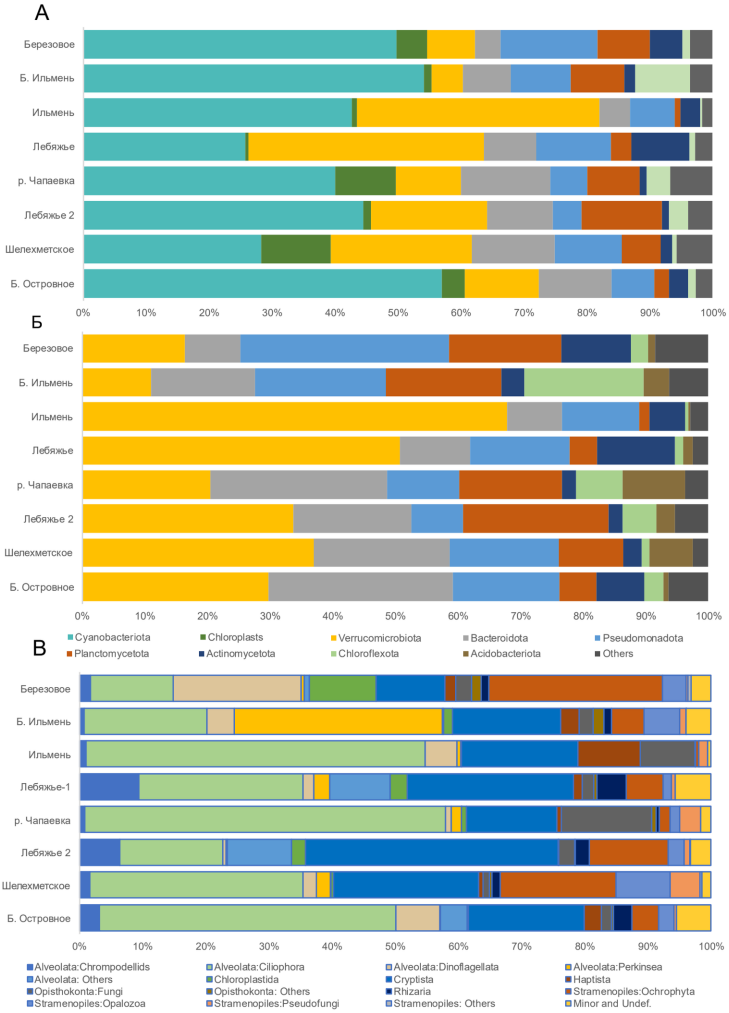


Рис 1. Структура планктонного сообщества исследованных водоемов по данным метабаркодинга. А: 16S рРНК, доли доминирующих филумов и хлоропластов эукариотических водорослей; Acidobacteriota включены в число «прочих» (Others); Б: только гетеротрофные филумы прокариот; гетеротрофные классы Cyanobacterota показаны в составе «прочих»; С: микроэукариоты, основные филогенетические группы, включая грибы (Fungi), но исключая Embryophyta и Metazoa

Как видно из рисунка 1А, во всех водоемах доминирующей или второй по численности ридов группой были цианобактерии; число их ридов значительно превышало число последовательностей, принадлежащих хлоропластам эукариотических водорослей даже в нецветущем оз. Березовое. Однако, если в нем преобладали представители Cyanobiaceae, то во всех остальных водоемах – типичные возбудители «цветения воды», в первую очередь, *Planktothrix agardhii*, и только в оз. Ильмень, наряду с ним – два представителя клады *Dolichospermum/Aphanizomenon*, *Aph. flos-aquae* и *Aph. gracile*.

Для бактериопланктона исследованных водоемов было характерно аномально высокое развитие Verrucomicrobia, и в первую очередь, Chthoniobacterales. В озерах Ильмень и Лебяжье доля Verrucomicrobia в гетеротрофном бактериопланктоне превышала 50%, в оз. Лебяжье 2 и р. Чапаевка, и в меньшей степени в озерах Березовое и Б. Ильмень их меньшая доля была отчасти скомпенсирована развитием другой группы PVC-суперфилума, Planctomycetota (рис.1Б). Как видно из рис. 2, преобладание Verrucomicrobia было связано с разными ОТЕ, а не только с доминирующим в библиотеке в целом POTU-7. Так, в оз. Ильмень, вторым по численности после POTU-7 был POTU-34, который в остальных озерах не достигал даже 0,1% суммарной численности; несколько представителей этого типа встречались в основном в оз. Лебяжье-2 и Б. Ильмень, а также р. Чапаевка (кластер II), и в гораздо меньшей степени развивались в остальных водоемах. Однако в кластере I, ассоциированном с нецветущим оз. Березовое, представители веррукомикробий отсутствовали, и их доля в бактериопланктоне этого озера была близка к типичным для пресных вод величинам.

Среди микроэукариот в цветущих водоемах преобладали Ciliophora и Cryptista, тогда как в нецветущем оз. Березовое – Ochrophyta и Dinoflagellata (рис. 1В). В общем, филогенетическая структура планктонных микроэукариот во всех озерах была близкой к типичной для пресных вод.

По составу доминирующих ОТЕ протистов (рис. 2) было выделено три крупных кластера, причем кластер I ассоциирован с нецветущим оз. Березовое, а два остальных – с цветущими водоемами. Среди доминантов только три ОТЕ: EOTU-1 Cryptomonas, EOTU-13 Sessilida (Hastatella) и EOTU-8 Hypotrichia (Halteria) интенсивно развивались во всех водоемах, прочие же были приурочены к одному или двум водоемам (рис. 2).

По составу доминирующего комплекса как гетеротрофных бактерий, так и микроэукариот, наиболее далеко отстоят от прочих водоемов озера Березовое (без цветения) и Шелехметское (с наименьшим уровнем цветения) (табл., рис. 2). Объединение прочих водоемов в группы по составу про- и эукариот заметно различается, но причины этого не ясны и требуют дальнейшего более углубленного изучения.

Окрестности г. Чапаевск, где расположены шесть из исследованных озер, в 1990 и 2000 гг. считались одной из самых промышленно загрязненных территорий Самарской области (Биоиндикация ..., 2007). С того времени экологическая обстановка несколько изменилась, однако, возможно, на необычный состав бактериопланктона влияет накопленное в донных осадках загрязнение. С другой стороны, повышенная доля Verrucomicrobiota обнаруживается и в двух озерах Рождественско-Шелехметской поймы, которые исследовались в августе 2023 г., и тогда состав гетеротрофных бактерий в них был близок к типичному (не показ.). Поэтому, возможно, влияние на него оказала «волна жары», с которой совпал период нашей экспедиции. Для решения этого вопроса, очевидно, необходимы дальнейшие наблюдения.

Таким образом, проведенное исследование позволило получить первые данные о таксономическом составе микробного планктонного сообщества пойменных водоемов р. Волга ниже г. Самара. К сожалению, из-за необычных погодно-климатических особенностей в период отбора остается неясным, насколько обнаруженная структура

сообщества типична для исследованных водоемов, или же отражает изменения, связанные с реакцией сообществ на аномально высокие температуры.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-14-20005, https://rscf.ru/project/23-14-20005/

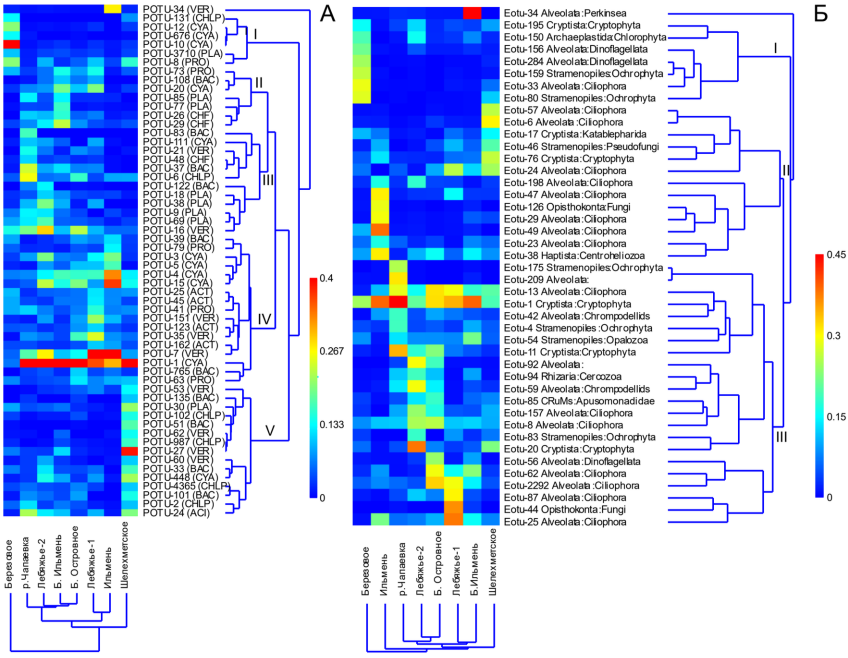


Рис. 2. Тепловые карты двумерной кластеризации sqrt-трансформированных относительных численностей доминирующих ОТЕ прокариот (А) и эукариот (Б). Алгоритм кластеризации – UPGMA, мера различия – хордовое расстояние (что соответствует расстоянию Хеллингера между станциями и хордовому расстоянию между ОТЕ). Основные кластеры ОТЕ обозначены римскими цифрами

Литература

Биоиндикация экологического состояния равнинных рек / Под ред. О.В. Бухарина, Г.С. Розенберга. М.: Наука, 2007. 403 с.

Edgar R.C. UPARSE: Highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads // Nature Methods. 2013. V.10. P. 996–998.

Ferencz B., Toporowska M., Dawidek J. Role of Hydrology in Cyanobacterial Blooms in the Floodplain Lakes // Water. 2023. V. 15. 1547.

Hugerth L.W., Muller E.E., Hu Y.O., Lebrun L.A., Roume H., Lundin D., Wilmes P., Andersson A.F. Systematic design of 18S rRNA gene primers for determining eukaryotic diversity in microbial consortia. // PloS one. 2014. V. 9, №4. e95567.

Quast C., Pruesse E., Yilmaz P., Gerken J., Schweer T., Yarza P., Peplies J., Glöckner F.O. The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools // Nucleic Acids Research. 2013. V. 41(D1). P. D590-D596.

Walters W., Hyde E.R., Berg-Lyons D., Ackermann G., Humphrey G., Parada A., Gilbert J.A., Jansson J.K., Caporaso J.G., Fuhrman J.A., Apprill A., Knight B. Improved bacterial 16S rRNA gene (V4 and V4-5) and fungal internal transcribed spacer marker gene primers for microbial community surveys // mSystems. 2015. V. 1, №1. e00009-15.

DIVERSITY OF PLANKTONIC PRO- AND MICROEUKARYOTES IN WATER BODIES OF VOLGA RIVER FLOODPLAIN NEAR SAMARA

M.V. Umanskaya, M.Yu. Gorbunov, E.S. Krasnova, S.V. Bykova, N.G. Tarasova, O.V. Mukhortova

The phylogenetic structure of the planktonic microbial community in eight lakes of the Volga River floodplain was analyzed. In seven lakes, intense cyanobacterial blooms dominated by *Planktothrix agardhii* were observed. Among prokaryotes, various OTUs of the order Chthoniobacterales (Verrucomicrobiota) exhibited strong dominance, which is a rare phenomenon in freshwater continental reservoirs. Among protists, ciliates, Cryptista, and Ochrophyta were predominant in lakes with cyanobacterial blooms, whereas lakes without blooms exhibited dominance of Ochrophyta, dinoflagellates, cryptophytes, and Chlorophyta. The microbial community structure in these lakes was clearly influenced by both the ecological characteristics of the study area and the abnormal weather conditions during sampling. However, the degree of influence of these factors cannot be accurately assessed based on a single observation.

СОСТОЯНИЕ ЗООПЛАНКТОНА И МАКРОЗООБЕНТОСА В ОЗЕРЕ СЯМОЗЕРО

Ю.Ю. Фомина[1], А.И. Сидорова [2]

[1]Карельский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО»

[2]Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Гидробиологические исследования на озере Сямозеро были начаты в 1930-х гг. Так, в 1932 г. ихтиологические исследования сопровождались сбором бентоса и планктона на водоеме (Г. Якшина и Т. Матвеева). В 1933 г. была организована экспедиция на озеро Сямозеро, в составе которой работали гидробиологи С. В. Герд и Н. И. Володченко. В ходе проведенных исследований был собран значительный материал по бентосу, планктону и питанию рыб (Герд, 1946). Далее следовал период работы Сямозерской комплексной экспедиции:1952-1956 гг. зоопланктон изучала З. И. Филимонова (1961; 1962), в 1973-1974 гг. – Н. Б. Лазорева (1975), бентос в 1954–1961 гг. и 1973–1974 гг. Соколова В.А. (1962, 1977). В 1980-х–1990-х гг. наблюдения за зоопланктоном выполняла Т. П. Куликова (2004), за бентосом – С. А. Павловский (2014). В 2012–2015 гг. гидробиологические исследования на озере Сямозеро проводила группа исследователей (Кучко, Савосин, 2018; Ильмаст и др., 2018). С целью оценки современного состояния экосистемы озера Сямозеро по показателям зоопланктона и макрозообентоса были проведены исследования в 2023 г.

Гидробиологические пробы были отобраны 16 августа 2023 г. в юго-западной части Сямозеро. Глубина станций варьировала от 2 до 5,6 м. Наибольшая антропогенная

нагрузка характерна для станций 1, 2, которые располагались ближе к вершинной части губы Сяргилахта, станции 3, 4 находились на выходе из губы, станции 5, 6 – в открытой части озера. Глубина станций: 1 – 4 м; 2 – 2 м; 3 – 5 м; 4 – 3,1 м; 5 – 2,1 м; 6 – 5,6 м. Наибольшая антропогенная нагрузка характерна для станций 1, 2, отличающихся замедленным водообменом и близким расположением к жилым домам. Всего на озере Сямозеро было отобрано 6 проб зоопланктона и 2 пробы макрозообентоса (станция 1 и 4). Температура на станциях достигала 18–19 °С.

Отбор зоопланктона производили с помощью сети Джеди (диаметр 18,5 см; диаметр пор 100 мкм) и фиксировали 96 % этиловым спиртом. Применялась стандартная методика для сетного отбора и камеральной обработки проб (Методические..., 1984а; Комплексное …, 2011). Идентификация зоопланктона осуществлялась по «Определителю зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1» (2010). Расчет биомассы выполняли по формулам связи массы с длиной тела гидробионтов (Балушкина, Винберг, 1979).

Количественные пробы бентоса отбирали дночерпателем автоматическим коробчатым (площадью 0,025 м^2) на каждой станции по одному дночерпателю, промывали через сито № 23 и фиксировали 96 % этиловым спиртом. Камеральная обработка включала разбор проб, согласно стандартным методикам сбора и первичной обработки материала (Методические …, 1984б; Комплексное …, 2011). Таксономическая идентификация проводилась с использованием определителей (Определитель …, 2016).

В данным августа 2023 г. видовой состав зоопланктона Сямозеро насчитывал 31 таксон: Rotifera – 10, Calanoida – 2, Cyclopoida – 3, Cladocera – 16. В состав доминантов входили *Heterocope appendiculata* Sars, 1863, *Eudiaptomus gracilis* (Sars, 1863), *Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857), *Thermocyclops oithonoides* (Sars, 1863), *Daphnia cristata* Sars, 1862, *D. galeata* Sars, 1864, *Bosmina cf. gibbera* Schoedler, 1863, Diaphanosoma brachyurum (Liévin, 1848), *Limnosida frontosa* Sars 1862, *Chydorus sphaericus* (Müller, 1776), *Asplanchna priodonta* Gosse, 1850, *Polyarthra luminosa* Kutikova, 1962, *Keratella cochlearis* (Gosse, 1851), *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1879). Впервые была обнаружена американская чужеродная коловратка *Kellicottia bostoniensis*. Во время предыдущих исследований (Балагурова, 1959; Филимонова, 1961, 1962; Куликова, 2004; Кучко и др., 2018) чужеродный вид отмечен не был. В целом сравнение с данными предыдущих лет показало, что видовой состав и доминантный комплекс зоопланктона озера Сямозеро не изменился с 50-х годов прошлого века (Балагурова, 1959; Филимонова, 1961, 1962).

Видовое разнообразие зоопланктона достигалось главным образом за счет ветвистоусых ракообразных (~50% общего числа отмеченных видов), что типично для водоемов Карелии. Для сообщества водоема зафиксировано высокое видовое разнообразие, индекс Шеннона-Уивера по численности варьировал от 3,40 до 3,82, по биомассе – от 2,79 до 3,52, однако на одной станции был отмечен низкий индекс видового разнообразия (1,73), что связано с преобладанием крупной коловратки *A. priodonta*, доля которой в общей биомассе зоопланктона составляла более 70 %.

В губе Сяргилахта (станции 1 и 2) были отмечены наиболее высокие значения численности (228,7 и 170,1 тыс. экз./м^3), что связано с преобладанием (более 65% от общей численности) мелких коловраток *K. cochlearis*, *P. luminosa*, *K. longispina*. На станции 1 наблюдали самую высокую биомассу (7,84 г/м^3) из-за обилия *Asplanchna priodonta*.

На станциях 3, 4, 6 структура зоопланктона имела схожий характер. По численности доля Calanoida варьировала от 6 до 8 %, Cyclopoida – от 27 до 41 %, Cladocera – от 23 до 32 %, Rotifera – от 19 до 44 %. По биомассе доля Calanoida

изменялась от 4 до 6 %, Cyclopoida – от 21 до 33 %, Cladocera – от 41 до 57 %, Rotifera – от 6 до 27 %. Обилие коловраток уменьшается по мере удаление от берега. Коловратки являются тонкими фильтраторами, в прибрежной части создаются благоприятные для формирования кормовой базы условия, медленный, по сравнению с открытой частью озера, водообмен, наличие зарослей высшей водной растительности, поступающее с терригенным стоком легкоминерализуемое органическое вещество. Так, на станции 5, наиболее удаленной от берега, доля коловраток по численности составляла 34 %, а по биомассе 1 %, биомасса *Asplanchna priodonta* отмечена 0,02 г/м^3, на станции 1, где численность коловраток составляла 65 % и биомасса – 75%, биомасса *A. priodonta* – 5,73 г/м^3. По данным исследования (Фомина и др., 2019), улучшение трофической базы приводит к увеличению обилия представители рода *Asplanchna*. При этом доля Calanoida, отряда чувствительных к качеству воды, на станции 5 отмечена 17 % по численности и 54 % по биомассе. Доля рачкового планктона по биомассе варьировала от 25 % (станция 1) до 99 % (станция 5).

Численность и биомасса варьировали в широких пределах от 57,8 до 228,7 тыс. экз./м^3, в среднем 125,5 тыс. экз./м^3 и от 1,06 до 7,84 г/м^3, в среднем 2,81 г/м^3 соответственно. В целом на большинстве станций количественные показатели соответствовали межгодовой динамике зоопланктона, отмеченной в предыдущие годы (Филимонова, 1961; Куликова, 2007; Кучко и др., 2018), только станция 1 отличалась высокими показателями, что, вероятно, связано с антропогенным влиянием.

Согласно Китаеву (2007), показатели зоопланктона по биомассе на станциях 2, 4, 6 соответствовали α-мезотрофному, на станции 5 – β-мезотрофному, на станции 1 – α-евтрофному уровню трофии.

Согласно литературным данным, среди водоемов Карелии Сямозеро относили к тендипединовой (хирономидной) группе озер, в водоеме насчитывали 28 форм личинок Chironomidae (Решетников и др., 1982). В состав таксономического разнообразия озера Сямозеро входят более 180 таксонов (Соколова, 1977; Озера Карелии, 2013; Павловский, 2014). Детальные количественные показатели макрозообентоса изучаются с 1954 года.

На станции 1 были отмечены виды из таких групп, как двукрылые насекомые Diptera (главным образом личинки Chironomidae) и личинки *Chaoborus* sp. Основной фон донного населения по численности составляют хирономиды (50% от общей численности), а по биомассе – *Chaoborus* sp. (81% от общей биомассы).

На станции 4, как в профундали большинства северных озер, были обнаружены животные следующих систематических групп: личинки Chironomidae и малощетинковые черви Oligochaeta. В доминирующем комплексе личинки Chironomidae вида *Limnophyes karelicus* (Tshernovskij, 1949) в донном биоценозе составили около половины по численности и одну треть по биомассе. Таксон *Tanytarsus* gr. *gregarius* по биомассе достигал до 33%. Остальные таксоны не играли существенной роли в сообществе. Реликтовые ракообразные не идентифицированы.

В целом сравнение с данными предыдущих лет (Соколова, 1977; Озера Карелии, 2013; Павловский, 2014) показало, что состояние донных ценозов характеризовалось относительной стабильностью доминирующего комплекса организмов.

Район исследования отличается хорошим развитием бентофауны, особенно осенью, и играет в откорме рыб большую роль (Решетников и др., 1982). Согласно литературным материалам, богато заселена организмами бентоса литоральная зона озера, особенно затишная, зарослевая, где биомасса донных организмов самая высокая по всему водоему может достигать 8,7 г/м^2 (Павловский, 2014). Показатели численности и биомассы донных организмов в 2023 г. были близки к значениям, полученным в предыдущий период исследований (Озера Карелии, 2013). Так, численность сообщества макрозообентоса в 2023 г. на станции 1 отмечена 160 экз./м^2, при биомассе 1,95 г/м^2,

численность макрозообентоса на станции 4 была выше по сравнению со станцией 1 за счет высокой численности мелких организмов и составила 1000 экз./м^2, а биомасса была ниже – 1,52 г/м^2. Согласно классификации С.П. Китаева (2007), показатели зообентоса по биомассе соответствовали олиготрофному уровню трофии.

Литература

Балагурова М.В. Озеро Сямозеро // Озера Карелии. Природа, рыбы и рыбное хозяйство: справочник. Петрозаводск, 1959. С. 163-182.

Балушкина Е.В., Винберг Г.Г. Зависимость между длиной и массой тела планктонных ракообразных // Экспериментальные и полевые исследования биологических основ продуктивности озер. Л.: ЗИН АН СССР, 1979. С. 58–72.

Герд С.В. Обзор гидробиологических исследований озер Карелии // Труды Карело-Финского отделения Всесоюзного научно-исследовательского института озерного и речного рыбного хозяйства. Л., Петрозаводск, 1946. Т. 2. С. 27-139.

Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 395 с.

Комплексное гидрохимическое и биологическое исследование качества вод и состояния водных и околоводных экосистем: методическое руководство. Ч. 1. Полевые исследования / под ред. Т.И. Моисеенко. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. университета, 2011. 128 с.

Куликова Т.П. Зоопланктон водных объектов бассейна реки Шуя. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 124 с.

Куликова Т. П. Зоопланктон водных объектов бассейна Онежского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 223 с.

Кучко Я.А., Ильмаст Н.В., Кучко Т.Ю. Характеристика зоопланктона Сямозера (южная Карелия) по результатам многолетнего мониторинга // Известия РАН. Серия биологическая. 2018. №5. С. 557–564.

Методические рекомендации по сбору и обработке материалов в гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция. Л.: ГосНИОРХ, 1984а. 33 с.

Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зообентос и его продукция. Л.: ГосНИОРХ, 1984б. 52 с.

Озера Карелии. Гидрология, гидрохимия, биота**.** Справочник / Под ред. Н.Н. Филатова, В.И. Кухарева. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013. 463 с.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон / под ред. В. Р. Алексеева, С. Я. Цалолихина. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 495 с.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 2. Зообентос / под ред. В.А. Алексеева и С.Я. Цалолихина. М.-СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 457 с.

Павловский С.А. Сравнительная характеристика и многолетняя динамика макрозообентоса основных биотопов озера Сямозеро // Труды Карельского научного центра РАН. 2014. №2. С. 140-146.

Решетников Ю.С., Попова О.А., Стерлигова О.П., Титова В.Ф., Бушман Л.Г., Иешко Е.П., Макарова Н.П., Малахова Р.П., Помазовская И.В., Смирнов Ю.А. Изменение структуры рыбного населения эвтрофируемого водоема. М.: Наука, 1982. 248 с.

Соколова В.А. Зообентос и его кормовое значение // Сямозеро и перпективы его рыбохозяйственного использования. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1977. С. 93-124.

Соколова В.А. Кормовые ресурсы бентоса Сямозера // Труды Сямозерской комплексной экспедиции. Петрозаводск, 1962. Т. 2. С. 36-55.

Филимонова З.И. Зоопланктон озера Сямозера // Труды Сямозерской комплексной экспедиции. Петрозаводск, 1961. Т. 2. С. 56-81.

Филимонова З.И. Зоопланктон Сямозера, его динамика и кормовое значение для рыб // Гидробиологические исследования. Тарту, 1962. Ч. 3. С. 106-116.

Фомина Ю.Ю., Теканова Е.В., Калинкина Н.М. Биоиндикация современного состояния Кондопожского залива Онежского озера в районе расположения форелевых хозяйств по показателям зоопланктона // Водные биоресурсы и среда обитания. 2019. Т. 2. №2. С. 20-26.

STATE OF ZOOPLANKTON AND MACROZOOBENTHOS IN LAKE SYAMOSERO

Yu.Yu. Fomina, A.I. Sidorova

To assess the current state of the ecosystem of Lake Syamozero based on zooplankton and macrozoobenthos indicators, studies were conducted in 2023. The American alien rotifer *Kellicottia bostoniensis* was discovered for the first time. It was found that, in general, the species composition and dominant complex of zooplankton of Lake Syamozero have not changed since the 1950s. The abundance and biomass varied widely from 57,8 to 228,7 thousand ind./m^3 and from 1,06 to 7,84 g/m^3. The trophic level based on zooplankton indicators varied across stations from α-mesotrophic to α-eutrophic. The state of bottom cenoses was characterized by relative stability of the dominant complex of organisms. The number of macrozoobenthos community varied from 160 to 1000 ind./m^2, with biomass from 1,52 g/m^2 to 1,95 g/m^2. The trophic level according to zoobenthos indicators corresponded to oligotrophic.

CLADOCERA ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ВОДОЕМОВ НОВОСИБИРСКИХ ОСТРОВОВ ПО ДАННЫМ ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Л.А. Фролова[1], Н.М. Нигматуллин[2], Л. Ширрмайстер[3], С. Веттерих[3,4]

[1]Институт археологии и этнографии Сибирского отделения РАН

[2]Казанский (Приволжский) федеральный университет

[3]Институт Альфреда Вегенера, Центр полярных и морских исследований имени Гельмгольца, Германия

[4]Институт географии, Технический университет Дрездена, Германия

Биоразнообразие пресноводной фауны арктических островов в настоящее время изучено слабо. В данной работе приведены новые данные о видовом богатстве ветвистоусых ракообразных Новосибирского архипелага, полученные с использованием палеолимнолгического метода. В результаты выполненных исследований таксономический список группы Cladocera о. Б. Ляховский пополнен 6 видами, кроме того, ряд таксонов идентифицирован до более высокого таксономического ранга в силу специфики использованного метода. Выявлены основные абиотические факторы, влияющие на распределение таксонов кладоцера в водоемах о. Б. Ляховский. Установлено, что по зоогеографическому районированию доминировали таксоны, относящиеся к палеарктическому фаунистическому комплексу или таксоны с широким ареалом распространения. Результаты наших палеолимнологических исследований

представляют интерес для последующих таксономических, биогеографических и филогеографических исследований.

Сообщества гидробионтов континентальных вод Восточной Сибири и особенно арктических островов России относятся к числу наименее изученных. Целью нашего исследования было предоставить новую информацию о фауне Cladocera (Branchiopoda: Crustacea) Новосибирских островов (Восточная Сибирь). Новосибирские острова являются одной из наиболее удаленных и труднодоступных территорий российской Арктики. Это одна из причин, по которой изучение архипелага во все исторические периоды осуществлялось в недостаточном объеме, и даже сейчас знания о его современной природной среде, животном и растительном мире во многом фрагментарны.

Первоначальные сведения о таксономическом разнообразии группы Cladocera (Branchiopoda, Crustacea,) Сибири и Дальнего Востока датируются серединой XIX века. В работах С. Фишера в 1851 г. было выполнено описание первого вида надотряда Cladocera из Сибири, а именно *Daphnia middendorffiana* Fischer, 1851 с полуострова Таймыр по материалам, собранным экспедицией А.Ф. Миддендорфа (Коровчинский и др., 2021).

Данные о фауне водоемов Новосибирских островов впервые получены в результата сбора и анализа коллекций экспедиции, снаряженной Императорской Академией наук в Восточную Сибирь, а точнее Приянский край и на Новосибирские острова в 1885—1887 гг. Были получены данные о составе кладоцера, копепода и остракода водоемов Новосибирских островов (Sars, 1898). В целом, на Новосибирских островах Г.О. Сарс идентифицировал обнаружил три вида группы Cladocera. В водоемах на о. Б. Ляховский (у Малого Зимовья, у реки Захар-Урях) и на острове Котельный были найдены многочисленные экземпляры *Daphnia* (*Daphnia*) *middendorffiana* Fischer, 1851. Нередкими были находки партеногенетических самок *Chydorus sphaericus* (O.F. Müller, 1776) на о. Б. Ляховский и на о. Котельный (Sars, 1898). Для о. Котельный указывается одна находка плохо сохранившегося экземпляра *Bosmina obtusirostris* var. *arctica* (вид ныне не валидный, видимо речь о *Bosmina* (*Eubosmina) coregoni* Baird, 1857).

С тех пор, на протяжения более ста лет наши сведения о составе фауны микроракообразных Новосибирских островов не сильно пополнились. По данным А.А. Новичковой (2015) и созданной на основе литературных источников базы по фауне арктических островов число видов микроракообразных (Cladocera и Copepoda), отмеченных во внутренних водоемах Новосибирских островов составляет 19 видов, из которых 18 принадлежит к подклассу Copepoda и лишь 1 вид относится к надотряду Cladocera.

Для изучения состава кладоцерных сообществ водоемов Новосибирских остров, а точнее водоемов осторова Большой Ляховский нами был использован палеолимнологический метод. Такой метод изучения состава кладоцерного сообщества может быть рекомендован для водоемов, которые находятся в удаленных, труднодоступных местах или являются слабо изученными, а также для водоемов с относительно коротким безледным периодом. Метод хорошо себя зарекомендовал в исследованиях малоизученных арктических и субарктических водоемов (Sarmaja-Korjonen, 2002; Фролова, 2011; Frolova et al., 2018). Кроме того, данные, полученные с использованием палеолимнологического метода могут быть применены для анализа корреляций между параметрами окружающей среды и таксономическим составом пресноводных сообществ Cladocera (Nevalainen et al., 2013).

В общей сложности на палеолимнологический анализ кладоцерных сообществ были исследованы донные отложения 15 небольших водоемов южной части острова Б.

Ляховский. По климатическому районированию регион относится к арктической зоне с суровой зимой, непродолжительным и холодным летом. По наблюдениям ближайшей метеостанции (Мыс Шалаурова) за 1937–2000 гг. среднемноголетняя температура составила в январе -30,9°С и -31,2°С в феврале. Средняя многолетняя температура самого теплого месяца - июля + 2,5°С, а среднегодовая температура воздуха (TAnn) составляет −14,5 °С. (Булыгина и др., 2018). Исследованные водоемы отличались небольшой площадью и глубиной, низкой степенью минерализации, с активная реакция среды нейтральными или слабощелочными условиями активной среды.

В результаты выполненных палеолимнологических исследований таксономический список группы Cladocera о. Б. Ляховский пополнен 6 видами, кроме того два таксона дополнительно идентифицированы до уровня рода (*Alona* sp., *Eurycercus* sp.) и 5 таксонов семейств Chydoridae и Daphnidae определены до уровня группы видов. По зоогеографическому районированию преобладали таксоны с палеарктическим или всесветным ареалом распространения.

Корреляционный анализ Спирмана позволил выявить множество статистически значимых взаимосвязей представленности отдельных таксонов Cladocera и абиотических параметров исследуемых водоемов. Наибольшее количество достоверных корреляций таксонов Cladocera было обнаружено с показателями степени минерализации воды, pH, глубиной водоемов и климатическими параметрами. Результаты наших исследований гидробионтов о. Б. Ляховский представляют интерес для последующих таксономических, биогеографических и филогеографических исследований.

Исследования кладоцерных сообществ выполнены при поддержке проекта НИР FWZG-2025-005.

Литература

Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России, ВНИГМИ-МЦД. 2018. URL: http://meteo.ru/data/156-temperature (дата обращения: 28.02.2023).

Новичкова А.А. Микроракообразные (Cladocera, Copepoda) внутренних водоемов арктических островов и закономерности их распределения в высоких широтах: Дис. … канд. биол. наук. М., 2015. 172 с.

Фролова Л.А. Ветвистоусые ракообразные (Cladocera LATREILLE, 1829, Branchiopoda, Crustacea) в палеоэкологических исследованиях // Методические подходы к использованию биологических индикаторов в палеоэкологии. Казань: Казан. ун-т, 2011. С. 52-88.

Nevalainen L., Luoto T.P., Kultti S., Sarmaja-Korjonen K. Spatio-temporal distribution of sedimentary Cladocera (Crustacea: Branchiopoda) in relation to climate // Journal of Biogeography. 2013. V. 40. P. 1548-1559.

Sarmaja-Korjonen K. Multi-proxy data from Kaksoislammi Lake in Finland: dramatic changes in the late Holocene cladoceran assemblages // Journal of Paleolimnology. 2002. V. 28. P. 287-296.

Sars G.O. The Cladocera, Copepoda and Ostracoda of the Jana-Expedition // Ежег. Зоол. музея Имп. Акад. Наук. 1898. Т. 3. С. 324–359.

CLADOCERA OF POLYGON PONDS OF THE NEW SIBERIAN ISLANDS ACCORDING TO PALEOLIMNOLOGICAL ANALYSIS

L.A. Frolova, N.M. Nigmatullin, L. Schirrmeister, S. Wetterich

The biodiversity of freshwater fauna of the Arctic Islands of the Russian Federation is currently poorly studied. The present study has provided new data on the cladocerans species diversity of poorly studied taxa of freshwater invertebrate of the New Siberian Archipelago, which can be used in future ecological and conservation studies. Of the 13 taxa of cladocerans that were found on New Siberian Archipelago, six species are recorded for the first time. The main abiotic factors influencing the distribution of cladoceran taxa have been identified. The main abiotic factors affecting the distribution of Cladocera taxa were identified. Our paleolimnological data are of interest for taxonomic, biogeographic and phylogeographic studies.

МАКРОЗООБЕНТОС ВРЕМЕННЫХ ПОЙМЕННЫХ ВОДОЕМОВ РЕК ИЖ И ПОЗИМЬ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Н.В. Холмогорова
Удмуртский государственный университет

Исследован таксономический состав макрозообентоса временных водоемов, расположенных в поймах рек Иж и Позимь на территории г. Ижевска. В водоемах поймы р. Иж зарегистрировано 76 видов бентоса, в водоемах поймы р. Позимь – 154 вида. Загрязнение вод р. Иж промышленными и поверхностными стоками города вызывает сокращение видового богатства макрозообентоса временных водоемов поймы. Приводятся списки амфибиотических насекомых. Описана сезонная динамика биоразнообразия, численности и биомассы.

Речные поймы играют большую роль в жизни водных и околоводных экосистем. В пойме аккумулируется огромное количество биогенных элементов, принесенных как с поверхности водосбора, так и образовавшихся на месте в результате разложения и минерализации затапливаемой растительности и отмерших животных (Фащевский, 2007). Все это приводит к обильному развитию водных беспозвоночных в пойменных водоёмах и формированию уникальной фауны. В пойменных водоемах живые организмы находятся в постоянно меняющихся условиях, чему способствует заливание речными и талыми водами в период паводка и резкое уменьшение уровня воды в межень.

К временным водоемам, помимо прочих, относятся долговременные весенние лужи – это лужи, образованные в пойме реки или рядом с озером, прудом, в результате весеннего разлива. Непродолжительный срок существования таких водоемов определяет характер их фауны.

Цель работы: анализ качественного и количественного состава макрозообентоса временных водоёмов в поймах рек Иж и Позимь, расположенных в черте города Ижевска.

Задачи: 1) изучить таксономический состав макрозообентоса пойм рек Иж и Позимь; 2) изучить численность и биомассу макрозообентоса во временных водоёмах пойм рек Иж и Позимь; 3) проанализировать сезонную динамику качественного и количественного состава макрозообентоса.

Сбор донных макробеспозвоночных проводили с 2011 по 2014 (37 проб) и с 2019 по 2021 гг (46 проб).

В ходе исследования был изучен макрозообентос долговременных весенних луж в поймах рек Позимь и Иж (Камский речной бассейн). Площадь луж в начале мая составляла от 10 м^2 до 3400 м^2, постепенно уменьшаясь по мере высыхания. Глубина – 10-50 см. Грунт преимущественно детритный. Водный период в изученных водоемах имел продолжительность с апреля по конец мая - июль в разные годы.

В среднем течении реки Иж изучались два крупных временных водоема, максимальной площадью 3000-3400 м^2, расположенных на левобережной пойме. Река Иж пересекает всю территорию города Ижевска с северо-запада на юго-восток и имеет протяженность в городской черте свыше 40 км, в том числе около 30 км собственно река, представляющая участки нижнего и верхнего бьефа Ижевского водохранилища. Исследуемый участок реки Иж находится в самой нижней точке русла, расположенного в городской черте и по данным гидрохимического мониторинга испытывает максимальную антропогенную нагрузку. класс качества вод 4Б (грязная), характерные загрязняющие вещества: медь, цинк, азот нитритный, легко окисляемые органические вещества по величине $БПК_5$, трудно окисляемые органические вещества по показателю ХПК, азот аммонийный, фосфаты, железо общее и фенолы летучие.

В нижнем течении реки Позимь изучено пять временных водоемов площадью от 10 до 90 м^2, расположенных на левом берегу. По данным гидрохимического мониторинга, вода в р. Позимь на данном участке имеет 3Б класс качества (очень загрязненная), характерные загрязняющие вещества: медь, железо общее, трудно окисляемые органические вещества по величине ХПК, цинк и азот аммонийный (Государственный …, 2023). Расстояние между водоемами Позими и Ижа составляет около 5 км.

Температура воды в лужах поймы реки Иж всегда была выше на 1-2 °С чем в водоёмах поймы реки Позимь, что объясняется меньшей глубиной и большей площадью водоёмов поймы реки Иж.

Всего в составе фауны обследованных водоемов было выявлено 197 видов из 64 семейств и 4 типов. Наиболее разнообразны в видовом отношении членистоногие (148 видов), в первую очередь за счет насекомых, среди которых выделяются отряды жесткокрылых (56 видов), двукрылых (25 таксонов), стрекоз (18 видов) и ручейников (13). Значительный вклад в видовое богатство долговременных луж внесли брюхоногие моллюски (31 вид). Именно в этих водоемах впервые для Удмуртии зарегистрированы виды *Aenigmomphiscola europea* (Kruglov&Starobogatov, 1981), *L. turricula* Held, 1836, *Aplexa turrita* (Müller, 1774), *Armiger bielzi* (Kimakowicz, 1884) (Холмогорова, 2019).

Двукрылые представлены 12 семействами: Ceratopogonidae, Chironomidae, Limoniidae, Dixidae, Chaoboridae, Culicidae, Psychodidae, Tabanidae, Ptychopteridae, Tipulidae, Simuliidae, Syrphidae. Также были обнаружены водные клещи (*Hydryphantes sp.* (Koch, 1841), *Limnesia orientalis* (Lundblad, 1969)), ракообразные (*Cyzicus tetracerus* (Krynicki, 1830), *Lepidurus apus* (L., 1758), *Branchipodopsis affinis* (G.O.Sars, 1898), *Lynceus brachyurus* (Müller, 1776) (Сидоровский и др., 2014)).

Во временных водоемах поймы реки Иж зарегистрировано 76 видов. Из них 29 видов жуков, 18 – моллюсков, 8 таксонов личинок двукрылых, 7 – ручейников, 5 – кольчатых червей, 3 – стрекоз, по два вида ракообразных и клопов, один вид поденок и плоских червей (табл.).

В водоемах поймы реки Позимь зарегистрировано 154 вида. Среди которых 45 видов жуки, 29 – моллюски, 21 таксон личинок двукрылых, 16 видов – стрекозы, по 10 видов поденок и ручейников, 9 – клопы, 8 – кольчатые черви, 3 – ракообразные, 2 – водные клещи, 1 – веснянки (табл.). Значительное снижение биоразнообразия во временных водоемах поймы реки Иж при схожих гидрологических характеристиках мы связываем с высоким уровнем загрязнения вод реки промышленными и коммунальными стоками г. Ижевска.

Численность организмов макрозообентоса во временных водоемах поймы реки Иж менялась от 143 до 2689 экз./м^2, а в пойме реки Позимь – от 44 до 1633 экз./м^2. Биомасса донных макробеспозвоночных в пойме реки Иж составляла от 234 до 26889 мг/м^2, а в пойме реки Позимь – от 100 до 56317 мг/м^2. Средняя плотность организмов

макрозообентоса статистически значимо выше в водоемах р. Иж ($p < 0,01$). Биомасса различалась не значимо. Рост биомассы бентоса вызван увеличением доли брюхоногих моллюсков, среди которых доминировали прудовики. В донных сообществах пойменных водоемов реки Иж выше доля моллюсков по численности, а в водоемах Позими – личинок подёнок. Плотность и биомасса бентоса при высыхании менялась нелинейно, так как при высыхании одновременно происходит вылет имаго амфибиотических насекомых, переход в неактивную фазу ракообразных и уменьшение площади водоёмов.

Таблица. Таксономический список амфибиотических насекомых временных водоемов

Таксоны	Пойма р. Иж	Пойма р. Позимь
Odonata		
Erythromma humerale (Selys, 1887)		*
E. najas (Hansermann, 1823)		*
Coenagrion puella (L., 1758)		*
C. hastulatum (Charpentier, 1828)		*
C. *pulchellum* (Van der Linden, 1823)		*
C. armatum (Charpentier,1840)		*
Platycnemis pennipes (Pallas,1771)		*
Lestes sponsa (Hansemann, 1823)		*
Lestes virens (Charpentier,1825)		*
Lestes dryas (Kirby, 1890)		*
Somatochlora metallica (Van der Linden, 1823)		*
S. flavomaculata (Van der Linden, 1825)	*	*
Aeschna juncea (L ., 1758)		*
Libellula sp. (L., 1758)	*	
L. quadrimaculata (L., 1758)		*
Leucorrhinia pectoralis (Charpentier, 1825)		*
Sympetrum flaveolum (L., 1758)		*
S. danae (Sulzer, 1776)	*	
Plecoptera		
Perlodes sp. (Banks, 1903)		*
Ephemeroptera		
Cloeon гр. dipterum (L ., 1758)	*	*
Cloeon (C.) luteolum Müller, 1776		*
Baetis vernus Curtis, 1834		*
Kageronia fuscogrisea (Retzius 1783)		*
Caenis horaria (L., 1758)		*
C. robusta Eaton, 1884		*
Leptophlebia (L) vespertina (L., 1767)		*
L. (L) marginata (L., 1768)		*
Habrophlebia lauta (McLachlan, 1884)		*
Siphlonurus sp. (Eaton, 1868)		*
Trichoptera		
Anabolia furcata (Brauer, 1857)	*	*
Limnephilus coenosus (Curtis, 1834)	*	*
L. rhombicus (L.1758)		*
L. flavicornis (F. 1787)	*	*
L. nigriceps (F. 1787)		*
L. stigma (Curtis,1834)	*	
L. decipiens (Kolenati, 1848)		*
L. centralis (Curtis, 1834)		*
Grammotaulius nigropunctatus (Retzius, 1783)		*
G. nitidus (Müller, 1764)		*
G. sibiricus (MacLachlan, 1874)	*	
Ironoquia dubia (Stephens, 1837)	*	*
Hydropsyche angustipennis (Curtis 1834)	*	

По мере высыхания водоемов сокращается биоразнообразие, средние показатели индекса Шеннона меняются с 1.61 до 0.92. Максимальное видовое богатство во всех изученных временных водоемах отмечалось в начале мая. Кроме того по мере высыхания в сообществах уменьшается доля олигохет (r_s= - 0.43; $p<0.01$).

Выводы:

1. В составе фауны макрозообентоса долговременных весенних луж в поймах рек Позимь и Иж было выявлено всего 197 видов из 64 семейств и 4 типов. Наиболее таксономически разнообразными оказались водоемы поймы реки Позимь, в которых зарегистрировано 154 вида макрозообентоса; во временных водоемах поймы Ижа – 77 видов;
2. Количественный состав макрозообентоса во временных водоемах подвержен значительным колебаниям, численность менялась от 44 до 2689 экз./м^2, биомасса – от 100 до 56317 мг/м^2.
3. По мере высыхания водоемов сокращается биоразнообразие, средние показатели индекса Шеннона меняются с 1.61 до 0.92. Кроме того, в сообществах уменьшается доля олигохет, а наибольшим количественным колебаниям подвержены насекомые, для которых характерна цикличность вылета и размножения.

Автор искренне благодарит А.С. Сажнева (ИБВВ РАН) за определение видов жуков, Д.М. Палатова (ИПЭЭ РАН) за проверку определения видов подёнок, М.В. Винарского (СПбГУ) за определение видов брюхоногих моллюсков.

Литература

Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Удмуртской Республики в 2022 году». Ижевск: «Управление охраны окружающей среды и природопользования Минприроды Удмуртской Республики», 2023. 286 с.

Сидоровский С.А., Каргапольцева И.А., Холмогорова Н.В. Новые материалы к фауне Anostraca, Notostraca, Conchostraca Удмуртской Республики // Амурский зоологический журнал. 2014. VI(1). С. 12–15.

Фащевский Б.В. Экологическое значение поймы в речных экосистемах // Уч. зап. Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. 2007. №5. С. 118–129.

Холмогорова Н.В. Новые данные по фауне брюхоногих моллюсков семейств Lymnaeidae, Planorbidae, Physidae Удмуртской Республики // Моллюски: биология, экология, эволюция и формирование малакофаун / Тез. докл. Всеросс. научн. конф. с международным участием. Ярославль: Филигрань, 2019. С. 95.

MACROZOOBENTHOS OF TEMPORARY FLOODPLAIN WATER BODIES OF THE IZH AND POZIM RIVERS IN THE URBAN ENVIRONMENT

N.V. Kholmogorova

The taxonomic composition of macrozoobenthos of temporary water bodies located in the floodplains of the Izh and Pozim rivers within the city of Izhevsk was studied. In the floodplain water bodies of the Izh and Pozim rivers, 76 and 154 benthos species were recorded, respectively. Pollution of the Izh River waters by industrial and surface runoff from the city leads to a decrease in the species richness of macrozoobenthos of temporary floodplain water bodies. Lists of amphibiotic insects are provided. Seasonal dynamics of biodiversity, abundance and biomass are described.

МАЛЫЕ ОЗЁРА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ КАК МЕСТООБИТАНИЯ РЕДКИХ ВОДНЫХРАСТЕНИЙ

Е.В. Чемерис[1], Ю.С. Виноградова[1], Н.К. Конотоп[1], В.А. Филиппова[2], А.А. Бобров[1]
[1]Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН
[2]Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН

Для Центральной Якутии обобщены сведения о распространении и экологии редких (*Hydrilla verticillata*, *Potamogeton maackianus*, *P. rutilus*) и охраняемых водных растений (*Carexpseudo cyperus, Nuphar pumila*, *Nympha eatetragona*). Находки видов сосредоточены в водно-эрозионных озёрах долинного комплекса рек Лена, Алдан, Амга. Микроклимат долин крупных рек, наличие таликов, гидрологические и гидрохимические особенности водоёмов обеспечивают успешное выживание диаспор редких видов в условиях ультраконтинентального климата. Все водоёмы относятся к малым озёрам, расположены в долинах рек и находятся в стадии зрелости (старости), воды характеризуются низкой минерализацией, нейтральной или слабощелочной средой.

Республика Саха (Якутия) – уникальный регион России. Разнообразие водных сосудистых растений Якутии изучено достаточно хорошо (Бобров, Мочалова, 2014, 2017; Определитель …, 2020). Наиболее подробны данные о флоре водоёмов Центральной Якутии (ЦЯ). Для ЦЯ характерно неравномерное распределение и представленность в водоёмах водных видов, как широко распространённых, так и редких. В долине среднего течения р. Алдан и нижнего течения р. Амга нами найдены водоёмы, где совместно произрастают виды, которые больше нигде в Якутии не встречаются: *Hydrilla verticillate* (L. f.) Royle (Hydrocharitaceae), *Potamogeton maackianus* A. Benn., *P. Rutilus* Wolfg. (Potamogetonaceae) (Бобров и др., 2017; Bobrovetal., 2018). Кроме перечисленных здесь отмечены виды, охраняемые в региональной Красной книге: *Carex pseudocyperus* L. (Cyperaceae) *Nuphar pumila* (Timm) DC. и *Nymphae atetragona* Georgi (Nymphaeaceae). Цель работы: установить основные параметры среды обитания в водоёмах, способствующие успешному выживанию популяций этих редких и охраняемых водных видов в условиях многолетней мерзлоты и резкоконтинентального климата.

Основной материал, собран авторами в ЦЯ в 2014, 2015, 2022 и 2023 гг., так же использованы данные гербариев ИБВВ РАН (IBIW), ИБПК СО РАН (SASY), БИН РАН (LE), МГУ (MW), базы GBIF, литературные источники (Красная …, 2017; Определитель …, 2020).Изучены распространение и особенности местообитаний6 видов (5 гидрофитов и 1 гигрофита). Из них три вида с ограниченным распространением в ЦЯ – *H. verticillata*, *P. maackianus* (Бобров и др., 2017) и *P. rutilus* (Bobrov et al., 2018). Охраняемый *C. pseudocyperus*, для которого отмечено продвижение на север за последнее время (Николин и др., 2016; данные авторов). Эти виды можно отнести к теплолюбивому элементу флоры, их находки в ЦЯ располагаются на 1000 км и более к северу от основного ареала. Ещё два вида из сем. Nymphaeaceae – *N. pumila*, *N. tetragona*, как охраняемые виды, распространённые достаточно широко, снижающие свою численность в ЦЯ (Красная…, 2017). Из сторонних источников были включены данные, которые содержали точное указание местонахождения. Оценивали географические координаты, положение в рельефе (русло, пойма, надпойменная терраса, междуречье, высота над уровнем моря), происхождение котловины водоёма (термокарстовое, водно-эрозионное) (Жирков, 2014) и примерные размеры. По собственным данным анализировали: характер грунта, глубину, кислотность (pH) и минерализацию воды (мг/л). Всего в анализ

включено 132 записи (*N. tetragona* – 60; *C. Pseudocyperus* – 28; *N. pumila* – 19; *P. rutilus* – 10; *H. verticillata* – 9; *P. maackianus* – 6).

Для определения эколого-климатических предпочтений видов использовали базу WorldClim (Fick, Hijmans, 2017) и предлагаемые 19 биоклиматических показателей (стандартные переменные температур и осадков), значения среднего количества осадков, максимальные и минимальные температуры по среднему месяцу (январь, апрель, июль и октябрь) из каждого сезона (12 переменных). Все данные связывали с координатами находок видов. Карты-схемы распространения видов выполнены в программе QGIS.

Местонахождения редких и охраняемых видов в ЦЯ были нанесены на карту температуры многолетнемёрзлых пород (Фёдоров и др., 2019) (рис. 1). Полученные данные подтвердили наше наблюдение о неравномерном распределении по территории водоёмов с редкими и охраняемыми видами. Находки всех рассматриваемых видов оказались сконцентрированы в местах, где представлены относительно “тёплые” мёрзлые грунты с температурами: –3(–2)–0°C (рис. 1). Находки редких (за исключением одной находки *P. rutilus*) распространены на ограниченной площади в долинах нижнего течения р. Амга и среднего течения р. Алдан, а охраняемых Nymphaeaceae и *C. pseudocyperus* чуть более равномерно распределены по территории, но также концентрируются в долинах крупных и средних рек (рис. 1, 2А). Все водоёмы с редкими и охраняемыми видами небольшие, с площадью 0.01–3.96 км^2, что соответствует по размерной классификации малым озёрам (Жирков, 2014).

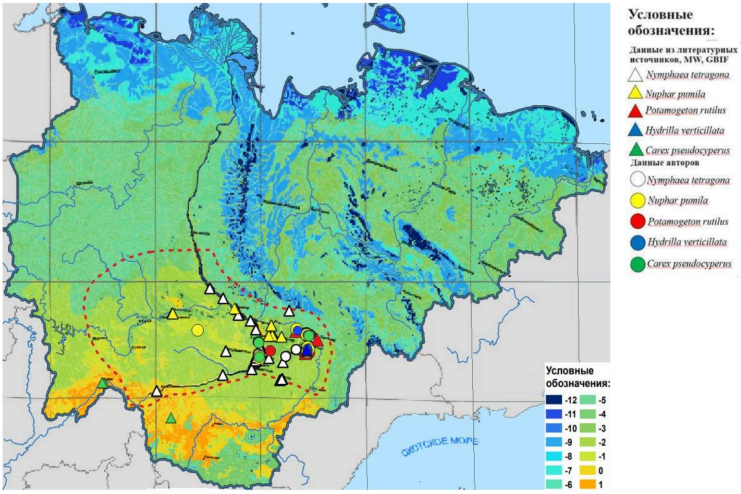


Рис. 1. Находки редких и охраняемых видов водных сосудистых растений в Якутии и температуры грунтов на глубине слоя годовых колебаний (Фёдоров и др., 2019)

Абсолютное большинство находок тяготеют к долинам крупных рек: надпойменным террасам, пойме. Здесь теплее, чем на водоразделе, и влияние мерзлоты нивелируется водными массами рек и таликами (подрусловыми и подозёрными), которые функционируют как аккумуляторы тепла (Михайлов, 2009) и препятствуют промерзанию водоёмов. Размах высот над уровнем моря местообитаний видов так же показывает преобладание низменных форм рельефа. Для *N. tetragona* характерен самый широкий диапазон: от 62 до 145 м н.у.м. и наибольшие средние значения высот (127.5м).

Остальные виды имеют очень близкие значения среднего 120—121.5 м и меньшее варьирование. Более половины находок всех редких и охраняемых видов сделаны в зрелых водоёмах надпойменных террас. В речных экотопах (в руслах малых рек и протоках) встречаются только представители сем. Nymphaeaceae.

Местообитания редких видов – это малые озёра с небольшими глубинами (максимальная 2.6 м), маломинерализованной водой с близким к нейтральному pH.Происхождение котловины озёр влияет на встречаемость редких и охраняемых видов. Подавляющее большинство находок (>50% для всех видов) сосредоточено в водно-эрозионных озёрах (пойменных, старичных) высокой поймы и террас, что подчёркивает важность долин крупных рек для сохранения биоразнообразия водных растений в условиях криолитозоны. В термокарстовых водоёмах встречаемость редких видов заметно ниже.

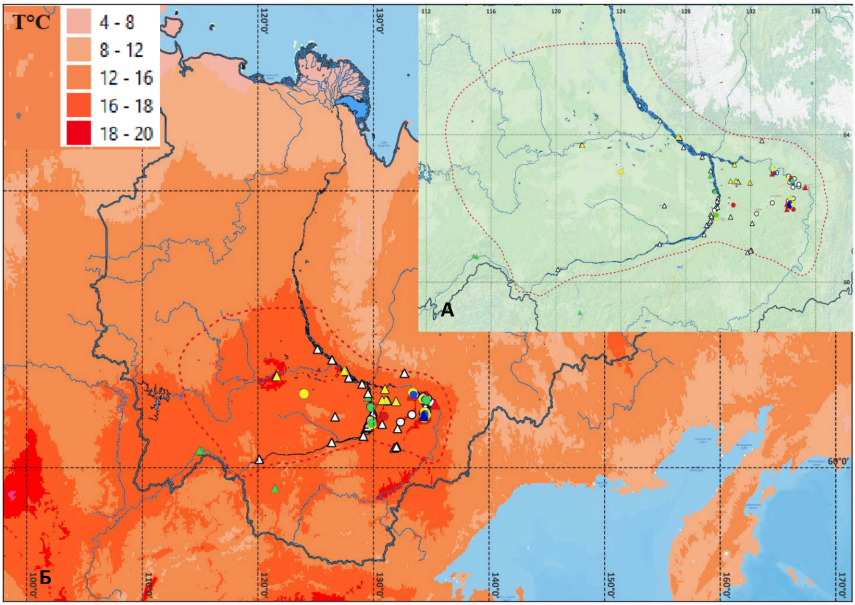


Рис. 2. Местонахождение редких и охраняемых видов в Центральной Якутии:
А –на топографической карте, Б –на карте средних температур июля.
Условные обозначения видов см. на рисунке 1

На сходные предпочтения видов указывают такие важные характеристики условий обитания как кислотность и минерализация воды в летнее время несмотря на то, что эти показатели не постоянны и могут меняться (Городничев и др., 2014). Так, pH в местообитаниях всех видов от нейтрального до слабощелочного – 7.3–12.6. Средние значения соответствуют слабощелочным водам: 8.4 для *P. maackianus* и *P. rutilus*, 8.1 для *H. verticillata*, 8.4 для *N. tetragona*, кроме *N. pumila* (9.2) и *C. Pseudocyperus* (9.8), где средние значения pH смещены к щелочным водам.

По отношению к минерализации исследованные виды несколько различаются. *N. pumila* и *N. tetragona* обитают в достаточно широком диапазоне: 34–374 мг/л для первого и 50–360 мг/л для второго, в местообитаниях*C. pseudocyperus*– 225–332 мг/мл, что

соответствует среднеминерализованным водам, тогда как остальные редкие виды обитают в пределах 91–186 мг/л. Общий для всех видов диапазон 50–374 мг/л. Низкая встречаемость в термокарстовых озёрах междуречья рассматриваемых видов может быть связана с тенденцией к засолению по мере старения таких водоёмов, что характерно для ЦЯ. При этом термокарстовые – самый распространённый и многочисленный тип водоёмов в регионе (Жирков, 2014). В связи с изменением климата в ЦЯ отмечена активизация термокарстовых процессов и рост числа и площади термокарстовых озёр (Iijima et al., 2021), неподходящих для обитания этих редких и охраняемых видов.

Немаловажный фактор, влияющий на распространение видов – возраст экосистемы. Водоёмы, где отмечены редкие и охраняемые виды, находятся в стадии зрелости или старения, на что указывает наличие сплавин, сформированная и разнообразная водная растительность и мощные (>1 м) илистые, сапропелевые или торфянистые отложения на дне, создающие дополнительную теплоизолирующую толщу (Шелудякова, 1958).

Выживание редких и охраняемых водных видов растений в ЦЯ обеспечивается сочетанием особых условий обитания в водоёмах: микроклиматическими особенностями долин крупных рек и высокой теплообеспеченностью местообитаний в летний период; наличием таликов, препятствующих промерзанию водоёмов; особыми гидрохимическими показателями – водой с нейтральной или слабощелочной реакцией с малой и средней минерализацией; морфометрическими характеристиками водоёмов – малыми размерами (до 5 км^2) и глубинами (до 2.6 м), что способствует быстрому и равномерному прогреванию водной толщи. Водоёмов с таким сочетанием условий в ЦЯ очень немного, часто они расположены в непосредственной близости от населённых пунктов. Природоохранным организациям стоит обратить на них внимание, так как малые озёра – это уникальные и уязвимые экосистемы, которые вносят значительный вклад в биоразнообразие водных сосудистых растений криолитозоны (Чемерис и др., 2025).

Работа выполнена при поддержке грантов РНФ № 23-24-00544, 23-14-00115.

Литература

Бобров А.А., Мочалова О.А. Заметки о водных сосудистых растениях Якутии по материалам якутских гербариев // Новости систематики высших растений. 2014. Т. 45. С. 122–144.

Бобров А.А., Мочалова О.А. Водные сосудистые растения долины Колымы: разнообразие, распространение, условия обитания // Бот. журн. 2017. Т. 102. №10. С. 1347–1378.

Бобров А.А., Филиппова В.А., Николин Е.Г., Чемерис Е.В. Новые для флоры Якутии Elodeacanadensis, Hydrillaverticillata (Hydrocharitaceae) и Potamogetonmaackianus (Potamogetonaceae) // Бот. журн. 2017. Т. 102. №2. С. 222–231.

Городничев Р.М., Ушницкая Л.А., Ядрихинский И.В., Спиридонова И.М., Колмогоров А.И., Фролова Л.А., Пестрякова Л.П. Морфометрические и гидрохимические особенности водно-эрозионных озер северных рек Якутии // Вестник СВФУ. 2014. Т. 11. №6. С. 30–37.

Жирков И.И. Схема лимногенетической классификации озер Северо-Востока России // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2014. №34. С. 18–25.

Красная книга Республики Саха (Якутия): Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений. М.: Реарт, 2017. Т. 1. 412 с.

Михайлов В.М. Теплые поймы холодных рек // Природа. 2009. №5. С. 32–38.

Николин Е.Г., Чемерис Е.В., Филиппова В.А., Бобров А.А. О редком в Якутии виде Carex pseudocyperus (Cyperaceae) // Бот. журн. 2016. Т. 101. №3. С. 309-314.

Определитель высших растений Якутии. 2-е изд. М.: КМК; Новосибирск: Наука, 2020. 896 с.

Республика Саха (Якутия): комплексный атлас. Якутск: ФГУП «Якутское аэрогеодезическое предприятие», 2009. 240 с.

Фёдоров А.Н., Шестакова А.А., Торговкин Я.И., Васильев Н.Ф., Константинов П.Я., Самсонова В.В., Калиничева С.В., Башарин Н.И. Цифровое тематическое картографирование современного состояния мерзлотных ландшафтов Якутии // Вестник СВФУ. Серия «Наука о Земле». 2019. №2 (14). С. 36–49.

Шелудякова В.А. К изучению торфяников Якутии // Доклады на восьмой научной сессии. Ботаника, почвоведение, зоология, зоотехния. Якутск: Якутское кн. изд-во, 1958. С. 25–33.

Bobrov A.A., Chemeris E.V., Filippova V.A., Maltseva S.Y. European pondweed in East Siberia: evidence of Potamogetonrutilus (Potamogetonaceae) in Yakutia (Asian Russia) with evaluation of current distribution and conservation status // Phytotaxa. 2018. V. 333. №1. P. 58–72.

Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology. 2017. V. 37. N 12. P. 4302–4315.

Iijima Y., Abe T., Saito H., Ulrich M., Fedorov A.N., Basharin N.I., Gorokhov A.N. and Makarov V.S.Thermokarst Landscape Development Detected by Multiple-Geospatial Data in Churapcha, Eastern Siberia // Front. Earth Sci. 2021. V. 9. 750298.

SMALL LAKES OF CENTRAL YAKUTIA AS A HABITAT OF RARE AQUATIC PLANTS

E.V. Chemeris, Yu.S. Vinogradova, N.K. Konotop, V.A. Filippova, A.A. Bobrov

The data on distribution and ecology of rare (*Hydrilla verticillata*, *Potamogeton maackianus*, *P. rutilus*) and protected aquatic plants (*Carex pseudocyperus*, *Nuphar pumila* and *Nymphae atetragona*) were summarized for Central Yakutia. The most occurrences of these species are found in water-erosion lakes of the valley complex of the Lena, Aldan and Amga rivers. The combination of microclimate of large river valleys, the presence of taliks, hydrological and hydrochemical factors together ensure successful survival of diaspores of these rare species in the conditions of a sharplycontinental climate. All water bodies belong to small lakes, they are located in the river valleys, and stand at the stage of maturity (old age), their waters are neutral or slightly alkaline with low mineralization.

ВЛИЯНИЕ ВСЕЛЕНЦЕВ НА ИЗМЕНЕНИЕ ВИДОВОГО СОСТАВА АБОРИГЕННОЙ ФАУНЫ КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Ф.М. Шакирова, В.З. Латыпова[1,2]

[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет

[2]Институт проблем экологии и недропользования АН РТ

В статье представлены изменения видового состава аборигенной фауны Куйбышевского водохранилища в результате гидростроительства и активизации хозяйственной деятельности. Приводятся сведения по изменению видовое разнообразия гидробионтов и проникновению чужеродных видов в водоём. Отмечено, что в настоящее время в

результате завершения строительства нового грузового порта СММЛЦ (Свияжский мультимодальный логистический центр), расположенного на пересечении международных транспортных коридоров «север-юг» и «запад-восток», следует ожидать дальнейшего изменения видового состава ихтиофауны Куйбышевского водохранилища. Новый грузовой порт станет перевалочным пунктом экспортно-импортных грузов не только для регионов Поволжья, но и международным транспортным коридором маршрута Китай – северо-западная Европа.

В результате масштабного гидростроительства, зарегулирования большинства речных бассейнов, активизации хозяйственной деятельности человека, а также значительных климатических изменений отмечаются заметные изменения в фаунистическом составе в наземных и водных экосистемах вследствие проникновения чужеродных видов (Слынько, Терещенко, 2014). При этом в историческом аспекте наблюдаются не только быстрые изменения видового разнообразия отдельных экосистем, но и нередко необратимые преобразования ландшафтов целых регионов (Биологические …, 2004).

Не обошла эта проблема и Куйбышевское водохранилище, расположенное в центральной части речного стока Волги в густонаселенном районе Среднего Поволжья (Куйбышевское …, 2007).

До зарегулирования стока Волги, в районе будущего Куйбышевского водохранилища встречался 51 вид рыб (Кузнецов, 1978). В результате гидростроительства и перекрытия реки плотинами Жигулевской ГЭС во вновь созданном водоеме изменились условия обитания гидробионтов, что сказалось на видовом составе и численности реофильных и лимнофильных видов (Кузнецов, 2005; Шакирова и др., 2014, 2015 и др.).

В первые десятилетия функционирования водохранилища из состава ихтиофауны выпали такие проходные виды как каспийская минога *Caspiomyzon wagneri* (Kessler), севрюга *Acipenser stellatus* (Pallas), шип *A. nudiventris* (Lovetsky), белорыбица *Stenodus leucichthys leucichthys* (Guldenstadt), каспийская кумжа *Salmo trutta* (L.), шемая *Chalcalburnus chalcoides* (Guldenstadt) и другие (Лукин, 1961; Поддубный, 1983; Цыплаков, 1974). Однако стали появляться чужеродные виды, ранее здесь не встречавшиеся. За более чем шестидесятилетний период существования водохранилища сегодня в составе его ихтиофауны отмечается 60 видов рыб, в числе которых 19 видов – вселенцы (31,7%), хотя видовой состав вселенцев, появившихся здесь в разные годы и различным путем насчитывает 24 вида, но некоторые из них в настоящее время уже не встречаются в водоёме и информация по ним отсутствует (Шакирова и др., 2015; 2023). Видовая принадлежность рыб приводится по Ю.С. Решетникову, А.Н. Котляр (Словарь названий рыб…, 2022).

Вселенцы (речной угорь – *Anguilla anguilla* (Linnaeus, 1758), черноморско-азовская тюлька – *Clupeonella cultriventris* (Nordmann, 1840), пестрый толстолобик – *Aristichthys nobilis* (Richardson, 1846), белый толстолобик – *Hypophthalmichthys molitrix* (Valenciennes, 1844), белый амур – *Ctenopharyngodon idella* (Valenciennes, 1844), малоротый буффало – *Ictiobus bubalus* (Rafinesque, 1818), большеротый буффало – *I. cyprinellus* (Valenciennes, 1844), черный буффало – *I. niger* (Rafinesque, 1820), европейская корюшка – *Osmerus eperlanus* (Linnaeus,1758), европейская ряпушка – *Coregonus albula* (Linnaeus,1758), баунтовский сиг – *Coregonus lavaretus baunti* (Muchomedijarov, 1948), чудской сиг – *C. l. maraenoides* (Poljakow, 1874), пелядь – *C. peled* (Gmelin, 1789), радужная форель, (микижа) – *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792), девятииглая колюшка – *Pungitius pungitius* (Linnaeus, 1758), трехиглая колюшка – *Gasterosteus aculeatus* Linnaeus, 1758, черноморская пухлощекая игла-рыба – *Syngnathus*

nigrolineatus Eichwald 1831, ротан-головешка – *Perccottus glenii* Dybowskii, 1877, звездчатая пуголовка – *Benthophilus stellatus* (Sauvage, 1874), каспийский бычок-головач – *Ponticola* (=*Neogobius) gorlap* (Illjin, 1949), бычок-кругляк (черноротый бычок) – *Neogobius melanostomus* (Pallas, 1814), бычок-песочник – *Neogobius fluviatilis* (Pallas, 1814), бычок-цуцик – *Proterorhinus marmoratus* (Pallas, 1814) появились в результате акклиматизационных и рыбоводных работ, проводимых в водохранилище, случайного завоза видов (попутная акклиматизация), садкового выращивания, активизации судоходства, строительства каналов, а также за счет проникновения и расселения чужеродных видов, как с севера, так и с юга, продолжающиеся и сегодня (Шакирова и др., 2015; Динамика…, 2020).

В бассейне Волги, в том числе в Куйбышевском водохранилище, в настоящее время наблюдается активное расселение интересного, но весьма опасного вселенца китайского мохнорукого краба – *Eriocheir sinensis* H. Milne Edwards, 1853), обнаруженного ранее в экосистеме Белого моря, рек беломорского бассейна, а теперь в водохранилищах р. Волги, что свидетельствует о «биологическом прогрессе вида» (Биологические …, 2004, с. 228; Shakirova et al., 2007).

Некоторые из перечисленных видов, как черноморско-азовская тюлька, успешно натурализовалась в новых для неё условиях, достигла достаточной численности и активно осваивается промыслом. Следует отметить, что с проникновением вселенца в бассейн Волги не произошло полного вытеснения аборигенов даже частично сходных по экологии (чехонь, синец, уклейка). Напротив, наблюдается повышение их биологических показателей (численность, темп роста, упитанность и др.), а также существенное улучшение кормовой базы большинства хищных видов рыб (судак) (Кияшко, 2004; Слынько, Кияшко, 2012).

Численность других видов: черноморская пухлощекая игла рыба, головешка-ротан, звездчатая пуголовка, бычок-кругляк (по удельной доле вида в уловах контрольных орудий лова за многолетний период) является средней по численности. Остальные виды в водоеме встречаются единично, редки или малочисленны. В настоящее время отсутствует информация по всем трем видам буффало, баунтовскому и чудскому сигам (Шакирова и др., 2015).

Чужеродные виды, которым удаётся натурализоваться в новых условиях, нередко становятся доминантами в донных и пелагических сообществах водоёмов, значительно меняя их трофическую структуру и оказывая существенное воздействие на аборигенные виды (Яковлев, 1997; Биологические …, 2004; Дгебуадзе, Павлов, 2007; Решетников, Попова, 2011).

Учитывая активизацию вселения чужеродных видов в новые экосистемы в последние десятилетия, становится очевидным актуальность изучения этого процесса и выявление закономерностей протекания биологических инвазий. В настоящее время расширились и углубились исследования, связанные с проблемой вселения чужеродных видов, появились работы, посвященные как процессу инвазии, так и воздействию чужеродных видов на аборигенные (Биол. Инваз., 2004; Гребневик…, 2000; Слынько, Терещенко, 2014; Шакирова и др., 2021 и др.).

В настоящее время важным является изучение воздействия чужеродных видов на экосистему водохранилища и исследование взаимоотношений инвазийных видов с аборигенными. Для выявления роли чужеродных видов в функционировании ихтиофауны Куйбышевского водохранилища исследовали спектр питания одного из хищных видов рыб Куйбышевского водохранилища – налима *Lota lota* L., который прежде в основном питался ершом. Однако, со снижением численности ерша в водоеме экологическая ниша Куйбышевского водохранилища, занимаемая некогда им, сегодня оказалась открытой для включения в нее бычков, которые, в свою очередь, стали

важным и доступным объектом питания и откорма налима, потерявшего ерша – основного компонента своего питания.

На наш взгляд, смена основного трофического компонента у налима прошла без существенного воздействия на его популяцию, хотя следует оговориться, что в этом направлении комплексные исследования в Куйбышевском водохранилище ведутся в небольшом объеме. Налим, как и другие хищные виды Куйбышевского водохранилища, включил бычка-кругляка и других вселенцев в свой спектр питания (Семенов, 2009).

Успешно натурализовавшиеся вселенцы в условиях водохранилища становятся доступным кормом для аборигенных хищных видов, снижая тем самым пресс хищников на молодь ценных в промысловом отношении рыб. Однако поиск регуляторов численности вселенцев сегодня остаётся весьма актуальным. Несмотря на то, что этот вопрос затрагивается многими специалистами, он и сегодня недостаточно исследован вследствие того, что биология и экология вселенцев изучены очень слабо и требуют комплексного рассмотрения и глубокого анализа трофических связей вселенцев с аборигенными видами.

Таким образом, снижение численности ерша в Куйбышевском водохранилище привело к тому, что его экологическую нишу в настоящее время постепенно занимают бычки, использующие освободившиеся биотопы ерша и перешедшие на потребление его корма – бокоплавов и хирономид (Shakirova and all., 2021).

Исследованиями выявлен процесс адаптации хищных видов рыб водохранилища и, в частности налима, к новым объектам питания – бычкам. Установлено, что в настоящее время в пищевом спектре налима бычки играют существенную роль. При этом, потеря налимом своего основного компонента питания – ерша не сказалась отрицательно на его популяции, так как высокая численность бычков в водоеме и их доступность, в качестве основного корма, обеспечивают этого хищника пищей.

Анализ литературных и экспериментальных данных выявил, что новая цепь питания рыб в Куйбышевском водохранилище (бычки – налим) служит, во-первых, подтверждением полной акклиматизации бычков в водоеме, а во-вторых, указывает на то, что налим может выполнять роль регулятора численности вселенцев (бычков) и биологического мелиоратора.

Исследование за проникающими, акклиматизируемыми и выращиваемыми в водохранилище видами рыб показывает, что процесс формирования ихтиофауны Куйбышевского водохранилища не стабилизирован, он продолжается в условиях проникновения и расселения чужеродных видов.

Дальнейшие изменения в составе ихтиофауны Куйбышевского водохранилища и самопроизвольного вселения чужеродных видов в экосистему следует ожидать в результате активизации деятельности нового грузового порта СММЛЦ (Свияжский мультимодальный логистический центр), расположенного на пересечении международных транспортных коридоров север − юг и запад − восток. Следует учесть, что порт имеет возможности выхода к трем морям (Черному, Каспийскому, Балтийскому) и станет перевалочным пунктом экспортно-импортных грузов не только для регионов Поволжья, но и международным транспортным коридором маршрута Китай – северо-западная Европа.

В результате строительства Куйбышевского водохранилища среда обитания рыб во вновь созданном водоёме претерпела значительные изменения, которые повлекли за собой перестройку видового состава рыбного населения. Одновременно, на формирование современного рыбного населения водохранилища повлияли вселенцы, проникшие в водоем с севера и юга, через каналы, являющиеся транспортными путями

для проникающих видов, акклиматизационные мероприятия, садковое выращивание и др.

Современный состав ихтиофауны Куйбышевского водохранилища включает 60 видов рыб, в том числе 19 видов (31,7%) вселенцев. Дальнейшие изменения видового разнообразия могут быть связаны с целенаправленной интродукцией и с продолжающимся самопроизвольным вселением в водоём чужеродных видов, усиление которого можно ожидать в результате завершения строительства и активизации деятельности нового грузового порта СММЛЦ (Свияжский мультимодальный логистический центр) - крупного центра перевозок экспортно-импортных грузов для регионов Поволжья и международного транспортного коридора маршрута Китай–северо-западная Европа.

Литература

Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах. СПб.: Т-во науч. Изд. КМК, 2004. 436 с.

Гребневик *Mnemiopsis leidyi (A.Agassiz)* в Азовском и Черном морях: биология и последствия вселения (под ред. С.П. Воловика). Ростов-на-Дону: БКН, 2000. 500 с.

Дгебуадзе Ю.Ю., Павлов Д.С. Вчера, сегодня и завтра инвазий чужеродных видов в Российской Федерации // Сб. научн. трудов ФГНУ «ГосНИОРХ» / Исследования по ихтиологии и смежным дисциплинам на внутренних водоемах в начале XXI века. СПб.; М.: Товарищество научных изданий КМК, 2007. Вып. 337. С. 71–82.

Динамика состояния экосистем и популяций рыб различных экологических групп Куйбышевского водохранилища. Казань: Изд-во АН РТ, 2020.122 с.

Кияшко В.И. Трофоэкологическая характеристика тюльки *Clupeonella cultriventris* в водохранилищах Средней и Верхней Волги // Вопр. ихтиологии. 2004. Т. 44. № 6. С. 811-820.

Кузнецов В.А. Особенности воспроизводства рыб в условиях зарегулированного стока реки. Казань: Изд-во Казанского гос. ун-та, 1978. 160 с.

Кузнецов В.А. Рыбы Волжско-Камского края. Казань, 2005. 208 с.

Куйбышевское водохранилище: экологические аспекты водохозяйственной деятельности. Казань: Фолиант, 2007. 320 с.

Лукин А.В. Куйбышевское водохранилище // Изв. ГосНИОРХ. 1961. Т. 50. С. 62–76.

Поддубный А.Г. Ихтиофауна // Куйбышевское водохранилище. Л.: Наука, 1983. С. 148–169.

Решетников Ю.С., Попова О.А. Влияние вида-вселенца на экосистему реки Пасквик // Матер. всерос. конф. с международн. участием, посвящ. 80-летию Тат. Отд. ФГБНУ «ГосНИОРХ». СПб, 2011. С. 294-298.

Решетников Ю.С., Котляр А.Н. Словарь названий рыб на шести языках (латинский, русский, английский, немецкий, французский, испанский). М.: Тов-во научн. издан. КМК, 2022. 838 с.

Семенов Д.Ю. Роль чужеродных видов в питании хищных рыб Куйбышевского водохранилища // Изв. Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11. №1. С. 181–184.

Слынько Ю.В., Кияшко В.И. Анализ эффективности инвазий пелагических видов рыб в водохранилищах Волги // Росс. журн. биол. инвазий. 2012. №1. С. 73–87.

Слынько Ю.В., Терещенко В.Г. Рыбы пресных вод Понто-Каспийского бассейна: Разнообразие, фауногенез, динамика популяций, механизмы адаптаций. М.: Изд-во Полиграф-Плюс, 2014. 328 с.

Цыплаков Э.П. Расширение ареалов некоторых видов рыб в связи с гидростроительством на Волге и акклиматизационными работами // Вопр. Ихтиологии. 1974. Т. 14. Вып. 3. С. 396–405.

Шакирова Ф.М., Северов Ю.А. Видовой состав ихтиофауны Куйбышевского водохранилища // Вопросы ихтиологии. 2014. Т. 54. №5. С. 520–532.

Шакирова Ф.М., Северов Ю.А., Латыпова В.З. Современный состав чужеродных видов рыб Куйбышевского водохранилища и возможности проникновения новых представителей в экосистему водоема // Росс. журн. биол. инвазий. 2015. №3. С. 77–98.

Шакирова Ф.М., Северов Ю.А., Латыпова В.З. Питание налима *Lota lota* в современных условиях Куйбышевского водохранилища // Вопросы ихтиологии. 2021. Т. 61. №1. С. 119-123

Шакирова Ф.М., Смирнов А.А., Латыпова В.З., Анохина О.К., Валиева Г.Д. Изменение ихтиоценоза Куйбышевского водохранилища на современном этапе функционирования экосистемы водоема // XI Международная научно-практическая конференция «Экология речных бассейнов». Суздаль, 2023. С. 141–151.

Яковлев В.Н. Неогенез (быстрое формообразование) у рыб бассейна Волги // Первый конгресс ихтиологов России / Тез. докладов. М.: ВНИРО, 1997. С. 31.

Shakirova F. M., Panov V.E., Clark P.F. New records of the Chines mitten crab, *Eriocheir sinensis* H. Milne Edwards, 1853, from the Volga River, Russia // Aquatic Invasions. 2007. V. 2. Iss. 3. P. 169-173.

Shakirova F.M., Severov Yu.A., Latypova V.Z. Feeding of Burbot *Lota lota* in Modern Conditions of the Kuybyshev Reservoir // Journal of Ichthyology. 2021. V. 61. №1. P. 161–165.

NFLUENCE OF INVADERS ON THE CHANGE IN THE SPECIES COMPOSITION OF THE ABORIGINAL FAUNA OF THE KUIBYSHEV RESERVOIR

F.M. Shakirova, V.Z. Latypova

The article presents changes in the species composition of the native fauna of the Kuibyshev Reservoir as a result of hydroelectric construction and increased economic activity. Information is provided on changes in the species diversity of aquatic organisms and the penetration of alien species into the reservoir. It is noted that at present, as a result of the completion of the construction of the new cargo port SMMLC (Sviyazhsk Multimodal Logistics Center), located at the intersection of the international transport corridors "north-south" and "west-east", further changes in the species composition of the ichthyofauna of the Kuibyshev Reservoir should be expected. The new cargo port will become a transshipment point for export-import cargo not only for the Volga regions, but also an international transport corridor for the China - Northwestern Europe route.

К ВОПРОСУ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ПЛАНАРИЙ В ЛЕСНОМ ЗАВОЛЖЬЕ И ЗАПАДНОМ ПРЕДКАМЬЕ

Н.В. Шакурова

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Изучено распространение планарий – трехвевистокишечных турбеллярий (Tricladida) на территории Лесного Заволжья (10 водоемов, Республика Марий Эл) и Западного Предкамья (лесные и пойменные водоёмы реки Волги, водоёмы системы Голубых озёр,

оз. Глубокое, Республика Татарстан). Методом гистологической идентификации получено подтверждение присутствия двух видов – *Polycelis tenuis* (сем. Planariidae) в трех цветовые морфах, и *Bdellocephala punctata,* (сем. Dendrocoelidae) в озерах Лесного Заволжья. Впервые планарии *Dendrocoelum lacteum* и *Polycelis tenuis* обнаружены в оз. Глубокое (Западное Предкамье). Впервые планарии вида *Bdellocephala punctata*, обнаружены во временном водоеме Сосновой рощи на территории г. Йошкар-Олы (Лесное Заволжье).

Планарии (Turbellaria: Tricladida) – неотъемлемый компонент бентоценозов многих пресных и солоноватых континентальных водоемов, один из регуляторных факторов экосистем, участвующих в поддержании гомеостаза гидробиоценозов, представляющий значительный интерес для фаунистических и экологических исследований (Коргина, 2006). Однако небольшое количество представителей этой группы и сложности, возникающие при их идентификации, приводят к тому, что планарии зачастую остаются вне поля зрения исследователей гидрофауны (Коргина, 1987; Порфирьева, Дыганова, 1987). Несмотря на появление отдельных работ по этой теме в последнее десятилетие, роль планарий в водных экосистемах остается недостаточно изученной. Планарии представляют собой группу с обычно ограниченными ареалами (Порфирьева, Дыганова, 1987). Из трех семейств планарий европейской части России, в Заволжье были зафиксированы представители двух семейств: Planariidae и Dendrocoelidae (Порфирьева, Дыганова. 1987). Согласно монографическому обзору этих авторов, в различных регионах Заволжья из семейства Planariidae были описаны виды *Planaria torva* и *Polycelis tenuis*: присутствие *Planaria torva* отмечено в озерах Западного Предкамья (оз. Дальний Кабан, Раифское и Голубое), *Polycelis tenuis* также обнаружен в Западном Предкамье в ассоциации с *Planaria torva*, а также этот вид планарий отмечен на территории Лесного Заволжья в озерах бассейна реки Илеть (Порфирьева, Дыганова, 1983). В семействе Dendrocoelidae в Заволжье был описан вид *Bdellocephala punctata*, который встречен в Западном Предкамье (оз. Дальний Кабан и Голубое) и в лесном Заволжье (оз. Кичиер) (там же). Второй вид из этого семейства – *Dendrocoelum lacteum*, ранее обнаружен в Западном Предкамье (оз. Голубое) (Дыганова, 1980; Курбангалиева, Кашеварова, 1946). Эти данные были подтверждены и дополнены Монасыповым М.А, описавшем структурно-функциональным характеристикам макрозообентоса солоноватоводных карстовых озер Среднего Поволжья (Монасыпов, 2003). Было установлено, что три вида планарий – *Planaria torva, Polycelis tenuis, Dendrocoelum lacteum,* – являются характерными для бентоценозов солоноватоводных карстовых озер Западного Предкамья, включая систему Голубых озер. Эти же виды также называются автором и для Лесного Заволжья (озера Югидем, Голубая Старица, Каракаер, Шунгалдан, Соленое) (Монасыпов, 2003). Впоследствии сведения о распространении планарий в Лесном Заволжье существенно расширены в ходе комплексных гидробиологических исследований, проведенных за последнее годы (Бедова и др., 2005, 2006, 2007; Тимофеева и др., 2008, 2010). Однако гистологической идентификации перечисленных видов, обнаруженных в водоемах Заволжья, проведено не было. Изучение распространения планарий в Лесном Заволжье и Западном Предкамье, определение их видового состава с использованием стандартных гистологических методов таксономической идентификации было целью нашего исследования

На водоёмах Лесного Заволжья сбор материала проводился совместно с сотрудниками Марийского государственного университета в летне-осенний период на 10 водоемах: озёра Сурок, Кичиер, Конаньер, Гусинец, Пыжан-ер, Шутьер, Табашинское (Зрыв), Шемьер, Женское, а также водоём в парковой зоне Сосновая роща в городе

Йошкар-Ола. В Западном Предкамье были обследованы лесные и пойменные водоёмы реки Волги, водоёмы системы Голубых озёр, а также озеро Глубокое (летне-осенний и зимний период). Сбор проб проводился с использованием дночерпателя и вручную. Собранные образцы предварительно изучались прижизненно или по тотальным препаратам после просветления зафиксированных экземпляров. Для точного определения видовой принадлежности планарий были проведены гистологические исследования с использованием традиционных методик микротехники. Изготовление гистологических полутонких (5 мкм) срезов осуществлялось на ротационном микротоме НМ 325. Препараты окрашивались по Маллори. Для анализа гистологических препаратов использовался мультифункциональный моторизованный микроскоп Axio Imager M2 (CZ), позволяющий проводить оцифровку и измерения объектов. Для изображений с недостаточной глубиной резкости мы применяли фокус-стекинг. используя программу Helicon Focus 6.0.18.

По результатам проведенных гистологических исследований подтверждено присутствие планарий сем. Planariidae в обследованных озерах Лесного Заволжья (оз. Сурок, Кичиер, Конаньер, Гусинец, Пыжан-ер, Шутьер, Табашинское (Зрыв), Шемьер, Женское, водоем Сосновой рощи г. Йошкар-Ола). На это указывают детали гистологической структуры глотки, характеризующие «планариидный» тип. У образцов, отнесенных нами к сем. Planariidae, во внутренней стенке глотки мышечные волокна продольной и кольцевой ориентации располагаются отдельными слоями (рис. 1 *А*). Планарииды озер Лесного Заволжья были представлены несколькими морфами, отличными по окраске – светло желтая, темно желтая и черная. Светло и темно желтые экземпляры отмечены для озер Сурок, Шутьер, Женское, Гусинец, тогда как в озерах Табашинское и Кичиер представлены как желтые, так и черные морфы. В оз. Пыжан-ер, Шемьер, Конаньер выявлены только меланисты. Размеры планариид варьировали от 5 до 13 мм. Для половой системы планариид трех цветовых вариаций характерен единый план строения копулятивного аппарата, что позволяет отнести их к виду *Polycelis tenuis* Jjima, 1884. Копулятивный аппарат базально имеет крупное шаровидное утолщение (бульбус) вокруг семенного пузырька, и дистально (в мужском атриме) широко коническую папиллу, окружающую семяизвергательный канал (рис. 1 *Б*). Папилла образует по всей длине семяизвергательного канала продольные складки. Мужской атрий продолжается общим атриумом, сообщающимся с внешней средой. В общем атриуме залегают два аденодактиля (специфические секреторно-мускульных органы), один из которых ориентирован поперек тела и расположен в боковом кармане общего атрима, второй, более крупный лежит вдоль продольной оси тела. Наличие аденодактилей однозначно указывает на вид *Polycelis tenuis.* исключая вид *Polycelis nigra*. Примечательно, что половозрелыми особями являлись экземпляры крайне малых размеров (5 мм), тогда как согласно общеизвестным описаниям *Polycelis tenuis* «длина половозрелых червей 10-12 мм» (Порфирьева, Дыганова, 1987).

Получены гистологические подтверждения принадлежности к семейству Dendrocoelidae планарий, обнаруженных в шести озерах Лесного Заволжья (Шургу-ер, Гусинец, Пыжан-ер, Кичиер, Шутьер, Конаньер) и временном водоеме Сосновой рощи, Смешанное расположение продольных и кольцевых мышечных волокон, формирующих внутреннюю стенку глотки, однозначно указывают на «дендроцелидный» вариант (рис. 2).

Эти планарии отличаются крупными размерами (до 21 мм), бурой однотонной окраской, биокулярностью, хорошо выраженными аурикулами. Имеется адгезивный орган. Гистологический анализ строения полового аппарата позволил уверенно идентифицировать этих дендроцелид как *Bdellocephala punctata* Pallas, 1774. Миниатюрная папилла пениса, короткий семяизвергательный канал, овальный бульбус,

вмещающий объемный семенной пузырек, латеральная позиция семяпровода относительно бульбуса, – все эти признаки являются характерными для данного вида (рис. 2 *Б*).

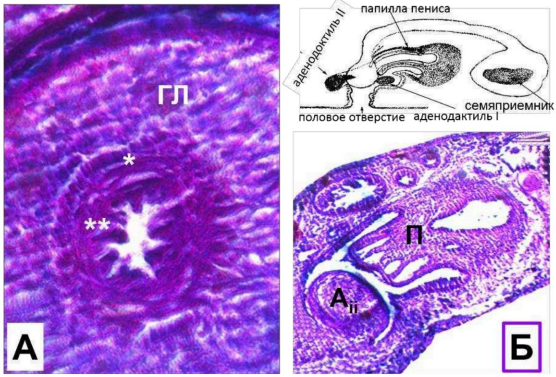


Рис. 1. *Polycelis tenuis.* Строение глотки по «планариидному» типу (А). Сагиттальный срез через копулятивный аппарат (Б)

ГЛ – глотка; *) – продольные мышечные волокна; **) – кольцевые мышечные волокна; П – пенис (бульбус и папилла копулятивного органа); $А_{II}$ – аденодактиль II

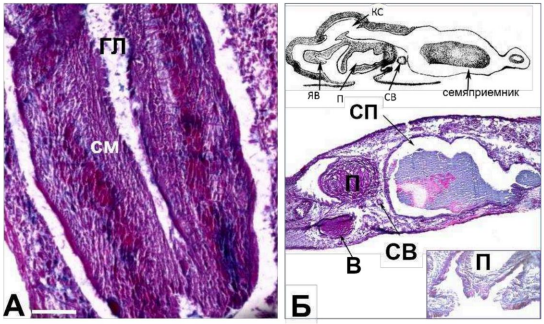


Рис. 2. *Bdellocephala punctata.* Строение глотки по «дендроцелидному» типу (А). Сагиттальный срез через копулятивный аппарат (Б), на вклейке короткая папилла копулятивного органа

ГЛ – глотка; см – смешанные продольные и кольцевые мышечные волокна внутренней стенки глотки; П – копулятивный орган; СВ – семяпровод; СП – семяприемник; В – влагалище; ЯВ – яйцевод; КС – канал семяприемника

В озерах природно-территориального комплекса Западного Предкамья (оз. Глубокое, озера Голубое, Малое Голубое-1, Малое Голубое-2) обнаружены два вида планарий – *Polycelis tenuis* и *Dendrocoelum lacteum*. В оз. Глубокое планарии выявлены впервые. Популяции вида *Polycelis tenuis* в этих озерах составлены только меланизированными особями, светлые морфы отсутствовали.

Принадлежность обнаруженных дентроцелид к виду *Dendrocoelum lacteum* Müller, 1774 в обследованных водоемах подтверждена гистологически, по структуре глотки и особенностям половой системы (присутствует один аденодактиль, яйцеводы перед впадением в общий атриум сливаются в один проток) (рис. 3). Копулятивный аппарат дендроцелид из этих биотопов также демонстрирует признаки, типичные для *D. lacteum*: хорошо развита папилла пениса, состоящая из базальной части в виде широкого цилиндра и дистальной узкой трубчатой части, заканчивающейся длинным флагеллумом (рис. 3 *Б*). Мужской атрий имеет вид конусовидной полости, которая открывается узким отверстием в общий атрий. С полостью общего атриума сообщается полость единственного аденодактиля.

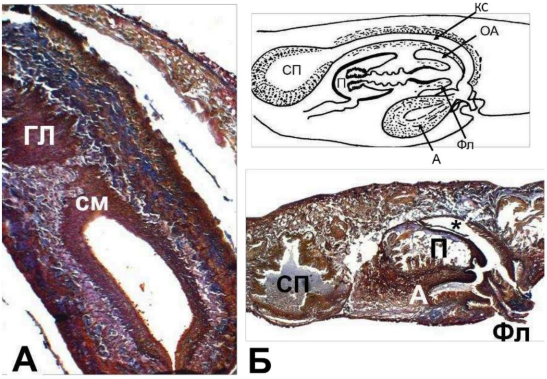


Рис. 2. *Dendrocoelum lacteum.* Строение глотки по «дендроцелидному» типу (А). Сагиттальный срез через копулятивный аппарат (Б)

ГЛ – глотка; см – смешанные продольные и кольцевые мышечные волокна внутренней стенки глотки; П – копулятивный орган; Фл – флагеллюм; СП – семяприемник; КС – канал семяприемника; А – аденодактиль; *) – общий атриум

Таким образом, по результатам проведенной гистологической идентификации видов планарий озер Заволжья можно сделать вывод о достоверном присутствии в бентоценозах озер Лесного Заволжья двух видов: *Polycelis tenuis* (сем. Planariidae) и *Bdellocephala punctata,* (сем. Dendrocoelidae). Для оз. Глубокое и Голубых озер (Западное Предкамье) подтверждено присутствие *Dendrocoelum lacteum* и *Polycelis tenuis*. Причем впервые для оз. Глубокое обнаружены планарии этих видов. Впервые планарии вида *Bdellocephala punctata* обнаружены во временном водоеме Сосновой рощи на территории г. Йошкал-Олы (Лесное Заволжье).

Выражаем благодарность сотрудникам Марийского государственного университета, и отдельная признательность Прасковье Владимировне Бедовой, за предоставленный материал.

Литература

Бедова П.В. Макрозообентос литорали озера Кичиер (состояние, сезонная динамика) // Научные исследования в национальном парке «Марий Чодра». Вып. 2. Гидробиологические исследования. Йошкар-Ола: МарГУ, 2006. С. 88–99.

Бедова П.В., Горохова А.Г., Забурдаева Е.А. Мониторинговые исследования бентофауны озера Шутьер НП «Марий Чодра» // Популяции в пространстве и времени / Сборник материалов VIII Всероссийского популяционного семинара. Н. Новгород, 2005. С. 26–28

Бедова П.В. Структурно-функциональная организация донных сообществ озер Марийского Полесья // Эколого-биологические проблемы вод и биоресурсов: пути решения / Сборник научных трудов всеросс. конф. Ульяновск, 2007. С. 30–32.

Дыганова Р.Я. Планарии окрестностей г. Казани // Проблемы охраны вод и рыбных ресурсов Поволжья / Тез. докл. 2-й конф. молодых ученых. Казань, 1980. С. 90–93.

Дыганова Р.Я., Порфирьева Н.А. К вопросу о распространении планарии в водоемах Заволжья // Проблемы охраны вод и рыбных ресурсов / Тез. докл. 3-й Поволжской конференции. Казань, 1983. С. 171.

Коргина Е.М. Фауна турбеллярий Иваньковского водохранилища // Фауна и биология пресноводных организмов. Л.: Наука, 1987. С. 149.

Курбангалиева Х.М., Кашеварова О.В. Гидробиологическая характеристика Голубого озера // Учен. зап. Казан. ун-та. 1946. Т. 106. №3. С. 71–91.

Монасыпов М.А. Структурно-функциональные характеристики макрозообентоса солоноватоводных озер Среднего Поволжья: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Казань, 2003. 24 с.

Порфирьева Н.А., Дыганова Р.Я. Планарии Европейской части СССР: морфология, систематика, распространение. Казань: Изд-во КГУ, 1987. 190 с.

Тимофеева М.Ю., Канюшкова Т.А., Ильин А.В., Пайдыганов П.П. Озеро Табашинское (результаты лимнологических исследований) // Научному прогрессу – творчество молодых / Материалы международной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам. Йошкар-Ола: МарГу, 2008. С.81–82.

Тимофеева М.Ю., Торбеева А.В., Ожиганова О.С. Бедова П.В. Состояние бентоценозов некоторых озер Сотнурской возвышенности Республики Марий Эл // Регионы в условиях неустойчивого развития. Кострома: КГУ им. Н.А. Некрасова, 2010. Т. 2. С.484–489.

ON THE DISTRIBUTION OF PLANARIA IN THE FORESTED VOLGA REGION AND THE WESTERN PRE-KAMA REGION

N.V. Shakurova

The distribution of planarians – triclad flatworms (Tricladida) – has been studied in the territory of the Forested Volga Region and the Western Pre-Kama Region. Through histological identification, the presence of two species has been confirmed: *Polycelis tenuis* (Planariidae) in three color morphs, and *Bdellocephala punctata* (Dendrocoelidae) in the lakes of the Forested Volga Region. For the first time, the planarians *Dendrocoelum lacteum* and *Polycelis tenuis* were found in Lake Glubokoe (Western Pre-Kama Region). For the first time, the planarian species *Bdellocephala punctata* was discovered in a temporary water body in the Pine Grove area in the city of Yoshkar-Ola (Forested Volga Region).

ОЦЕНКА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ФИТОПЛАНКТОНА НЕКОТОРЫХ РАЗНОТИПНЫХ ОЗЕР НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВАНИИ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА «А» ВО ЛЬДУ И ПОДЛЕДНОЙ ВОДЕ

Е.М. Шарагина[1], П.В. Кулизин[1], НА. Старцева[1], Д.А. Журова[1,2], А.С. Кузнецова[3], Е.Л. Воденеева

[1]*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,*
[2]*Нижегородский филиал «Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии»*
[3]*ООО «Вятка Строй»*

По данным 2023 года поведена оценка содержания хлорофилла «*a*» в подледной воде и толще льда в озерах Лунское и Вадское (бассейн Средней Волги), различающихся своим происхождением и ледовым режимом. Показано, что в полностью и частично замерзающих водоемах более высокие концентрации пигмента отмечались в подледных горизонтах. Максимальные значения хлорофилла «*a*» (на отдельных станциях – более 9 мкг/л в подледной воде и толще льда) были зарегистрированы в высокоэвтрофном оз. Лунском, где отмечалось активное развитие цианобактерий планктотрихетового комплекса (до 90% общих количественных показателей). Распределение хлорофилла в керне льда оказалось неравномерным, и было более заметным в нижних пористых горизонтах, контактирующих с водой.

Хлорофилл «*a*», наряду с прочими фотосинтетическими пигментами, является показателем продукционной активности водоемов, анализ его содержания позволяет дать оценку как фотосинтетической активности отдельных альгоценозов, так и экологическому состоянию тех или иных водных объектов в целом (Минеева, Семадени, 2020; Денисов и др., 2020). Ледовый покров водоемов представляет собой важный структурный компонент биосферы со специфическими свойствами, являясь хорошо защищенной экологической нишей для заселения ее организмами планктона. Изучение развития зимнего растительного планктона (криопланктона) в основном проводилось на примере морей Арктики и Антарктики, пресноводные континентальные водоемы в этом плане изучены значительно слабее (Немировская, Кравчишина, 2016; Звалинский и др., 2010; Винокурова и др., 2017). В отличие от морского льда, пресноводный является более монолитным, и водоросли остаются вмерзшими в него, в неактивном состоянии. Поры, полости и каналы, присутствующие постоянно во льду морских водоемов, возникают только весной, или в течение временных потеплений (Шаров, 2022; Salonen et al., 2009).

Целью настоящего исследования стала оценка содержания хлорофилла «*a*» во льду и подледной воде некоторых озер Нижегородской области (Вадское, Лунское), различающихся своим происхождением и режимом становления льда.

Материалом для работы послужили пробы фитопланктона подледной воды и льда, отобранные в течение зимнего периода 2023 года с двух различных по морфометрическим, гидрологическим и гидрохимическим параметрам озер – Вадское и Лунское. Озеро Вадское расположено в Вадском районе Нижегородской области, представляет собой памятник природы регионального значения, по своему происхождению является карстовым (Соснина, Воденеева, 2023). Озеро Лунское – пойменное озеро, старица р. Волги, расположено в черте города Нижнего Новгорода и испытывает достаточно сильную антропогенную нагрузку. Питание озера осуществляется за счет поверхностного стока (Старцева, Охапкин, 2003). Сетка станций устанавливалась в соответствии с особенностями озер. На оз. Вадское пробы льда и

подледной воды отбирались в первой декаде февраля с 6 станций. Станция 2 в течение всего зимнего периода оставалась безледной, так как именно здесь на дне озера находится воклина, где происходит разгрузка реки Вадок. На озере Лунское было установлено 3 станции, отбор проб производился во второй декаде марта. Пробы льда (керн) на водоемах отбирались при помощи кольцевого ледобура. Отбор проб подледной воды в объеме 1 л. производился батиметрическим методом. Толщина льда на оз. Вадское составляла 30-60 см, на оз. Лунском – доходила до 70 см, также сверху присутствовал слой снега толщиной 30 см. Поскольку на оз. Лунское отбор проб производился в марте в момент оттепели, то лед был пористым и неоднородным, поэтому была возможность разделить его на фракции по визуальным признакам. Образцы льда оттаивались при комнатной температуре. Затем производилась фильтрация проб при помощи вакуумной фильтровальной установки ПВФ-47/1НБ с использованием микрофильтрационных мембран «Владипор» типа МФАС ОС-2. Экстракция хлорофилла с фильтров осуществлялась в 90% этаноле с помощью мульти-ротатора Multi Bio RS-24 в течение 60 минут в темноте при комнатной температуре. Далее осуществлялось центрифугирование экстрактов при g=1600 в течение 20 минут при комнатной температуре. Оптическая плотность измерялась с помощью спектрофотометра СФ-2000. Измерение оптических плотностей проводили на длине волны 664 и 750 нм до и после подкисления экстракта (Бакаева и др., 2013). Подсчет биомассы растительного планктона производился общепринятыми в гидробиологии методами.

В озере Вадское распределение хлорофилла в подледной воде оказалось неравномерным. Наиболее высокие значения этого показателя (до 1,45 мкг/л) были отмечены в полностью замерзающей западной части озера, составляя в среднем для этой части акватории более 1 мкг/л. Биомасса фитопланктона здесь изменялась от 0,3 до 1,93 г/м^3, с преобладанием в планктоне динофлагеллят. В восточной части водоема, включая безледную станцию (ст.2), содержание хлорофилла «*a*» оказалось ниже, составляя в среднем для этой акватории 0,6 мкг/л. Значения биомассы здесь варьировали от 0,3 до 1,3 г/м^3, основной вклад в которую также определяли динофитовые водоросли. Содержание хлорофилла «*a*» в подледной воде озера Вадское имело линейную зависимость с биомассой фитопланктона (R^2=0,86). В толще льда хлорофилл был зарегистрирован на всех станциях отбора проб. На двух станциях (1, 3) концентрации этого показателя в 3-6 раз превышали таковые для подледной воды (до 4,32 мкг/л), при этом биомасса водорослей льда была низкой, составляя 0,14-1,17 г/м^3. Комплекс доминирующих таксонов был сформирован динофитовыми водорослями, как и в подледной воде. В летний сезон вблизи указанных станций отмечалось активное развитие высшей водной растительности, что возможно повлияло на завышенные значения хлорофилла и их несоответствие значениям биомассы водорослей. На станциях 4-6 отмечалась обратная тенденция – значения концентрации хлорофилла «*a*» во льду оказались ниже, чем в подледной воде (0,02-0,78 мкг/л), что является более закономерным явлением, так как в подледной воде вегетация водорослей в целом выше, чем во льду (Шаров, 2022). Кроме того, в подледную воду может попадать хлорофилл из механически разрушенных клеток нижнего горизонта льда при его подтаивании. В отличие от наблюдаемой в подледной воде линейной зависимости биомассы водорослей и содержания хлорофилла, во льду данной закономерности не отмечалось. Это может определяться как текстурными особенностями льда в разных частях акватории, так и в целом более суровыми (экстремально низкие температуры, механическое воздействие кристаллов льда и т.д.), условиями для развития криофитона. В целом, значения концентрации хлорофилла «*a*» и биомассы в данном озере соответствовали олиготрофному уровню развития (Китаев, 1984).

В полностью замерзающем пойменном озере Лунское, характеризующимся высоким трофическим статусом и «цветением» в течение вегетационного периода цианобактериями планктотрихетового комплекса (Старцева, Гаврилко, 2024), концентрации хлорофилла «*a*» оказались заметно выше, варьируя от 1,74 до 9,41 мкг/л в подледной воде. Распределение этого показателя также было неравномерным по акватории озера, его максимальные значения отмечались на самой глубоководной станции 2. Основными доминантами в зимний период выступали безгетероцитные цианобактерии (включая потенциально токсичные виды), которые формировали до 80-90% суммарных показателей развития зимнего фитопланктона: значения биомассы изменялись от 1,62 до 11,81 г/м^3. Развитие цианобактерий происходило и в толще льда. Биомасса водорослей и концентрации хлорофилла «*a*» здесь были ниже, чем в подледной воде и варьировали по станциям от 1,26 до 7,71 г/м^3 и 3,28 до 9,57 мкг/л соответственно. Анализ отдельных горизонтов керна льда показал, что максимальными концентрации водорослей и пигментов оказались в самых нижних горизонтах льда (на станции 3 – до 21,12 г/м^3 биомассы и 28,43 мкг/л хлорофилла), где отмечались визуально заметные скопления цианобактерий. Поскольку исследования проводились в период первых весенних оттепелей (вторая декада марта), то в это время происходило подтаивание льда и образование в нем полостей и каналов, заполненных водой, что может благоприятствовать развитию водорослей (Salonen et al., 2009).

Таким образом, в исследованных водоемах независимо от особенностей их ледового режима в зимний период отмечалось развитие водорослей как в воде, так и в самой толще льда, при этом наибольшие значения биомассы и концентрации хлорофилла «*a*» отмечались в подледных горизонтах. Более интенсивным развитие этих показателей было в эвтрофном водоеме, где отмечалось визуально заметное подледное цианобактериальное «цветение» воды. Высокая пластичность цианобактерий, толерантность к низким температурам и условиям освещенности (Rücker et al, 1997) способствовали массовому развитию их также в толще льда, особенно в зоне контакта с водой. Массовое подледное развитие цианобактерий, присутствие в комплексе доминант потенциально токсичных видов, может спровоцировать более ранние по срокам вспышки опасного «цветения» озера, активно использующегося в рекреационных целях.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-24-00573

Литература

Винокурова Г.В., Коломейцев А.А., Суторихин И.А., Фроленков И.М, Фроленков О.М. Состав, структура фитопланктона, концентрация хлорофилла и гидрофизические параметры воды оз Красиловское в начале весны при условии ледостава // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии Формирование водных ресурсов суши в условиях антропогенных воздействий / Труды III Всероссийской научной конф. с междунар. участием. Барнаул, 2017. Т. 1. С.55-63

Денисов Д.Б., Слуковский З.И., Косова А.Л. Содержание хлорофилла «*a*» в планктоне озер урбанизированных территорий Мурманской области // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. 17. С. 163–167.

Звалинский В.И. Марьяш А.А., Стоник И.В., Швецова М.Г., Сагалаев С.Г., Бегун А.А., Тищенко П.Я. Продукционные и гидрохимические характеристики льда, подледной воды и донных осадков эстуария реки Раздольной (Амурский залив, Японское море) в период ледостава // Биология моря. 2010. Т. 36. № 3. С.186–195

Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озёр разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.

Минеева Н.М., Семадени И.В. Сезонная и межгодовая динамика хлорофилла в планктоне Рыбинского водохранилища (2015-2019 гг.) // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, 2020. Вып. 92(95). С. 12-27.

Немировская И.А., Кравчишина М.Д. Изменчивость концентрации взвеси и органических соединений во фронтальных зонах Атлантического и Южного океанов // Океанология. 2016. Т. 56. № 1. С. 60–69.

РД 52.24.784-2013Массовая концентрация хлорофилла «*a*». Методика измерений спектрофотометрическим методом с экстракцией этанолом.

Соснина А.С., Воденеева Е.Л. Состав и развитие фитопланктона озера Вад (Нижегородская область) // «Биосистемы: организация, поведение, управление» / 75-я Всероссийская с международным участием школа-конференция молодых ученых. Нижний Новгород, 2023. С. 294.

Старцева Н.А., Гаврилко Д.Е. Цианобактерии планктотрихетового комплекса в альгоценозе малого водоема урбанизированного ландшафта (на примере оз. Лунское, г. Нижний Новгород) // Тезисы докладов 13-го Съезда гидробиологического общества при Российской академии наук, посвященный 300-летию РАН, десятилетию науки и техники в России и пятилетию Архангельского отделения ГБО при РАН. Архангельск: КИРА. 2024. С. 224-225.

Старцева Н.А., Охапкин А.Г. Состав и структура фитопланктона некоторых пойменных озер культурного ландшафта (на примере г. Нижнего Новгорода) // Биология внутренних вод. 2003. №4. С. 35-42.

Шаров А.Н. Подледный фитопланктон и его весеннее развитие в северных озерах // IV Всероссийская конференция с международным участием «Актуальные проблемы планктонологии». Калининград, 2022. С. 217-219.

Rücker J., Wiedner C., Zippel P. Factors controlling the dominance of *Planktothrix agardhii* and *Limnothrix redekei* in eutrophic shallow lakes // Shallow Lakes ’95. Developments in Hydrobiology, 1997. V. 119.

Salonen K., Leppäranta M., Viljanen M., Gulati R.D. Perspectives in winter limnology: closing the annual cycle of freezing lakes // Aquat. Ecol. 2009. 43. P. 609-616.

ASSESSMENT OF PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY OF PHYTOPLANKTON OF SOME VARIOUS LAKES OF THE NIZHNY NOVGOROD REGION BASED ON THE CONTENT OF CHLOROPHYLL «A» IN ICE AND UNDER-ICE WATER

E.M. Sharagina, P.V. Kulizin, N.A. Startseva, D.A. Zhurova,
A.S. Kuznetsova, E.L. Vodeneeva

Based on 2023 data, the chlorophyll «*a*» content in subglacial water and ice thickness was assessed in Lakes Lunskoye and Vadskoye (Middle Volga basin), which differ in their origin and ice regime. It was shown that in fully and partially freezing water bodies, higher pigment concentrations were observed in subglacial horizons. The maximum chlorophyll «*a*» values (at some stations - more than 9 mcg/l in subglacial water and ice thickness) were recorded in the highly eutrophic Lake Lunskoye, where active development of cyanobacteria of the “Planktotricheta” complex was noted (up to 90% of the total quantitative indicators). The distribution of chlorophyll in the ice core turned out to be uneven, and was more noticeable in the lower porous horizons in contact with water.

МАССОВОЕ РАЗВИТИЕ ЦИАНОБАКТЕРИЙ В ОЗЕРАХ РОССИИ: ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ

А.Н. Шаров
Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

Рассмотрены основные причины и последствия массового развития цианобактерий в водоемах. Национальная программа по изучению «цветений» воды в России отсутствует. В конце 2021 г в России введен СанПиН 1.2.3685-21, согласно которому установлены ПДК микроцистина-LR в 1 мкг/л в питьевой воде и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Содержание цианотоксинов в воде исследованных водоемах России, как правило, не превышает 1 мкг/л, но в отдельных случаях наблюдались концентрации более 40 мкг/л. Представлен обзор современных физических, химических и биологических методов борьбы с массовым развитием цианобактерий в поверхностных пресноводных экосистемах и проведен анализ их эффективности.

Ожидается, что «цветение» воды станет более частым и сильным в поверхностных водоемах из-за изменения климата и деградации экосистем. Загрязнение водоемов органическими и минеральными соединениями, в том числе биогенными элементами, а также глобальные климатические изменения способствуют массовому развитию микроводорослей. В умеренных масштабах рост водорослей и цианобактерий повышает биологическую продуктивность водоёмов, что связано с поступлением в водную среду продуктов жизнедеятельности водорослей: белков, свободных аминокислот, углеводов, витаминов, макро- и микроэлементов, стимулирующих развитие гидробионтов. «Цветения» ухудшают качество воды, снижают биологическую продуктивность, представляют серьёзную угрозу для жизни и здоровья людей, вызывают болезни и массовую гибель рыб, бентосных, планктонных и нейстонных беспозвоночных, а также водоплавающих птиц и млекопитающих, создают проблемы на водозаборных станциях, водохранилищах, рекреационных водоёмах. Внеклеточные и внутриклеточные цианотоксины становятся факторами экологического риска, так как многие из них обладают высокой биологической активностью, проявляя аллергенные, мутагенные, канцерогенные, антигормональные, бактерицидные и другие свойства.

В настоящее время «цветение» наблюдается во всех природно-климатических зонах Земли: в небольших и крупных реках, их эстуариях, больших и мелких озёрах, прудах и водохранилищах, опреснённых морских акваториях и морях. Об актуальности этой проблемы говорит большое число публикаций в научных и научно-практических изданиях, значительное число международных программ и договоров по исследованию процессов и возбудителей «цветения», финансируемых правительствами и фондами различных государств. Национальная программа по изучению «цветений» в России отсутствует. Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) была рекомендована ПДК 1 мкг/л для микроцистина-LR в питьевой воде и общее содержание микроцистинов в воде в зонах рекреации – 20 мкг/л.

Согласно СанПиН 1.2.3685-21 (постановление от 28 января 2021 года N 2) "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде питьевой систем централизованного, в том числе горячего, и нецентрализованного водоснабжения, воде подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, воде плавательных бассейнов, аквапарков для микроцистина-LR

установлены в 1 мкг/л (лимитирующий показатель вредности – санитарно-токсикологический, 1 класс опасности). Доминирование цианобактерий в водоемах источниках питьевой воды требует введения дополнительных стадий очистки. Обработка воды должна включать в себя как удаление самих цианобактерий (избегая клеточного лизиса и последующего выделения токсинов), так и ранее выделившихся из клеток растворенных цианотоксинов.

Богатство видового состава планктонных водорослей и цианобактерий в водоемах России связано с морфометрическими характеристиками. Наибольшее видовое разнообразие наблюдалось в самых крупных водохранилищах. Многолетнее изменение видового состава в водохранилищах сопряжено с фазами водности. В летне-осенний период лидировали цианобактерии (64-80% от средней биомассы). Обычно в этот период доминируют виды родов Microcystis, Aphanizomenon, Dolichospermum (Anabaena) и Planktothrix. Биомасса фитопланктона в июле-октябре может быть >11 мг/л, что характерно для биологического загрязнения вод. На отдельных участках и в заливах за счет нагонных явлений отмечается «гиперцветение» при биомассе фитопланктона >50 мг/л. Содержание цианотоксинов в воде исследованных водоемах России, как правило, не превышает 1 мкг/л, но в отдельных случаях наблюдались концентрации более 40 мкг/л (Воякина и др., 2020; Корнева и др., 2014; Tekanova et al., 2024).

В научной литературе нет общего мнения природы появления цианотоксинов. Существуют несколько гипотез:

1. Защитная функция. Гипотеза о роли водных ракообразных как «пускового фактора», определяющего появление у цианобактерий способности синтезировать цианотоксины (DeMott et al., 1991).

2. Сигнальная функция. Выработка токсинов цианобактерий как своего рода «сигнальных» молекул, с помощью которых популяции бактерий могут регулировать их собственный рост в зависимости от условий (Kaplan et al., 2012).

3. Аллелопатическая гипотеза отводит цианотоксинам роль «химического инструмента» подавления одних видов другими при конкурентных взаимоотношениях (Сиделев, 2013; Babica et al., 2006). В природе аллелопатия может проявиться при лимитировании факторами (например, биогенами) когда даже толерантные виды фитопланктона оказываются чувствительными к действию токсинов.

На основе анализа более 700 отечественных и зарубежных источников произведена оценка существующих методов борьбы с массовым развитием цианобактерий (Корнева и др., 2023). Представлен обзор современных физических, химических и биологических методов борьбы с массовым развитием цианобактерий в поверхностных пресноводных экосистемах. Проведен анализ эффективности разных методов борьбы с цианобактериальным «цветением» воды.

На сегодняшний день отсутствует универсальная технология борьбы с массовым развитием цианобактерий. Необходим комплексный подход с использованием комбинаций физических, химических, биологических методов, оптимизированных по критериям безопасность-стоимость-эффективность. Нужно проводить дальнейшие исследования в различных условиях и водоемах с выявлением приоритетных гидробиологических, гидрохимических и гидрологических факторов и механизмов, обуславливающих массовое развитие цианобактерий. Необходима оценка рисков массового развития цианобактерий в водоёмах Российской Федерации, нормирование состава и содержания токсичных метаболитов цианобактерий, развитие методов молекулярно-генетической детекции токсигенных цианобактерий.

Литература

Воякина Е.Ю., Русских Я.В., Чернова Е.Н., Жаковская З.А. Токсичные

цианобактерии и их метаболиты в водоёмах северо-запада России // Теоретическая и прикладная экология. 2020. №1. С. 124–129.

Корнева Л.Г., Соловьева В.В., Жаковская З.А., Русских Я.В., Чернова Е.Н. Фитопланктон и содержание цианотоксинов в Рыбинском, Горьковском и Чебоксарском водохранилищах в период аномально жаркого лета 2010 г. // Вода: химия и экология. 2014. №8. С. 24–29.

Сиделёв С.И. Влияние цианобактериальных токсинов на рост *Scenedesmus acutus* и *Gloeocapsa* sp. в условиях лабораторного эксперимента // Вода: химия и экология. 2013. №9. С. 60–65.

Корнева Л.Г., Шаров А.Н., Сиделев С.И., Зубишина А.А., Медведева Н.Г., Лазарева Г.А. «Цветение» воды цианобактериями и методы борьбы с их массовым развитием. Дубна: Гос. ун-т «Дубна», 2023. 258 с.

Babica P., Blaha L., Marsalek B. Exploring the natural role of microcystins – a review of effects on photoautotrophic organisms // J. Phycol. 2006. V. 42. P. 9–20.

DeMott W.R., Moxter F. Foraging cyanobacteria by copepods: responses to chemical defense and resource abundance // Ecology. 1991. 72. P. 1820−1834.

Tekanova E., Sidelev S., Kalinkina N., Chernova E., Barinova S., Sharov A., Smirnova V. Toxigenic cyanobacteria and microcystins in a large northern oligotrophic Lake Onego, Russia // Toxins. 2024. V. 16. №11. P. 457.

CYANOBACTERIAL HARMFUL BLOOM IN RUSSIAN LAKES: CAUSES AND CONSEQUENCES

A.N. Sharov

The main causes and consequences of the cyanobacteria harmful bloom are considered. There is no national program for studying water blooms in Russia. At the end of 2021, SanPiN 1.2.3685-21 was introduced in Russia, according to which the MAC of microcystin-LR was set at 1 μg/l in drinking water and surface water bodies for domestic and drinking, cultural and domestic water use. The content of cyanotoxins in the water of the studied reservoirs of Russia does not exceed 1 μg/l, but in some cases concentrations of more than 40 μg/l were observed. A review of modern physical, chemical and biological methods for combating the mass development of cyanobacteria in surface freshwater ecosystems is presented and an analysis of their effectiveness is carried out.

БАКТЕРИОБЕНТОС В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ РАИФСКОГО И САРАЛИНСКОГО УЧАСТКОВ ВОЛЖКО-КАМСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

Н.Г. Шерышева[1], М.А. Унковская[2]
[1]Институт экологии Волжского бассейна РАН
[2]Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник

В июле 2019, 2022 гг. проведены исследования количественной структуры бактериальных сообществ в донных отложениях озер и водотоков Волжско-Камского заповедника. Общая численность бактериобентоса в озерах Раифского участка составила $11.3\pm0.8\times10^9$ кл/мл, биомасса – 916.3±87.5 мг/л, в протоках и речных станциях Саралинского участка – $4.6\pm0.6\times10^9$ кл/мл и 371±61.2 мг/л, соответственно. На основе гранулометрического и кластерного анализов в озерах выявлены три группы донных

отложений: тонкодисперсные гомогенные илы, гетерогенные илы, пески. Установлено закономерное снижение численности и биомассы бактерий от тонкодисперсных илов (N=13.1±0.8×10^9 кл/мл, B=111±9 мг/л) к песчанистым отложениям (N=4.4±0.8×10^9 кл/мл, B=55±6 мг/л).

Особенностью Раифского участка Волжко-Камского заповедника является своеобразная гидрологическая система разнотипных озер, объединенных малыми реками Сумка и Сер-Булак (Унковская и др., 2024): проточные озера суффозионно-карстового происхождения Раифское, Ильинское, Линево, Карасиха, бессточные озера Илантово и озера, представляющие собой «окна» в сфагновых болотах – Гнилое, Долгое. Саралинский участок заповедника, представляет собой выдвинутый в Куйбышевское водохранилище полуостров, большая часть которого занята древними третьей и четвертой надпойменной террасами р. Волги (Хасанов, Зиганшин, 2020).

Цель настоящего исследования – дать оценку количественным характеристикам бактериобентоса в различных по гидродинамическому режиму водных объектах Волжско-Камского заповедника: разнотипным озерам Раифского участка, а также протокам и речным станциям Саралинского участка; провести типизацию донных отложений озер; выявить закономерность распределения бактериобентоса в различных биотопах озер.

В 2019, 2022 гг. проводились исследования бактериобентоса в озерах и водотоках Волжко-Камского заповедника в составе комплексной экспедиции Института экологии Волжского бассейна РАН. Отбор проб донных отложений проводили с поверхностных горизонтов дночерпателем Петерсена с площадью захвата ковша 0.025 $м^2$. При отборе проб в илах измеряли температуру, активную реакцию среды – pH in situ с использованием портативного прибора pH-METR № 5123. Тип донных отложений определяли на основе гранулометрического анализа, проведенного влажным просеиванием через сита и методом осаждения (Законнов и др., 2018, Кузяхметов и др., 2004). Выделяли следующие размерные фракции механического состава грунта: крупный песок >1 мм, средний и мелкий песок 1.0-0.1 мм, алеврит 0.1-0.01 мм, пелит <0.01 мм (Законнов и др., 2018). Идентификацию типов грунтов производили по (Законнов и др., 2018) и по классификации озерных илов М.В. Кленовой (Зайков, 1960). Определение общей численности и биомассы бактерий проводили методом флуоресцентной микроскопии с использованием флуоресцеинизотиоцината (FITC) (Гальченко, 2001). Подсчет бактериальных клеток проводили с помощью микроскопа Leica DM5500B при увеличении ×1000.

В Раифском участке заповедника в 2019 г. были исследованы озера Линево, Илантово, Долгое, Ильинское, Раифское, в 2022 г. – Линево, Долгое, Моховое, Гнилое, Карасиха. В Саралинском участке исследовали станции: Большая и Малая протока, Мыс (зона слияния рек Кама и Волга), р. Кама, Нижний кордон (р. Волга).

Общая численность бактериобентоса в озерах Линево, Илантово, Долгое, Ильинское, Раифское в 2019 г. изменялась от 3.3×10^9 кл/мл до 14.5×10^9 кл/мл (рис. 1). В тонкодисперсных серых и черных илах, залегающих в пелагических зонах озер на глубинах 5-17 м, численность бактерий составляла 7-12×10^9 кл/мл, в литоральных илах (прибрежные зоны с глубинами 0.8-5 м) плотность бактерий снижалась до 4-8.8×10^9 кл/мл. Следует отметить, что в оз. Долгое на максимальной глубине, где обнаружен специфичный алевритовый песок кофейного цвета, численность бактерий была минимальной – 3.3×10^9 кл/мл.

В 2022 г. исследовались глубоководные пелагические и мелководные прибрежные биотопы озер Линево, Долгое, Моховое, Гнилое и Карасиха. Общая численность бактерий была сопоставима с 2019 г и составила 2.6-16.3×10^9 кл/мл (рис. 2).

Наибольшая плотность бактерий сосредоточена в пелитовых илах, минимальная – в песчанистых отложениях.

Значения биомассы донных бактерий изменялись соответственно их численности и составляли в 2019 г. 217-814 мг/л, в 2022 г. изменялись от 321 мг/л до 1629 мг/л (рис. 1, 2). Максимальные биомассы бактериобентоса регистрировались в 2019 г. в озерах Илантово, Линево, Раифское, а в 2022 г. – в озерах Гнилое, Моховое, Карасиха, Линево.

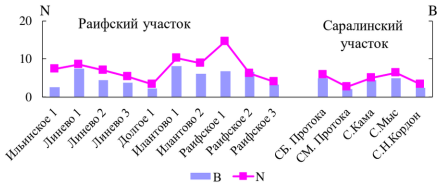


Рис. 1. Общая численность ($N \times 10^9$ кл/мл) и биомасса (B, мг/л) бактериобентоса в озерах и водотоках Волжско-Камского заповедника в июле 2019 г.

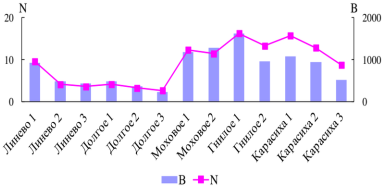


Рис. 2. Общая численность ($N \times 10^9$ кл/мл) и биомасса (B, мг/л) бактериобентоса в озерах Волжско-Камского заповедника в июле 2022 г.

В 2022 г. на основе гранулометрического анализа была проведена типизация донных отложений озер, в результате которой выявлены три группы разновидностей – тонкодисперсные илы, гетерогенные илы и пески (Шерышева и др., 2023).

Тонкодисперсные гомогенные черные и серые алевритo-пелитовые илы залегают на глубоководных пелагических станциях с глубинами более 5 м в озерах Линево, Моховое и Карасиха. Для них характерно наибольшее содержание в механическом составе алевритовых и пелитовых фракций – 64-86%. В оз. Моховое илы сильно газируют, в оз. Карасиха – имеют запах сероводорода. *Коричневый сапропель* обнаружен на глубине 5.5 м в оз. Гнилое – уникальный тип донных отложений: характеризуется желеобразной консистенцией, высоким содержанием органических веществ и тонкодисперсных фракций, при высыхании светлеет. На северном участке оз. Гнилое в зарослях высшей водной растительности на глубине 3 м формируется тонкодисперсный *торфянистый ил,* в котором происходит интенсивный процесс метанообразования.

Гетерогенные мелкопесчанистые и алевритовые илы залегают в прибрежных участках озер, в их составе значительную долю составляют фрагменты макрофитов и торфянистые частицы. К данному морфотипу нами отнесены илы, содержащие 10-25% пелитовой (илистой) фракции:

– темно-серый мелкопесчанисто-макрофитный ил на прибрежном участке выноса р. Сер-Булак из оз. Линево;

– торфянистый ил с мелкозернистым песком на мелководном биотопе в зарослях лилий, кувшинок и роголистника в оз. Долгое;

– серый песчанисто-алевритовый ил в зарослях ряски оз. Моховое;

– темно-серый алевритовый ил, вынос р. Сер-Булак из оз. Карасиха.

Пески обнаружены на мелководьях с глубинами 0.5-2.5 м:

– темно-серый илистый мелкозернистый песок на участке впадения р. Сер-Булак в оз. Линево;

– серый мелкозернистый песок на участке чистой воды без макрофитов рядом со сплавиной в оз. Долгое;

– алевритовый песок (алеврит) кофейного цвета на глубоководной станции в оз. Долгое;

– темно-серый мелкозернистый песок в месте впадения р. Сер-Булак в оз. Карасиха.

Прибрежные пески имеют гетерогенную структуру: содержат различные включения, остатки полуразложившейся водной растительности, иловые частицы, фрагменты листового опада и древесного опада, волоски животных.

Уникальный морфотип песка залегает на глубоководной станции в оз. Долгое (глубина 12.5 м) – гомогенный плотный алеврит молочно-кофейного цвета, идентифицированный нами как *алевритовый песок.* Особенность его в том, что он состоит, в основном, из одного алеврита – 96,6%. Микроскопический анализ показал наличие мелких и средних алевритовых частиц в его составе и только единичные растительные фрагменты.

В ряду морфотипов: тонкодисперсные илы – гетерогенные илы – пески, средние значения численности бактерий закономерно уменьшались: 13.45×10^9 кл/мл – 7.98×10^9 кл/мл – 3.65×10^9 кл/мл, биомасса бактерий также снижалась от тонких илов к песчанистым отложениям: 1153 мг/л – 784 мг/л – 390 мг/л.

Для получения более глубокого представления о пространственном распространении бактерий был проведен кластерный анализ общей численности и биомассы бактерий по ряду абиотических показателей – глубине, активной реакции среды pH, редокс-потенциалу Eh, количеству гранулометрических фракций, содержанию органического и гумусового вещества (рис. 3).

Дендрограмма количественных показателей бактериобентоса в озерах образует две крупные кластерные ветви, достоверно отличающихся друг от друга по количественным показателям: биотопы мелководий с песчанистыми отложениями и биотопы тонких и гетерогенных илов (таблица). Анализ корреляционной матрицы по материалам экспедиций показал, что общая численность и биомасса бактериобентоса имеет высокую функциональную связь с тонкодисперсными (алевритовыми+пелитовыми) фракциями илов ($r=0.71$ и $r=0.81$ при $p<0.5$ соответственно).

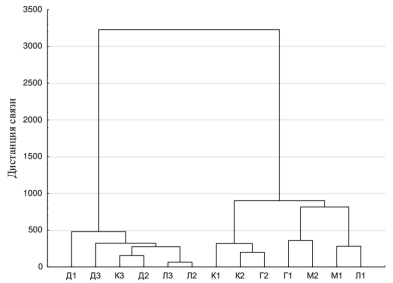


Рис. 3. Дендрограмма количественных показателей бактериобентоса методом Варда (Ward`s method): оз. Карасиха (К1 – глубина, К2, К 3 – прибрежье), оз. Моховое (М1 – глубина, М2 – прибрежье), оз. Долгое (Д1 – глубина, Д2, Д3 – прибрежье), оз. Линево (Л1 – глубина, Л2, Л3 – прибрежье) в Раифском участке в июле 2022 г.

Таблица. Средние значения численности и биомассы бактериобентоса (±доверительный интервал) на биотопах озер заповедника в 2022 г.

Биотоп	H, м	Тип донных отложений	$N\times10^9$ кл/мл	B, мкг/г
Прибрежные мелководья	0.5-2.5	Пески	4.4±0.8	0.6±0.06
Литораль, профундаль	2.5-10	Илы	13.1±0.8	1.1±0.09

Примечание: H – глубина, N – общая численность бактерий, B – биомасса бактерий, СБ – сапрофитные бактерии, ГБ – гетеротрофные бактерии

Донные отложения водотоков Саралинского участка заповедника представлены тонкодисперсными серыми илами. Общая численность бактерий в илах водотоков в 2019 г. изменялась от 2.6×10^9 кл/мл до 6.3×10^9 кл/мл, биомасса – от 201 мг/л до 494 мг/л. При этом среднестатистические значения численности бактерий (средняя±доверительный интервал) в илах составили $4.60\pm0.69\times10^9$ кл/мл, биомассы – 371±61.28 мг/л. Для сравнения, в это же время в озерах Раифского участка средняя численность бактериобентоса достигала $9.18\pm1.18\times10^9$ кл/мл, средняя биомасса – 653±50.51 мг/л.

Как следует из сравнительного анализа, количественные показатели бактериобентоса в илах речных участков с активным гидрохимическим режимом значительно ниже по сравнению с обогащенными органическим веществом илами озер. Такие значимые различия в количественной структуре бактериобентоса обусловлены рядом факторов, наиболее значимым из которых, по мнению авторов, является гидродинамический режим. Так, на примере Приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища было показано, что под воздействием гидродинамических условий формируется вектор пространственного распространения бактерий по донному ложу (Рахуба, Шерышева, 2023). Другими важными факторами количественных различий бактериобентоса двух участков Волжско-Камского заповедника служат морфометрическое строение, проточность, происхождение, гидрохимический режим, ландшафтные особенности: почвенно-растительные условия, залесенность и заболоченность, особенности почвенного покрова (Калимуллина, 2002; Палагушкина и др., 2002; Унковская, Тарасов, 2016; Унковская и др., 2024).

Для пространственного распределения бактериобентоса в озерах установлена биотопическая закономерность снижения численности и биомассы бактерий от глубоководных тонкодисперсных гомогенных и гетерогенных илов к прибрежным песчанистым отложениям.

Работа выполнена по программе фундаментальных исследований по тему № 1024032600218-3-1.6.20.

Авторы выражают глубокую благодарность сотруднику Волжско-Камского биосферного государственного заповедника Е.Н. Унковской за общую организацию экспедиционных работ и помощь при отборе проб донных отложений.

Литература

Гальченко В.Ф. Метанотрофные бактерии. М.: ГЕОС, 2001. 500 с.

Зайков Б.Д. Очерки по озероведению. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. 240 с.

Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И., Шерышева Н.Г. Гидродинамические процессы и их роль в формировании донных осадков водохранилищ Волжско-Камского каскада // Труды ИБВВ РАН. 2018. Вып. 81(84). С. 35–46.

Каримуллина С.Н. История изучения почвенного покрова Волжско-Камского заповедника // Тр. Волж.-Камск. гос. зап-ка. Казань, 2002. Вып. 5. С. 199–213.

Кузяхметов Г.Г., Мифтахова А.М., Киреева Н.А., Новоселова Е.И. Практикум по почвоведению. Уфа: РИО БашГУ, 2004. 120 с.

Палагушкина О.В., Бариева Ф.Ф., Унковская Е.Н. Видовой состав, биомасса и продуктивность фитопланктона озер Раифского участка Волжско-Камского заповедника и его охранной зоны // Тр. Волж.-Камск. гос. зап-ка. Казань, 2002. Вып. 5. С. 37–53.

Рахуба А.В., Шерышева Н.Г. Влияние гидродинамических условий на распределение бактериобентоса в верхнем бьефе Жигулевской ГЭС Куйбышевского водохранилища // Поволжский экологический журнал. 2023. №2. С. 214–228.

Унковская Е.Н., Тарасов О.Ю. Гидрохимический режим Волжско-Камского заповедника и его охранной зоны // Тр. Волж.-Камск. гос. зап-ка. Казань, 2016. Вып. 7. С. 9–37.

Унковская Е.Н., Косова М.В., Шурмина Н.В., Мухаметзянова Ф.М., Игнатьев Ю.А. Гидрохимическая характеристика разнотипных озер Волжско-Камского заповедника // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 2. С. 39–50.

Хасанов Р.Р., Зиганшин И.И. Предварительные итоги исследования озер охранной зоны Саралинского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника // Науки о Земле: от теории к практике (Арчиковские чтения – 2020) / Матер. Всеросс. научно-практ. конф. с международным участием. Чебоксары: Изд. дом «Среда», 2020. С. 101-107.

Шерышева Н.Г., Унковская М.А, Файзуллин А.Р. Бактериобентос озер Волжско-Камского биосферного государственного заповедника в 2022 г // Актуальные проблемы особо охраняемых природных территорий-5 / Труды Всероссийской научной конференции. Тольятти: ИБЦ ИЭВБ РАН, 2023. С. 240-244.

BACTERIOBENTHOS IN BOTTOM SEDIMENTS OF WATER BODIES OF THE RAIFA AND SARALINSKY SITES OF THE VOLGA-KAMA NATURE RESERVE

N.G. Sherysheva, M.A. Unkovskaya

In July 2019 and 2022, studies of the quantitative structure of bacterial communities in bottom sediments of lakes and watercourses of the Volzhsko-Kama Reserve were conducted. The total number of bacteriobenthos in the lakes of the Raifa site was $11,3\pm0,8\times10^9$ cells mL^{-1}, biomass – $916,3\pm87,5$ μg L^{-1}, in the channels and river stations of the Saralinsky site – $4,6\pm0,6\times10^9$ cells mL^{-1} and $371\pm61,2$ μg L^{-1}, respectively. Based on granulometric and cluster analyses, three groups of bottom sediments were identified in the lakes: finelyю dispersed homogeneous silts, heterogeneous silts, and sands. A regular decrease in the number and biomass of bacteria has been established from finely dispersed silts to sandy sediments.

РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОЗЕРА ЕНДРА

А.В. Шерышова, С.А. Сенник
Тюменский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («Госрыбцентр»)

В статье дана характеристика состояния экосистемы озера Ендра и состояния популяции основного промыслового вида рыб – пеляди. Рассмотрены история рыбохозяйственного использования озера, современное состояние, проблемы и пути их решения.

Озеро Ендра расположено на территории Ханты-Мансийского района ХМАО-Югры, в вершинной части водораздела рек Согом и Ковенская. Окружено малодоступными кочковатыми сфагновыми болотами, прерываемыми возвышенными островами хвойного леса с примесью лиственных деревьев. Озеро вытянуто с северо-востока на юго-запад и имеет длину 11.4 км. Средняя ширина 4.1 км. Площадь озера 56.4 $м^2$ (Лезин, 1990). Наибольшая глубина 5.5 м, преобладающие глубины 2.5 м. Из озера вытекает одна река – Янгуловская, в западной части, на месте впадения реки Шош-Ега образовался перешеек, соединяющий озеро с оз. Шошъегатор. Береговая линия развита

слабо. Берега большей частью низменные, болотистые. Южный и часть северного берега возвышенные, песчаные.

В подводной части вдоль северного и южного берегов лежат участки с песчаным грунтом, ширина которых колеблется от 300 м до 1 км. Имеются песчаные участки у восточного и западного берегов озера. Грунт центральной части озера преимущественно состоит из торфяного ила с остатками мхов.

Гидрологический режим озера практически не зависит от режима рек Обь и Иртыш. Питание преимущественно снеговое и дождевое, уровень меняется в зависимости от выпадающих осадков.

Вода слабокислая (pH 5.7–6.5), очень мягкая (общая жесткость 0.15–0.2 мг/экв.л). Содержание кислорода в воде в зимнее время значительно отличается год от года. В начале ледостава оно составляет 10–15 мг/л почти повсеместно, в конце зимнего периода – в одни годы 6–12 мг/л, в другие 3–4 мг/л и менее. В местах с заиленными и торфяными грунтами в конце зимы нередко наблюдается полное отсутствие кислорода.

Макрофиты в озере развиты слабо. Вдоль южного песчаного берега полосой 150–200 м тянется тростник и осока. Изредка встречается вех *Cicutaverosa* L., восточные и западные берега зарастают осокой Carex, вахтой трехлистной *MenyanthestrifoliataL.* и белокрыльником болотным *CallapalustrisL.* Встречаются заросли водной гречихи, подводной растительности не обнаружено.

В оз. Ендра постоянно обитают 9 видов рыб: пелядь *Coregonus peled* (Gmelin), обыкновенная плотва *Rutilus rutilus rutilus* (L.), сибирский елец *Leuciscus leuciscus baicalensis* (Dybowski), язь *Leuciscus idus* (L.), серебряный карась *Carassius auratus gibelio* (Bloh.), щука *Esox Lucius* Linnaeus, речной окунь *Perca fluviatilis* L., ёрш *Gymnocephalus cernuus* (L.) и пескарь *Gobio gobio (Linnaeus, 1758)*.

В составе донных сообществ беспозвоночных в озере обычны малощетинковые черви Oligochaeta, личинки гетеротропных насекомых: Diptera, Odonata, Trichoptera, Ephemeroptera, клопы, жуки, двустворчатые и брюхоногие моллюски. Самой многочисленной группой являются личинки двукрылых сем. Chironomidae, их общая численность составляет до 80% всей численности бентосных организмов, населяющих озеро. Наибольше распространение из них имеют виды родов P*rocladius, Psectrocladius, Tanytarsus, Chironomus*. Наиболее продуктивными являются илистые грунты с биомассой до 4 г/м^2.

В зоопланктоне среди ракообразных беспозвоночных массовое развитие по биотопам отмечено среди таксонов родов *Bosmina, Chydorus,Daphnia, Diaphanosoma, Holopedium*; веслоногие рачки представлены циклопами рода *Cyclops, Mesocyclops, Heterocope, Diaptomus*, их науплиальными и копеподитными стадиями развития, среди коловраток численно доминируют мелкие таксоны *Keratella, Conochilus, Polyarthra, Notholca, Kellicottia,* а также хищная *Asplanchna priodonta.* Значение биомассы зоопланктона в среднем по биотопам варьирует в пределах 2–5 г/м^3.

Для оз. Ендра, как, как и для всех озер Ендырской системы, характерно то, что пелядь, обитающая в нем, отличается быстрым ростом, скороспелостью (половозрелыми особи становятся уже на третьего году жизни) и большими размерами – не редко большую часть промыслового стада составляют особи длиной свыше 45 см и массой более 1,5 кг. Бренд «ендырская пелядь» широко известен не только на территории Российской Федерации, рыбопосадочный материал пользуется спросом также и на рыбоводных хозяйствах Казахстана и Китая.

Размерно-возрастной состав. Максимальная продолжительность жизни пеляди, судя по значительному массиву накопленных данных, составляет 10–12 лет (Попов, 2007). В уловах на озере Ендра преобладают рыбы в возрасте 4–7 лет, периодически встречаются единичные особи возрастом 13–14 лет. В 2024 г. основу уловов составляли

особи возрастом 6+…7+ лет (генерации 2016–2017 гг. Преобладание этих генераций отмечается четвертый год подряд (табл.).

Таблица. Возрастной состав пеляди в 2021–2024 гг., оз. Ендра, ставные сети, ноябрь – декабрь 2024 г. (жирным шрифтом выделены преобладающие в уловах возраста)

Год	Возрастной состав, %											Экз.	Средние	
	3+	4+	5+	6+	7+	8+	9+	10+	11+	12+	13+		длина,см	масса, г
2021	16.9	**25.9**	15.5	23.5	18.2	-	-	-	-	-	-	132	32.49	599.0
2022	3.2	6.5	**22.6**	**19.4**	16.1	25.8	3.2	3.2	-	-	-	31	33.2	753.1
2023	-	8.3	**31.3**	**28.1**	11.5	8.3	7.3	4.2	-	1.0	-	96	34.32	716.2
2024	-	2.4	13.6	**24.8**	**25.0**	18.4	11.4	3.4	0.6	0.3	0.2	617	35.51	842.1

Это, несомненно, свидетельствует о наличии в популяции отдельных урожайных поколений, одними из которых, в частности, является поколения 2016–2017 г., которые составляют на текущий момент основу всей популяции. Особи возрастом 2+…4+ последние года в уловах практически отсутствуют.

Отмечается повышение средней длины и массы, как в связи с общим повышением среднего возраста в уловах, так и по отдельным возрастным группам за ряд лет. Так, за период 1975–1982 гг. (здесь и далее используются фондовые данные Тюменского филиала ФГБНУ «ВНИРО») длина особей пеляди (SL) составила от 21.7 до 40.7 см (в среднем 30.18 см), а масса рыб изменялась от 160 до 1574 г (в среднем 520.55г), масса пеляди возрастом 6+ в среднем составляла 601.9 г, а длина 31.44 см.

В 2021–2024 гг. длина SL колебалась от 26.0 до 49.0 см (в среднем 33.74±0.11см); масса особей варьировала от 288 г до 1950 г (в среднем 711.34±6.93 см) Пелядь в возрасте 6+ лет имела среднюю массу 708.62±7.18 г и длину 33.82±0.11 г (рис.).

Половая структура, плодовитость. Половая структура популяции пеляди характеризуется соотношением полов 1:1. За период 1975–2024 гг. самки составили 52.1 %, самцы – 47.9 %.

Как и у большинства рыб, у пеляди абсолютная плодовитость варьирует в широких пределах и во многом зависит от длины и массы производителей. В исследуемый период абсолютная плодовитость колебалась в пределах 3.9–64.8 тыс. шт. икринок. В 2024 г. она в среднем составила 32.0 тыс. шт. икринок.

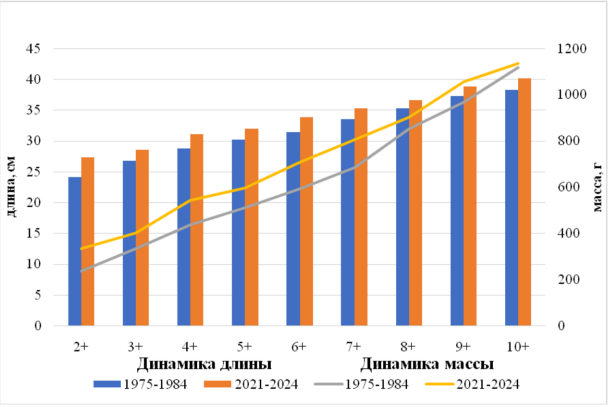


Рис. Линейный и весовой рост пеляди оз. Ендра за ряд лет

Питание. В большинстве озёрных водоёмов в пределах естественного ареала пелядь питается преимущественно организмами зоопланктона, среди которых предпочтение отдаётся ветвистоусым рачкам даже при доминировании веслоногих (Скрябин, 1956).

Определить текущий спектр питания затруднительно в связи с тем, что последние годы все исследования состояния популяции проводятся только в период ее нереста, в ноябре, когда рыба перестает питаться и наполнение желудков отсутствует. В исследованиях предыдущих лет анализ содержимого желудков показал, что наибольший удельный вес в пищевом комке принадлежал ветвистоусым рачкам рода *Daphnia*.

Коэффициент упитанности пеляди в ноябре – декабре был равен: по Фультону – 1.85, по Кларк – 1.68, что говорит о хороших условиях нагула в летний период 2024 г.

Более шестидесяти лет оз. Ендра используется в рыбоводных целях. Промысел ведется в нерестовой период, во время подхода стада на нерестовые пески в ноябре–декабре. Полученная от производителей икра пеляди инкубируется на рыбоводных заводах и в дальнейшем личинка используется для зарыбления различных водоемов в целях воспроизводства рыбных запасов и для товарного рыбоводства.

Неоднократно запасы пеляди в озере подрывались, как и из-за нерационального промысла (в 60–70х годах вылов доходил до 100 тонн), так и из-за гидрологических особенностей озера – периодически возникающих зимних заморов (последний замор был отмечен весной 2004 г.).

В популяциях с высокой численностью, впервые нерестящиеся особи играют роль резерва. Они начинают активно размножаться, когда численность более взрослых рыб снижается (Никольский, 1974). Отсутствие в уловах особей младшевозрастных поколений (2+…3+) говорит о недостаточной эффективности естественного воспроизводства последних лет.

На текущий момент несмотря на то, что биологические показатели пеляди оз. Ендра находятся в удовлетворительном состоянии и признаков перелова нет, стоит ожидать снижения уловов в последующие годы, после выхода из эксплуатации старшевозрастных производителей.

В предыдущие годы для поддержания численности популяции пеляди проводились ежегодные зарыбления озера личинкой и, в настоящее время, в виду малого пополнения запаса, возобновление зарыбления озера личинкой, полученной от местных производителей, будет служить дополнительной мерой по поддержанию численности популяции пеляди на достаточном уровне.

Также, в озере практически не ведётся промысел хищной и малоценной рыбы, за исключением случаев, когда она попадается в качестве прилова при сборе рыбоводной икры или во время любительской рыбалки, которая осложняется труднодоступностью озера в летний период. Из-за этого численность местных видов рыб остаётся высокой, и они активно уничтожают личинок пеляди и конкурируют с ней за корм. Ежегодный мелиоративный лов позволит устранить хищных и конкурентных в питании рыб, что приведет к повышению численности и биомассы пеляди в водоеме. Лов хищных и малоценных видов рыб в озере необходимо проводить с помощью неводов и методомтрадиционного для коренных малочисленных народов севера лова – котцового лова. Отлов рыбы в оз. Ендра нужно проводить в определенные периоды: с 1 мая по 31 октября – с использованием озерных неводов, а с 1 января по 31 декабря – с помощью котцового лова.

Таким образом, зарыбление личинкой и организация мелиоративного лова на оз. Ендра являются необходимыми мерами для поддержания запасов пеляди на текущем уровне и, в будущем, для увеличения численности стада этого ценного промыслового вида рыб.

Литература

Лезин В.А. Реки и озера Тюменской области: словарь-справочник. Тюмень: Пеликан, 1995. 298 с.

Никольский Г.В. Теория динамики стада рыб. М.: Наука, 1974. 447 с.

Попов П.А. Рыбы Сибири: распространение, экология, вылов. Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2007. 526 с.

Скрябин А.Г. Сиговые рыбы юга Сибири. Новосибирск: Наука, 1979. 230 с.

FISHERIES MANAGEMENT OF LAKE YENDRA

A.V. Sheryshova, S.A. Sennik

The article describes the state of the ecosystem of Lake Endra and the state of the population of the main commercial species of the lake – peled. The article considers the history of the fishing use of the lake, the current state, problems and ways to solve them.

БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВУХ ЭНДЕМИЧНЫХ ЭВРИБАТНЫХ АМФИПОД РОДА *OMMATOGAMMARUS* ИЗ ДРЕВНЕГО ОЗЕРА БАЙКАЛ В УСЛОВИЯХ БЫСТРОГО ГРАДИЕНТНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Ю.А. Широкова[1], Е.В. Тэльнес (Мадьярова)[1], А.Д. Мутин[1], Я.А. Ржечицкий[1], Ж.М. Шатилина[1,2], М.А. Тимофеев[1,2]

[1]*Иркутский государственный университет*

[2]*Байкальский исследовательский центр*

Целью исследования было оценить ответ биохимических показателей байкальских глубоководных амфипод *Ommatogammarus flavus* и *O. albinus*, выловленных с различных глубин, на быстрое градиентное изменение температуры. Для оценки содержания энергетических метаболитов и активности антиоксидантных ферментов проводили понижение и повышение температуры. В отдельных экспериментах оценивалась выживаемость амфипод, выловленных с разных глубин, при гипертермии. Среди исследуемых биохимических маркеров наиболее сильное и продолжительное изменение было зафиксировано в содержании глюкозы при повышении температуры. В экспериментах по оценке выживаемости *O. flavus* продемонстрировал бóльшую устойчивость к гипертермии, чем *O. albinus*. Глубина вылова не оказывала влияние на выживаемость амфипод. При понижении температуры гибели животных не отмечали.

В озере Байкал обитают единственные в мире глубоководные пресноводные амфиподы, среди которых представители рода *Ommatogammarus* отличаются способностью населять широкий диапазон глубин (Русинек и др., 2012). В предыдущих исследованиях нами было показано, что виды *O. flavus* (Dybowsky, 1874)и *O. albinus* (Dybowsky, 1874) способны выдерживать длительное содержание при атмосферном давлении. При этом у них отмечался высокий уровень выживаемости и минимальные изменения в энергетическом обмене и параметрах антиоксидантной защиты (Madyarova et al., 2022). Это позволяет использование эврибатных *O. flavus* и *O. albinus* в качестве модельных видов для проведения экофизиологических исследований.

Известно, что *O. flavus* и *O. albinus* встречаются в диапазонах глубин 2.5– 1300 м и 47–1642 м соответственно (Базикалова, 1945). Диапазон обитания *O. flavus* включает литоральную зону с интенсивными колебаниями температуры. Это позволяет

предположить, что данный вид может быть более устойчивым к изменениям температуры по сравнению с обитающим на бóльших глубинах *O. albinus*. Представителей *O. flavus* и *O. albinus* обнаруживают в массе на глубинах 100-300 м и 200-500 м соответственно (Madyarova et al., 2022). В экспериментах с градиентом температурных условий было показано, что температура ~4 °C является предпочитаемой для исследуемых видов (Timofeyev, 2002), что соответствует температуре воды в озере глубже 200 м, равной 3.5–4 °C (Shimaraev, Domysheva, 2013). Ранее эксперименты по постепенному изменению температуры среды с представителями глубоководных байкальских амфипод проводили только с использованием вида *O. flavus*, выловленных с глубины 50-100 м (Axenov-Gribanov et al., 2016). При этом исследованные биохимические показатели, такие как активность антиоксидантных ферментов и лактатдегидрогеназы (ЛДГ), содержание лактата изменялись непродолжительно (Axenov-Gribanov et al., 2016). В данной работе, учитывая эврибатность видов, мы отлавливали *O. flavus* и *O. albinus* с разных глубин, а также расширили спектр исследуемых показателей для выявления наиболее перспективного маркера стрессовых воздействий для байкальских глубоководных амфипод.

Целью исследования было оценить ответ биохимических показателей байкальских глубоководных амфипод *O. flavus* и *O. albinus*, выловленных с разных глубин, на быстрое градиентное изменение температуры. Были исследованы такие биохимические показатели, как энергетические метаболиты (глюкоза, гликоген, аденилаты, лактат), активность ЛДГ и ферментов антиоксидантной системы (пероксидаза, каталаза и глутатион S-трансфераза (ГСТ)), так как они являются высокочувствительными маркерами температурного стресса и играют ключевую роль в адаптации к изменениям температуры (Sokolova, 2021). В отдельных экспериментах оценивали выживаемость амфипод при повышении температуры.

Амфипод *O. flavus* и *O. albinus* отлавливали с использованием донных глубоководных ловушек вблизи п. Большие Коты (51.8982° N, 105.0700° E). Для оценки биохимических показателей особей *O. flavus* отлавливали с глубины 100, 150 и 300 м, *O. albinus* – с глубины 200 и 300 м. Для оценки выживаемости амфипод *O. flavus* отлавливали с глубины 100 и 300 м, а *O. albinus* с 200 и 300 м. Для обоих типов экспериментов амфипод акклимировали в течение недели при 4 °C, меняли воду и кормили животных каждые 2–3 дня. Для оценки биохимических показателей проводили понижение и повышение температуры отдельно для каждого вида, выловленного с определенной глубины. В случае понижения температуры оценивали содержание энергетических метаболитов у *O. flavus* и измеряли активность ферментов у обоих видов. Содержание энергетических метаболитов и ферментативную активность в ответ на повышение температуры оценивали у обоих исследуемых видов, однако содержание лактата определяли только у *O. flavus* в связи с нехваткой образцов для оценки данного параметра у *O. albinus*.

В ходе экспериментальной экспозиции амфипод проводили постепенное (1 °C/ч) понижение и повышение температуры среды от 4°C. Амфипод фиксировали в жидком азоте при достижении следующих температур: 0.5, 1, 2, 4 (контроль), 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 и 22 °C, после чего проводили измерение биохимических показателей с помощью спектрофотометра Carry 50 ConcUV/visiblespectrophotometer (Varian, Australia). Для оценки выживаемости амфипод температуру повышали на 1 °C/ч до достижения LT_{100} (температура 100%-й гибели амфипод).

Статистическую обработку данных проводили в программе «R» (R Core Team, 2023). Чтобы определить, влияет ли фактор глубины и/или температуры на исследуемые биохимические показатели, проводили анализ обобщенной линейной модели (ОЛМ). Для вида *O. albinus* оценивали влияние глубины только на активность ферментов, так

как в случае других параметров представителей данного вида отлавливали только с одной глубины. Сравнения исследуемых показателей с контрольным уровнем проводили с применением непараметрического теста Данна с поправкой Хоммеля на множественные сравнения.

При понижении температуры среды гибели амфипод не наблюдали. В экспериментах по оценке выживаемости амфипод в условиях быстрого постепенного изменения температуры 50%-я и 100%-я гибель особей (LT_{50} и LT_{100}) происходила при более низкой температуре у *O. albinus* (LT_{50} = 21 °C и LT_{100} = 24 °C) по сравнению с *O. flavus* (LT_{50} = 25 °C и LT_{100} = 26 °C). Внутривидовые отличия в выживаемости особей, выловленных с разных глубин, отсутствовали.

По результатам анализа ОЛМ глубина вылова оказывала статистически значимое влияние только на единичные показатели исследуемых амфипод. Так в случае *O. flavus* было показано влияние глубины вылова на содержание гликогена (16%-е повышение медианы на каждые 100 м). Глубина вылова оказывала влияние на активность каталазы и ГСТ у *O. albinus*, с увеличением глубины на 100 м медиана активности ферментов снижается на 44% и 37% соответственно.

Статистически значимое влияние изменения температуры на глюкозу с высоким размером эффекта было обнаружено для обоих видов. При повышении температуры на 1 °C у *O. flavus* и *O. albinus* наблюдали увеличение медианы содержания глюкозы на 52% и 42% соответственно. Слабое, но статистически значимое понижение активности каталазы при повышении температуры (понижение медианы на 6% на 1 °C) отмечали у *O. albinus*.

Статистически значимое влияние взаимодействия между температурой и глубиной было обнаружено только для активности пероксидазы и каталазы у *O. albinus*. Однако размер эффекта был небольшой – медиана активности пероксидазы увеличивалась на 3%, а каталазы на 2,5% на каждые 100 м и 1 °C. Так как глубина вылова и взаимодействие глубины с температурой не оказывали выраженного эффекта на биохимические показатели, данные для амфипод, отловленных с разных глубин, были объединены для оценки ответа биохимических показателей на быстрое постепенное изменение температуры.

При постепенном повышении температуры у *O. flavus*и *O. albinus* происходило статистически значимое пятикратное повышение содержания глюкозы при 14 и 16°C соответственно, при чем оно оставалось повышенным до конца экспериментов. Когда температура достигла 22°C, содержание глюкозы у *O. flavus*и *O. albinus* было больше по сравнению с контрольной группой в 13 и в 9 раз соответственно. При этом содержание гликогена во время экспериментов не изменялось. В случае *O. flavus*повышение температуры до 18 °C приводило к статистически значимому повышению содержания лактата в два раза. Содержание лактата оставалось выше контрольного уровня до конца эксперимента (больше контроля в 2.6 раз при достижении 22 °C).

В случае остальных исследуемых показателей непродолжительные статистически значимые отличия от контроля были выявлены только у *O. albinus.* У данного вида при 12 °C снижалось содержание АМФ и повышался уровень энергии аденилатов, а при 20 °C происходило снижение содержания АДФ. Среди исследуемых ферментов наблюдали понижение активности ЛДГ при 10 и 16 °C и повышение активности ГСТ при достижении 18 °C.

Быстрое постепенное понижение температуры не приводило к статистически значимым отличиям от контроля почти у всех исследуемых показателей. Исключением было только повышение активности ГСТ у *O. albinus*. Активность фермента понизилась в два и полтора раза при достижении 1 °C и 0.5 °C соответственно.

В работе Madyarova et al. (2022) была показана способность байкальских амфипод *O.flavus*и *O. albinus* выдерживать длительное содержание при атмосферном давлении, что позволяет их использование в качестве модельных объектов для исследования адаптивных способностей как представителей глубоководных эврибатных видов. Однако с использованием анализа ОЛМ было выявлено, что глубина вылова может влиять на некоторые биохимические показатели. Не смотря на обнаруженные влияния глубины, размеры эффекта для глубины и взаимодействия между температурой и глубиной были низкими, то есть эти факторы вызывают лишь слабые изменения в исследуемых показателях. Также стоит отметить, что глубина вылова не влияла на выживаемость амфипод при повышении температуры. Поэтому для дальнейших сравнений влияния температуры на биохимические показатели данные с разных глубин были объединены.

Среди всех исследуемых показателей наиболее сильный и продолжительный ответ на быстрое постепенное повышение температуры был продемонстрирован для глюкозы для обоих исследуемых видов байкальских глубоководных амфипод. В стрессовых условиях, вызванных повышением температуры, выработка глюкозы посредством активации глюконеогенеза или мобилизации энергетических резервов организма может быть связана с энергетическими нуждами для поддержания гомеостаза (Vasudevan, Rajendran, 2021). Однако длительное повышенное содержание глюкозы может привести к токсичности и нарушению функционирования митохондрий с последующим развитием окислительного стресса и воспаления (Girietal., 2018). В связи с этим потенциальные преимущества повышенного уровня глюкозы могут быть ограничены во времени у *O. flavus*и *O. albinus*.

Возможно, мы не наблюдали изменений в содержании гликогена в связи с тем, что воздействие температуры было быстрым (на протяжении 18 часов), и в течение этого времени могло не произойти значительной мобилизации запасенной в гликогене глюкозы. Отсутствие у исследуемых глубоководных амфипод продолжительных статистически значимых изменений в активности ферментов при повышении температуры, предположительно, может свидетельствовать об эффективном поддержании их антиоксидантной системой окислительно-восстановительного баланса.

Понижение температуры не приводило к гибели *O. flavus*и *O. albinus*, что свидетельствует об их устойчивостик низкой температуре. Понижение температуры вызывало ответ только в активности ЛДГ у *O. albinus*, что может быть связано с его меньшей устойчивостью к температурным колебаниям по сравнению с *O. flavus*.

Несмотря на преимущественное обитание исследуемых эврибатных амфипод в абиссальной зоне, они способны переносить широкий диапазон температур. Эта способность может быть связана с их относительно недавней эволюционной историей – глубоководные организмы озера Байкал появились около 3,5 миллионов лет назад (Kaygorodova et al., 2007). По-видимому, *O. flavus*и *O. albinus* постепенно утрачивают функции, связанные с адаптацией к литоральной зоне, одновременно перестраивая свои метаболические системы для повышения выживаемости в термически стабильной абиссальной зоне озера. Результаты экспериментов по выживаемости подтвердили гипотезу о том, что *O. flavus*, диапазон глубин обитания которых включает литораль озера с интенсивными температурными изменениями,обладают большей устойчивостью к повышению температуры среды, по сравнению с *O. albinus*, населяющего бóльшие глубины.

Таким образом, было обнаружено, что при повышении температуры среди всех биохимических показателей наиболее сильная и продолжительная реакция у байкальских амфипод *O. flavus*и *O. albinus* была в содержании глюкозы. Данный показатель может быть использован как перспективный маркер стрессовых воздействий

у исследованных глубоководных амфипод. Показано, что *O. flavus,* обитающий в диапазоне глубин, включающем литораль, является более устойчивым к быстрому постепенному повышению температуры, по сравнению с *O. albinus*, диапазон глубин обитания которого смещен в область бóльших глубин. Оба вида продемонстрировали устойчивость к постепенному понижению температуры. Глубина вылова не оказывала влияние на выживаемость амфипод в условиях гипертермии и приводила лишь к слабому влиянию на единичные биохимические показатели.

Литература

Базикалова А.Я. Амфиподы озера Байкал // Тр. Байкал. лимнолог. станции. 1945. Т. 11. С. 1–440.

Kaygorodova I.A., Sherbakov D.Y., Martin P. Molecular phylogeny of Baikalian Lumbriculidae (Oligochaeta): evidence for recent explosive speciation // Comparative Cytogenetics. 2007. V. 1. №1. P. 71–84.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2023.

Shimaraev M.N., Domysheva V.M. Trends in hydrological and hydrochemical processes in Lake Baikal under conditions of modern climate change // Climatic change and global warming of inland waters: Impacts and mitigation for ecosystems and societies. 2013. P. 43–66.

Sokolova I. Bioenergetics in environmental adaptation and stress tolerance of aquatic ectotherms: linking physiology and ecology in a multi-stressor landscape // Journal of Experimental Biology. 2021. V. 224. Suppl_1. P. jeb236802.

Timofeyev M.A. On the role of adaptive abilities in the distribution of endemic amphipods from Lake Baikal // Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen. 2002. V. 28. №3. P. 1613–1615.

Vasudevan S., Rajendran S. Thermal stress induced hyperglycemia in the blue swimmer crab, *Portunus pelagicus* // Journal of Thermal Biology. 2021. V. 100. P. 103076.

BIOCHEMICAL RESPONSES TO RAPID GRADUAL TEMPERATURE CHANGES OF TWO ENDEMIC EURIBATHIC AMPHIPODS OF THE GENUS *OMMATOGAMMARUS* FROM ANCIENT LAKE BAIKAL

Y.A. Shirokova, E.V. Telnes (Madyarova), A.D. Mutin, Y.A. Rzhechitskiy, Zh.M. Shatilina, M.A. Timofeyev

The aim of the research was to estimate the biochemical responses of Baikal deep-water amphipods *Ommatogammarus flavus* and *O. albinus*,collected from different depths, to the rapid gradual temperature changes. To assess the content of energy-related molecules and the activity of antioxidant enzymes the decrease and increase in temperature were carried out. We separately estimated the survival of the amphipods collected from different depths under temperature increase. Among the biochemical markers studied glucose showed the most significant response to temperature increase. Survival experiments showed that *O. flavus* was more tolerant to temperature increase than *O. albinus*. Sampling depth had no effect on the amphipods survival. There was no mortality of the animals during temperature decrease.

СОДЕРЖАНИЕ РТУТИ В МЫШЦАХ ПРОМЫСЛОВЫХ ВИДОВ РЫБ ГОРЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И НЕКОТОРЫХ ОЗЕР НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Г.В. Шурганова[1], А.А. Ревухин[1,2], Р.Е. Воронин[1], Д.И. Постнов[2], В.А. Гремячих[3], М.И. Базаров[3], В.Т. Комов[3]

[1]Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
[2]Нижегородский филиал ФГБНУ «ВНИРО» Россия
[3]Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН

Представлены данные (2023 г.) о содержании ртути (Hg) в мышечной ткани некоторых видов промысловых рыб, обитающих в Горьковском водохранилище, а также в трех озерах Нижегородской области в зависимости от длины их тела. Показано, что концентрация Hg в мышцах рыб Горьковского водохранилища и исследованных озер находится на уровне, сопоставимом с данными, зафиксированными для других водоемов, и не превышает установленных в Российской Федерации нормативов.

Ртуть широко распространена в окружающей среде в различных формах, ее соединения токсичны для всех живых организмов и представляют риск для здоровья населения. В настоящее время ртуть признана одним из приоритетных загрязнителей на международном уровне. Ртуть вызывает значительный интерес исследователей, особенно в контексте её содержания в водных биоресурсах, таких как рыба (Немова и др., 2014).

Содержание ртути в рыбе зависит от ряда факторов, в частности, её режима питания и места в пищевой цепи (Любченко и др., 2024). Потребление заражённой рыбы является актуальной проблемой, поскольку высокие концентрации ртути могут вызвать негативные последствия для здоровья человека, вплоть до летального исхода (Голованова, 2018; Thangam et al., 2016).

Накопление ртути в тканях рыб многих водоемов Средней Волги, в которых проводится промысловый лов рыбы, до сих пор изучено недостаточно. Это касается как Горьковского водохранилища, так и озер Нижегородской области. При этом следует учитывать, что употребление рыбы, добытой в промысловых целях, может представлять риск для здоровья человека в долгосрочной перспективе из-за кумуляции этого токсичного элемента (Горбунов и др., 2018).

Цель настоящей работы – анализ зависимости концентрации ртути в мышечной ткани промысловых рыб Горьковского водохранилища и озер Нижегородской области от их вида и длины тела.

Отлов ихтиологического материала проводили в летне-осенний период 2023 г. на одиннадцати станциях Горьковского водохранилища, расположенных на его речном, озёрно-речном и озёрном участках, в Ярославской, Костромской, Ивановской и Нижегородской областях, а также на акваториях трёх озёр Нижегородской области: оз. Малое Юхро (Борский р-он), оз. Урзино (Бутурлинский р-он) и оз. Родионово (Сосновский р-он).

Вылов рыб осуществляли с помощью ставных стационарных сетей и неводов. Всего было поймано более 360 экземпляров различных видов рыб: речной окунь (*Perca fluviatilis*, L., 1758), обыкновенная плотва (*Rutilus rutilus*, L., 1758), густера (*Blicca bjoerkna*, L., 1758), уклейка (*Alburnus alburnus*, L., 1758) и тюлька (*Clupeonella cultriventris*, Nordmann, 1840).

Рыбу замораживали при температуре -20 °С и доставляли в лабораторию физиологии и токсикологии водных животных Института биологии внутренних вод РАН для дальнейшей обработки. Перед анализом в лабораторных условиях измеряли длину и массу тела, определяли пол и возраст согласно стандартным ихтиологическим методикам. Образцы мышц отбирали из средней части тела между боковой линией и спинным плавником (Комов, 2004). Содержание ртути в образцах определяли методом пиролиза, используя ртутный анализатор РА-915+ с приставкой ПИРО (ООО «Люмэкс», Санкт-Петербург, Россия). Анализы проводились в трёх повторностях без предварительной подготовки проб. Для контроля точности аналитических измерений применяли сертифицированные биологические материалы DORM-4 и DOLM-5 (Институт химии окружающей среды, Оттава, Канада).

Статистическая обработка полученных данных проводилась на платформе «RStudio». Был проведен регрессионный анализ для выявления зависимости содержания ртути в мышцах каждого вида рыб от их длины.

Установлено, что длина тела исследуемых экземпляров рыб Горьковского водохранилища варьировала в пределах 4.0 – 22.3 см, масса – от 0.7 до 248.6 г, возраст – от 0+ до 6+ лет. Концентрация ртути (Hg) в мышечной ткани колебалась в диапазоне от 0.013 до 0.382 мг/кг сырой массы. Сравнительный анализ показал, что содержание ртути в мышцах рыб снижалось в следующем порядке: окунь ≥ тюлька ≥ уклейка ≥ густера ≥ плотва. Максимальные концентрации ртути зарегистрированы у речного окуня. Его длина составляла от 5.8 до 22.3 см (в среднем 11.8±0.4 см), а содержание Hg – от 0.013 до 0.382 мг/кг (в среднем 0.063±0.005 мг/кг). Плотва показала минимальные значения содержания ртути: от 0.021 до 0.094 мг/кг (в среднем 0.045±0.002 мг/кг), с длиной тела от 4.5 до 20.7 см (в среднем 12.4±0.6 см). Возраст исследованных рыб находился в диапазоне от 0 до 6+ лет, включая ювенильные, молодые и взрослые стадии развития. Наибольшие показатели массы зафиксированы у окуня, плотвы и густеры, в то время как минимальные значения отмечены у тюльки и уклейки. Выявлена положительная корреляция между возрастом и содержанием ртути для всех исследованных видов рыб. Коэффициенты корреляции, как правило, варьировали в пределах умеренных и средних значений ($p \leq 0.01$).

Анализ полученных данных показал, что с увеличением длины тела рыб наибольшее накопление ртути в мышечной ткани отмечено у тюльки и уклейки, затем следуют окунь и плотва, а минимальные значения зафиксированы у густеры. Концентрация Hg в мышцах рыб (за исключением густеры) значимо положительно коррелировала с длиной тела ($r = 0.49 – 0.79$, $p < 0.001$ в зависимости от вида).

По результатам анализа установлено, что различий в зависимости содержания металла от длины по выборкам рыб из озёрно-речного и озёрного участков Горьковского водохранилища не установлено. Поэтому анализировались результаты работы, полученные на всей исследованной акватории водохранилища.

Анализ результатов исследований озёр показал, что наибольшее значение содержания ртути зарегистрировано в мышцах рыб из оз. Малое Юхро. У плотвы оно составило 0.101–0.530 мг/кг, у окуня – 0.176–0.501 мг/кг. Меньшая концентрация содержания ртути зафиксирована у окуня из карстового оз. Родионово (0.110–0.283 мг/кг), являющимся памятником природы регионального значения. Наименьший показатель зарегистрирован в мышцах плотвы из оз. Урзино (старичное озеро р. Пьяна) (0.038–0.138 мг/кг). Результаты определения возраста рыб в лабораторных условиях по чешуе показали, что возраст плотвы в оз. Малое Юхро варьировал от 4+ до 7+ лет, а в оз. Урзино от 1+ до 3+ лет. В оз. Малое Юхро и оз.Родионово возраст окуня варьировал от 2+ до 4+ лет. Выявлена тенденция увеличения концентрация содержания ртути в мышцах рыб с возрастанием их возраста.

Уровни накопления ртути в мышцах рыб Горьковского водохранилища и озер Нижегородской области близки к ранее установленным значениям для пресноводных водоемов европейской части России (Болотова и др., 2015; Ложкина и др., 2021; Степанова, Комов, 1997). Согласно нормативам РФ, содержание ртути у исследованных рыб в целом не превышало допустимые пределы. По результатам исследования лишь у двух особей окуня Горьковского водохранилища было обнаружено содержание ртути выше 0,3 мг/кг. Превышение концентрации нормативов ртути наблюдалось в мышцах взрослых особей плотвы оз. Малое Юхро.

Исследование уровня содержания ртути в мышечной ткани рыб Горьковского водохранилища и озер Нижегородской области подтверждает важность мониторинга загрязнения водных экосистем тяжелыми металлами, в частности ртутью.

Соблюдение этических норм. Протоколы использования животных утверждены Биоэтической комиссией Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (Протокол №68/1 от 01.03.2023).

Литература

Болотова Н.Л., Тропин Н.Ю., Шурганова Г.В. Биоиндикация ртутного загрязнения водных объектов Вологодской и Нижегородской областей (на примере рыб как тест-объектов) // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. №5. С. 13–19.

Голованова И. Л. Влияние ртути на гидролиз углеводов у рыб и млекопитающих // Ртуть и другие тяжелые металлы в экосистемах. Современные методы исследования содержания тяжелых металлов в окружающей среде / Тезисы Всероссийской научной конференции и школы-семинара для молодых ученых, аспирантов и студентов / Череповец: Череповецкий государственный университет, 2018. С. 16–17.

Комов В.Т., Степанова И.К., Гремячих В.А. Содержание ртути в мышцах рыб из водоемов Северо-Запада России: причины интенсивного накопления и оценка негативного эффекта на состояние здоровья людей // Актуальные проблемы водной токсикологии. Борок, 2004. С. 99–123.

Ложкина Р.А., Гремячих В.А., Антипов И.А., Комов В Т. Ртуть в мышцах леща водохранилищ Волжского каскада // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем / Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: Вятский государственный университет, 2021. С. 96-99.

Любченко Е.Н., Попова Д.А., Дьяченко М.Ю., Тимохова А.В. Случай хронического отравления ртутью у кота при кормлении морской рыбой // Дальневосточный аграрный вестник. 2024. Т. 18. №1. С. 47–56.

Степанова И К., Комов В.Т. Накопление ртути в рыбе из водоемов Вологодской области // Экология. 1997. №4. С. 196-202.

Thangam Y., Umavathi S., Vysakh V.B. Investigation of mercury toxicity in haematological parameters to fresh water fish «Cyprinus carpio» // International Journal of Science and Research. 2016. V. 5, iss. 2. P. 1039–1043.

MERCURY CONTENT IN THE MUSCLES OF COMMERCIAL FISH SPECIES OF THE GORKY RESERVOIR AND SOME LAKES NIZHNY NOVGOROD REGION

G.V. Shurganova, A.A. Revukhin, R.E. Voronin, D.I. Postnov, V.A. Gremyachikh, M.I. Bazarov, V.T. Komov

Data (2023) on the mercury (Hg) content in the muscle tissue of some species of commercial fish living in the Gorky reservoir, as well as in three lakes of the Nizhny Novgorod region, depending on their body length, are presented. It is shown that the concentration of Hg in the muscles of the fish of the Gorky reservoir and the lakes studied is at a level comparable to the data recorded for other waters and does not exceed the standards established in the Russian Federation.

ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ГИДРОГЕЛЕЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Е.П. Щапова, А.Н. Гурков, Я.А. Ржечицкий, Е.Б. Индосова, М.А. Тимофеев
Иркутский государственный университет

В работе представлены два типа флуоресцентных сенсоров для мониторинга состояния водных экосистем. Первый тип — гидрогелевый сенсор для обнаружения ионов тяжелых металлов в пресной воде, который использует флуоресцентный краситель Rhod-5N. Второй тип — имплантируемый сенсор для измерения pH в организме амфипод, содержащий краситель SNARF-1. Тестирование имплантируемого сенсора проводилось на байкальских амфиподах *Eulimnogammarus verrucosus* и *Acanthogammarus lappaceus longispinus*. Результаты исследования показывают высокоючувствительность сенсоров к изменениям pH и концентрации токсичных ионов, что показывает их применимость для эффективной оценки состояния водоемов и физиологического состояния гидробионтов.

Современные технологии мониторинга озёр становятся все более важными для высокопроизводительной оценки состояния водных ресурсов и защиты экосистем. В последние годы разработаны различные инновационные методы, которые используют дистанционную съёмку, автоматизированные системы и различные оптические зонды (Polokhin et al., 2023).

Безволоконные флуоресцентные сенсоры представляют собой перспективный инструмент для оценки целевых параметров водной среды, позволяя проводить измерения без необходимости подключения к оптоволокну или использования внутренних микроэлектронных компонентов. Эти сенсоры способны эффективно измерять содержание растворенных веществ как в воде, так и в тканях животных, что делает их универсальными для различных приложений. Удобной основой для подготовки данных сенсоров являются прозрачные гидрогели, которые заякоревают флуоресцентные красители, реагирующие на различные химические вещества. Для детекции сигнала от этих сенсоров необходим флуоресцентный микроскоп или его аналог с подключённым спектрометром или цветной камерой. Подобные сенсоры в перспективе могут обеспечить достаточно высокую точность измерений и работать в реальном времени, что особенно важно в условиях экологических катастроф. Использование различных красителей позволяет адаптировать сенсоры под специфические задачи и условия.

В данной работе представлены два типа флуоресцентных сенсоров: гидрогелевый сенсор для обнаружения ионов тяжелых металлов в пресной воде и гидрогелевый сенсор для измерения pH в организме животных.

Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами, такими как ртуть, кадмий, свинец и хром, представляет собой серьезную глобальную проблему, затрагивающую экосистемы и здоровье человека (Тихомирова и др., 2022). Эти металлы попадают в окружающую среду через различные источники, включая промышленные выбросы,

автомобильный транспорт и сельское хозяйство. Кроме того, загрязнение водных экосистем тяжелыми металлами приводит к ухудшению качества питьевой воды, что также угрожает здоровью населения. Поэтому обеспечение контроля и снижения распространения ионов тяжелых металлов в окружающей среде является важной задачей для международного сообщества. Для их систематического контроля необходим простой, быстрый и недорогой аналитический метод.

Разработанный нами сенсор на основе полиакриламидного гидрогеля с красителем Rhod-5N представляет собой эффективный и простой в изготовлении инструмент для контроля появления катионов тяжёлых металлов в пресной воде. Этот сенсор использует усиление флуоресценци Rhod-5N при связывании с двух- и трехвалентными катионами, а для нормализации сигнала был использован вспомогательный эталонный краситель, ковалентно связанный с декстраном изотиоцианатфлуоресцеина (FITC-D). Для иммобилизации Rhod-5N и FITC-D в работе использовали полиакриламид высокой плотности. Для получения сенсора смешивали 50 мкл водного раствора акриламида (0.45 г/мл) и бис-акриламида (0.09 г/мл%), 10 мкл водного раствора Rhod-5N в концентрации 0.1 мг/мкл, 2 мкл водного раствора FITC-D в концентрации 0.076 мкг/мкл, 0.2 мкл тетраметилэтилендиамина и 1 мкл 10%-ного водного раствора персульфата аммония. Раствор отбирали в стеклянный капилляр диаметра 900 мкм.

Для тестирования чувствительности сенсора использовали пресную байкальскую воду с добавлением различных концентраций хлорида кадмия. Полученные флуоресцентные сенсоры помещали в байкальскую воду и фотографировали с помощью флуоресцентного микроскопа Микмед-2 (ЛОМО, Россия) в зеленом канале с подключенным цветным цифровым фотоаппаратом EOS 1200D (Canon, Тайвань). В программе ImageJ, имеющей возможность для анализа и обработки фотоизображений, разделяли изображение на цветные каналы и определяли соотношение яркости пикселей зеленого и красного каналов на фотоизображениях устройств-сенсоров.

Таким образом, с помощью заранее подготовленной калибровочной линии оценивали примерную концентрацию ионов в воде. Метод является полуколичественным, однако он дает возможность оперативно обнаруживать целый ряд тяжёлых металлов в пресной воде даже в низких концентрациях (рис. 1).

Второй тип оптических сенсоров – имплантируемый гидрогелевый сенсор для измерения pH в организме животных.

Использование имплантируемых оптических сенсоров может повысить эффективность анализа состояния живых организмов, например гидробионтов. Гидробионты небольших размеров широко используются в исследованиях в таких областях как экотоксикология, экологическая физиология, в аквакультуре и при экологическом мониторинге пресноводных экосистем (Osuna-Flores et al., 2019). Применение сенсоров в экспериментальных исследованиях токсических эффектов позволяет не только получать данные в реальном времени, но и изучать индивидуальные реакции тест-организмов на воздействие экотоксикантов. Это может позволить значительно улучшить точность и эффективность оценки рисков для окружающей среды, что особенно важно для разработки мер по охране экосистем и здоровья человека.

В работе представлен метод мониторинга уровня pH в организме амфипод с помощью гидрогелевого сенсора, содержащего флуоресцентный краситель SNARF-1. Измерение pH в организме критически важно, так как кислотно-щелочной баланс влияет на множество метаболических процессов (Jakubowska, Normant-Saremba, 2016). Сенсор был подготовлен путем смешивания 2 мг/мл SNARF-1, конъюгированного с декстраном, 45 мкл дистиллированной воды, 60 мкл раствора акриламида (30% акриламид, 0.8% N,N′-метиленбисакриламида), 1 мкл N,N,N′,N′-тетраметилэтилендиамина и 2 мкл 10%-

ного раствора персульфата аммония. Полученный раствор отбирали в стеклянный капилляр диаметра 300 мкм. Полученные нити гидрогеля длиной 1-2 мм вкалывали в амфипод с помощью медицинской иглы размером 16 G.

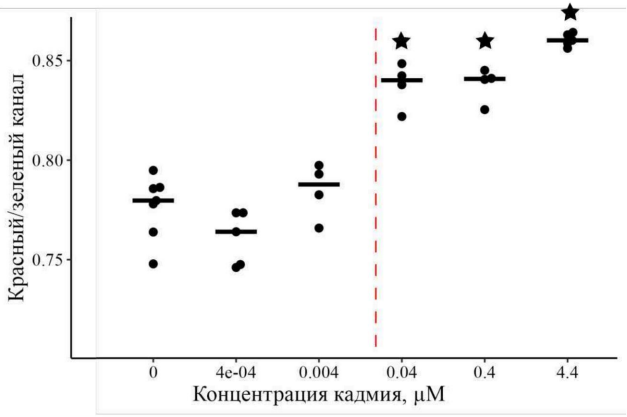


Рис. 1. Оценка концентрации ионов кадмия с помощью флуоресцентного сенсора по интенсивностям флуоресценции Rhod-5N и FITC-D, определяемых под флуоресцентным микроскопом в красном и зелёном каналах цветной камеры соответственно. Вертикальная пунктирная линия обозначает превышение ПДК (~0.009 µM). Чёрная звезда – статистически значимое отклонение от контрольной группы при $p < 0.01$ (тест Манна-Уитни с поправкой Хольма на множественные сравнения)

Объектом исследования были выбраны два вида байкальских эндемичных амфипод: литоральный вид *Eulimnogammarus verrucosus* (Gerstfeldt, 1858) и глубоководный вид *Acanthogammarus lappaceus longispinus* Takhteev, 2000. Вид *E. verrucosus* — типичный обитатель литорали Байкала, встречается повсеместно под камнями, начиная с глубины в несколько сантиметров вплоть до 10 – 15 метров (Базикалова, 1945).Взрослые представители вида имеют размеры тела 25 – 35 мм и тонкий хитиновый экзоскелет, относительно вида *A. l. longispinus*. Вид *A. l. longispinus* длиной тела до 53 мм встречается на глубине от 2 до 180 м (Тахтеев, 2000). Данный вид имеет кутикулярные вооружения, такие как кили и шипы, а также плотный, менее прозрачный хитиновый экзоскелет. Кроме того, данные объекты исследования относительно легко собрать и содержать в лаборатории.

С помощью микроскопа Z16 APO (Leica Microsystems, Германия) в сочетании со спектрометром QE Pro (Ocean Optics, Флорида, США) снимали сигнал с флуоресцентного сенсора, имплантированного в организм *E. verrucosus* и *A. lappaceus longispinus* в апикальные мышцы 5 – 6 сегментов. Во время снятия сигнала, *E. verrucosus* содержали под микроскопом в термостатической камере с циркулирующей байкальской водой при температуре 5 – 8°C, что позволяет поддерживать стабильные условия для наблюдений (Gurkov, 2016). Температуру и водообмен для *A. lappaceus longispinus* контролировали вручную. Количественное сравнение полученных спектров показало, что экзоскелет и ткани *E. verrucosus* снижали интенсивность флуоресценции примерно в три раза по сравнению со свободными гелями, в то время как у *A. lappaceus longispinus* снижение составило примерно десять раз (рис. 2). Несмотря на это, сигнал

флуоресцентного сенсора все еще был обнаружим спектрометром для *A. lappaceus longispinus*.

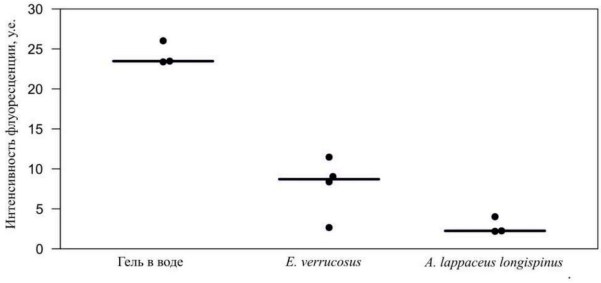


Рис. 2. Интенсивность флуоресценции сенсорных гелей, содержащих SNARF-1, в апикальных мышцах пятого-шестого сегментов *E. verrucosus* и *A. lappaceus longispinus*. Точка на рисунке представляет индивидуальную особь амфипод, а черта – медианное значение

Таким образом, в работе мы продемонстрировали метод визуализации и снятия сигнала с pH-чувствительного флуоресцентного сенсора после инъекции в апикальные мышцы эндемичных амфипод озера Байкал.

Чувствительность подготовленных сенсоров к изменениям pH в организме амфипод *E. verrucosus* проверяли с помощью экспозиций в гиперкапнических условиях. Для эксперимента воду насыщали CO_2 и после одного часа экспозиции измеряли сигнал. Уровень CO_2 во время эксперимента он находился в диапазоне 55 – 97 мг/л. Контрольные значения уровня CO_2 в воде составляли 6 мг/л для *E. verrucosus*. С помощью pH-чувствительного флуоресцентного сенсора было зафиксировано, что данная экспозиция привела к статистически значимому снижению медианного значения pH внутри гидрогеля с 8.1 до 6.9 у амфипод *E. verrucosus* (рис. 3).

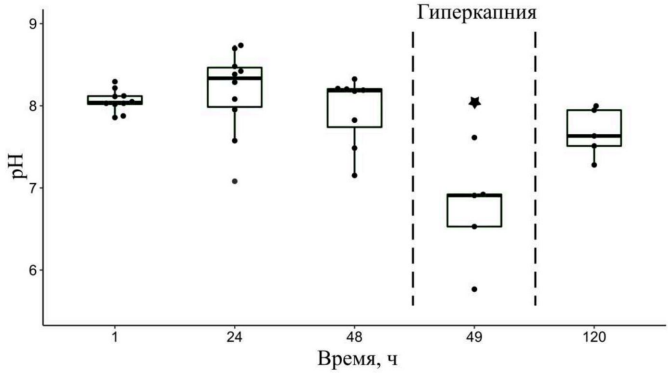


Рис. 3. Изменение pH межклеточной среды с помощью pH-чувствительного флуоресцентного сенсора экспозиций в гиперкапнических условиях. Чёрная звезда – статистически значимое отклонение при $p < 0.05$. Точка на рисунке представляет индивидуальную особь амфипод *E. verrucosus*

Полученные результаты подтверждают эффективность разработанных сенсоров на основе гидрогелей для непрерывного мониторинга как воды, так и физиологического состояния гидробионтов. В перспективе данные инструменты могут позволить ускорить и повысить чувствительность экологического мониторинга, позволяя быстро и точно оценивать как состояние водоемов, так и их обитателей. Применение данного инструментария может способствовать более эффективному управлению водными ресурсами и охране окружающей среды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-74-00095.

Литература

Базикалова А.Я. Амфиподы озера Байкал // Труды Байкальской лимнологической станции (Т. 11). Alexander Doweld, 1945.

Тихомирова В.В., Смирнова П.С. Загрязнение поверхностных и сточных вод Российской Федерации тяжелыми металлами // Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия. 2022. №10. С. 1–5.

Jakubowska M., Normant-Saremba M. The influence of carbon dioxide-induced water acidification on the osmotic and metabolic responses of the Baltic amphipod Gammarus oceanicus // Marine and Freshwater Behaviour and Physiology. 2016. V. 49. №3. P. 173–185.

HYDROGEL-BASED FLUORESCENCE SENSORS FOR MONITORING WATER RESOURCES

E.P. Shchapova, A.N. Gurkov, Y.A. Rzhechitsky, E.B. Indosova, M.A. Timofeev

This study presents two types of fluorescent sensors for monitoring aquatic ecosystems. The first type is a hydrogel sensor for detecting heavy metal ions in fresh water, which uses the fluorescent dye Rhod-5N. The second type is an implantable sensor for measuring pH in amphipods, containing the dye SNARF-1. The implantable sensor was tested on Baikal amphipods *Eulimnogammarus verrucosus* and *Acanthogammarus lappaceus longispinus*. The results of the study show sufficient sensitivity of the sensors to changes in pH and concentration of toxic ions, which demonstrates their applicability for effective assessment of the state of water bodies and the physiological state of aquatic organisms.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ИХТИОКОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ ЗАМОРНЫХ ОЗЕР ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Е.Н. Ядренкина

Институт систематики и экологии животных СО РАН

Результаты комплексного обследования двадцати разнотипных озер степной зоны Новосибирской области (оценка площади акваторий, глубины, характера донных отложений, температуры, ионного состава воды, содержания растворенного в воде кислорода, толщины льда, видового состава рыб, расчеты общей ихтиомассы) свидетельствуют о высокой рыбопродуктивности заморных озер, несмотря на развитие условий жесткой гипоксии под ледовым покровом и обедненный видовой состав. Китайский карась *Carassius auratus* выдерживает промерзание водоема, дефицит растворенного в воде кислорода и низкую температуру воды (вплоть до отрицательных

значения в солоноватых озерах). Золотой карась *C. carassius* и озерный гольян *Phoxinus percnurus* сохраняют жизнеспособность в промерзающих пресноводных озерах региона. Показаны высокие ресурсные возможности заморных озер, рыбопродуктивность которых превышает 25 кг/га.

Биотопы многих водоемов характеризуются эпизодическим возникновением условий гипоксии, частота и жесткость которых могут существенно варьировать по сезонам. В научных публикациях зимнее и летнее недонасыщение водных масс Западно-Сибирских водоемов растворенным в воде кислородом рассматривается как естественное явление. В своем большинстве гидробионты уязвимы к гипоксии; при развитии дефицита растворенного в воде кислорода разные виды могут сохранять жизнеспособность от нескольких часов до несколько дней. Массовая гибель беспозвоночных и позвоночных животных от асфиксии характеризуется термином «замор». В географическом аспекте «заморная зона» охватывает бореальный комплекс равнинных речных и озерных экосистем региона (степная, лесостепная, лесоболотная).

В одних и тех же озерах степень зимнего дефицита кислорода в разные годы варьирует вплоть до полного исчезновения заморных явлений на более или менее продолжительный ряд лет. Это зависит от объема воды озера перед ледоставом, от величины поверхностного и грунтового стоков, толщины и плотности ледового покрова и других факторов гидрологического режима. Развитие летних заморов связано с прогреванием мелководных озер: по мере роста температуры увеличивается потребление кислорода гидробионтами, в то время как растворимость кислорода в воде уменьшается. Кроме того, ситуация усугубляется активным потреблением кислорода в ночные часы альгофлорой, биомасса которой в летние месяцы резко увеличивается. Особенно часто заморы наблюдаются в многочисленных мелководных озерах юга Западной Сибири (Ядренкина и др., 2010).

Цель проводимых нами исследований направлена на выявление экологических механизмов функционирования популяций разных видов рыб в условиях зимней гипоксии. Согласно плану проведения работ, предусматривалось: 1) оценить заморные водоемы Новосибирской области в качестве объектов рыбохозяйственного пользования: влияние зимних заморов на формирование видового состава рыб и рыбопродуктивность разнотипных озер; 2) сформировать кадастр заморных озер региона; 3) разработать Программу сохранения и поддержания биологического разнообразия водных экосистем малых озер региона.

Вышеприведенный перечень задач связан с тем, что эксплуатация биологических ресурсов многих малых водоемов региона осуществляется бесконтрольно, что проявляется в перекрывании русел малых рек насыпными дамбами, блокирующими сообщение с озерами, а также в ненормируемом изъятии рыб и промысловых видов беспозвоночных.

В основу проведенного анализа положены полученные нами ранее материалы по комплексному изучению озер Новосибирской области в период регрессивной фазы обводнения территории (низкого уровня воды, 2006-2007 гг.) (из фондов ИСиЭЖ СО РАН). В ходе обследования озер проведены измерения геоморфологии озерных котловин (координаты места их расположения, площадь акватории, глубина, характер донных отложений), гидрохимических показателей (макроэлементного и солевого состава воды) по О.А. Алекину (1970), температуры воды, содержания растворенного в воде кислорода, толщины льда, видового состава рыб, рыбопродуктивности разнотипных озер по С.П. Китаеву (1984).

В анализ материалов данной статьи включены данные по 20 разнотипным озерам степной зоны.

На территории Новосибирской области расположено более 3 000 озер. Озера в основном бессточные, мелководные и соленые, являются основным элементом гидрографии Обь-Иртышского междуречья (Поползин, 1965; Савченко, 1997). По данным Н.В. Савченко, по происхождению выделяют озера древних ложбин стока (проточные озера Хорошее, Кривое, Чебачье и др.); пойменно-долинные (в долинах современных рек – Индерь, Урюм и др.); просадочные (Угуй, Журавлево); наиболее крупные реликтовые озера древнеозерных равнин (бессточные озера Чаны, Убинское, Сартлан, Тандово). В зависимости от генезиса и географического положения основная часть озер области разделяется на два основных озерных района: Чано-Барабинский и Карасукский. Первый из них расположен в лесостепной зоне и включает около 2 500 озер с общей площадью около 4 900 км^2. Около 85% этих озер относятся к категории малых (с площадью акватории менее 1 км^2) Крупные озера этого района – Чаны, Убинское, Сартлан, Тандово – малочисленны, однако их площадь превышает 60% общей акватории всех озер. Карасукский озерный район значительно меньше по количеству и площади (около 100 км^2) озер, относится к степной зоне. Из них наиболее крупные озера – Хорошее, Кривое, Чебачье – имеют площадь соответственно 30.3; 19.0 и 17.8 км^2 (рис. 1).

В период регрессии (в фазу низкой водности) 12% озер пересыхают. Глубины подавляющего большинства прочих озер не превышают 2.0 м, в среднем варьируя в интервале 0.5-1.5 м.

По ионному составу воды преобладающую группу озер степной зоны составляют водоемы натриево-гидрокарбонатного типа – 85% общей численности обследованных, 12% озер – хлоридно-натриевые, 3% – хлоридно-магниевые. Для озерного комплекса степной зоны характерна щелочная среда (pH > 7) и неустойчивый газовый режим. Так в период открытой воды содержание растворенного кислорода варьирует в интервале 5-7 мг/л, однако при формировании и нарастании толщины ледового покрова его концентрация сокращается до критических значений (для поддержания жизнеспособности гидробионтов) – < 1 мг/л. Кроме того, обследованные нами озера в своем подавляющем большинстве мелководные, многие в зимний период частично или полностью промерзают до дна.

Помимо гипоксии, в оставшемся подо льдом горизонте воды многократно увеличивается минерализация, что часто приводит к снижению температуры воды вплоть до отрицательных значений. Сочетание этих факторов мы рассматриваем в контексте «критических условий среды» для функционирования биологических комплексов, особенно в отношении верхнего трофического звена – рыб. В литературе при оценке физиологического состояния рыб в условиях гипоксии и переохлаждения организма используется термин «синдром зимнего стресса» (Kramer, 1987; Lemly, 1996). При этом, все изученные нами пресные и солоноватые озера характеризуются высокими показателями рыбопродуктивности – 24-30 кг/га (2400-30000 кг/км^2) при ихтиомассе, в некоторых случаях достигающей 120 кг/га. Поэтому вопрос о причинно-следственных связях между высокой продуктивностью водных биологических ресурсов и жесткими условиями среды вызывает особый интерес. Анализ видового состава рыб в разнотипных озерах региона опосредованно отражает и различия в функционировании ихтиокомплексов (рис. 2). Так, в крупных глубоководных и проточных, либо сообщающихся с речной системой озерах с благоприятным газовым режимом (озера Вздорное, Гусиное, Хорошонок и др.) успешно переживают зимний период оксифильные виды рыб, такие как лещ *Abramis brama*, язь *Leuciscus idus*, плотва *Rutilus rutilus*, верховка *Leucaspius delineatus*, окунь *Perca fluviatilis*, щука *Esox lucius*. При формировании гипоксии они перемещаются из участков водоемов с неблагоприятными условиям среды в зоны гидросети с относительно высокой скоростью водообмена и

благоприятным газовым режимом. В частично промерзающих озерах комплекс представителей ихтиофауны ограничен двумя-тремя видами – китайский карась *C. auratus*, золотой карась *C. carassius*, озерный гольян *Phoxinus percnurus* (озера Беляниха, Кислы, Яркуль и др.), причем гольян и золотой карась – обитают только в озерах с низкой минерализацией воды. В промерзающих озерах состав ихтиофауны монотипен и представлен одним видом – китайским карасем (озера Альбуган, Шкалово, Чаган и др.).



Рис. 1. Озерный комплекс степной зоны Новосибирской области (Карасукский озерный район (Савченко, 1997)

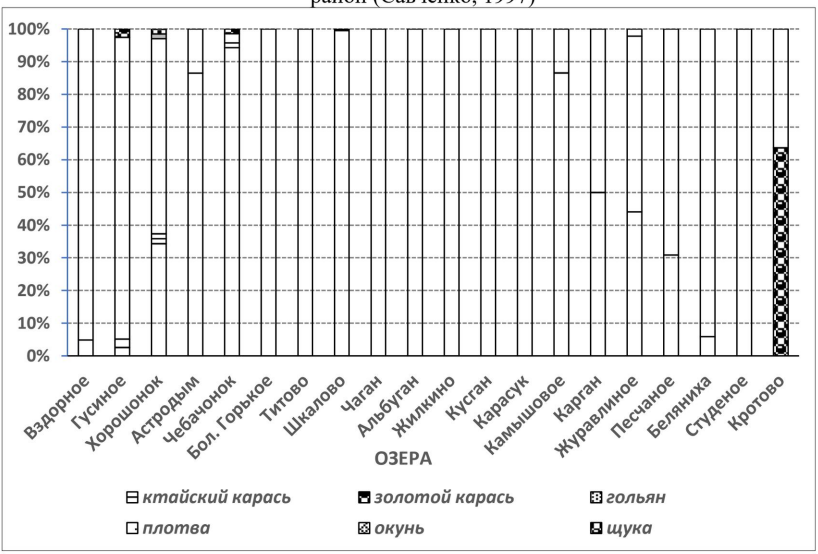


Рис. 2. Видовой состав рыб в разнотипных озерах степной зоны Западной Сибири в период регрессии (низкого уровня обводнения территории), в % от общей численности

Фактически, рыбы не зарегистрированы только в озерах с минерализацией воды в летний период выше 12 г/л. Условия зимней гипоксии в изолированных озерах обуславливают сокращение видового богатства рыб за счет выпадения оксифильных видов, однако общие показатели их рыбопродуктивности остаются на высоком уровне.

По результате ревизии состояния экологических систем малых и средних озер степной зоны Новосибирской области выявлено:

- по сравнению с фазой трансгрессии в период аридизации озера Карасукского района претерпели существенные изменения геоморфологических, гидрологических и гидрохимических характеристик и свойств; 12% озер, из числа обследованных, находятся в состоянии пересыхания и не могут эффективно использоваться для рыбохозяйственного освоения (озера Камышиное, Малое Горькое, Малое Черное, Осолодочное);

- существенно изменилась структура сообществ рыб; в подавляющем большинстве обследованные водные объекты по видовому составу рыб являются карасевыми и карасево-гольяновыми. Только относительно глубоководные и проточные озера характеризуются бóльшим видовым разнообразием рыб: озера Вздорное и Гусиное, по сути являющиеся плесами озера Кривое, по типу рыбного населения – плотвично-окуневые; озера Астродым, Мелкое, Хорошонок, Чебаченок – карасево-окуневые;

- бóльшая часть озер по причине периодически развивающейся гипоксии являются заморными, однако приспособленность некоторых видов рыб к критическим условиям среды позволяют рассматривать их ресурсные возможности для эффективной эксплуатации озерного комплекса в рыбохозяйственных целях;

Оценка ресурсных возможностей изучаемых водных объектов для их рыбохозяйственного освоения позволяет внести соответствующие поправки в рабочую документацию организаций, деятельность которых направлена на регламентацию природопользования и охрану биологических ресурсов региона. Программу рационального использования рыбных ресурсов заморных водоемов возможно реализовать только при условии слаженной организации действий природоохранных и рыбоохранных региональных и федеральных служб.

Литература

Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 444 с.

Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 208 с.

Поползин А.Г. Зональное лимнологическое районирование озер юга Обь-Иртышского бассейна // Вопросы гидрологии Западной Сибири. Новосибирск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1965. С. 52-62.

Савченко Н. В. Озера южных равнин Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СибУПК, 1997. 297 с.

Kramer D.L. Dissolved oxygen and fish behavior // Env. Biol. Fish. 1987. V. 18. P. 81-92.

Lemly A.D. Winter stress syndrome: an important consideration for hazard assessment of aquatic pollutants // Ecotoxicology and Environment Safety. 1996. V. 34(3). P. 223-227.

FUNCTIONING OF FISH COMMUNITY IN THE CONDITIONS OF THE FROZEN LAKES OF WESTERN SIBERIA

E.N. Yadrenkina

The results of study of various types of lakes in the steppe zone of the Novosibirsk region (assessment of the size of water areas, depth, bottom sediments, temperature, ionic water composition, amount of dissolved oxygen, ice thickness, fish community etc.,) indicate a high fish productivity of frozen lakes, despite the severe hypoxia under the ice cover and limited species richness of fish. *Carassius auratus* can survive in freezing conditions, with a lack of oxygen and negative water temperatures. The *C. carassius* and *Phoxinus percnurus* can survive in freezing freshwater lakes. The high productivity of fish resources in freezing lakes, reaching 25-30 kg/ha, is shown.

ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТА КИСЛОРОДА РОГАТКОВЫХ РЫБ (COTTOIDEI) ОЗЕРА БАЙКАЛ

В.М. Яхненко, Ю.П. Сапожникова, А.Г. Королева, И.А. Небесных, А.А. Епифанцев, Е.А. Вахтеева, И.В. Ханаев
Лимнологический институт СО РАН

Качественные и количественные параметры эритроцитов, структура гемоглобинов коттоидных рыб Байкала определяются экологическими особенностями видов.

Эритроциты и белок гемоглобин являются основным звеном системы транспорта кислорода у рыб. Состав и морфология эритроцитов рыб генетически детерминированы и видоспецифичны. Морфологические параметры эритроцитов – это переменные, которые коррелируют со всеми сторонами жизнедеятельности организма, особенностями среды обитания и ее изменениями (Yakhnenko et al., 2016; Lahnsteiner, 2020). Однако о роли разного рода факторов, степени их воздействия на систему крови рыб известно мало. Это актуально в отношении байкальских рогатковых рыб (Cottoidei).

На долю байкальских рогатковых рыб приходится более двух третей разнообразия видов рыб (из 60 видов) озера Байкал. 38 видов – эндемики (Bogdanov, 2023). Столь высокий уровень видового разнообразия и эндемизма свидетельствуют об обилии экологических ниш и сложности биоценотических отношений. Байкальские рогатковые рыбы обитают как в прибрежной, так и в глубоководной зонах озера, в том числе в эпипелагиале и батипелагиале. Литораль освоили придонно-прибрежные (виды родов *Paracottus, Leocottus, Batrachocottus*) и бенто-пелагические (*Cottocomephorus*), бенталь – придонно-глубоководные (*Batrachocottus, Asprocottus, Limnocottus, Cyphocottus, Procottus*), пелагиаль – пелагические (*Comephorus*), абиссаль – глубоководные (*Cotinella, Abyssocottus, Neocottus*) (Талиев, 1955; Сиделева, 1982; Bogdanov, 2023).

Цель исследования - оценить количественные и качественные особенности зрелых эритроцитов, структуру гемоглобинов представителей рогатковых рыб Байкала разных экологических групп.

Отбор крови проводился у рыб, отловленных во время глубоководных тралений на озере Байкал в августе-сентябре 2020 – 2024 гг.

Количество исследованных зрелых эритроцитов каждого вида не менее 100 с колебаниями 100-500. Для сравнительного анализа данных использовали средства «Описательной статистики» и «Двухвыборочный t-тест» в пакете «Анализ данных» в Microsoft office excel 10, версия 14. Достоверность различий количественных данных определялась по критерию Стьюдента.

Использованы стандартные процедуры гематологического (Yakhnenko et al., 2016) и ультраструктурного (Weakley, 1975) анализов. Для измерения эритроцитов

использовалась компьютерная программ ImageProPlus 6.0. Исследования структуры гемоглобина проводили с использованием метода изоэлетрофокусирования (Ригетти, 1986).

Окрашенные азур-эозином мазки периферической крови рыб были исследованы на световом микроскопе Axiostar plus с фотокамерой AxioCam ICc1 (Zeiss, Germany), структуру клеток крови - на трансмиссионном электронном микроскопе Leo 906 E (Zeiss, Germany) с ускоряющим напряжением 80 kV.

Эритроциты в периферической крови исследованных рыб представлены зрелыми (до 90%) и эритробластами (незрелые формы красной крови). В цитоплазме зрелых эритроцитов выявлены рибосомы, эндоплазматический ретикулум, митохондрии (Yakhnenko et al., 2016). Наличие этих органоидов свидетельствует об участии клеток в процессах метаболизма.

Кровь рогатковых рыб характеризуется наиболее низкой концентрацией гемоглобина (Hb), наименьшими показателями количества эритроцитов на единицу объема крови (Э), кислородной емкости крови (КЕК) и содержания гемоглобина в эритроците (СГЭ) по сравнению с другими рыбами Байкала (Yakhnenko et al., 2016).

Число эритроцитов наибольшее у прибрежных и пелагических, низкие показатели Э – у глубоководных видов. Высокие показатели СГЭ выявлены у глубоководных видов. Отмечена обратная корреляция СГЭ и количества эритроцитов (рис. 1).

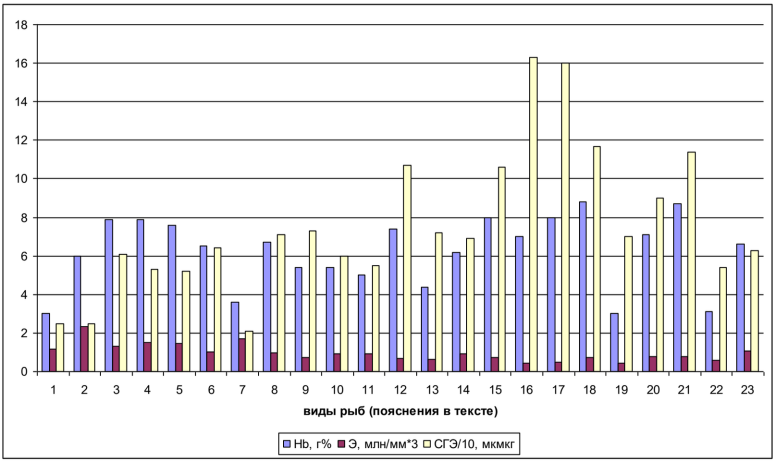


Рис. 1. Количественные параметры красной крови рогатковых рыб озера Байкал

Виды рыб: 1 - *Leocottus kesslerii* (9 экз.), 2 - *Paracottus knerii* (24), 3 - *Cottocomephorus grewingkii* (51), 4 - *C.inermis* (22), 5 - *C.alexandrae* (25) ,6 - *Comephorus baicalensis* (34), 7 - *C. dybowski* (50), 8 - *Cotinella boulengeri* (13), 9 - *Batrachocottus baicalensis* (12), 10 -*B.nikolskii* (12), 11 - *B. multiradiatus* (17), 12 - *Asprocottus platycephalus* (15), 13 - *A. intermedius* (8), 14 - *A.herzensteini* (21), 15 - *Cyphocottus megalops* (11), 16 - *Neocottus werestschagini* (10), 17 - *N. thermalis* (8), 18 - *Abyssocottus korotneffi* (15), 19 - *A. gibbosus* (7), 20 - *Limnocottus griseus* (18), 21 - *L.bergianus* (20), 22 - *L. pallidus* (9), 23 - *Procottus major* (7)

Малоизменчивыми цитометрическими параметрами зрелых эритроцитов являются ядерно-цитоплазматические отношения (NCR), числовая эксцентричность (E), которая характеризует степень эллипсоидности эритроцитов, площадь клетки (S). У обитателей литорали E и S – меньше, NCR – больше по сравнению с другими видами. У

абиссальных видов эритроциты имеют почти круглую форму. У большой голомянки *C. baicalensis* NCR достоверно меньше, размеры эритроцитов – крупнее по сравнению с малой голомянкой *C. dybowski*. Эритроциты придонно-пелагических рыб имеют более высокую степень эллипсоидности по сравнению с малоактивными пелагическими рода *Comephorus* (рис. 2).

Показатели NCR определяются объемами ядра и цитоплазмы. Известно, что размер ядра связан с процессами метаболизма, клеточными циклами. Размеры и форма клеток эритроцитов – видоспецифичны и определяются как экологическими особенностями, так и филогенетическими отношениями видов (Lahnsteiner, 2020).

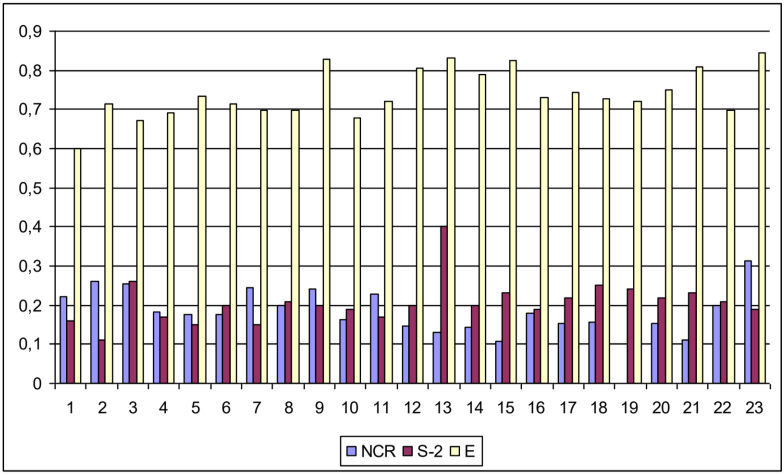


Рис. 2. Цитометрические параметры зрелых эритроцитов рогатковых рыб озера Байкал, мкм. Виды рыб: см. рис. 1.

При фракционировании гемоглобинов у всех исследованных рыб выявлены как анодные, имеющие низкое сродством к кислороду, так и катодные изоформы гемоглобинов, которые имеют высокое сродство к кислороду и низкую чувствительность к изменениям pH, что при низких температурах позволяет гемоглобину связываться с высокой степенью насыщения. У *N. thermalis* и *L. bergianus* выявлены только анодные, у *A. herzensteini* – только катодные изоформы. Можно предположить, что подобное проявление изоформ гемоглобина связано с адаптацией видов к конкретным специфичным условиям. Известно, что ареал обитания *N. thermalis* приурочен к местам выхода термальных вод в районе бухты Фролиха.

Таким образом, цитометрические параметры эритроцитов, количественные показатели красной крови определяются экологическими особенностями видов рогатковых рыб.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Гостемы № 1210323002248 (руководитель д.г-м.н. А.П. Федотов), с использованием микроскопической техники в Центре коллективного пользования «Ультрамикроанализ» (рук. д.б.н. Е.В. Лихошвай, инженер А.П. Лопатин). Благодарим команду НИС «Верещагин».

Литература

Ригетти П. Изоэлектрофокусирование. Теория, методы и применение. М.: Мир, 1986. 398 с.

Талиев Д. Н. Бычки-подкаменщики Байкала (Cottoidei). М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1955. 602 с.

Bogdanov B.E. The Sculpins (Perciformes: Cottidae) of Lake Baikal and Baikal region: updated checklist with the description of new taxa // Limnology and Freshwater Biology. 2023. 3. P. 63–95.

Lahnsteiner F. Erythrocyte morphometry in teleost fish – Species-specific, inter-individual and environmental-related differences // Acta Zool. 2020. P. 1–13.

Yakhnenko V.M., Klimenkov I.V., Sudakov N.P., Belyshenko A.Yu., Glyzina O.Yu., Mamontov A.M., Sapozhnikova Yu.P., Sukhanova L.V. Morphofunctional Peculiarities of Erythrocytes in Wild and Farmed Coregonid Fishes from Lake Baikal // Contemporary Problems of Ecology. 2016. V. 9. P. 219–228.

ORGANIZATION OF BLOOD OXYGEN TRANSPORT SYSTEM FOR COOTOID FISH OF LAKE BAIKAL

V.M. Yakhnenko, Yu.P. Sapozhnikova, A.G. Koroleva, I.A. Nebesnykh, A.A. Epifantsev, E.A. Vakhteeva, I.V. Khanaev

Qualitative and quantitative parameters of red blood cells, the structure of hemoglobins of cottoid fish of Lake Baikal are determined by the ecological features of the species.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОДОЛЖЕНИЯ МЕЖДУНАРОДНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ «ОЗЕРА ЕВРАЗИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ»

Н.Н. Филатов[1], Т.И. Регеранд[1], Р.Р. Шагидуллин[2], Д.В. Иванов[2]
[1]Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
[2]Институт проблем экологии и недропользования АН РТ

Евразия – самый большой материк на Земле, население которого составляет ¾ населения всей планеты. Это наиболее быстро развивающийся и технологически развитый регион, который требует для экономики, жизни населения больших ресурсов и в первую очередь водных, которыми богат регион. Здесь расположены уникальные водные объекты, такие как Каспий, Байкал, крупнейшие озера Европы: Ладожское и Онежское, Арал, Иссык-Куль, Телецкое, Севан, Баскунчак, Хубсугул, Урмия, озера Арктической зоны, трансграничные озера Ханка, Псковско-Чудское, Или-Балхашской системы и еще несколько миллионов разнообразных водных объектов.

Озера и водохранилища, озерно-речные системы используются для питьевого водоснабжения, водоотведения, водного транспорта, энергетики, рекреации, получения биоресурсов, развития аквахозяйств. При этом имеются многочисленные проблемы сохранениях их экосистем, рационального использования ресурсов для настоящего и будущих поколений. Поэтому важной задачей конференции является консолидация ученых стран Евразии, БРИКСа для исследования фундаментальных задач и решения практических проблем при их тесном сотрудничестве ученых многих стран. Важной целью конференции создание научной платформы для обсуждения актуальных проблем многочисленных водных объектов Евразии с учетом их природного разнообразия, трансграничного положения, разных подходов по использованию, перераспределение их ресурсов, водных ресурсов, строительству гидротехнических сооружений в условиях глобального изменения климата.

Озера и их водосбора, озерно-речные системы необходимо рассматривать как это сложные эколого-социо-экономического системы, но при разрозненности усилий разных научных организаций, стран, недостаточной координации работ, несовершенства существующих в разных странах мониторинга, отсутствии интегрированных систем управления, основанных на данных и знаниях и соответствующих математических моделях для создания систем поддержки принятия управленческих решений, решить сложные системные проблемы трудно. Требуется консолидация усилий ученых, практиков стран Евразии. Необходимо использовать возможности ученых разных стран, международных организаций БРИКС, разнообразных научных фондов. Важно отметить, что оптимальные решения рассматриваемых научных проблем, связанных с изучением, использованием и охраной водных объектов должны учитывать экономику, социальную сферу и политическую ситуацию как внутри каждой отдельной страны, так и Евразии в целом. Важно гармонизировать подходы к охране и рациональному использованию ресурсов, оценке параметров качества вод водоемов. Необходимо согласовать нормативные документы, регламентирующие на законодательном уровне критерии оценки экологического состояния трансграничных водных объектов. Требуется обратить внимание на достоверность результатов количественного анализа определяемых компонентов (концентраций) химических параметров, полученных различными аналитическими методами, т.е. необходима на международном уровне консолидация усилий по гармонизации подходов по оценке разнообразных параметров вод, в особенности биогенных и загрязняющих веществ. Важно совершенствовать подходы в образовании в соответствии с предстоящими задачами. Существенно увеличить обмен специалистами разных стран стран БРИКС, необходимо регулярное проведение школ,

семинаров по наиболее актуальным проблемам лимнологии и гидрологии. Для рационального использования и охраны ресурсов водных объектов Евразии необходима модернизация законодательной и нормативно-методической базы, совершенствование управления ресурсами.

С учетом опыта проведения трех конференций «Озера Евразии: проблемы и пути их решения» отмечаем необходимость организации тематических конференций, на которых будут обсуждаться и предлагаться решения наиболее важных теоретических и практических задач лимнологии Евразии. Поэтому важна регулярность проведения конференций с периодичностью раз в 2–3 года в разных странах БРИКС, а также создание координационного Совета «Озера Евразии».

На ближайшую перспективу необходимо обратить особое внимание лимнологов Евразии на такие направления научных исследований как:

– озера и водохранилища как резервуары/источники пресной воды, питьевого водоснабжения;

– трансграничные проблемы лимнологии;

– водные объекты в национальном богатстве стран Евразии;

–озера для мониторинга климата;

– озера, водохранилища, озерно-речные системы как важный компонент глобального углеродного цикла, включая круговорот углекислого газа и источники метана;

– озера как «продукт» и регуляторы регионального климата;

– озера и озерно-речные системы как объекты хозяйственной и рекреационной деятельности (биоресурсы, гидроэнергетика, водный транспорт, питьевое водоснабжение, аквакультура, рекреация);

–совершенствование прогноза гидрологического режима и экосистем озер для долгосрочного планирования экономической деятельности и сохранения озер;

– создание интегрированных систем управления водопользованием, обеспечивающих информационную поддержку природоохранных органов;

– разработка и внедрение инновационных моделей для моделирования сложных систем в озерах, оценки состояния и изменений их трофического статуса, качества вод, водных и биологических ресурсов малоизученных или вовсе не изученных озер.

Для консолидации усилий, развития лимнологии представляется целесообразным рассмотреть вопрос издания международного печатного и электронного журнала «Озера Евразии», а также создания Ассоциации лимнологов Евразии.

PROSPECTS FOR CONTINUING THE INTERNATIONAL CONFERENCES «LAKES OF EURASIA: PROBLEMS AND WAYS TO SOLUTIONS»

N.N. Filatov, T.I. Regerand, R.R. Shagidullin, D.V. Ivanov

Lakes and reservoirs, lake-river systems are used for drinking water supply, water transport, energy, recreation, bioresources and developing aquaculture. At the same time, there are numerous problems with preserving their ecosystems, rational use of resources for the present and future generations. Therefore, an important task of the conference is to consolidate scientists from the countries of Eurasia, BRICS to study fundamental problems and solve practical problems in close cooperation of scientists from many countries. An important goal of the conference is to create a scientific platform for discussing current problems of numerous water bodies in Eurasia, taking into account their natural diversity, transboundary location, different approaches to use, redistribution of their resources, water resources, construction of hydraulic structures in the context of global climate change. Taking into account the experience

of organization three conferences «Lakes of Eurasia: Problems and Solutions» we note the need to organize narrowly focused thematic conferences, where solutions to only a few of the most important theoretical and practical problems of Eurasian limnology will be discussed and proposed. Therefore, it is important to hold conferences regularly every 2-3 years in different BRICS countries, as well as to create a coordinating Council «Lakes of Eurasia». To consolidate efforts, developing limnology, it is advisable to consider the issue of publishing an international printed and electronic journal «Lakes of Eurasia», as well as creating an association of limnologists of Eurasia. Several of the most important general themes for the near future are proposed.

ОЗЕРА ЕВРАЗИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

МАТЕРИАЛЫ
III МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
г. Казань, 20 – 23 мая 2025 г.

Материалы публикуются в авторской редакции.

Подписано в печать 12.05.2025 .
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. печ. л. 62,0. Тираж 125 экз. Заказ № 147.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Orange Key
г. Казань, ул.Некрасова, д. 38