

АКАДЕМИЯ НАУК
СССР

М. Я. ПРЫТКОВА

**ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ
В МАЛЫХ
ВОДОХРАНИЛИЩАХ**

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ

М. Я. ПРЫТКОВА

ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ В МАЛЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ

БАЛАНСОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ



ЛЕНИНГРАД
«НАУКА»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1981



3084

Осадконакопление в малых водохранилищах. Балансовые исследования.
П р ы т к о в а М.Я., Л., „Наука“, 1981. 152 с.

В монографии представлены результаты впервые выполненных в каскаде прудов комплексных исследований осадконакопления, включающих изучение эрозионных условий на водосборе, морфометрических характеристик водоемов, гидрологического режима, водного, седиментационного и солевого балансов. Выявлена и оценена роль отдельных источников в наполнении и заилении прудов, установлены особенности морфологии их чаш, водного и седиментационного балансов, режима взвесей. Изложена методика комплексных исследований осадконакопления. Показана возможность использования водного и седиментационного балансов прудов для оценки стока воды и наносов временных водотоков. Определено влияние состояния прилегающих к водоему склонов на его заиливание. Библ. — 173 назв., ил. — 26, табл. — 51.

Ответственный редактор кандидат географических наук
И.Н. СОРОКИН

Мария Яковлевна ПРЫТКОВА

ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ В МАЛЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ

Балансовые исследования

Утверждено к печати Институтом озераведения АН СССР

Редактор издательства Г.Л. Кирикова. Художник И.П. Кремлев
Технический редактор З.А. Соловьева. Корректор О.В. Олендская

ИБ № 20001

Подписано к печати 03.07.81. М-20123. Формат 60х90 1/16. Бумага
офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 9 1/2=9.50 усл. печ. л. Уч.-изд. л.
9.81. Тираж 800. Изд. № 7734. Тип. зак. № 101. Цена 1 р. 50 к.

Издательство „Наука“, Ленинградское отделение
199164, Ленинград, В-164, Менделеевская лин., 1

Ордена Трудового Красного Знамени Первая типография издательства „Наука“
199034, Ленинград, В-34, 9 линия, 12

ВВЕДЕНИЕ

Планом развития народного хозяйства СССР на 1981–1990 гг. и решениями XXVI съезда КПСС предусмотрены расширение площадей орошаемого земледелия, высокопродуктивных орошаемых пастбищ и сенокосов, рост производства рыбы в государственных прудовых хозяйствах. Реализация этих задач в зоне недостаточного увлажнения, прежде всего, связана с улучшением использования местного стока, аккумулируемого в многочисленных малых водохранилищах (прудах), создаваемых на малых реках, ручьях, оврагах, балках. Эти водоемы наряду с их хозяйственным назначением осуществляют и важную водоохранную роль, способствуя пополнению запасов грунтовых вод и защищая от заиления продуктами эрозии водосбора более крупные реки и водоемы.

В СССР насчитывается около 130–150 тысяч малых водохранилищ, половина которых находится в лесостепной и степной зонах, где на каждую 1000 км² площади приходится в среднем 25 таких водоемов, а в отдельных районах Украины, Молдавии, Предкавказья и Поволжья – до 40–50 и более. Многие небольшие реки под влиянием сооруженных на них цепочек (каскадов) прудов давно утратили свой естественный режим. Представляя собой значительное антропогенное явление, малые водохранилища находятся в постоянном развитии и оказывают все большее влияние на географический ландшафт и гидрологический режим наполняющих их водотоков. Оценка степени этого воздействия является актуальной задачей современной гидрологии.

Осадконакопление, свойственное всем водоемам замедленного водообмена, – тормоз в эксплуатации малых водохранилищ, теряющих ежегодно в связи с заилением до 10–30% своего объема. По нашим данным, в малых водохранилищах СССР ежегодно откладывается около 225–300 млн.м³ продуктов эрозии, т.е. столько же, что и во всех крупных водохранилищах страны. Заиление приводит к уменьшению объема водной массы водоемов, зарастанию их высшей водной растительностью, снижению качества воды и эффективности использования. Поэтому особую актуальность приобретает разработка наиболее обоснованных способов прогноза этого явления в проектируемых водоемах, мер охраны водоемов от заиления и решение вопроса об использовании прудового ила. Для этого,

прежде всего, необходимы фактические данные об интенсивности заиления малых водохранилищ и составе донных отложений в них. В результате выполненных за последние 40–50 лет в нашей стране экспедиционных (маршрутных) исследований заиления около 700 малых водохранилищ преимущественно лесостепной и степной зон получены сведения о количестве, и частично, физико-механических свойствах донных отложений. В то же время остались неизученными гидрологический режим водоемов, источники осадкообразующего материала и их роль в осадконакоплении, взвеси и наносоудерживающая способность водоемов, химические свойства донных отложений. Слабо изучено заиление каскадов прудов и влияние этих водоемов на сток наносов рек. Многие из перечисленных вопросов требуют постановки комплексных исследований малых водохранилищ, включающих изучение эрозионных условий на водосборе, морфометрических характеристик водоемов, водного, солевого, седиментационного и других балансов водоема, донных отложений.

Балансовый метод исследований осадконакопления в малых водохранилищах позволяет выявить и количественно оценить источники осадкообразующего материала, их роль в заилении водоемов, наносоудерживающую способность водоемов и факторы, ее определяющие. Все эти сведения необходимы для познания самого процесса осадконакопления, разработки и осуществления мер защиты водоемов от осадкообразующего материала, обоснования возможности использования данных по заилению прудов для оценки слабо изученного стока наносов малых водотоков и эффективности противоэрозионных мероприятий на водосборе.

Учитывая слабую изученность седиментационного баланса малых водохранилищ вообще и входящих в состав каскада в частности, Институт озероведения АН СССР в течение 1973–1976 гг. провел исследования каскада из 7 прудов на б. Каракубанской (Краснодарский край), в программу которых входили изучение водного, солевого и седиментационного балансов прудов, а также небольшой объем гидробиологических работ для ориентировочной оценки роли отдельных гидробионтов в осадконакоплении.

В полевых исследованиях и обработке материалов принимали участие И.С.Бойко, М.А.Иванов, В.А.Лепская, Г.В.Позднякова, О.А.Шеховцов, Е.А.Юдин, Е.Л.Яшугин. Лабораторная обработка проб донных отложений производилась в Институте озероведения АН СССР (И.А.Краснова, А.Д.Свирко) и Институте „Кубаньгипроводхоз“, где также анализировались образцы почв. Пробы фитопланктона обработаны в Институте зоологии АН АЗССР. Исследования каскада прудов выполнены под руководством и при участии автора настоящего издания, пятая глава которого написана Г.В.Поздняковой.

Автор выражает свою глубокую признательность за помощь в организации и проведении полевых работ руководителям Института „Кубаньгипроводхоз“, Управления водного хозяйства и мелиорации Краснодарского края, Тихорешского Управления эксплуатации ороси-

тельных систем, колхоза „Ленинский путь“, на территории которого расположен исследуемый каскад прудов, а также проф. А. Г. Касымову за постоянное содействие в проведении гидробиологических работ. Автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность Б. Б. Богословскому, В. В. Сластихину и Н. В. Мирошникову за рецензирование рукописи и И. Н. Сорокину за ценные советы в процессе ее подготовки.

Глава 1. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ И ПРУДЫ НА ВОДОСБОРЕ б.КАРАКУБАНСКОЙ

1.1. Природные условия, определяющие формирование стока воды и наносов

Балка Каракубанская – левобережный приток р.Терновки, впадающей в р.Ею, – типичный временный водоток Азово-Кубанской равнины. Расположенная в станице Калниболотской Новопокровского района Краснодарского края, она, как и все степные водотоки, зарегулирована прудами (рис.1). Общая протяженность балки составляет 13 км, а площадь ее водосбора в створе плотины пруда № 9 – 25,6 км² (табл. 1).

Уклон поверхности водосбора балки незначительный: в среднем составляет 0°40', в верховье он не превышает 0°10'. Средняя высота водосбора равна 86,5 м, глубина базиса эрозии – 46 м, густота эрозионного расчленения – 1,0 км/км². Оврагов на водосборе нет. Такие показатели, как средний уклон и густота эрозионного расчленения водосбора, растут по длине балки (табл.1), что вообще характерно для временных водотоков Азово-Кубанской равнины, в том числе обследованных нами в 1970 г. балок Плоской и Грузской в бассейне р.Еи (Заррин, 1975). Последние имеют еще более пологий рельеф водосбора, чем б.Каракубанская. Отмеченный характер изменения морфометрических характеристик водосбора по длине балки предопределяет увеличение стока воды и наносов в том же направлении.

Пологий рельеф водосбора балки тормозит формирование поверхностного стока, но способствует образованию внутрипочвенного. Первый возникает только на прилегающих к балке склонах, попеременно меняющих по ее длине свою крутизну. Так, на участке размещения прудов № 1–3 (рис.1) уклон правого склона достигает 3°, а левого – 2°; пруды № 4–6 характеризуются более крутым левым склоном (2–5°) и пологим правым (1–4°); на небольшом участке размещения прудов № 7–7б уклон прилегающих склонов резко возрастает до 7–10°, причем правый более крутой, чем левый; самые нижние пруды каскада (№ 8 и 9) характеризуются более крутым левым склоном (3–6°), тогда как уклон правого не превышает 4°.

Гидрографический и присетевой фонды земель, по терминологии А.С.Козменко (1957), составляют всего 36,3% площади водосбора и являются наиболее активной стокоформирующей его частью, относительное значение которой возрастает по длине балки. Проходящая по левому ее склону грейдерная дорога с боковыми кюветами

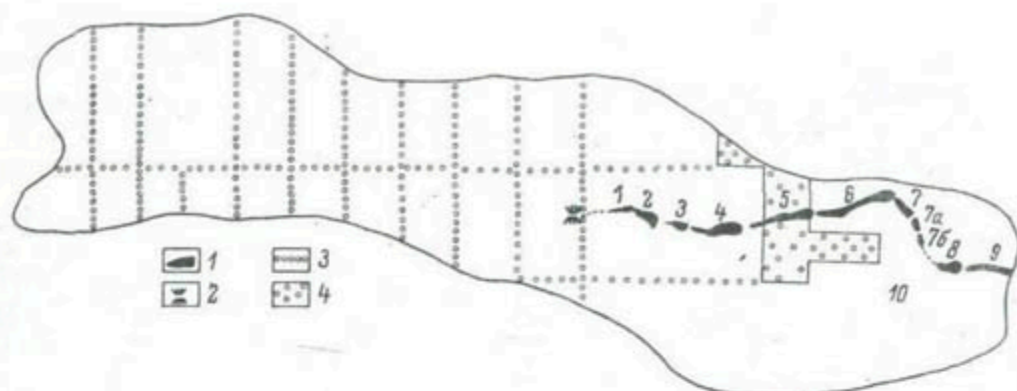


Рис.1. Общая схема водосбора б.Каракубанской.

1 - пруды; 2 - гидрометрическое сооружение; 3 - лесополосы; 4 - сады.

Т а б л и ц а 1

Характеристики водосборов прудов на б.Каракубанской

Номер пруда	Площадь, км ²	Средний уклон, ‰	Густота эрозийного расчленения, км/км ²	Распаханность, %
1	13.2/13.2	5/5	0.76/0.76	99/99
2	15.1/1.9	5/10	0.76/0.79	98/91
3	15.9/0.76	6/9	0.81/1.71	97/80
4/23	17.5/1.6	6/9	0.83/1.1	97/89
5/24	18.5/1.0	7/20	0.84/1.0	97/94
6/25	19.3/0.86	8/34	0.87/1.4	93/21
7	19.6/0.25	9/38	0.87/1.4	92/-
7а/26	19.7/0.09	9/31	0.87/-	92/-
7б/27	19.8/0.13	9/23	0.87/-	92/-
8/28	24.8/5.0	11/18	1.0/1.6	88/74
9/29	25.6/0.83	12/22	1.0/0.96	86/43

П р и м е ч а н и е. Здесь и далее в первой графе числитель - номер пруда по рис.1, знаменатель - то же по табл.7; в остальных графах числитель - характеристики общего водосбора, знаменатель - частного.

Т а б л и ц а 2

Средний механический состав (в %) почвообразующей породы и поверхностного слоя (0-10 см) почвы водосбора б.Каракубанской

Склон	>0.25 мм	0.25- 0.05 мм	0.05- 0.01 мм	0.01- 0.005мм	0.005- 0.001мм	<0.001 мм	Сумма частиц <0.01 мм
Почвообразующая порода							
Левый	-	2.7	31.2	12.9	17.9	35.3	66.1
Правый	-	2.6	30.5	12.2	18.2	36.5	66.9
Среднее	-	2.6	30.8	12.6	18.0	35.9	66.5
Почва							
Левый	0.0	3.4	33.5	12.7	20.7	29.7	63.1
Правый	0.0	2.6	32.3	14.9	17.3	32.9	65.1
Среднее	0.0	3.0	32.9	13.8	19.0	31.3	64.1

отсекает часть водосбора, исключая, таким образом, поступление отсюда стока.

На протяжении первых 9.5 км балка вытянута преимущественно в направлении с запада на восток (рис.1) и только на участке размещения прудов № 7-76 резко поворачивает на юго-восток. На большей части длины левый склон балки имеет южную ориентацию, а правый - северную. С ориентацией склонов, как будет показано ниже, связаны физико-механические свойства берегового, грунта, режим грунтовых вод в берегах, размещение родников.

Почвообразующей породой на водосборе является бурый и желто-бурый суглинок глинистого механического состава (табл.2) и мощностью 17-18 м. Он залегает на глубине 130-140 см на склоне и 170-180 см - на водоразделе. Реакция среды сильно щелочная ($pH = 8.4-8.9$); содержание гумуса не превышает 0.7%; сумма поглощенных оснований ($Ca + Mg$) составляет 32.7 мг-экв. на 100 г почвы, причем на долю кальция приходится 56%; плотность лесовидных пород - 1.3-1.5 т/м³ (Агрохимическая характеристика..., 1964).

Почвы водосбора, предкавказские карбонатные малогумусные мощные черноземы, так же как и почвообразующая порода, имеют глинистый механический состав (табл.2), при этом почвы левого инсолируемого склона более легкого механического состава, чем

правого затененного, что обусловлено более интенсивным проявлением эрозии почв на левом склоне. В отличие от черноземов других районов страны черноземы Краснодарского края обладают высокой водопроницаемостью (Симакин, 1969), снижающей поверхностный сток. Так, летом 1974 г. водопроницаемость почв водосбора к концу второго часа опыта на залеже составила 3.8 мм/мин., а на пару – 5.3 мм/мин. Сведения об агрохимических свойствах почвы водосбора приведены в табл.3. Верхние горизонты карбонатных почв содержат 0.12% водно-растворимых солей, а потери при обработке HCl составляют здесь 4.5%, увеличиваясь до 14.3% на глубине 150–160 см. Плотность поверхностного горизонта почвы равна 1.3 т/м³ (Агрохимическая характеристика..., 1964). Для повышения урожайности на поля колхоза, начиная с 1953 г., вносятся минеральные и органические удобрения. Каждый гектар пашни получает 2.6 т навоза и 5.6 т условных туков минеральных удобрений с пропорциональным соотношением в них азота, фосфора и калия 1:1.5:0.5.

Станица Калниболотская возрастом чуть менее 200 лет (год основания 1794) возникла на месте тогда еще малоосвоенной, необжитой степи, покрытой травами, ковылем, с остатками лесных массивов и значительными пространствами, занятыми зарослями шиповника и терна. Богатые пастбища открывали большие возможности для скотоводства (Куценко, Солодухин, Чучмай, 1968). Первые поселенцы – черноморские казаки – впервые и подняли эти целинные земли. В настоящее время нетронутых участков на всей территории колхоза „Ленинский путь” не осталось: все земли, свободные от хозяйственных и жилых построек, отведены под пахоту, сады и виноградники. Основной посевной культурой является озимая пшеница, которой заняты 42.4% площади водосбора. Под пропашными культурами (подсолнечник, сахарная свекла, кукуруза) находится 26.1% и многолетними травами – 14% площади. Формирование поверхностного стока на склоне зависит не только от состава культур, но и от направления пахоты. Так, на склоне балки, обработанном поперек, поверхностный сток образуется при водообразовании в 17.5 раза большем, чем на склоне, обработанном вдоль (Бойко, 1977).

Водосбор балки расположен в зоне недостаточного увлажнения (Темникова, 1959), где индекс сухости, по М.И.Будыко, равен 1.5–1.7. Средняя годовая температура воздуха по показаниям метеостанции Тихорецк (60 км юго-западнее изучаемого водосбора) за многолетний период равна 11.6° (табл.4), а по показаниям метеостанции Белая Глина (40 км северо-восточнее) – 9.2° (Агроклиматическая характеристика..., 1963). Амплитуда колебания средней месячной температуры воздуха составляет 28°, а средняя продолжительность безморозного периода – 180 дней. Период работ экспедиции (май 1973–декабрь 1976 г.) по средней годовой температуре воздуха был близок норме (табл.4).

Годовое количество осадков за многолетний период (1891–1976 гг.) в Тихорецке составляет 566 мм (табл.4), а в Белой Глине –

Т а б л и ц а 3

Агрохимические свойства поверхностного (0-10 см)
горизонта почвы водосбора б.Каракубанской

Склон	рН	Карбо- натность (CaCO_3), %	Поглощенные ос- нования, мг-экв./100 г			Гу- мус, %	Подвиж- ный фос- фор (P_2O_5)	Обмен- ный калий (K_2O)
			Са	Mg	Са+Mg			
Левый	8.2	2.66	33.76	10.43	44.19	4.15	1.67	29.97
Правый	8.2	2.37	33.73	12.77	46.50	3.80	1.70	22.13
Сред- нее	8.2	2.52	33.74	11.60	45.34	3.98	1.86	25.90

Т а б л и ц а 4

Средние климатические характеристики по показаниям
метеостанции Тихорецк

Период	Сезонные				Годо- вые
	XI-II	III-V	VI-VIII	IX-X	

Температура воздуха, град

Многолетний	-0.4	10.0	22.5	14.1	11.6
XI 1972-X 1976 г.	-0.2	11.4	21.8	14.7	11.9

Осадки, мм

Многолетний	173	138	175	80	566
XI 1972-X 1976 г.	196	143	175	100	614

Средняя скорость ветра, м/с

Многолетний	4.2	3.7	2.4	3.4	3.4
XI 1972-X 1976 г.	4.0	3.8	2.5	3.2	3.4

Число дней с пыльными бурями

Многолетний	0	3.4	0.4	0.2	4.0
XI 1972-X 1976 г.	4.2	10.2	0	0.5	14.9

489 мм. Преобладают осадки осенне-зимнего (XI–II) и летнего (VI–VIII) сезонов, которые в сумме дают 61.6% годового количества. Связь между сезонными и годовыми суммами осадков слабая (коэффициент корреляции $r < 0.6$), поскольку внутригодовое распределение их неустойчиво. Осадки теплого периода нередко выпадают в виде ливневых дождей. Хотя Азово-Кубанскую равнину нельзя отнести к таким ливнеактивным районам, как Молдавия, юг Украины, где за один ливень выпадает до 200 мм осадков (Сластухин, 1964), но и здесь, по исследованиям И.С.Бойко, имели место осадки со слоем 120–140 мм. Период работ экспедиции по годовой сумме осадков относится к циклу лет с повышенной водностью (рис. 2, табл. 4). Во время ливневых дождей на водосборе балки, особенно на прирусловых склонах, формируется поверхностный сток. Дожди, выпавшие 15 и 17 августа 1974 г. общим слоем 56 мм, дали на стоковой площадке (длина 135 м, ширина 20 м, уклон $3^{\circ}10'$), расположенной на правом берегу пруда № 6, слой стока 10 мм (Бойко, Заррин, 1976). Поверхность площадки была распахана вдоль склона. Высокая температура воздуха летом, достигающая в июле 43° , и длительные (до 100 дней и более) засушливые периоды вызывают растрескивание почвогрунтов, и выпадающие ливневые осадки, нередко полностью расходуясь на заполнение трещин, стока не дают.

Летние ливни вызывают склоновый смыв почвы. Так, дожди, выпавшие 15 и 17 августа 1974 г., произвели на упомянутой выше стоковой площадке смыв почвы, достигший 85 т/км^2 (Бойко, Заррин, 1976), при этом средняя мутность склонового стока составила 8.6 кг/м^3 . В эти же дни мутность воды в ручейках, стекающих из сада с распашкой вдоль склона (пруд № 5), составила $1.6\text{--}3.9 \text{ кг/м}^3$ (измерения производились Е.А.Юдиным в устьевой части ручейков, в 1–2 м от уреза пруда). Ливневые дожди производят интенсивный смыв почвы с прилегающих к прудам садов и огородов, заноса продуктами смыва дороги по берегам прудов и образуя валы высотой 0.2–0.3 м в прибрежном тростнике. Сползание грязевой массы из садов на берегах пруда № 5 отмечалось после дождей, выпавших 12, 13, 15, 16 и 20 августа 1973 г. А ливни, прошедшие с 29 апреля по 2 мая 1975 г. и давшие общий слой осадков 97.5 мм, произвели сильный смыв на территории тех же садов, последствия которого в виде конусов выноса наносов в пруду № 5 стали видны только в июне – после снижения уровня в нем (рис. 3). Линейный размыв прилегающих склонов, также с образованием конусов выноса наносов в прудах, производят потоки воды, стекающие с дорог. В приплотинной части пруда № 9, на левом его склоне, размывы, начинающиеся от дороги, имели длину 9–60 м, ширину по верху 0.5–2.0 м и наибольшую глубину 0.2–1.0 м; объем вынесенной со склонов земли составил $1.0\text{--}60.0 \text{ м}^3$.

Поверхностный сток во время весеннего снеготаяния – явление редкое по причине небольших снегозапасов, частых оттепелей и большой водопроницаемости почвы. Снежный покров, как правило,

неустойчив, появляется обычно в первой декаде декабря, а сходит в середине марта. Устойчивым он становится лишь в начале января и, пролежав в среднем 48 дней, разрушается во второй декаде февраля. Высота снежного покрова незначительная (менее 10 см). В течение зимы под влиянием частых оттепелей снег то сходит, то вновь появляется. Общее число дней с оттепелями в среднем составляет 52, из них 13 приходится на период с устойчивым снежным покровом. Почвы ежегодно промерзают в среднем на глубину 34 см, а в отдельные зимы — на 58 см. Во время оттепелей происходит пополнение запасов продуктивной влаги, с чем связано формирование внутрипочвенного стока.

Зимние периоды 1973/74, 1974/75 и 1975/76 г. были неблагоприятны для формирования весеннего поверхностного стока. Наибольшие запасы воды в снежном покрове, согласно показаниям метеостанции Тихорецк, не превышали 23 мм (5/II 1974 г.) при среднем многолетнем их значении 35 мм, а по показаниям метеостанции Белая Глина были не больше 27 мм при норме 44 мм. В первые две зимы не было устойчивого снежного покрова и только зимой 1975/76 г. он появился в конце января. Последний снежный покров в эти зимы сходил в начале-середине марта и нередко раньше наступления устойчивых положительных средних суточных температур воздуха. Почвогрунты в отдельные зимы (1975/76 г.) либо совсем не промерзали, либо (1973/74 г.), промерзнув на глубину более 40 см, оттаивали с поверхности к моменту снеготаяния, и талая вода при небольших снегозапасах просачивалась в почву, практически не давая поверхностного стока. Дефицит влаги в почве после схода снежного покрова, по подсчетам И.С.Бойко, оказался равным 50–60%, т.е. почва была в состоянии впитать значительно больше воды, чем ее содержалось в снеге в эти зимы. Обследованием водосбора балки после схода снежного покрова следов стока не обнаружено.

В зимний период происходит накопление влаги почвой. Наибольшие ее запасы в слое 0–100 см под озимой пшеницей — основной культурой на водосборе балки — наблюдаются в марте и достигают в среднем за многолетний период 168 мм (Агроклиматическая характеристика..., 1963), а минимальные — в июне (72 мм). Экспедиционный период характеризовался пониженными против нормы запасами продуктивной влаги в почве. Ее средние месячные значения в отдельные месяцы (IX–XI, III–VI) были в 1,2–4,9 раза меньше их средних многолетних значений. На водосборе б.Каракубанской летом 1974 г. влажность поверхностного слоя почвы (0–2 см) менее всего изменялась под многолетними травами и была наибольшей под подсолнечником благодаря хорошей затененности поверхности.

В период больших влагозапасов в почве (поздняя осень, весна) образуется внутрипочвенный сток, в апреле и ноябре 1976 г. отмеченный в верховье балки при влагозапасах более 100 мм: струйки воды высачивались из-под пахотного горизонта на правом бере-

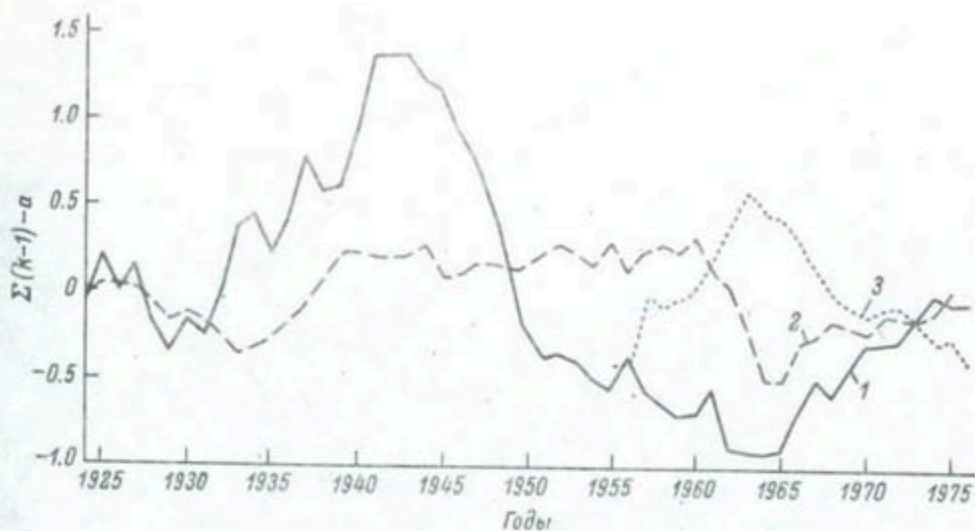


Рис.2. Разностные интегральные кривые годовой суммы осадков (1), средней годовой температуры воздуха (2) по станции Тихорецк и испарения с водной поверхности (3) грунтового испарителя в Краснодаре.



Рис.3. Конусы выноса наносов из прилегающих садов к пруду № на б.Каракубанской, образовавшиеся во время ливневых дождей апреле 1975 г. Фото автора.



Рис.4. Скопления верховодки в тальвеге б.Каракубанской в апреле 1976 г. Фото автора.



Рис.5. Родник на б.Каракубанской, в верховье пруда № 6. Фото автора.

гу пруда № 2 (рис.1). В тальвеге балки почвенные воды начинали скапливаться ниже гидрометрического сооружения (рис.1), постепенно увеличиваясь в объеме по направлению к пруду № 1 (рис.4). Вода стояла в колеях колес, устьях впадающих в балку логов.

В питании б.Каракубанской, как и других временных водотоков Азово-Кубанской равнины (Навозова, 1955), участвуют многочисленные родники и ключи, бьющие из-под склонов. Родники расположены по всей длине балки, начиная от гидрометрического сооружения, преимущественно под правым затененным ее склоном, и известны издавна. До 1960 г. на левом ее берегу, выше пруда № 1, был родник, воды которого наполняли нижерасположенные пруды, но он заилился и прекратил существование. Еще в 1927 г. население пользовалось водой родников, находящихся в верховье прудов № 5 и 6 (рис.5), долговечны и родники в верховьях прудов № 7 и 9. Часть родников скрыта под уровнем прудов, и установить их наличие можно лишь в зимнее время по незамерзающей над ними воде или наледям.

Лёссовидные суглинки, слагающие водосбор балки, содержат водоносные горизонты, которые, несмотря на слабый дебит, пониженное качество воды и неустойчивый режим, широко эксплуатируются неглубокими колодцами. Приурочены водоносные горизонты к песчаным разностям суглинков и супесей; водоупором являются более плотные суглинки и глины; водообильность отложений — 0.01–0.3 л/с; воды сульфатно-магниево-натриевые и сульфатно-гидрокарбонатно-натриево-кальциевые с минерализацией 1.5–4.0 г/л. На водосборе есть и артезианские воды понтического горизонта. Статический уровень в отдельных скважинах находится на глубине 10 м от поверхности. Согласно наблюдениям на метеостанции Белая Глина, грунтовые воды в экспедиционный период стояли на 11 см ближе к поверхности земли, чем в среднем за 1968–1976 гг. (табл.5). Это подтверждает повышенную водность периода работ экспедиции.

Водосбор балки в большей степени подвержен дефляции, чем эрозии почв. Последняя, как отмечалось выше, приурочена к прирусловым склонам балки, а первая распространена повсеместно. Активным фактором дефляции почв является ветер, средняя годовая скорость которого за многолетний период равна 3–4 м/с (табл.4). Наибольшая скорость ветра отмечается в зимне-весенний период (XI–V), когда поверхность водосбора слабо защищена снежным и растительным покровом. Период работ экспедиции по скорости ветра был близок среднему многолетнему.

Балка Каракубанская, течение которой ориентировано с запада на восток, является как бы проводящим коридором для ветров восточного и западного направлений, преобладающих здесь. Наибольшей повторяемостью в году (54%) отличаются ветры восточных направлений, чаще всего наблюдающиеся в ноябре (42%) и реже — в июле (15–18%). В отличие от них ветры западных направлений (33% в году) обычно имеют место в июне-июле (19–25%) и реже — в

Т а б л и ц а 5

Средняя глубина грунтовых вод (в м) по показаниям метеостанции Белая Глина

Год	Сезонная				Годовая
	XI-II	III-V	VI-VIII	I-X	
1972-1973	11.14	10.91	10.94	10.99	11.01
1973-1974	10.83	10.66	10.76	10.94	10.79
1974-1975	10.96	10.75	10.80	11.00	10.87
1975-1976	11.00	10.85	10.95	10.81	10.92
Среднее	10.93	10.79	10.86	10.96	10.88
Среднее за 1968-1976 гг.	11.05	10.87	10.95	11.10	10.99

ноябре (10-12%) В экспедиционный период повторяемость ветров восточных и западных направлений была ниже нормы и составила соответственно 39 и 16%, а повторяемость штилей, наоборот, была выше нормы (22% против 10%).

Ветры со скоростью более 15 м/с вызывают пыльные бури. Такие ветры по данным метеостанций Тихорецк и Белая Глина наблюдаются соответственно 29 и 34 дня в году. Наиболее сильные пыльные бури отмечены в 1946, 1948, 1959 и 1969 гг. В среднем в году бывает 4 дня с пыльными бурями (табл.4), чаще возникающими весной, особенно в марте и апреле, при ветрах восточного направления. С октября по январь их развитию препятствует осенняя и зимняя увлажненность почвы, но в феврале при сочетании морозной погоды, отсутствия снежного покрова и значительной скорости ветра действие пыльных бурь может быть продолжительным (1976 г.). В летний сезон, как и в осенний, пыльные бури - явление редкое по причине защищенности почвы растительностью. Период работ экспедиции характеризуется увеличенным числом дней с пыльными бурями против среднего многолетнего (табл.4).

Для борьбы с эрозией и дефляцией почв на водосборе создана система полевых защитных лесных полос (рис.1) с междоузлиями не более 500 м. На ветроударных участках сеть полос более плотная. С подветренной стороны лесных полос размещаются пропашные культуры, а с наветренной - многолетние травы и озимые. Для снижения поверхностного стока на полях применяется система летне-осенней обработки почвы по типу чистого полупара, соблюдается чередование культур с глубокой корневой

системой и культур, иссушающих преимущественно верхний слой почвы. Для увеличения весеннего запаса влаги в почве применяется глубокая зяблевая вспашка. Ее эффект особенно значителен в годы, когда осадки холодного периода неполностью восстанавливают влажность всего почвенного профиля. Однако эти меры не исключают поступление наносов в пруды из садов и огородов индивидуального пользования, где противоэрозионные мероприятия не выполняются.

1.2. Пруды на водосборе

3584
Строительство прудов на Азово-Кубанской равнине, начавшееся позднее, чем в других районах степной зоны, относится, видимо, к периоду заселения степей переселенцами из Украины и России, т.е. к концу XVIII в. Первые документальные упоминания о прудах этой территории датированы 1851-1860 гг., когда на реках Азовского бассейна возведено было уже очень много мельничных плотин, служивших переправой через реки, поскольку броды из-за сильной заиленности дна рек почти отсутствовали. Тростник, во множестве росший в прибрежной зоне прудов и азовских рек, в то время широко использовался для кровли строений, огораживания скотных загонов, огородов, устройства плотин. В зимнее время в тростниках укрывался от вьюг и метелей скот. Все реки уже тогда были маловодными, имели слабое течение „по причине многочисленных запруд для мельниц“, а берега их густо заселены. До наших дней в бассейне р.Еи сохранились еще пруды, строительство которых относится к 1840 г. (Прыткова, 1975а). На этом основании трудно согласиться с некоторыми исследователями, рассматривающими пруды как временные сооружения: водоемы, существующие 50 лет и более, вряд ли можно считать временными. Подтверждением их долговечности служит и часто повторяемая старожилami фраза: „Сколько себя помню, столько и пруд был“. Временными же пруды становятся по вине человека: там, где не ведется уход за плотинами, вовремя не производится их ремонт, срок их жизни сильно сокращается. В то же время до сих пор существуют и эксплуатируются пруды, построенные еще в XIX в., например Жеребцовская система в Волгоградской области (Шумаков, 1966); пруды, построенные в Каменной степи (Сухарев, Сухарева, 1957) экспедицией В.В.Докучаева, в Поволжье (Магакян, 1977) — экспедицией генерала Жилинского.

Пруды Азово-Кубанской равнины в разные годы обследовались Институтом озероведения АН СССР: в 1963 г. — верховые, а в 1970 г. — каскады на балках Грузской и Плоской в бассейне р.Еи. Собраны сведения об интенсивности их заиления (Прыткова, 1969, 1975б), донных отложениях (Шеховцов, 1969; Юдин, 1969; Шеховцов, Юдин, 1975), гидробиологии (Слепухина, 1969; Касымов, Слепухина, 1975) и гидрохимии (Позднякова, 1975). Общим для водо-

сборов всех обследованных прудов является выположенность рельефа, небольшие уклоны ($30' - 1^{\circ}$), отсутствие оврагов при значительной распаханности (60-90%).

В 1973 г. на водосборе б. Каракубанской насчитывалось 12 прудов (рис.1), занимающих около 1% его площади. Более детально изучены пруды № 4-9, другие обследованы маршрутно.

Водосборы прудов различаются по морфометрическим показателям (табл.1). Наиболее благоприятными условиями формирования поверхностного стока и склонового смыва почвы отличаются водосборы прудов № 6 и 7а со средним уклоном поверхности 31-38%. Водосборы особенно верхних прудов (№ 1-5) значительно распахан-ны (более 80-90%), а водосбор пруда № 5 на 80% покрыт садами. К прудам № 6-9 примыкают жилые постройки, сады, огороды. Пруды образованы земляными плотинами, высота которых изменяется от 1 до 8 м. Наиболее низкие плотины (менее 3 м) имеют пруды № 2, 3, 7а, 7б, 8. Плотины периодически ремонтируются, наращиваются по высоте для сохранения емкости пруда, которая уменьшается по мере его заиления. Для сброса избытка воды в тело плотины заложены трубы диаметром 20-40 см. Не имеет водосброса плотина пруда № 4, но почти каждый год весной она прорывается, и если ее ремонт затягивается, как это случилось в 1974 г., то пруд почти лишается воды. Тело плотины прудов сильно фильтрует. Пруды в значительной степени заросли тростником (табл.6), высота которого в конце лета достигает 4 м.

В состав каскада входят пруды, способные аккумулировать большое количество воды и предотвращать размыв плотин нижерасположенных прудов. Такую роль выполняет пруд № 6, ежегодно удерживающий воду, поступающую в него из пруда № 5 при прорыве плотины пруда № 4. Исключение составил только 1975 г., когда пруд № 6 сбросил некоторое количество воды в нижний бьеф. Размеры прудов, отнесенные к наибольшему уровню 1975 г., приведены в табл.6.

Периодическое наращивание высоты плотины приводит к увеличению начальных (до заиления) размеров прудов при очередной отметке НПУ, в результате чего для прудов каракубанского каскада отмечается тесная связь ($r = 0.93$) объема и площади зеркала с продолжительностью эксплуатации. На этом основании в ряде случаев можно через объем и площадь зеркала косвенно определить влияние на ту или иную характеристику продолжительности эксплуатации. Тесная связь между объемом и площадью зеркала прудов ($r = 0.95$) превращает эти морфометрические показатели во взаимозаменяемые.

В силу внутригодовых колебаний уровня прудов их размеры подвержены значительным изменениям в году. Это видно из соотношения между наибольшим и наименьшим значениями площади зеркала (табл.6), уменьшающегося от 3-5 для верхних прудов каскада (№ 5-7а) до 1.3-1.5 для нижних в связи с более зарегулированным

стоком основных источников их наполнения. Ежегодный прорыв плотины пруда № 4 приводит к увеличению указанного соотношения до 13.8. При минимальном уровне оказываются осушенными 70–80% площади зеркала верхних прудов и 20–30% – нижних. Поэтому промерные и зондировочные работы на прудах следует производить в период их высокого наполнения. Лучшее время для этих работ на прудах исследованного каскада – весна, пока еще не появились заросли тростника.

Среди морфометрических характеристик прудов есть ряд таких, знание которых помогает составить представление о происходящих в водоемах процессах, источниках наполнения, а значения используются для приближенной оценки объема водоемов.

Показатель емкости прудов (отношение средней глубины к наибольшей) значительно изменяется в пределах одного каскада (0.32–0.76) и увеличивается по мере заиления прудов (табл.6). Поэтому использование его осредненных для отдельных районов значений, полученных по проектным данным (незаиленные пруды), в целях оценки объема в той или иной степени заиленных прудов (Молдованов, 1964; Кривонос, 1968) сопряжено с определенными погрешностями.

Открытость водоемов (отношение площади зеркала к средней глубине) характеризует условия перемешивания водной массы и, как будет показано ниже, является важной классификационной характеристикой водохранилищ разного размера. Ее значения для прудов каскада не превышают $0.07 \text{ км}^2/\text{м}$ (табл.6).

Показатель формы чаши водоема (отношение длины водоема к его наибольшей глубине и ширине) определяет характер продольного профиля отложений в прудах (Юдин, 1971). Его значения для прудов каскада изменяются от 1.0 до 11.0 м^{-1} (табл.6) и растут с увеличением размера водоема.

Удельный водосбор (отношение площади водосбора к площади зеркала) и **слой аккумуляции** (отношение объема водоема к площади водосбора) выражают связь водоема с водосбором, проявляющуюся через отдельные элементы балансов. При каскадном размещении прудов на водотоке удобнее пользоваться средними значениями этих показателей, полученных для каждого створа водотока с учетом всех вышерасположенных прудов.

Совместное рассмотрение изменения по длине водотока удельного водосбора и слоя аккумуляции (рис.6) позволяет составить представление об источниках наполнения прудов. Из рис.6 следует, что размеры прудов (объем, площадь зеркала) нарастают по длине балки быстрее, чем площадь водосбора. Это возможно в том случае, если по длине каскада резко возрастает поверхностный сток, или при относительной стабильности его резко увеличивается грунтовое питание прудов. Поскольку в пределах небольшой длины каскада поверхностный сток не может увеличиться в 30 раз, как это

стоком основных источников их наполнения. Ежегодный прорыв плотины пруда № 4 приводит к увеличению указанного соотношения до 13.8. При минимальном уровне оказываются осушенными 70–80% площади зеркала верхних прудов и 20–30% – нижних. Поэтому промерные и зондировочные работы на прудах следует производить в период их высокого наполнения. Лучшее время для этих работ на прудах исследованного каскада – весна, пока еще не появились заросли тростника.

Среди морфометрических характеристик прудов есть ряд таких, знание которых помогает составить представление о происходящих в водоемах процессах, источниках наполнения, а значения используются для приближенной оценки объема водоемов.

Показатель емкости прудов (отношение средней глубины к наибольшей) значительно изменяется в пределах одного каскада (0.32–0.76) и увеличивается по мере заиления прудов (табл.6). Поэтому использование его осредненных для отдельных районов значений, полученных по проектным данным (незаиленные пруды), в целях оценки объема в той или иной степени заиленных прудов (Молдованов, 1964; Кривонос, 1968) сопряжено с определенными погрешностями.

Открытость водоемов (отношение площади зеркала к средней глубине) характеризует условия перемешивания водной массы и, как будет показано ниже, является важной классификационной характеристикой водохранилищ разного размера. Ее значения для прудов каскада не превышают $0.07 \text{ км}^2/\text{м}$ (табл.6).

Показатель формы чаши водоема (отношение длины водоема к его наибольшей глубине и ширине) определяет характер продольного профиля отложений в прудах (Юдин, 1971). Его значения для прудов каскада изменяются от 1.0 до 11.0 м^{-1} (табл.6) и растут с увеличением размера водоема.

Удельный водосбор (отношение площади водосбора к площади зеркала) и слой аккумуляции (отношение объема водоема к площади водосбора) выражают связь водоема с водосбором, проявляющуюся через отдельные элементы балансов. При каскадном размещении прудов на водотоке удобнее пользоваться средними значениями этих показателей, полученных для каждого створа водотока с учетом всех вышерасположенных прудов.

Совместное рассмотрение изменения по длине водотока удельного водосбора и слоя аккумуляции (рис.6) позволяет составить представление об источниках наполнения прудов. Из рис.6 следует, что размеры прудов (объем, площадь зеркала) нарастают по длине балки быстрее, чем площадь водосбора. Это возможно в том случае, если по длине каскада резко возрастает поверхностный сток или при относительной стабильности его резко увеличивается грунтовое питание прудов. Поскольку в пределах небольшой длины каскада поверхностный сток не может увеличиться в 30 раз, как это

Т а б л и ц а 6

Морфометрические характеристики прудов на б.Каракубанской (при НПУ)

Но- мер пруда	Объем, тыс. м ³	Площадь зерка- ла, тыс.м ²		Площадь зарос- лей тро- стника, %	Глубина, м		Дли- на, м	Наиболь- шая ши- рина, м	Показатель емкости		Откры- тость, 10 ³ м	Показа- тель формы чаши, м ⁻¹	Сред- ний удель- ный водо- сбор	Сред- ний слой аккумуляции, мм
		мини- маль- ная	при НПУ		сред- няя	наиболь- шая			началь- ный	конеч- ный				
1	1.7	-	4.2	-	0.41	-	130	-	-	-	1.0	-	3140	0.13
2	3.8	-	11.2	-	0.34	-	325	-	-	-	33.0	-	985	0.36
3	1.5	-	9.9	-	0.16	-	280	-	-	-	8.5	-	629	0.44
4/23	59.0	4.5	61.8	26.6	0.96	1.27	615	90	0.48	0.76	64.5	5.4	201	3.8
5/24	18.2	7.9	26.9	56.7	0.68	2.12	705	60	0.28	0.32	39.6	5.5	163	4.5
6/25	85.0	21.0	73.5	33.2	1.15	1.66	1100	60	0.62	0.69	63.9	11.0	103	8.8
7в/26	25.0	4.5	21.4	90.7	1.17	2.49	445	52	0.47	0.47	18.3	3.4	94	9.8
7б/27	2.1	2.0	2.7	7.6	0.79	1.44	50	35	0.41	0.55	3.4	1.0	94	9.9
8/28	24.6	18.1	27.5	57.3	0.90	1.69	750	101	0.44	0.53	30.6	4.4	98	9.2
9/29	63.5	32.5	41.0	13.2	1.55	2.76	490	94	0.47	0.56	26.4	1.9	87	11.4

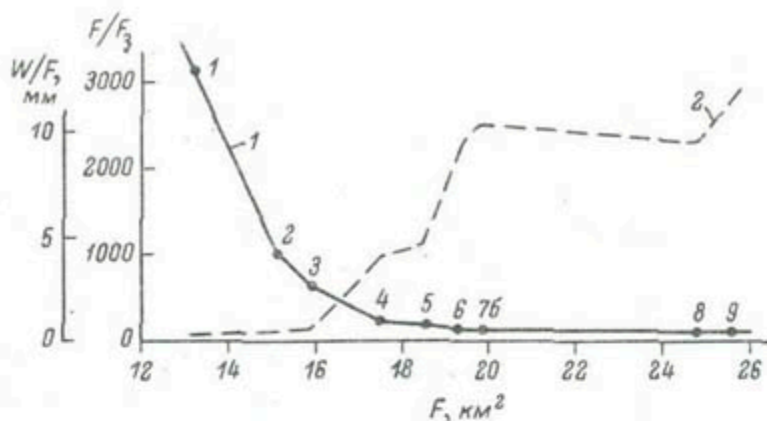


Рис. 6. Изменение среднего удельного водосбора (1) и слоя аккумуляции (2) по длине каскада прудов на б. Каракубанской.

Цифра у точки — номер пруда (рис. 1).

следует из значений удельного водосбора и слоя аккумуляции в начале и конце каскада, то вероятнее всего увеличение размеров прудов по длине каскада отнести за счет усиливающегося в этом направлении грунтово-фильтрационного питания прудов. Вместе с тем из рис. 6 можно сделать выводы о том, что влияние водосбора на происходящие в прудах процессы уменьшается вниз по длине каскада.

Вода прудов используется для полива прилегающих огородов, водопоя скота, разведения химикатов для опрыскивания колхозных садов (пруд № 5). В прошлом вблизи большинства прудов (№ 4, 6, 7а, 7б, 8) изготавливали саманный кирпич, и саманные ямы, сохранившиеся до наших времен, расположены ярусами по левому склону прудов № 4 и 6, а самые нижние из них усиливают изрезанность береговой линии. Свинотоварная ферма на левом берегу пруда № 1 и конный двор на правом берегу пруда № 9 служат дополнительными источниками поступления органического вещества в водоемы.

1.3. Особенности морфологии чаши прудов

Общим для всех водохранилищ, создаваемых в разных звеньях гидрографической сети и отличающихся размерами, является их назначение. — искусственное регулирование стока. С этой точки зрения между водохранилищами и прудами нет принципиального различия (Буторин, 1969). Тем не менее в существующих классификациях к прудам чаще всего относят небольшие водохранилища объемом менее 1 млн. м³ (Лопатин, 1965). При этом пруды нередко называют малыми водохранилищами, хотя к этой категории одни авторы причисляют водоемы объемом 1–20 млн. м³ (Лопатин, 1965), другие — менее 1 км³ (Матарзин, Богословский, Мацкевич, 1977).

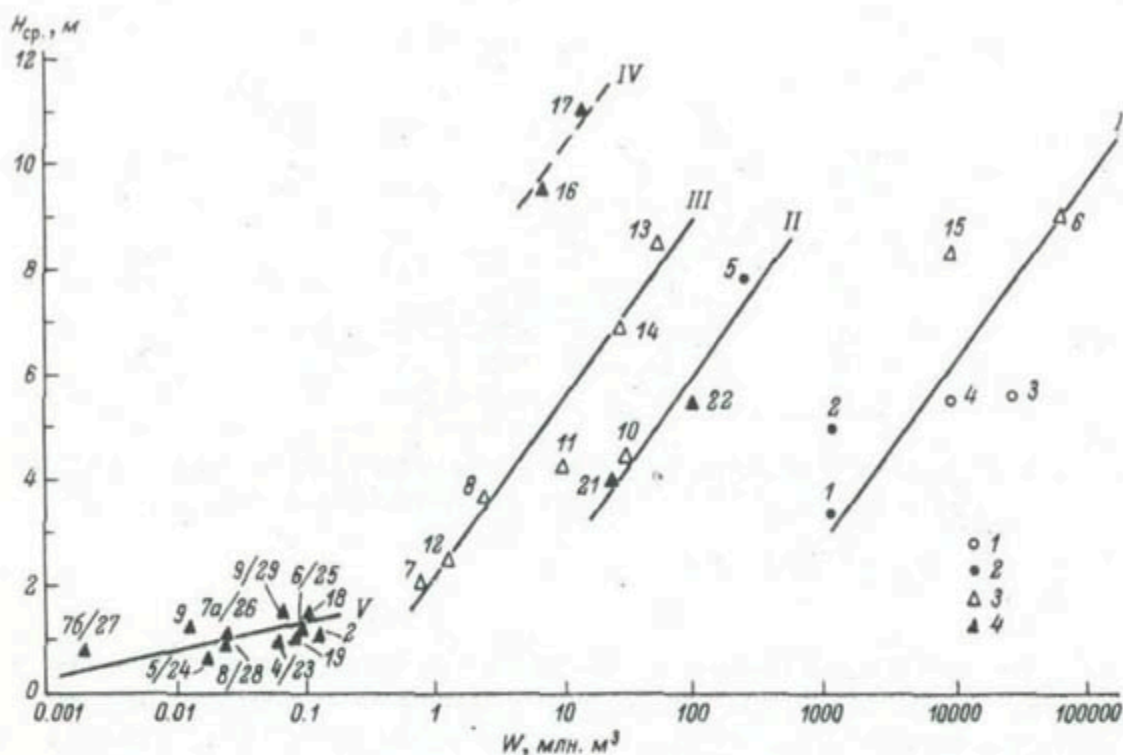


Рис.7. Связь средней глубины с объемом водной массы водохранилищ.

З о н ы: 1 – тайги; 2 – смешанных лесов; 3 – лесостепи; 4 – степи. 1–V – группы водохранилищ. Цифра у точки – номер водохранилища (табл.6 и 7).

Надо заметить, что в современной гидрологической литературе существует множество классификаций водохранилищ по размерам, но ни в одну из них не заложен генетический признак.

Создаваемое водохранилище наследует от водотока прежде всего морфологическое строение чаши, которое оно впоследствии в какой-то степени видоизменяет, приспособлявая к новым условиям за счет размыва одних участков и аккумуляции наносов на других. Поэтому размер водохранилища зависит от его размещения в разных звеньях гидрографической сети (порядка водотока). Технические элементы (плотина, водосброс) геотехнической системы, в которую входит водохранилище (Вендров, Дьяконов, 1976), могут нарушить связь размера водоема с порядком водотока, на котором он расположен, но при осреднении большого количества данных, стирающем индивидуальные особенности водохранилищ, она проявляется четко (Дроздов, 1974; Мильков, 1973; Прыткова, 1979). Поэтому в основу классификации водохранилищ по размерам следует прежде всего положить их размещение в разных звеньях гидрографической сети. Если на одном графике совместить кривые связи объема водной массы и средней глубины водохранилищ, седиментационный баланс которых был изучен (табл.7), то окажется, что во-

Т а б л и ц а 7

Морфометрические характеристики водохранилищ с изученным балансом наносов

Номер водохранилища	Наименование	Площадь водосбора, км ²	Объем, млн.м ³	Площадь зеркала, км ²	Средняя глубина, м	Открытость, 10 ⁶ м	Источник
Зона тайги и смешанных лесов							
1	Иваньковское		1120	327	3.4	96	Буторин, 1969
2	Угличское		1240	249	5.0	50	
3	Рыбинское	146000	25400	4550	5.6	815	
4	Горьковское		8660	750	5.5	136	
5	Можайское	1360	235	30.7	7.7	4	Эдельштейн, 1973
Лесостепная зона							
6	Куйбышевское		58000	6450	9.0	715	Буторин, 1969
7	Борщенское	48.0	0.757	0.36	2.1	0.17	Лопатин, 1961
8	Успенское	33.2	2.43	0.66	3.7	0.18	
9	Березовое	1.0	0.014	0.012	1.2	0.009	
10	Клебан-Быкское	403	30.0	6.8	4.4	1.6	Дрозд, Горецкая, 1967
11	Луганское	136	9.5	2.2	4.3	0.51	
12	Широкое	33.5	1.28	0.52	2.5	0.21	

Т а б л и ц а 7 (продолжение)

Номер водохра- нилища	Наименование	Площадь водосбо- ра, км ²	Объем, млн.м ³	Площадь зеркала, км ²	Средняя глубина, м	Откры- тость, 10 ⁶ м.	Источник
13	Старо-Крымское	1113	51.8	6.2	8.4	0.73	Широков, 1974
14	Ольховское	404	26.8	3.9	6.9	0.57	
15	Новосибирское	211000	8590	1075	8.3	130	
Степная зона							
16	Альминское	249	6.6	0.99	9.5	0.10	Дрозд, Хлоева, 1966
17	Тайганское	114	14.0	2.0	11	0.18	
18	Симферопольское	38.5	0.10	0.055	1.5	0.037	
19	Мирновское	53.0	0.080	0.062	1.1	0.056	Дрозд, Хлоева, 1966
20	Зиминовское	58.0	0.125	0.045	1.1	0.041	
21	Волчьи Ворота	1895	23.5	5.5	4.2	1.3	
22	Отказненское	7980	100	18.4	5.4	3.4	Прыткова, 1973б
Горная область							
30	Мингечаурское	62000	16000	625	25.6	24	Тарвердиев, 1974

водохранилища больше различаются по объему водной массы, чем по средней глубине (рис.7), и группируются по величине показателя открытости. Так, например, на рис.7 выделяются водохранилища I и II групп, расположенные на реках с постоянным течением, и водохранилища III-V групп - в верхних звеньях гидрографической сети, отнесенные к малым. Показатель открытости водохранилищ I и II групп соответственно равен 100-800 и 1-4 км²/м и уменьшается до 0.2-1.0 и 0.1-0.2 км²/м для водохранилищ III и IV групп. Общим для водохранилищ I-IV групп является сходство морфологического строения чаш: изменению средней глубины в них на 1 м соответствует соразмерное с начальным изменение объема водной массы (угол наклона кривых I-IV к оси абсцисс одинаков, рис.7).

Особую группу водоемов среди всех, и в частности среди малых, составляют водохранилища V группы, показатель открытости которых менее 0.1 км²/м. Расположенные в овражно-балочной сети, имеющей небольшую глубину вреза и пологие склоны, они имеют отличное от водохранилищ I-IV групп морфологическое строение чаши: незначительное изменение глубины в них вызывает резкое изменение объема водной массы. Эти водоемы отнесены к прудам. Таким образом, среди малых водохранилищ, расположенных в верхних звеньях гидрографической сети, выделяются самые малые - пруды, размер которых в значительно большей степени определяет особенности происходящих в них процессов, чем размер водохранилищ первых четырех групп.

На рис.7 данные по прудам разных природных районов (точка 9 - ЦЧО, 18-20 - степной Крым, 23-29 - Предкавказье - б.Каракубанская) группируются вокруг одной линии связи (кривая V), что служит подтверждением морфологического сходства их чаш. Объем этих прудов менее 150 тыс.м³, а показатель открытости менее 0.1 км²/м. Водоемы несколько большего объема (Боршенское - точка 7. Широкое - точка 12) по строению чаши занимают промежуточное положение между прудами (кривая V) и малыми водохранилищами III группы, расположенными на ручьях и малых реках. Поскольку показатель открытости их превышает 0.1 км²/м (табл.7), они не могут быть отнесены к прудам.

Выделенные пять групп не исчерпывают всего многообразия существующих водохранилищ и поэтому не могут рассматриваться как их классификация. Выполненный сравнительный анализ морфометрических характеристик водохранилищ с изученным седиментационным балансом позволил выявить особенность морфологии чаши самых малых из них - прудов, что необходимо для понимания особенностей водного и седиментационного балансов последних. При классификации водохранилищ по размерам нельзя брать за основу какую-нибудь одну морфометрическую характеристику (объем, или площадь зеркала, или среднюю глубину). Необходимо учитывать несколько таких характеристик или соотношение между ними. Классификационное значение может иметь, например, показатель открытости водоемов, характеризующий условия перемещения водной массы в них.

Глава 2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И ВОДНЫЙ БАЛАНС ПРУДОВ

2.1. Общая характеристика гидрологического режима прудов каскада

Уровненными наблюдениями на прудах каскада охвачен период с 19 апреля 1973 г. по 15 марта 1978 г. (рис.8).

Каскадное размещение прудов обуславливает прежде всего уменьшение амплитуды колебания уровня по длине каскада. Ее среднее годовое значение для верхних прудов (№ 4-7а) составило 63-87 см, а для нижних (№ 7б-9) - 37-52 см. В отдельные годы (1975 г.) амплитуда колебания уровня в прудах № 4-7а превышала 1 м, а в прудах № 8 и 9 достигала всего 70-80 см. Ее уменьшению по длине каскада способствует зарегулированность стока вышерасположенными прудами, уменьшение среднего удельного водосбора и усиление питания прудов грунтово-фильтрационными водами в этом направлении.

Различия в размерах прудов определяют особенности внутригодового режима их уровней. В то время как пруды № 4 и 5 сбрасывают воду, самый большой пруд каскада - № 6 - продолжает ее аккумулировать, а самый малый - № 7б - сбрасывает воду почти весь год, сохраняя практически постоянным свой уровень (рис.8). Отсутствие синхронности в колебаниях уровней прудов каскада нарушает связь между их средними месячными значениями.

Поскольку пруды расположены на одном водотоке, то во внутригодовом изменении их уровня есть общая закономерность, которая проявляется в одновременном наступлении на прудах многоводных и маловодных сезонов. Наполнение прудов начинается с ноября, а в отдельные годы и раньше. Осенне-зимний сезон (ноябрь-февраль) на всех прудах каскада характеризуется подъемом уровня в среднем на 20-56 см, и только на проточном пруду № 7б эта величина составила 8 см (табл.8). В начале сезона пруды еще непроточны, так как уровень стоит ниже отметки водосбора, но по мере повышения уровня, обычно с середины декабря, они начинают сбрасывать воду, что продолжается до перемерзания сбросных труб, которое происходит чаще в конце января.

Весенний сезон (март-май) характеризуется самым высоким в году наполнением прудов (рис.8) и значительным водообменом. В этот период пруды проточны, изменение их уровня составляет $\pm(1-3$ см), и только ежегодный прорыв плотины пруда № 4 приводит к его снижению в среднем на 25 см (табл.8). Сбросные расходы из пруда № 4 транзитом проходят через пруд № 5 и аккумулируются в пруду № 6, вызывая подъем уровня в нем в среднем на 12 см за сезон.

В летний сезон (июнь-август) на всех прудах каскада происходит спад уровня в среднем на 16-34 см и только в проточном пруду № 7б - всего на 4 см. В связи с большими потерями воды из

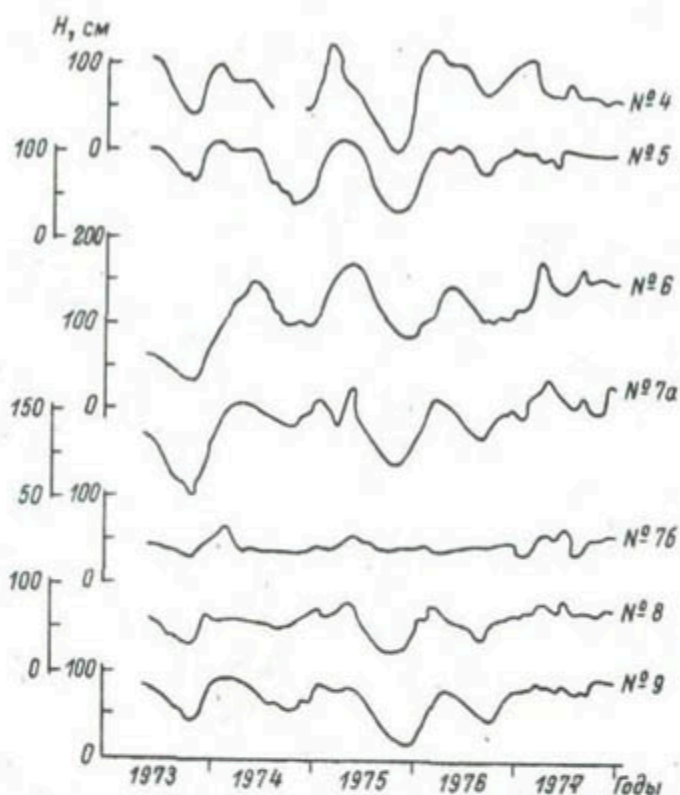


Рис.8. Совмещенный график колебания среднего месячного уровня прудов на б.Каракубанской.

прудов уровень оказывается ниже отметки водосбора, обычно уже в июне. Летние осадки, как правило, не вызывают подъемов уровня выше указанной отметки, и пруды становятся разобшенными, за исключением № 5 и 7б, которые большую часть года бывают проточны.

В осенний сезон (сентябрь–октябрь) в прудах каскада чаще всего наблюдаются самые низшие уровни (рис.8), которые сохраняют свою стабильность, изменяясь в среднем на $\pm 1-5$ см. В этот период пруды никогда не бывают проточны, кроме пруда № 7б.

Сезонные особенности режима уровня в прудах каскада послужили основой для выделения гидрологических сезонов при составлении их водного баланса.

Наблюдения над температурой воды проводились на двух прудах каскада: в пруду № 8 измерялась поверхностная температура воды, а в пруду № 7а – температура придонного слоя. Переход температуры воды в поверхностном слое через 4° весной, условно принятый за начало периода прогревания, в течение 1974–1976 гг. происходил во второй–третьей декадах марта, а осенью – в конце ноября–начале декабря. Наибольшая температура воды наблюдалась в конце июля–начале августа и достигала 28° . Продолжительность периода весенне–летнего прогревания воды составляла 125–128 дней. Между средней месячной температурой воды поверхностного

Т а б л и ц а 8

Среднее изменение уровня (в см) в прудах каскада на б.Каракубанской (1973-1977 гг.)

Номер пруда	Сезонное				Годовое
	XI-II	III-V	VI-VIII	IX-X	
4	56	-25	-34	0	3
5	41	-1	-29	-4	7
6	48	12	-23	-5	32
7а	53	1	-30	4	35
7б	8	-1	-4	1	5
8	20	-3	-16	5	10
9	34	-3	-22	-2	12

(пруд № 8) и придонного слоев (пруд № 7а) существует тесная связь, характеризующаяся коэффициентом парной корреляции, равным 0.996. Такой же теснотой ($r = 0.99$) отличается связь между средней месячной температурой воды прудов и температурой воздуха по метеостанции Тихорецк. Распределение температуры в водной массе прудов крайне неоднородно, что обусловлено не только морфологией чаши, но и наличием тростниковых зарослей. Берега и плотина оказывают влияние на температуру воды лишь близлежащих участков.

Ледовый режим прудов каскада в 1973-1976 гг. отличался разнообразием. Наиболее теплой была зима 1974/75 г., когда сумма отрицательных температур воздуха за период ледостава составила 175° . Толщина льда на прудах не превышала 12 см. Средней по сумме отрицательных температур воздуха (265°) была зима 1973/74 г., когда наибольшая толщина льда на прудах была равна 29 см. В самую холодную зиму 1975/76 г. сумма отрицательных температур воздуха достигла 420° , а наибольшая толщина льда - 36 см. Между толщиной льда всех прудов каскада существует тесная связь ($r = 0.87-0.97$).

Начало ледостава на прудах каскада приходилось на разные даты декабря: ранняя - 4.5 XII 1974 г., а поздняя - 31/XII 1976 г. Продолжительность ледостава изменялась от 69 до 93 дней, а по времени его период совпадал с периодом высокого наполнения прудов, поэтому лед на берегах не оседал. Вскрытие прудов происходило во второй-третьей декадах марта, при этом лед обычно таял на месте. Ледостав защищает берега прудов от размыва ветровым волнением, интенсивно развивающимся в период высокого

их наложения, поэтому совпадение сроков ледостава с периодом наибольших уровней в прудах способствует снижению годового количества продуктов размыва берегов – одного из основных источников осадконакопления.

Из анализа гидрологического режима прудов каскада следует, что наиболее благоприятные условия для осадконакопления создаются в летне-осенний сезон, когда пруды непроточны и задерживают все поступающие в них наносы. Размыв берегов и плотин наиболее интенсивно происходит в весенний сезон, при высоком наполнении прудов.

2.2. Водный баланс прудов каскада

Уравнение водного баланса прудов исследованного каскада имеет следующий вид:

$$P_o + P_b + O + P_p + P'_n + \Phi' = C + Z + И + \Phi \pm A_g \pm A_n \pm H, \quad (2.1)$$

где P_o – приток в пруд по основному водотоку (сброс воды и вышерасположенного пруда); P_b – боковой приток с прилегающего водосбора; O – осадки на зеркало пруда; P_p – родниковый сток; P'_n – грунтово-фильтрационные воды из берегов; Φ' – фильтрация через тело и основание плотины вышерасположенного пруда; C – сброс воды в нижний бьеф; Z – забор воды из пруда в хозяйственные нужды; $И$ – потери на испарение; Φ – фильтрация из пруда; A_g – изменение запаса воды в пруду; A_n – подземная аккумуляция в грунтах, слагающих борта и ложе пруда; H – невязка баланса.

В уравнение (2.1) не включены ледовые составляющие, поскольку, как показали наши наблюдения, в результате зимне-весеннего наполнения прудов на их берегах не оседает лед. Все элементы уравнения водного баланса выражены в объемных единицах, как рекомендуется для водоемов со значительным изменением площади зеркала, вызванным колебанием уровня (Методы расчета водных балансов, 1976).

Приток по основному водотоку (сброс из вышерасположенного пруда) измерялся на водосбросах прудов объемным способом, реометром в потоке ниже плотины пруда и лишь в отдельных случаях – поплавками. Годовой сток подсчитан по интерполяции между измеренными расходами, а для периода, когда измерения не производились, – по кривым связи измеренных расходов с уровнем пруда с учетом состояния труб (частично перемерзшие, свободное истечение). Зарегулированный сток б. Каракубанской в створе плотины нижнего пруда каскада (№ 9) в среднем за 1973–1976 г составил 1.2 мм (табл.9). В году он распределяется неравномерно: пруды сбрасывают воду главным образом весной (III–V), ког

Т а б л и ц а 9

Средний годовой сток на водосборе б.Каракубанской и его распределение в году (1973-1976 гг.)

Вид стока	Пло- щадь водо- сбора, км ²	Годо- вой сток, мм	Сезонный сток, % Годового			
			XI-II	III-V	VI-VIII	I-X-X
Зарегулированный	25.6	1.2	18.0	72.3	8.4	1.3
Склоновый	6.7	3.8	9.9	8.0	60.1	22.0
Внутрипочвенный	6.7	5.9	79.9	13.0	5.5	2.5
Родниковый	4.8	40.9	24.4	40.9	20.5	14.2
Грунтово-фильтрационный	5.9	5.3	27.6	27.7	29.4	15.3
Грунтовый из постоянного горизонта	8.9	0.8	24.8	37.6	27.0	10.6

коэффициент водообмена (отношение объема сброса воды к объему пруда за тот же период) является наибольшим в году (табл.10).

Приток с прилегающего водосбора складывается из склонового (P_c) и внутрипочвенного (P_g) стока. Первый определен методом водного баланса за суточный интервал времени (Малинина, 1960; Мичев, 1961), для чего использовалось уравнение

$$P_c = C + И - P_o - O + A_g. \quad (2.2)$$

При оценке склонового стока рассмотрено 44 суточных суммы осадков от 4 до 49 мм, вызвавших подъем уровня в прудах на величину, превышающую их слой. Этот сток, как показали расчеты, чаще всего наблюдается на водосборах прудов № 5-7б и 9, средний уклон которых превышает 20%. Наибольшие его значения свойственны водосборам прудов № 6 и 7а (рис.9) и в среднем за три года наблюдений составили соответственно 11.4 и 15.9 мм. Методом водного баланса склоновый сток наиболее точно определяется для периодов, когда пруды непроточны, так как оценка сбросных расходов при отсутствии самописцев уровня на прудах сопряжена с большой погрешностью. По этой причине несколько занижен склоновый сток с водосборов наиболее проточных (табл.10) прудов № 5 и 7б (рис.9). Годовой склоновый сток с водосбора каскада прудов

Т а б л и ц а 10

Средние коэффициенты водообмена прудов каскада на б.Каракубанской (1973–1976 гг.)

Номер пруда	Сезонные				Годовые
	XI–II	III–V	VI–VIII	IX–X	
4	0.34	1.04	0	0	2.05
5	1.14	3.19	0.23	0.17	5.88
6	0	0.05	0	0	0.06
7а	0.12	0.74	0.12	0	1.27
7б	5.80	14.2	3.90	1.97	26.7
8	0.59	0.93	0.17	0.014	1.89
9	0.11	0.38	0.065	0	0.61

№ 4–9 в среднем за 1973–1976 гг. составил 3,8 мм (табл.9) и наблюдался главным образом летом (VI–VIII) и осенью (IX–X). Применение метода водного баланса для оценки склонового стока ограничивается периодом открытой воды.

Внутрипочвенный сток определен методом водного баланса за месячные интервалы времени. Его годовая величина за 1973–1976 гг. для водосбора каскада прудов № 4–9 составила 5,9 мм (табл. 9). Наибольшее в году количество воды поступает в пруды внутрипочвенным путем в осенне–зимний сезон (XI–II) и составляет в среднем для водосбора 79,0% годового количества.

Летние осадки на зеркало прудов регистрировались плевниографами, устанавливаемыми в экспедиционный период на правом берегу прудов № 6 и 9, а для остальной части года определялись по данным осадкомера, что на территории правления колхоза „Ленинский путь“. При подсчете объема осадков за месяц учитывались изменения площади зеркала прудов.

Родниковый сток сначала был подсчитан для одного из родников, расположенного в верховье пруда № 5 и известного с 1927 г. Дебит родника, согласно измерениям в течение июня–ноября 1976 г колебался от 0,5 до 1,6 л/с и увеличивался с ростом влагозапасов в слое почвы 0–100 см ($r = 0,96$) и уменьшением глубины грунтовых вод ($r = -0,84$) на метеостанции Белая Глина. Уравнения связи дебита родника с влагозапасами и глубиной грунтовых вод характеризуются точностью соответственно 12 и 22% и использован для подсчета годового стока родника: первое – для периода года когда ведутся измерения влагозапасов, второе – для зимнего.

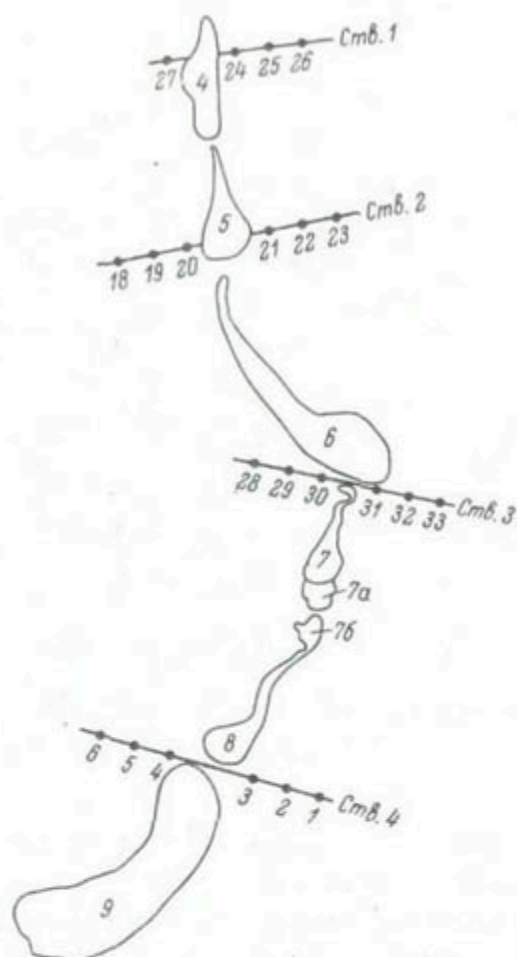
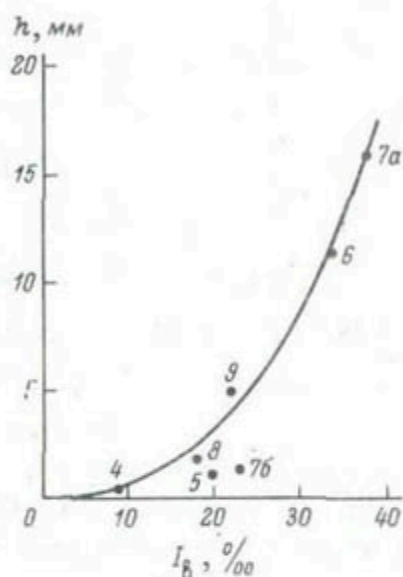


Рис.9. Связь среднего годового (1973–1976 гг.) склонового стока с частным водосбора прудов на б.Каракубанской с уклоном водосбора.

Ц и ф р ы у точек – номера прудов.

Рис.10. Схема размещения гидрогеологических скважин на берегах прудов на б.Каракубанской.

Объем родникового стока для других прудов каскада установлен по среднему соотношению между стоком изученного родника и начальными (без учета родникового питания) отрицательными невязками водного баланса за месячные интервалы времени. Эти соотношения для отдельных прудов каскада изменяются от 0,4 (пруд № 76) до 2,0 (пруд № 6). Не имеет родникового питания пруд № 8. Родниковый сток на водосборе каскада прудов № 4–9 в среднем за год равен 40,9 мм (табл.9) и распределяется в году более равномерно, чем зарегулированный сток балки, поверхностный и внутритпочвенный сток с прилегающего водосбора.

Наблюдения над уровнем грунтовых вод в берегах прудов производились в течение года (У1 1974-У1 1975) 10, 20 и 30 числ каждого месяца в гидрогеологических скважинах (рис.10), отстоящих от уреза на 20, 60 и 100 м (табл.11). Как выяснилось, грунтовые воды на левом, инсолируемом берегу стоят ниже, чем и правом затененном (табл.11). В пределах небольшого участка балки длиной 3.5 км режим грунтовых вод неодинаков. Это видно по изменению их амплитуды колебания и коэффициенту корреляции уровня грунтовых вод в берегах прудов с глубиной грунтовых вод на метеостанции Белая Глина (табл.11). На первых трех гидрогеологических створах (рис.10) внутригодовой режим грунтовых вод в берегах прудов совпадает с таковым на метеостанции Белая Глина, тогда как в нижнем створе 4 отличается от последнего (коэффициент корреляции меняет знак). Это является результатом влияния фильтрационных вод на режим грунтовых вод в берегах прудов. В створе 2 внутригодовые колебания уровня грунтовых вод синхронны изменению уровня пруда № 5 ($r = 0.73-0.89$). Тот же характер наблюдается и в створе 3, но коэффициент корреляции между уровнем грунтовых и прудовых вод здесь меньше ($r = 0.49-0.77$). Уровни грунтовых вод в скважинах створа 3 изменяются асинхронно уровню пруда № 8 ($r = -0.68 \div -0.80$).

В приплотинной части прудов, как следует из рис.11, происходит отток прудовых вод в водоносный горизонт, а в нижнем бьефе прудов, кроме пруда № 8, — приток грунтово-фильтрационных вод из берегов. Граница между участками оттока прудовых вод и притока вод из водоносного горизонта проходит через точку продольного профиля пруда, где уровень прудовых и грунтовых вод одинаков. Грунтово-фильтрационные воды из берегов включают фильтрацию в обход плотины вышерасположенного пруда, приток грунтовых вод с водосбора в его приплотинную часть, а также в верховья данного. Поступают они в верховье пруда, где уровень грунтовых вод в берегах выше уровня самого пруда. Пруды дренируют только ту часть грунтово-фильтрационного потока, направляющегося к их верховью, которая находится выше отметки вреза балки. Расчет единичного расхода грунтово-фильтрационных вод (q , м²/сут. производился по формуле Г.Н.Каменского для наклонного залегания водоупора:

$$q = k \left(\frac{Z_1 + Z_2}{2} - Z_{bp} \right) \frac{Z_2 - Z_1}{2l}, \quad (2.5)$$

где Z_1 и Z_2 — отметки уровня пруда и грунтовых вод в ближайшей к урезу скважине, м; l — расстояние скважины от уреза, м; Z_{bp} — отметка вреза балки в расчетном сечении, м; k — коэффициент фильтрации (принят равным 0.30 м/сут.).

Т а б л и ц а 11

Глубина залегания уровня грунтовых вод в берегах прудов на б.Каракубанской за период с 28 У1 1974 г. по 10 У 1975 г.

Створ	Берег	№ скважины	Расстояние от уреза, м	Глубина залегания уровня				Средний уровень грунтовых вод, м	Амплитуда, м	Коэффициент корреляции (r)
				наибольшая		наименьшая				
				м	дата	м	дата			
2	Левый	21	20	4.92	20 XI 1974	2.95	31 У 1975	62.81	1.97	-0.97
		22	60	5.97		3.92	10 У1 1975	63.08	2.05	-0.97
		23	100	7.46		5.39		63.09	2.07	-0.98
	Правый	20	20	4.48		2.48		63.54	2.00	-0.96
		19	60	5.90		3.86		63.27	2.04	-0.94
		18	100	7.32		5.32	31 У 1975	63.55	2.00	-0.98
3	Правый	29	60	3.64	8 УIII 1974	2.93		59.43	0.71	-0.97
		28	100	4.72		3.84	20 У 1975	59.68	0.88	-0.69
4	Левый	3	20	4.26	10 I 1975	1.62	30 У 1974	50.74	2.64	0.72
		2	60	4.15	10 IУ 1975	3.23		52.29	0.87	0.76
		1	100	7.23	20 IУ 1975	5.80		52.33	1.43	0.92
	Правый	5	60	4.32	10 II 1975	2.42		51.44	1.90	0.83
		6	100	6.04	20 I 1975	4.12		51.52	1.92	0.78

П р и м е ч а н и е. В последней графе — коэффициенты корреляции между глубиной залегания грунтовых вод в берегах прудов и на метеостанции Белая Глина.

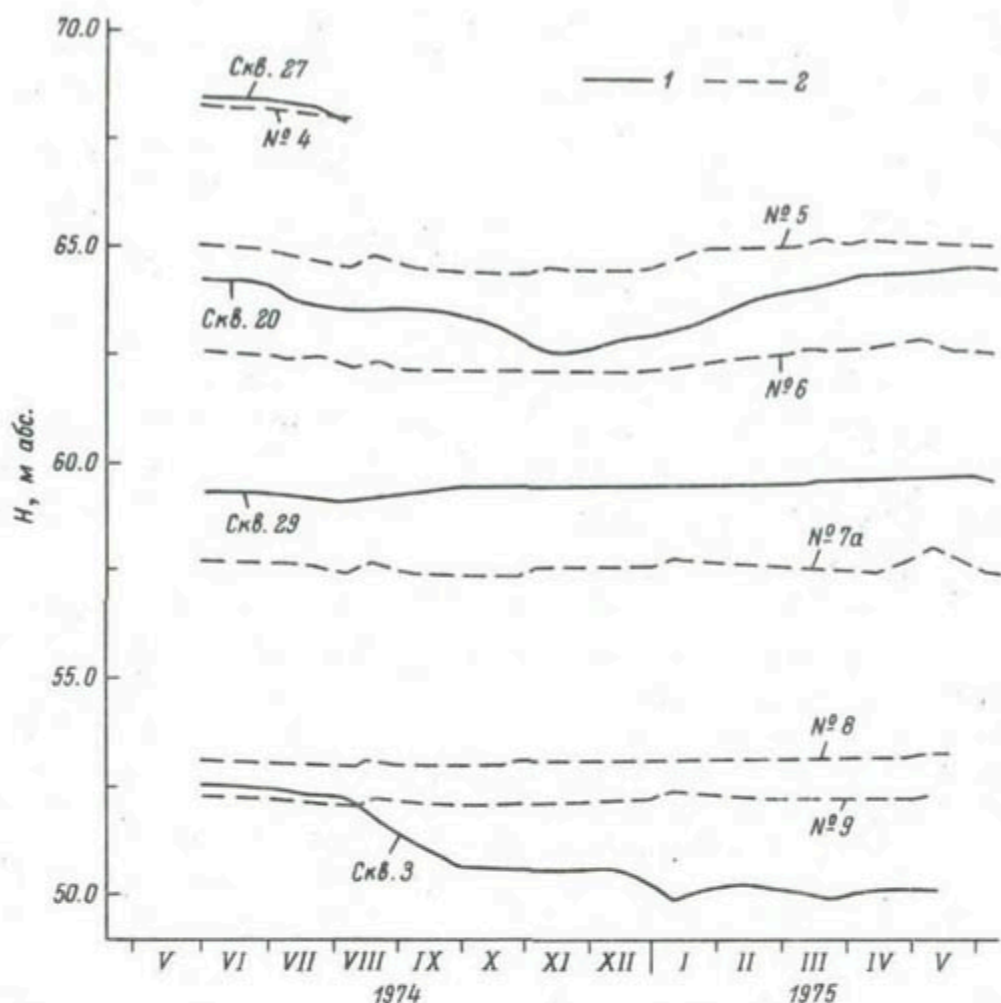


Рис.11. Внутригодовое изменение уровня грунтовых (1) и прудовых (2) вод на б.Каракубанской.

В качестве расчетных приняты створы плотин прудов. В створах тех плотин, где измерения уровня грунтовых вод не производились, необходимые данные получены путем интерполяции и экстраполяции измеренных значений в створах 1-4 (рис.10). Расчет выполнен для 1-го числа каждого месяца за период наблюдения над уровнем грунтовых вод в берегах. Как показали расчеты грунтово-фильтрационные воды поступают преимущественно со стороны правого берега, а в пруд № 7б - только с правого берега. Пруд № 4 получает эти воды в период их высокого стояния в берегах (IY-VI), а пруд № 9 совсем лишен такого питания.

Для оценки притока грунтово-фильтрационных вод в пруды каскада за весь период, взятый для составления водного баланса, получены уравнения регрессии его с глубиной грунтовых вод в Белс Глине и уровнем пруда. Полный коэффициент корреляции этих уравнений равен 0,7-1,0, а средняя квадратическая ошибка расчета этой составляющей водного баланса по ним для прудов № 4, 5, 7а и 1 не превышает 20% и составляет 30% для пруда № 6. С наибольшей

погрешностью оценивается приток этих вод в пруд № 76. В среднем для водосбора прудов № 4-8 годовой приток грунтово-фильтрационных вод в пруды равен 5.3 мм (табл.9). Распределение их в году довольно равномерное.

Фильтрация через тело плотины прудов № 3-6, 76 и 9 измерялась в течение 1973-1974 гг. С этой целью у подошвы плотины закладывалось три шурфа размером 20x20x20 см примерно на равном расстоянии друг от друга и от точки, где фильтрационный расход равен нулю. По времени заполнения определенного объема шурфа определялся средний фильтрационный расход каждого шурфа, который является наибольшим на части низового откоса, расположенной над шурфом. Расход фильтрации через все тело плотины определялся из выражения

$$Q_{\text{ф.пл}} = 0.022 \frac{b}{a} (q_1 + q_2 + q_3), \quad (2.4)$$

где $Q_{\text{ф.пл}}$ - расход фильтрации через тело плотины, м³/сут.; q_1 , q_2 и q_3 - соответственно элементарные расходы фильтрации над шурфами 1, 2 и 3, см³/с·м; b - расстояние между шурфами, м; a - линейный размер шурфа, м.

Фильтрация через тело плотины прудов за период составления водного баланса определена по графикам связи вычисленных по формуле (2.4) фильтрационных расходов с уровнем пруда.

Плотины прудов № 7а и 8 со стороны нижнего бьефа подпираются уровнем нижерасположенных прудов. Расчет фильтрации через тело плотины этих прудов выполнен по формуле

$$Q_{\text{ф.пл}} = k \cdot B \frac{H^2 - H_0^2}{2L}, \quad (2.5)$$

где $Q_{\text{ф.пл}}$ - фильтрационный расход через тело плотины, м³/сут.; k - коэффициент фильтрации, равный 1 м/сут.; B - длина плотины, м; H - отметка уровня данного пруда, м; H_0 - отметка уровня нижерасположенного пруда, м.

Величина L определяется по формуле

$$L = L_0 - 0.5mH, \quad (2.6)$$

где L_0 - ширина основания плотины, м; m - коэффициент заложения мокрого откоса плотины.

Пруды каскада теряют на фильтрацию через тело плотины в среднем за год 0.5 м слоя воды (табл.12). Наибольшего значения эти потери достигают на самом большом пруду № 6 (0.9 м) и самом малом № 76 (1.8 м), плотина которого находится в плохом состоянии. На пруду № 9, имеющему капитальную плотину, эти потери незначительны (0.09 м). В зимне-весенний период (XI-Y) фильтрация воды через тело плотины является важным элементом расходной части водного баланса данного пруда и источником питания нижерасположенного.

Т а б л и ц а 12

Средние потери воды из прудов каскада на б.Каракубанской и их распределение в году (1973-1976 гг.)

Вид потерь	Пло- щадь зер- кала, га	Годо- вой слой потерь, мм	Сезонные потери, % годового			
			XI-II	III-V	VI-VIII	IX
Фильтрация через тело плотины	25.5	509	31.6	37.6	20.0	10
Фильтрация в основа- нии плотины	25.5	280	32.4	27.9	24.8	14
Фильтрация в обход плотины	25.5	270	30.8	32.4	23.4	13
Испарение с водной поверхности	25.5	683	4.8	19.5	54.1	21

Т а б л и ц а 13

Средние поправочные коэффициенты на скорость ветра и влажность воздуха над прудами на б.Каракубанской (данные В.А.Лепской)

Вид поправочного коэффи- циента	Поправочные коэффициенты для прудов				
	4	6	7-76	8	9
На скорость ветра	0.89	0.87	0.50	0.77	0.7
	0.88	1.08	0.83	1.02	1.0
На влажность воздуха	1.21	1.10	1.46	1.12	1.1

П р и м е ч а н и е. Числитель - при восточном направлении ветра, знаменатель - при западном.

Фильтрация через проницаемое основание плотин определена по формуле Н.Н.Павловского для плотины с плоским флютбетом в однородном пласте:

$$Q_{\text{осн}} = k \cdot H \cdot B \cdot q_r, \quad (2.7)$$

где $Q_{\text{осн}}$ – фильтрационный расход, м³/сут.; k – коэффициент фильтрации (0.30 м/сут.); H – напор перед плотиной, м; B – длина плотины, м; q_r – приведенный расход, определяемый по графику в зависимости от отношения T/L , где T – мощность водопроницаемых пород под основанием плотины, м; L – ширина плотины по основанию, м.

Мощность суглинков под основанием плотин прудов определена по разности отметок подошвы их слоя и тальвега балки в створе плотины и колеблется от 10.5 до 13.2 м. По формуле (2.7) для каждого пруда каскада рассчитаны фильтрационные расходы в основании плотины при разных напорах перед плотиной и построены графики связи их с уровнем пруда, которые использовались для подсчета этого вида фильтрации за весь период составления водного баланса прудов. Расчеты показали, что пруды каскада в среднем за год расходуют на фильтрацию в основании плотины 0.28 м слоя воды (табл.12).

В течение всего года в приплотинной части прудов каскада происходит отток прудовых вод в берега (фильтрация в обход плотины), и уровень грунтовых вод здесь стоит ниже уровня пруда (рис.11). Фильтрация в обход плотины рассчитана по формуле Г.Н. Каменского (2.3) аналогично изложенному выше расчету притока грунтово-фильтрационных вод из берегов в пруд. Составленные уравнения регрессии фильтрационных расходов с глубиной грунтовых вод в Белой Глине и уровнем пруда отличаются большой теснотой связи (полный коэффициент корреляции $R_k = 0.8-1.0$), а средняя квадратическая ошибка расчета по ним для прудов № 4, 6, 7а, 8 и 9 составляет 1.0-14.6% и возрастает до 22.2% для пруда № 5 и 32.7% для пруда № 7б. На фильтрацию в обход плотины из прудов каскада в среднем расходуется 0.27 м слоя воды. Фильтрация эта напорная и ее наибольшие значения относятся к периоду высоких уровней в прудах (табл.12).

В среднем из прудов каскада на все виды фильтрации расходуется за год около 1.0 м слоя воды (табл.12), а в месяц – 88 мм. Согласно М.В.Потапову (1951), при указанных значениях фильтрации пруды находятся в тяжелых гидрогеологических условиях. Видимо, такие потери воды на фильтрацию свойственны всем прудам, построенным хозяйственным способом. Например, для пруда Поливного Волгоградской области значения их за летний месяц составили в среднем 48 мм (Малинина, 1960), для пруда Березового в Курской области – 240-300 мм слоя воды в месяц (Сорокин, 1961). Из всех видов фильтрации преобладающей является фильтрация через тело плотины, на которую в среднем приходится 48% об-

шего объема фильтрационных вод. Просачиваясь через тело и снование плотины, эти воды практически в полном объеме участвуют в наполнении нижерасположенного пруда каскада. Их роль в водном балансе прудов зависит от соотношения размеров смежных прудов каскада. Некоторым исключением является пруд № 6, откуда в пруд № 7 фильтрационные воды поступают в незначительном объеме — в виде фильтрационного ручья. Основная же их масса тратится на испарение или уходит в более глубокие водоносные горизонты и не дренируется прудами № 7 и 7а.

Вода прудов расходуется также на испарение с водной поверхности, транспирацию тростником, которым заросли пруды каскада, испарение с осушаемой поверхности, льда и снега на льду. Этот источник потерь воды из прудов изучался В.А.Лепской в течение 1973–1976 гг. В летние месяцы указанного периода на пруду № 5 измерялось испарение с водной поверхности по испарителю ГГ 3000. Одновременно производились необходимые метеонаблюдения на плавучей установке и посту, расположенному на правом берегу пруда № 6. Измеренные значения испарения превышают вычисленные по формуле ГГИ (рис.12) в связи с разной степенью прогреваемости прудов и больших водоемов. Формула ГГИ дает хорошие результаты для прудов каскада, если использовать метеозаписи по станции Тихорецк. Расхождения между фактическими и расчетными значениями испарения с водной поверхности за 5 месяцев 1973–1976 гг. не превышают $\pm 15\%$. По этой формуле было рассчитано испарение с водной поверхности пруда № 5 за те месяцы, когда его измерение не производилось. Эта составляющая для других прудов каскада получена путем умножения ее значения для опорного пруда № 5 на поправочные коэффициенты, учитывающие особенности ветрового режима и влажности воздуха над каждым прудом каскада. Коэффициенты, представляющие отношение скорости ветра и разности упругости водяного пара над данным прудом к их значениям над прудом № 5, определены по данным 6 метеостанций, расположенных в 1973 и 1974 гг. при различных направлениях и скоростях ветра (табл.13). Для этого на трех створах, совпадающих створами плотин прудов № 3, 5 и 9, через каждые полчаса измерялись скорость и направление ветра, влажность воздуха на скелях и в тальвеге балки. В расчет испарения вводился поправочный коэффициент, зависящий от преобладающего в данном месяце направления ветра.

Пруды каскада теряют на испарение с водной поверхности в среднем 0,68 м слоя воды в год (табл.12). Сезонное распределение испарения с водной поверхности пруда № 5 (табл.12) несколько отличается от данных Б.Д.Зайкова (1949), но подтверждает данные В.Г.Гвахария (1973), особенно для весеннего и летнего сезонов. Период работ экспедиции относится к циклу пониженного испарения с водной поверхности, начавшемуся с 1963 г. (рис.2). Испарение за открытый период 1973–1976 гг., согласно показани

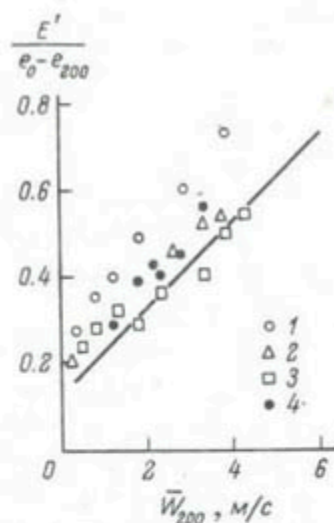


Рис.12. Связь вычисленных по формуле ГГИ (сплошная линия) и измеренных (1-4) значений $\frac{E'}{e_0 - e_{200}}$ для пруда № 5 на б.Каракубанской со скоростью ветра.

Годы наблюдений: 1 - 1973; 2 - 1974; 3 - 1975; 4 - 1976.

метеостанции Краснодар, где наблюдения ведутся в грунтовом испарителе ГГИ-3000, было на 12% ниже нормы (1954-1976 гг.), равной 958 мм.

Связь между испарением с водной поверхности пруда № 5 и грунтового испарителя в Краснодаре за отдельные сезоны и теплый период в целом характеризуется большой теснотой ($r = 0.99$), а средняя квадратическая ошибка уравнения регрессии равна 11.6%. Уравнение связи может быть использовано для определения испарения с водной поверхности пруда № 5 за периоды, когда измерения не производились.

Измерение потерь влаги на транспирацию, сопровождаемое ежедневными наблюдениями над температурой и влажностью воздуха, скоростью ветра, температурой поверхности воды, производилось методом быстрого взвешивания срезанных частей растений (Форш, 1957) в зарослях тростника на пруду № 5, а вес сырой массы листьев тростника с 1 м² площади зарослей определялся на всех прудах. Испарение между стеблями растений, согласно исследованиям З.Д.Матренинской (1957), принято равным 32% испарения с водной поверхности. Для периодов, не охваченных измерениями транспирации (май, сентябрь, октябрь), суммарное испарение с зарослей тростника вычислено по рекомендациям Гидрометеослужбы (Указание..., 1969). За вегетационный период 1973 и 1974 гг. суммарное испарение с зарослей в 1.5-1.3 раза превысило испарение с водной поверхности, а в аномально засушливый 1975 г. - в 2.2 раза.

Полоса обсыхающего летом ложа в отдельных прудах каскада составляет 20-80% площади их зеркала. Испарение с осушаемой поверхности пруда № 5, вычисленное по изменению содержания влаги в слое грунта 0-55 см с учетом выпавших осадков (Браславский, Шергина, 1965), в течение 7-26 июля 1976 г. составило 36-46% испарения с водной поверхности.

Забор воды на хозяйственные нужды из прудов каскада учтен ориентировочно. Опросом местного населения установлено, что по-

ливаются в основном помидоры и капуста с мая по сентябрь. Полоса полива шириной около 10 м тянется вдоль прудов № 6, 7, 7а, 8, 9. На полив 100 м² площади огорода расходуется в среднем 1 м³ воды из пруда. Эта величина и была принята в качестве нормы для расчета забора воды из прудов. Вода из пруда № 5 берется для химической обработки колхозных садов и виноградников. Е расход учитывается садовой бригадой.

Аккумулятивные члены уравнения водного баланса прудов каскада (2.1), включающие изменение запаса воды в водоеме и грунтах берега, определены в соответствии с рекомендациями Гидрометеослужбы (Руководство..., 1972). Запас грунтовых вод в берегах рассчитан на 1-е число каждого месяца за период наблюдений над их уровнем сначала для каждого берега пруда, а затем общий. Расчетными являлись створы плотин прудов. Недостаток насыщения грунтов приравнивался коэффициенту водоотдачи (0.025). Уравнения регрессии запаса грунтовых вод в берегах с глубиной грунтовых вод на метеостанции Белая Глина и уровнем пруда имеют полный коэффициент корреляции $R_k = 0.71-0.99$, а средняя квадратическая ошибка расчета по ним запаса вод в берегах прудов № 4-7а, 9 меньше 20% и только для прудов № 7б и 8 составляет соответственно 26.8 и 22.1%. По уравнениям регрессии определен запас грунтовых вод в берегах прудов на 1-е число каждого месяца за весь период составления водного баланса, а затем изменение запаса за расчетный период (месяц, сезон, год). Увеличение запаса грунтовых вод в берегах в конце расчетного периода соответствует оттоку прудовых вод в берега (знак минус), а уменьшение - притоку грунтовых вод в пруд (знак плюс). Подземная аккумуляция в берегах прудов № 4, 5, 7б составляет 20-38% общей. Пруды № 6, 7а, 8 и 9 характеризуются небольшим изменением запаса грунтовых вод в берегах, составляющим 2-6% общей аккумуляции.

Водный баланс прудов каскада составлен за период с мая 1971 г. по декабрь 1976 г. для различных интервалов времени (месяц, сезон, год). Годовой водный баланс дается за гидрологический год (XI-X), а сезоны приняты с учетом уровня режима прудов (см. раздел 2.1).

Пруды каскада различаются по размеру, характеру собственно водосбора, состоянию плотин, наличию или отсутствию того или иного источника наполнения. Все это определяет особенности водного баланса прудов, но наряду с этим размещение их на одной водотоке обуславливает некоторое сходство его черт. Прежде всего следует отметить, что все пруды, кроме пруда № 4, в течение 1973-1976 гг. увеличили объем водной массы (табл.14) в связи с большой увлажненностью периода в целом. Как отмечалось выше период воднобалансовых исследований пришелся на цикл многоводных лет по годовой сумме осадков (рис.2), глубине грунтовых вод (табл.5), а также на цикл лет с пониженным испарением (рис.2). Все это способствовало увеличению притока воды в пруды по срав-

Т а б л и ц а 14

Водный баланс (годовой) прудов каскада на б.Каракубанской

Год	Приход, %						Итого, тыс.м ³
	П _о	П _б	О	П _п	П _о	Ф'	
1973-1974	37.8	0.4	14.0	0.3	38.2	9.3	101.3
1974-1975	21.8	23.5	16.6	0.3	27.7	10.1	116.6
1975-1976	12.6	22.8	21.0	0.2	30.8	12.6	98.8
Среднее	24.0	15.9	17.2	0.2	32.0	10.7	105.6
1973-1974	34.1	1.9	7.9	3.6	32.1	20.4	126.8
1974-1975	38.5	0.1	7.4	2.6	21.8	29.6	108.7
1975-1976	21.2	1.1	8.0	1.3	30.8	37.6	99.0
Среднее	31.7	1.0	7.7	2.6	28.4	28.6	111.5
1973-1974	34.8	10.0	9.9	2.6	32.3	10.4	217.2
1974-1975	36.7	5.1	15.5	1.9	29.9	10.9	180.2
1975-1976	27.3	13.8	16.5	1.3	28.9	12.2	175.5
Среднее	33.2	9.5	13.7	2.0	30.5	11.1	191.0
1973-1974	17.5	12.5	14.8	20.8	34.4	-	51.9
1974-1975	28.7	18.3	13.4	16.1	23.5	-	56.0
1975-1976	18.9	33.0	12.2	13.5	22.4	-	52.5
Среднее	21.9	21.3	13.3	16.8	26.7	-	53.4
1973-1974	11.1	0.2	3.3	0.5	34.5	50.4	42.4
1974-1975	38.0	1.2	2.3	0.2	20.4	37.9	55.8
1975-1976	24.0	1.2	3.0	0.2	22.7	50.1	42.7
Среднее	25.7	0.5	2.8	0.3	25.3	45.4	47.0
1973-1974	34.0	12.8	18.1	20.9	-	14.2	82.0
1974-1975	50.4	4.2	14.1	17.9	-	13.4	84.5
1975-1976	36.7	17.3	15.8	17.3	-	12.9	82.8
Среднее	40.4	11.4	16.0	18.7	-	13.5	83.1
1973-1974	18.0	7.7	17.8	-	42.6	13.9	129.2
1974-1975	33.6	0.9	16.8	-	33.9	14.8	125.7
1975-1976	25.3	7.6	17.7	-	32.5	16.8	111.6
Среднее	25.6	5.4	17.4	-	36.5	15.1	122.2

П р и м е ч а н и е. Обозначения элементов водного баланса - в со-

	Расход, %						Итого, тыс. м³	А, тыс. м³	Н, %
	С	З	И	Ф _{осн}	Ф _{пл}	Ф _{бер}			
Пруд № 4									
	42.2	-	26.6	7.6	18.9	4.7	102.4	0.1	-1.2
	32.8	-	30.5	8.0	19.5	9.2	127.5	-6.9	-3.4
	20.6	-	27.5	10.2	27.2	14.5	102.1	-4.7	-1.5
	31.9	-	28.4	8.6	21.7	9.4	110.7	-3.8	-1.2
Пруд № 5									
	61.5	1.3	14.1	6.8	12.3	4.0	122.9	0.5	2.7
	59.9	0.7	15.1	7.1	10.6	6.6	110.5	-1.4	-0.4
	46.2	-	15.7	9.4	14.7	14.0	89.0	8.0	1.9
	56.7	0.7	14.9	7.6	12.4	7.7	107.5	2.4	1.4
Пруд № 6									
	-	0.4	43.0	7.3	44.5	4.8	139.8	80.7	-1.5
	4.6	0.4	38.4	7.4	44.0	5.2	158.1	22.2	-0.1
	-	0.4	36.0	8.0	50.6	5.0	134.4	44.8	-2.1
	1.7	0.3	39.2	7.6	46.2	5.0	144.1	49.2	-1.3
Пруд № 7а									
	10.4	0.9	39.0	21.1	25.9	2.7	45.5	7.2	-1.5
	35.2	0.7	26.7	15.7	19.3	2.5	60.5	-4.3	-0.4
	21.9	0.9	27.0	20.5	25.3	4.4	46.9	4.3	2.6
	23.7	0.8	30.5	18.7	23.1	3.2	50.9	2.4	0.2
Пруд № 7б									
	66.4	-	5.2	15.2	12.6	0.6	42.0	0.2	0.6
	76.3	-	3.0	11.4	8.9	0.4	55.7	0.1	-0.1
	71.3	-	3.2	14.8	10.3	0.4	42.5	0.02	0.5
	71.9	-	3.8	13.5	10.4	0.4	46.7	0.1	0.3
Пруд № 8									
	31.0	0.9	34.5	17.4	6.4	9.8	75.3	6.1	0.7
	44.5	0.7	28.4	13.8	5.8	6.8	94.8	-9.7	-0.6
	37.9	0.9	28.6	17.3	8.0	7.3	74.6	7.4	0.9
	38.3	0.8	30.4	16.0	6.6	7.9	81.6	1.3	0.3
Пруд № 9									
	19.2	0.4	31.7	11.5	4.3	32.9	124.1	6.4	-1.0
	33.7	0.4	26.9	10.3	2.7	26.0	133.9	-8.9	0.5
	23.6	0.5	29.6	14.1	2.1	30.1	95.3	15.4	0.9
	25.9	0.4	29.3	11.7	3.2	29.5	117.8	4.3	0.1

ответствии с уравнением (2.1).

нению с ее расходом. Водный баланс пруда № 4 в связи с ежегодным прорывом плотины отличается от такового других прудов каскада.

В приходной части годового водного баланса прудов (табл.14) приток воды по основному водотоку (сбросы из вышележащего пруда или зарегулированный сток) вместе с притоком с прилегающего водосбора составляет от 26 (пруд № 7б) до 52% (пруд № 8). Поэтому проектирование прудов без учета их наполнения родниковыми водами, которые в водном балансе прудов каскада составляют от 25 (пруд № 7б) до 36% (пруд № 9) общего прихода, и фильтрационными водами (11-45%) из вышерасположенных прудов может привести к необоснованному занижению их объема, приводящему к прорыву плотин в период большого наполнения (февраль-май).

В расходной части годового водного баланса прудов заметную роль играют сбросы воды в нижний бьеф, которые составляют от 24 (пруд № 7а) до 72% (пруд № 7б) общего расхода воды. Только пруд № 6, редко сбрасывающий воду в связи с большим объемом, расходует на сброс в среднем за год 1.7%. Испарение с поверхности прудов ни для одного из них не является преобладающей статьей расхода воды в годовом балансе и составляет от 4 (пруд № 7б) до 39% (пруд № 6) общего расхода воды. Его роль в расходной части баланса возрастает вместе с размерами прудов. Большой процент составляют фильтрационные потери из прудов, колеблясь от 24 (пруд № 7б) до 59% (пруд № 6). Фильтрационные потери из прудов при каскадном их расположении нельзя относить к числу безвозвратных как, например, испарение, забор воды на хозяйственные нужды, так как эти воды участвуют в наполнении нижерасположенных прудов. В последние полностью поступают фильтрационные воды, прошедшие через плотину и ее основание, и часть вод, профильтровавшихся из прудов в обход плотины. В нижерасположенный пруд поступает от 71 (пруд № 6) до 98% (пруд № 8) фильтрационных вод из вышерасположенного. Исключением является пруд № 7а, который принимает менее 14% фильтрационных вод пруда № 6 в виде грунтово-фильтрационного ручья. Забор воды на хозяйственные нужды (полив огородов, обработка колхозного сада) незначителен и не превышает 1% в расходной части годового водного баланса прудов.

Структура годового водного баланса прудов, расположенных в однородных природных условиях, зависит от их размера и не может характеризоваться средними для каскада относительными значениями отдельных составляющих. Приходная и расходная части годового водного баланса прудов каскада довольно тесно коррелируют с их объемом при уровне, равном среднему из наибольших за 1973-1976 гг. Коэффициенты парной корреляции соответственно равны 0.84 и 0.86.

Относительные потери воды на фильтрацию и испарение возрастают с увеличением размера (объема) прудов (коэффициенты кор-

реляции соответственно равны 0.82 и 0.75), а сброс воды уменьшается ($r = -0.81$). Влияние размера водохранилищ на составляющие расходной части водного баланса уже отмечалось в литературе (Volosinas, 1977).

Если учесть влияние размера прудов на составляющие расходной части одного баланса, а также приходную и расходную часть в целом, то структура расходной части годового водного баланса прудов разного объема будет иметь вид, показанный в табл.15. Эти данные могут быть полезными при проектировании прудов и водотоках типа б.Каракубанской. По ним можно запроектировать пруд такого объема, который обеспечит необходимый сброс воды в нижний бьеф. К примеру, проектируемый пруд должен обеспечить сброс в нижний бьеф за год 20 тыс.м³ воды. Из табл.15 видно, что на сброс из пруда объемом 70 тыс.м³ пойдет 14 тыс.м³ воды, а из пруда объемом 60 тыс.м³ - 25 тыс.м³. Следовательно, требуемый сброс воды обеспечит пруд объемом 60-65 тыс.м³.

Роль отдельных источников в наполнении прудов каскада меняется в течение года. Это видно из сезонного водного баланса прудов (табл.16).

В осенне-зимний сезон (XI-III) пруды получают 25-33% годового количества воды (табл.17). Расход воды меньше прихода, и пруды накапливают воду (табл.16). Из основного водотока (сброс из вышерасположенного пруда) в пруды поступает 9-29% общего притока воды, а с прилегающего водосбора - 1-35%. Осадки на зеркал прудов дают 4-17% в общем поступлении воды. Доля грунтово-фильтрационных вод в наполнении большинства прудов незначительна. Но в приходной части водного баланса прудов № 7а и 8 она составляет соответственно 18.2 и 17.9% общего количества воды. Родниковый сток является преобладающим в приходной части баланса большинства прудов каскада (25-35% общего прихода). Фильтрационные воды через тело и основание плотины вышерасположенного пруда составляют 9-55% общего притока воды. Расходуется вода главным образом на сброс (12-64% общего расхода) и фильтрацию. Потери на испарение незначительны (1-10% общего расхода).

Весной (III-V) в пруды поступает наибольшее в году количество воды (35-53% годового прихода), но расход воды в большинстве прудов превышает ее приход, и пруды частично срабатывают свой объем. Исключение представляет пруд № 6, который в связи с большой емкостью продолжает аккумулировать воду (табл.16). Главную роль в наполнении прудов играет приток из основного водотока (29-63% общего притока) и родниковый сток (21-38%), второстепенную - сток с прилегающего водосбора (менее 20%), осадки на зеркало (2-15%), грунтово-фильтрационные (0.2-14.6%) и фильтрационные (10-32%) воды. Расходуется вода преимущественно на сброс (6-84%) и фильтрацию. Потери на испарение, хотя и возрастают по сравнению с предшествующим сезоном, составляют 2-32% общего расхода.

Т а б л и ц а 15

Расчетные значения приходной, расходной частей годового водного баланса и аккумуляции прудов разного объема

Объем пруда, тыс.м ³	Расход, %				Приход, тыс.м ³	Расход, тыс.м ³	Аккумуляция, тыс.м ³
	сброс	фильтрация	испарение	забор			
1	72	23	4	1	46	42	4
10	64	27	8	1	58	55	3
20	55	30	14	1	72	69	3
30	47	34	18	1	84	84	0
40	37	37	25	1	96	97	-1
50	28	41	30	1	110	112	-2
60	20	44	35	1	122	126	-4
70	10	48	41	1	135	140	-5

Летом (VI-VIII) поступление воды в пруды уменьшается (16-23% годового) и при большом ее расходе объемы водоемов резко сокращаются (табл.16). В наполнении прудов ведущая роль принадлежит родниковому стоку (24-39% общего прихода), осадкам на зеркало (5-31%), фильтрации воды из вышерасположенного пруда (10-44%), второстепенная - стоку с прилегающего водосбора (2-20%), грунтово-фильтрационным водам из берегов (0,4-23%). В расходной части баланса по сравнению с предшествующим сезоном уменьшается сброс воды в нижний бьеф (менее 12% общего расхода) и только пруд № 76 продолжает сбрасывать воду (57% общего расхода). Преобладают потери воды на испарение (52-71%).

Осенью (IX-X) пруды получают наименьшее в году количество воды (7-12% годового), но в связи с уменьшением потерь воды в условиях минимального их наполнения и понижающейся температуры воздуха начинают накапливать воду (табл.16). Основную роль в их наполнении играет родниковый сток (29-64% общего прихода). Другие источники имеют второстепенное значение: осадки на зеркало дают 16-26% общего притока, сток с прилегающего водосбора - 1-19%, а фильтрационные воды из вышерасположенного пруда - 3-24%. В расходной части водного баланса преобладают потери воды на испарение (32-54% общего расхода) и фильтрацию.

Таким образом, пруды каскада в течение осенне-зимнего периода (IX-II) накапливают воду, а весной и летом сбрасывают часть

Т а б л и ц а 16

Водный баланс (сезонный) прудов (средний за период У1 1973-Х 1976 г.)

Сезон	Приход, %						Итого, тыс.м ³	Расход, %						Итого, тыс.м ³	А, тыс.м ³	Н, %
	П _о	П _б	О	П' _п	П _р	Ф'		С	З	И	Ф _{осн}	Ф _{пл}	Ф _{бер}			
Пруд № 4																
XI-II	16.2	35.3	14.0	0.2	25.0	9.3	44.2	25.0	-	6.7	13.8	35.2	19.3	24.5	19.7	-3.1
III-V	38.2	-	14.6	0.2	32.9	14.1	39.3	52.7	-	15.4	5.5	22.5	3.9	54.0	-14.6	0
У1-VIII	10.1	8.5	31.4	0.4	39.3	10.3	17.3	-	-	70.6	8.0	11.5	9.9	30.5	-47.4	14.9
IX-X	-	6.9	25.8	0.9	63.5	2.9	8.8	-	-	48.6	16.8	7.0	27.6	8.0	0.7	0.7
Пруд № 5																
XI-II	22.0	1.2	9.0	1.4	27.7	38.7	27.9	51.6	-	4.0	12.0	16.1	16.3	21.9	5.8	0.6
III-V	47.1	-	4.2	2.2	21.5	25.0	60.3	76.0	1.1	5.3	3.8	11.2	2.6	59.7	-0.3	1.6
У1-VIII	3.2	11.8	15.1	4.1	38.1	27.7	17.7	11.8	0.5	55.5	10.2	12.1	9.9	20.3	-2.7	1.7
IX-X	-	1.6	15.5	2.4	61.2	19.3	7.5	14.7	0.5	31.5	13.4	21.4	18.5	9.0	0.5	-14.3
Пруд № 6																
XI-II	22.9	15.3	12.1	2.0	35.2	12.5	49.4	-	-	9.6	11.5	73.0	5.9	27.1	22.4	0
III-V	54.7	0	8.6	1.6	24.7	10.4	87.4	6.3	0.3	32.4	8.2	46.2	6.6	39.1	48.4	-0.1
У1-VIII	7.6	18.2	21.2	3.3	36.2	13.5	31.4	-	0.6	62.1	5.3	28.7	3.3	49.5	-17.6	-1.5
IX-X	6.9	19.0	18.8	2.2	43.8	9.3	19.2	-	0.5	48.3	7.2	40.7	3.3	20.6	0.6	-4.2
Пруд № 7а																
XI-II	14.4	24.3	13.6	18.2	29.5	-	15.0	11.9	-	7.6	35.1	39.1	6.3	8.6	6.2	1.8

Т а б л и ц а 16 (продолжение)

Сезон	Приход, %						Итого, тыс.м ³	Расход, %						Итого, тыс.м ³	А, тыс.м ³	Н, %
	П _о	П _б	О	П' _п	П _р	Ф'		С	З	И	Ф _{осн}	Ф _{пл}	Ф _{бер}			
III-Y	29.3	20.5	10.6	11.8	27.8	-	19.4	49.3	0.4	13.0	13.7	20.8	2.7	19.8	0.04	-2.2
YI-VIII	17.6	20.1	15.9	22.3	24.1	-	11.9	6.0	1.6	62.1	13.9	14.9	1.5	16.0	-4.4	2.8
IX-X	15.5	11.9	15.7	28.1	28.8	-	6.1	-	1.4	53.8	22.1	20.0	2.7	6.0	0.2	-0.8
Пруд № 76																
XI-II	8.9	-	3.5	0.1	32.1	55.4	11.5	64.3	-	1.2	18.4	15.6	0.5	11.5	0.06	-0.4
III-Y	45.5	-	1.5	0.2	21.0	31.8	21.5	84.2	-	1.9	7.5	6.0	0.4	21.3	0.01	1.0
YI-VIII	11.3	2.3	4.7	0.4	26.8	44.5	8.5	57.1	-	10.6	18.7	13.0	0.6	8.4	0.01	0.6
IX-X	-	0.7	5.0	0.2	34.9	59.2	4.3	52.9	-	8.6	23.2	14.8	0.5	4.4	-0.003	-2.3
Пруд № 8																
IX-II	29.4	20.6	16.7	17.9	-	15.4	25.1	50.6	-	7.8	22.2	9.6	9.8	19.4	5.3	1.7
III-Y	63.2	1.7	11.2	13.6	-	10.3	28.3	60.8	0.4	15.8	11.7	4.4	6.9	29.5	-1.1	-0.1
YI-VIII	26.1	14.7	21.3	23.4	-	14.5	18.4	11.2	1.7	61.3	13.6	5.4	6.8	23.6	-5.2	-0.3
IX-X	23.0	10.0	21.8	28.5	-	16.7	10.0	2.1	1.6	51.7	24.1	10.9	9.6	8.4	1.6	-0.4
Пруд № 9																
XI-II	24.9	7.7	16.8	-	35.0	15.6	39.5	22.2	-	10.5	18.6	5.4	43.3	24.3	15.3	-0.2
III-Y	39.8	0.3	11.7	-	37.6	10.6	44.9	47.6	0.1	16.5	8.0	3.6	24.2	45.7	-0.6	-0.3
YI-VIII	11.0	10.3	24.6	-	35.5	18.6	24.0	9.5	0.9	51.7	10.2	1.8	25.9	34.2	-10.4	11.2
IX-X	1.5	7.3	26.3	-	41.0	23.9	12.4	-	0.8	47.4	16.6	1.2	34.0	13.3	-0.9	-0.1

Т а б л и ц а 17

Среднее сезонное поступление воды (% годового)
в пруды на б.Каракубанской (1973-1976 гг.)

Номер пруда	XI-II	III-V	VI-VIII	IX-X
4	40.4	35.9	15.7	8.0
5	24.6	53.0	15.7	6.6
6	26.4	46.6	16.8	10.2
7а	28.6	37.1	22.7	11.6
7б	25.1	46.9	18.6	9.4
8	30.7	34.6	22.5	2.2
9	32.7	37.1	19.9	10.3

своего объема. Сезонный водный баланс каждого пруда каскада имеет свои особенности, связанные прежде всего с различным размером прудов и характером их собственных водосборов. Самый малый пруд каскада - № 7б - в течение всего года сбрасывает относительно больше воды, чем другие пруды (табл.16), а пруд № 6, наоборот, только весной, причем в самом малом количестве (6% общего расхода). В течение всего года родниковый сток является основным источником наполнения прудов и только весной возрастает роль сбросов воды из вышерасположенного пруда в питание данного.

С точки зрения осадконакопления основной интерес представляют составляющие водного баланса, с которыми связано поступление наносов с водосбора (сток воды основного водотока, склоновый сток), а также вынос их из пруда (сброс воды в нижний бьеф). В связи с этим необходимо отметить, что приток воды из основного водотока (сброс воды в нижний бьеф) в пруды каскада наблюдается главным образом весной, а склоновый сток с прилегающего водосбора - летом и осенью (табл.9).

2.3. Особенности водного баланса прудов

На примере водохранилищ, седиментационный баланс которых был исследован, рассмотрим, как меняется структура водного баланса (число элементов, их относительное значение) в зависимости от принадлежности водоемов к разным генетическим группам (рис. 7), и, в частности, выявим особенности водного баланса прудов, составляющих, как отмечалось выше, особую группу малых водохранилищ.

Структура приходной части водного баланса (табл.14, 18) претерпевает изменения при переходе от самых крупных водохранилищ (I группа) к самым малым (прудам). В водном балансе прудов в отличие от других водохранилищ, дополнительно учитываются склоновый сток с прилегающего водосбора, родниковые воды, а при каскадном их размещении – грунтово-фильтрационные воды из берегов и вышерасположенного пруда.

С уменьшением размера водохранилищ, что равнозначно переходу от водохранилищ I группы к водохранилищам У группы – прудам, уменьшается относительный приток из основного водотока и возрастает доля осадков на зеркало (табл.18). Водохранилища I и II групп получают из основного водотока 94–99% общего притока. Эта доля уменьшается до 90% в балансе степных водохранилищ („Волчи Ворота“), сток в которые зарегулирован многочисленными прудами на их водосборе. Водохранилища III группы получают из основного водотока воды меньше (89–96%) по сравнению с водохранилищами I и II групп, и менее всего воды получают из основного водотока пруды, особенно при каскадном их размещении (22–47%).

Склоновый сток с прилегающего водосбора практически не влияет на наполнение крупных водохранилищ, поэтому не учитывается в их водном балансе (табл.18). На его долю приходится около 4% общего поступления воды в степные водохранилища, сток в которые зарегулирован прудами („Волчи Ворота“). С уменьшением размера водохранилищ роль этого источника в их наполнении возрастает. В водном балансе прудов каракубанского каскада доля склонового стока достигает 21% общего притока (табл.14), а его годовое количество зависит от уклона собственного (частного) водосбора прудов (рис.9).

Другие составляющие приходной части водного баланса водохранилищ также претерпевают изменения при переходе от одной группы водохранилищ к другой (табл.14, 18), но с точки зрения осадконакопления наибольший интерес представляет изменение притока из основного водотока и со склонов, с которыми связано поступление наносов в водоемы. Относительное значение первой составляющей баланса уменьшается, а второй – увеличивается при переходе от водохранилищ I группы к прудам.

Приток подземных вод в водном балансе водохранилищ I и частично II групп не учитывается (табл.18). Для сравнительно большого на Северном Кавказе Отказненского водохранилища ($W = 100 \text{ млн. м}^3$) его доля в приходной части водного баланса незначительна (0,1%), но резко возрастает для прудов на б.Каракубанской (до 25–36% общего притока воды). Увеличение роли подземных вод в наполнении водохранилищ с уменьшением размера последних уже отмечалось в литературе (Викулина, 1977).

В наполнении водохранилищ I и II групп осадки на зеркало играют незначительную роль, составляя менее 5% общего притока воды, но их доля возрастает до 4–17% в балансе малых водохранилищ.

Т а б л и ц а 18

Водный баланс водохранилищ

Номер водохранилища (табл.7)	Группа водохранилища (рис.7)	Период, годы	Приход, %		Итого, км ³	Расход, %			Итого, км ³	Коэффициент водообмена	Источник
			приток из основного водотока	осадки на зеркало		сброс	испарение	фильтрация			
1	I	1951-1956	98.2	1.4	11.01	84.9	1.3		11.01	8.4	Зиминова, 1959
2	I	1950-1956	98.8	1.0	13.70	95.6	0.6	0.7	13.70	10.6	Курдина, 1959
3	I	1947-1953	94.1	5.9	35.12	89.1	6.1	3.4	35.12	1.2	Рутковский, Курдина, 1959
4	I	1957-1958	98.5	1.3	67.22	98.9	1.3		61.64	7.0	Буторин, 1969
5	II	1961-1968	94.5	4.9	0.304	88.0	5.3	6.2	0.303	1.9	Скорняков, 1971
6	I	1957-1960	98.9	0.9	256.8	98.5	1.4		243.7	4.2	Буторин, 1969
7	III	1956-1958	96.3	3.7	0.0046	92.4	3.8	2.4	0.0045	5.5	Сорокин, 1961
8	III	1959-1961	89.0	11.0	0.0029	63.2	14.0	20.4	0.0028	0.7	Сорокин, 1963
9	У	1956-1958	87.0	13.0	0.000035	30.4	8.8	60.8	0.000032	0.7	Сорокин, 1961
21 ¹	II	1964-1965	86.5	9.9	0.025	40.9	21.2	21.0	0.025	0.4	Бойко, 1971
22 ²	II	1966-1970	98.7	1.2	0.447	93.3	2.6	4.1	0.433	3.1	Прыткова, 1973
30	I	1953-1966	98.3	0.7	12.20	83.0	5.2	0.2	11.53	0.6	Тарвердиев, 1974

П р и м е ч а н и я: 1) склоновый сток в водохранилище составляет 3.6% общего поступления воды; 2) подземный сток - 0.1% прихода.

При каскадном размещении прудов приток грунтово-фильтрационных вод из берегов и вышерасположенного пруда дает 11-46% общего прихода воды и является существенным источником их пополнения (Сухарев, 1968; Барбар, 1968; Смольянинов, 1972; Kennon, 1966). Таким образом, структура приходной части водного баланса прудов отличается от таковой других водохранилищ. Еще большее влияние оказывает размер водохранилищ на элементы расходной части водного баланса, в частности на испарение и фильтрацию, и, как следствие, сброс воды в нижний бьеф.

Относительные потери воды на испарение возрастают при переходе от водохранилищ I группы (менее 1.5% общего расхода) к водохранилищам II (3-5%) и III групп (4-14%). Больше всего теряют на испарение пруды (4-39%). В каждой группе водохранилищ есть водоемы, данные по которым отклоняются от общей закономерности. Так, Рыбинское водохранилище в связи с большой открытостью (табл.7) теряет на испарение воды больше (6%), чем другие водохранилища I группы (табл.18). Водохранилище „Волчи Ворота“ из-за длительного периода стояния высоких уровней теряет на испарение 21% общего расхода воды, тогда как другие водохранилища II группы - всего 3-5%. На величину испарения с поверхности прудов большое влияние оказывает растительность на их берегах (Форш, 1961).

Относительные потери воды на фильтрацию также возрастают при переходе от водохранилищ I группы (менее 3, 4% общего расхода) к водохранилищам II (4-6%) и III группы (до 20%). Роль этого источника потерь воды особенно заметно возрастает в балансе прудов, имеющих земляные плотины (24-59%). Потери на фильтрацию из прудов на б.Каракубанской и пруда Березового довольно хорошо согласуются (рис.13).

С точки зрения осадконакопления наиболее важным элементом расходной части водного баланса водохранилищ является сброс воды в нижний бьеф, характеризующий проточность водохранилищ и связанную с ней наносоудерживающую их способность.

Сброс воды из водохранилищ I группы является главной статьей ее расхода, на долю которой приходится 85-95% общего расхода. Он имеет существенное значение в расходе воды из водохранилищ II группы (88-93%) и уменьшается до 58% в балансе степного водохранилища „Волчи Ворота“ в связи с увеличением других статей расхода (табл.18). По этой же причине уменьшается сброс воды из водохранилищ III группы (63-92%). Пруды, как одиночные (Березовый), так и в составе каскада, сбрасывают относительно небольшое количество воды (24-57%). Следовательно, при переходе от водохранилищ I группы к самым малым (У группа), что соответствует уменьшению размеров водохранилищ, относительное значение сбросов воды из них уменьшается.

В каждой группе водохранилищ коэффициент водообмена (отношение объема сброса к объему водоема) убывает с увеличением их

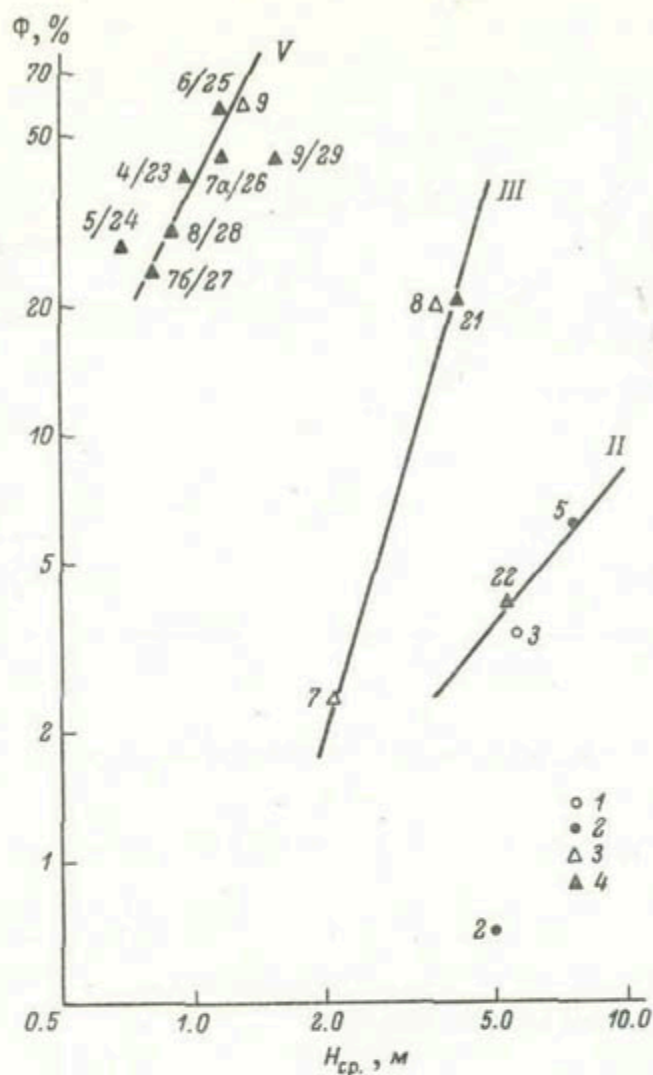


Рис.13. Связь относительных потерь воды на фильтрацию из водохранилищ со средней глубиной.

Условные обозначения те же, что и на рис.7.

средней глубины (рис.14). При этом с переходом от водохранилищ I группы к водохранилищам V группы влияние их размера (в данном случае – средней глубины) на коэффициент водообмена усиливается. Это видно по углу наклона кривых связи $C/W = f(H_{cp})$ к оси абсцисс на рис.14.

В заключение отметим, что структура водного баланса в значительно большей степени зависит от принадлежности водохранилищ к разным генетическим группам (рис.7), чем к разным природным зонам. Водный баланс прудов не может быть составлен на основе более изученного водного баланса водохранилищ других групп. Поэтому необходимо расширение воднобалансовых исследований малых водохранилищ в разных природных условиях.

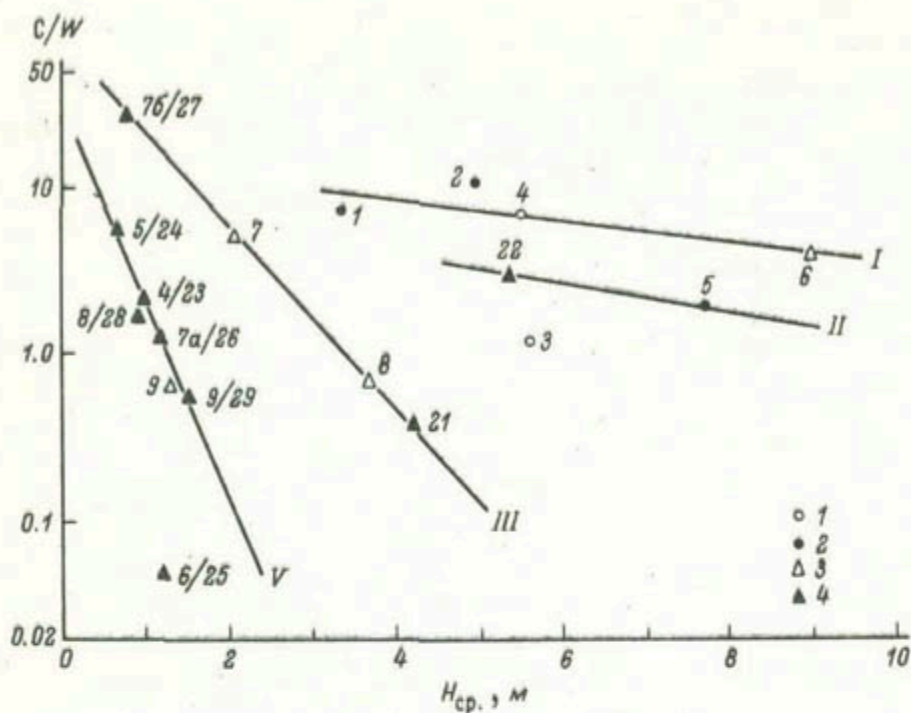


Рис.14. Связь коэффициента водообмена водохранилищ с их средней глубиной.

Условные обозначения те же, что и на рис.7.

2.4. Естественный (восстановленный) сток зарегулированного водотока

Под естественным будем понимать такой сток водотока, который имел бы место при отсутствии прудов. На участке водотока, заключенном между плотинами смежных прудов, сток складывается из притока (поверхностного и внутрипочвенного) с частного водосбора ($\Pi_{\text{с}}$), подземного стока на участке пруда (сток родников и приток грунтовых вод с водосбора) и стока с площади, занятой прудом. Пренебрегая последним в связи с незначительной величиной площади зеркала пруда по сравнению с площадью его водосбора, запишем уравнение для определения естественного стока водотока, образовавшегося на участке пруда, в следующем виде:

$$\Delta Q_e = \Pi_{\text{с}} + \Pi_{\text{р}} + \Pi_{\text{п}}, \quad (2.8)$$

где ΔQ_e - естественный (восстановленный) сток с частного водосбора пруда, тыс.м³; $\Pi_{\text{п}}$ - приток грунтовых вод с того же водосбора, тыс.м³.

В уравнении (2.8) все элементы, кроме притока грунтовых вод с водосбора ($\Pi_{\text{п}}$), определены при составлении водного баланса прудов (табл.14, 16).

Приток грунтовых вод с частного водосбора пруда рассчитан по формуле Г.Н.Каменского с использованием показаний уровня грунтовых вод в верхних скважинах, отстоящих от уреза пруда соответственно на 60 и 100 м и не испытывающих влияния со стороны пруда. За расчетные створы приняты створы плотин. Приток грунтовых вод определен для 1-го числа каждого месяца за период наблюдений над уровнем грунтовых вод. По этим данным составлены расчетные уравнения связи притока с глубиной грунтовых вод в Белой Глине и уровнем пруда. Полный коэффициент корреляции уравнения линейной регрессии для прудов № 4-6 и 7б составляет более 0.80 и только для прудов № 7а и 8 - соответственно 0.79 и 0.60; средняя квадратическая ошибка определения притока грунтовых вод в пруды по уравнениям регрессии - $\pm 21-32\%$.

Вычисленный по уравнениям регрессии приток грунтовых вод с водосбора прудов № 4-8 равен в среднем 0.8 мм за год (табл.9), и хотя на водосборах отдельных из них несколько различается по сезонному распределению, в целом для участка каскада характеризуется наибольшими значениями в весенний (III-Y) сезон (37.6% годового притока) и наименьшими (10.6% годового) осенью (IX-X).

Естественный (восстановленный) средний годовой сток б.Каракубанской, сформировавшийся на части водосбора, заключенной между плотинами прудов № 3, 9, 10 (рис.1), в среднем за три года исследований водного баланса прудов каскада составил 39 мм (табл.19). Наиболее многоводным был 1973/74 г., когда годовой сток с указанной части водосбора был равен 42 мм. В году сток распределяется неравномерно (табл.19). Наибольшее количество воды приходится на осенне-зимний (XI-II) сезон, составляя в среднем 36% годовой величины, несколько меньшее - на весенний (III-Y), но в целом оба сезона являются наиболее многоводными в году. Сток собственно осеннего сезона (IX-X) равен 12% годового.

В формировании годового стока балки на указанном участке главную роль играют родниковые воды, преобладающие во все сезоны и, дающие в среднем 74% годового стока (табл.20). Грунтовые воды не оказывают заметного влияния на сток балки. Участие склонового стока в общем стоке балки усиливается в летне-осенний сезон, а внутрипочвенные воды включаются в питание преимущественно в осенне-зимний сезон. Приведенные в табл.19 и 20 данные относятся только к части водосбора балки, где расположен исследованный каскад прудов. Площадь ее равна 6.76 км^2 и составляет всего 26.4% общей площади водосбора балки в створе плотины пруда № 9 (рис.1). Для определения стока со всего водосбора балки необходимо, хотя бы ориентировочно, оценить сток с его верхней части, расположенной выше плотины прудов № 3 ($F = 15.9 \text{ км}^2$) и № 10 ($F = 2.9 \text{ км}^2$). Эта часть водосбора имеет небольшой уклон поверхности (табл.1), поэтому основным видом стока здесь является внутрипочвенный. Его среднее годовое значение для неизученной части водосбора принято равным 10 мм, т.е. таким, как на водосборе пруда № 4.

Т а б л и ц а 19

Средний годовой (восстановленный) сток с частного водосбора прудов на б. Каракубанской и его распределение в году

Номер пруда	Площадь частного водосбора, км ²	Годовой, мм				Сезонный (% годового)			
		1973-1974	1974-1975	1975-1976	среднее	XI-II	III-V	V1-VIII	IX-X
4	1.6	25.2	37.8	33.4	32.1	52.2	25.8	13.0	9.0
5	1.0	44.9	25.3	33.0	34.4	24.5	39.4	22.2	13.9
6	0.86	97.5	76.4	89.6	87.8	33.9	29.7	23.9	12.5
7а	0.34	74.5	71.2	87.7	77.8	31.4	36.7	21.7	10.2
7б	0.13	77.9	122	98.3	99.4	29.7	37.5	20.1	12.7
8	2.0	5.6	2.2	8.1	5.3	51.7	7.2	25.6	15.5
9	0.83	78.2	52.8	54.7	61.9	32.8	33.2	20.3	13.7
Среднее		42.4	35.0	39.2	38.9	36.3	31.1	20.5	12.1

Т а б л и ц а 20

Составляющие стока (% полного) б.Каракубанской

Сезон	Склоновый	Внутрипоч- венный	Родниковый	Грунтовый
XI-II	2.6	34.5	61.0	1.9
III-V	3.2	2.5	91.0	3.3
VI-VIII	22.1	7.4	66.9	3.6
IX-X	12.7	3.3	81.6	2.6
Среднее	8.0	15.2	74.0	2.8

Средний годовой сток б.Каракубанской в створах плотин прудов, полученный суммированием стока с частных водосборов, возрастает по длине водотока (табл.21) и составляет в среднем за 1973-1976 гг. для водосбора 18 мм. На участке расположения прудов № 8 и 9 он несколько уменьшается в связи с отсутствием родникового питания в районе пруда № 8. Сток, сформировавшийся на участке каскада прудов № 4-9, в среднем в 2.2-2.8 раза больше стока балки в створах плотин прудов за 1973-1976 гг. (табл.21). Эти соотношения могут быть использованы для определения годового стока балки за отдельные годы при известных его значениях для водосбора каскада.

Период воднобалансовых исследований на прудах каскада совпал с циклом влажных лет (рис.2). Поэтому необходимо, хотя бы ориентировочно, оценить сток балки в средний по водности год и в годы различной водности.

Сезонный и годовой сток на водосборе каскада за 1973-1976 гг. тесно коррелирует с соответствующими суммами осадков, зарегистрированными в Калниболотской и Белой Глине ($r > 0.9$), а особенно - в Тихорешке ($r = 0.97$). Пользуясь последней связью, мы определили с точностью $\pm 22\%$ средний многолетний (1924-1976 гг.) годовой сток с водосбора исследованного каскада, значение которого при норме годовой суммы осадков 566 мм (табл.4) равно 35.2 мм. Годовой сток наиболее многоводного 1973-74 г. при обеспеченности 13% на 20% выше среднего многолетнего, а к последнему по значению близок 1974/75 г. (модульный коэффициент годового стока - K - равен 0.99, обеспеченность - $p = 53\%$). Завершающий год исследований (1975/76 г.) также относится к многоводному ($K = 1.11$, $p = 24\%$).

Таким образом, расчет естественного (восстановленного) годового стока зарегулированного водотока, помимо познавательного интереса, необходим для выявления водности периода исследований

Т а б л и ц а 21

Сток б.Каракубанской в створах плотин прудов (1973-1976 гг.)

Номер пруда	Площадь водосбора балки, км ²	Средний годовой сток балки (h_F)		Средний годовой сток с водосбора каскада, мм		$\frac{h_{\Delta F}}{h_F}$	$\frac{h'_{\Delta F}}{h_{\Delta F}}$
		тыс.м ³	мм	по водному балансу ($h_{\Delta F}$)	по наполнению ($h'_{\Delta F}$)		
3	15.9	159.0	10.0	—	—	—	—
4	17.5	210.4	12.0	32.1	51.1	2.7	1.60
5	18.5	244.8	13.2	33.0	47.6	2.5	1.44
6	19.3	320.3	16.6	46.6	37.8	2.8	0.81
7а	19.7	346.8	17.6	49.4	41.6	2.8	0.84
7б	19.8	359.7	18.2	51.1	46.1	2.8	0.90
8	24.8	399.3	16.1	35.6	33.9	2.2	0.95
9	25.6	450.7	17.6	38.9	38.6	2.2	0.99

водного баланса прудов. Из трех лет наблюдений два (1973/74 и 1975/76 г.) относятся к годам с повышенной водностью и один (1974/75 г.) соответствует периоду средней водности. Коэффициент вариации годового стока с водосбора каскада за 1924–1976 гг. невелик ($C_v = 0.18$) благодаря большому участию в его формировании родниковых вод (табл.20). Разностная интегральная кривая годовой суммы осадков (рис.2) в то же время характеризует и цикличность стока временных водотоков в верховьях р.Еи в силу тесноты связи между этими элементами.

Естественный сток водотока нередко определяют по наполнению прудов как сумму зарегулированного стока водотока (сброс воды из пруда) и объема ежегодных изъятий из естественного стока, оцениваемого в долях (0.3–2.0) объема пруда (меженного или обшего). Если эту долю принять равной 1.0, а за расчетный принять объем прудов, соответствующий среднему из наибольших уровней за 1973–1976 гг., то окажется, что естественный сток балки, вычисленный по наполнению прудов и методу водного баланса, различается (табл.21). Наибольшие расхождения (до 44–60%) относятся к створам плотин верхних прудов каскада – № 4 и 5 и по мере увеличения числа прудов уменьшаются.

В заключение отметим, что внутригодовое распределение зарегулированного стока (табл.9) отличается от такового естественного (табл.19) большей неравномерностью в году, обусловленной режимом эксплуатации прудов. Наибольший естественный сток балки имеет место в осенне-зимний сезон (XI–II), а зарегулированный – весной (III–V). Поэтому изучение только зарегулированного стока не дает представления о его режиме в естественных условиях.

2.5. Роль прудов в регулировании местного стока

Еще до недавнего времени гидрология не располагала необходимыми сведениями о степени регулирования и искажения местного стока прудами и водохранилищами в различных природных районах. К.П.Воскресенским (1953) и О.Н.Борсуком (1955, 1957) впервые учтено влияние прудов на сток малых рек Южного Заволжья, Молдавии, Украины и всей лесостепной и степной зон европейской территории СССР. Результаты этих исследований легли в основу методических рекомендаций, разработанных Гидрометеослужбой (Методические указания..., 1953, 1958).

Объем задержанного прудами стока ($W_{ак}$), определяющий их регулирующую роль, равен разности между естественным и зарегулированным стоком водотока, т.е.

$$W_{ак} = Q_e - C. \quad (2.9)$$

Т а б л и ц а 22

Регулирующая способность прудов и уменьшение годового стока б.Каракубанской за счет безвозвратных потерь из прудов (1973-1976 гг.)

Номер пруда	Объем вышерасположенных прудов (ΣW), тыс.м ³	Зарегулированный сток в створе плотины пруда (C), тыс.м ³	Годовой сток балки, тыс.м ³		$\frac{\Sigma W_{ак}}{\Sigma Q_e}$, %	$\frac{\Sigma W_{ак}}{\Sigma W}$, %	Безвозвратные потери из прудов				Коэффициент уменьшения стока
			естественный (ΣQ_e)	задержанный прудами ($\Sigma W_{ак}$)			$\Sigma (И-О)$, тыс.м ³	$\frac{\Sigma (И-О)}{\Sigma Q_e}$	$\frac{\Sigma (И-О)}{\Sigma W_{ак}}$	$\frac{\Sigma (И-О)}{\Sigma W}$	
4	46.6	35.3	51.3	16.0	31.2	34.3	13.3	0.26	0.83	0.28	0.74
5	62.8	61.0	85.8	24.8	28.9	39.5	20.7	0.24	0.84	0.33	0.76
6	128.5	2.4	161.3	158.9	98.5	123.6	51.0	0.32	0.32	0.40	0.68
7а	145.9	12.1	187.8	175.7	93.6	120.4	59.3	0.32	0.34	0.41	0.68
7б	147.7	33.6	200.7	167.1	83.2	113.1	59.7	0.30	0.36	0.40	0.70
8	169.8	31.3	211.3	180.0	85.2	106.0	71.1	0.34	0.40	0.42	0.66
9	230.3	30.5	262.7	239.2	88.7	103.9	84.4	0.31	0.35	0.37	0.69

Прудами № 4–9 на б.Каракубанской в 1973–1976 гг. в среднем задерживалось 89% естественного годового стока балки, сформировавшегося на участке размещения каскада (табл.22). При этом верхними прудами каскада – № 4 и 5 – регулируется всего 29–31% естественного стока. Благодаря наличию в каскаде большого пруда № 6 зарегулированность естественного стока балки резко возрастает (98.5%) и остается достаточно высокой до конца каскада (табл.22). Задержанный прудами объем стока только на верхнем участке каскада (пруды № 4 и 5) меньше объема прудов при среднем наибольшем уровне за 1973–1976 гг., ниже по каскаду он несколько превышает объем прудов.

Не вся вода, задержанная прудами, расходуется на безвозвратные потери (W_n), определяющие снижение стока водотока в связи с его аккумуляцией в прудах. Эти потери складываются из разницы между испарением с водной поверхности и суши (I_c) и забора воды на хозяйственные нужды, т.е.

$$W_n = I - I_c + Z = I - 0 - \Pi_3 + Z. \quad (2.10)$$

В связи с незначительной долей забора воды в расходной части водного баланса прудов (табл.14, 16) и малой величиной стока с площади, занятой прудом (Π_3), этими элементами в уравнении (2.10) можно пренебречь.

Безвозвратные потери воды из прудов каскада ($(\Sigma(I-0)/\Sigma Q_e)$) в среднем за 1973–1976 гг. составляли 24–34% годового естественного стока балки (табл.22). Коэффициент уменьшения годового стока (R_Q) за счет безвозвратных потерь воды из прудов определяется по формуле

$$R_Q = 1 - \frac{W_n}{Q_e}. \quad (2.11)$$

Его значение для участка балки в пределах исследованного каскада равно 0.66–0.76 (табл.22) и практически совпадает с данными О.Н.Борсука (1957) для территории Северного Кавказа (0.60–0.70).

На безвозвратные потери в пределах каскада расходуется от 32 до 84% задержанного прудами стока балки (табл.22, графа 10). Относительные потери стока достигают наибольшего значения на участке размещения прудов № 4 и 5 и в среднем для каскада составляют 35% задержанного прудами стока. Поэтому каскадное размещение прудов способствует не только увеличению зарегулированности стока балки, но и уменьшению безвозвратных потерь стока. При уровне, равном среднему из наибольших наблюдаемых в 1973–1976 гг., безвозвратные потери составляют всего 28–42% объема прудов (табл.22, графа 11). Следовательно, при оценке степени снижения стока за счет безвозвратных потерь в расчет нужно принимать не весь объем прудов, как это обычно делается при оценке

зарегулированности стока, а только его часть (0.3-0.4). Иными словами, необходимо отличать зарегулированность стока прудами от степени его снижения за счет безвозвратных потерь (Шикломанов, 1976).

Г л а в а 3. ВЗВЕСИ И ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ПРУДОВ

В результате экспедиционного обследования прудов оказались довольно хорошо изученными их донные отложения (общая масса, физико-механические свойства). В то же время исследователями недостаточное внимание уделялось оценке точности измеренного объема отложений, определению средней плотности и изучению химического состава донных отложений. До последнего времени оставались также неизученными взвеси прудов, если не считать отдельных измерений мутности воды, сбрасываемой из водоемов. Поэтому при исследовании прудов на б.Каракубанской этим вопросам уделено особое внимание.

3.1. Взвеси прудов

Изучение взвесей водохранилищ необходимо как для составления седиментационного баланса, так и для оценки качества воды, используемой для орошения, водоснабжения и других целей.

В комплекс полевых работ по изучению взвесей прудов на б. Каракубанской входили режимные наблюдения над мутностью поверхностного слоя в приплотинной части прудов и съемки мутности по акватории прудов. Режимные наблюдения выполнялись на постоянной вертикали. Пробы воды отбирались 3-5 раз в месяц объемом 0,5 л. Выделение наносов из пробы производилось ее фильтрованием сначала через бумажный фильтр, а затем через мембранный фильтр № 4.

Съемки мутности делились на детальные и сокращенные. Во время детальных съемок на каждом пруду выбирались 5-6 вертикалей (3 вертикали - в приплотинной части пруда, остальные - в стрежневой), а во время сокращенных - 3 вертикали в стрежневой части пруда. При глубине вертикали более 0,5 м пробы отбирались у поверхности и дна. В общей сложности на каждом пруду выполнено от 8 (пруд № 4) до 19 съемок мутности (табл.23). На основе анализа данных съемок установлено, что мутность поверхностного слоя воды на постоянной вертикали в среднем для всех прудов каскада равна средней мутности поверхностного слоя (табл.23) и несколько меньше донной и средней мутности воды в пруду. Между средней мутностью воды в пруду и ее значением на постоянной вертикали существует тесная связь ($r > 0,9$), поэтому режимные наблюдения над мутностью воды в приплотинной части прудов отражают изменение средней мутности в водоеме.

Т а б л и ц а 23

Мутность воды прудов на б.Каракубанской (1973-1976 гг.)

Номер пруда	Число съемок	Мутность воды, г/м ³				Парные коэффициенты корреляции			$\frac{\rho_1}{\rho_4}$
		средняя (ρ_1)	средняя поверхностная (ρ_2)	средняя донная (ρ_3)	поверхностная на постоянной вертикали (ρ_4)	$r_{\rho_1\rho_2}$	$r_{\rho_1\rho_3}$	$r_{\rho_1\rho_4}$	
4	8	47	47	43	40	0.99	0.99	0.96	1.17
5	19	65	65	64	69	0.97	0.96	0.96	0.94
6	19	63	64	63	72	0.98	0.97	0.94	0.88
7	18	53	37	66	39	0.73	0.96	0.42	1.36
7а	15	52	54	49	54	0.92	0.93	0.92	0.96
7б	15	125	114	137	110	0.98	0.99	0.96	1.14
8	18	84	91	83	92	0.98	0.97	0.94	0.95
9	19	107	107	108	102	0.95	0.96	0.82	1.05
Среднее		75	72	6	72				1.04

Т а б л и ц а 24

Мутность поверхностного слоя воды (в г/м³)
в приплотинной части прудов каскада на б.Каракубанской

Год	Сезонная				Годо- вая	Сезонная				Годо- вая
	XI- II	III- У	УІ- УІІІ	ІХ- Х		XI- II	III- У	УІ- УІІІ	ІХ- Х	
Пруд № 4										
1972-1973	-	-	-	28	-	-	-	-	98	-
1973-1974	32	37	42	28	35	40	62	109	56	65
1974-1975	29	31	58	55	41	52	60	69	72	61
1975-1976	28	35	111	96	62	35	92	194	80	97
Среднее	30	34	70	52	45	42	71	124	76	75
Пруд № 5										
Пруд № 8										
1972-1973	-	-	101	56	-	-	-	167	165	-
1973-1974	40	31	53	38	41	42	37	53	50	45
1974-1975	45	37	76	61	53	43	45	87	97	64
1975-1976	21	38	115	110	64	48	58	163	64	82
Среднее	35	35	86	66	53	44	47	118	94	72
Пруд № 6										
Пруд № 9										
1972-1973	-	-	-	269	-	-	-	97	88	-
1973-1974	63	72	70	70	68	50	41	76	78	65
1974-1975	83	59	80	110	81	46	40	76	70	56
1975-1976	73	62	175	186	115	49	72	130	58	76
Среднее	73	64	108	159	94	48	51	95	74	65

Средняя годовая мутность воды в приплотинной части прудов каскада колеблется от 45 до 94 г/м³ (табл. 24) с наименьшим значением в пруду № 4, где освещению воды способствуют заросли подводной растительности. Пруду № 6 свойственно развитие ветрового волнения, приводящего к взмучиванию поверхностного слоя отложений и повышению мутности воды. Наибольшая мутность наблюдалась в 1975/76 г., составляя в отдельных прудах 62-115 г/м³. Внутригодовое изменение мутности прудовой воды характеризуется ее наибольшими значениями в летний (VI-VIII) сезон (табл.24) и наименьшими - зимою (XI-II).

Взвеси прудов в зимний период представляют главным образом остатки взмученных с осени донных отложений и почв, смытых прилегающих склонов поздними дождями. Мутность воды весны практически не отличается от ее значений в зимний период (табл. 24), поскольку питание прудов осуществляется преимущественно грунтово-фильтрационными водами, а взвеси образуются за счет размыва берегов, ложа и плотины. Некоторому увеличению мутности воды способствует таяние льда, содержащего до 100–560 г/зольных наносов. Летом содержание взвесей достигает максимум в году, а в их формировании участвуют продукты склонового смыва почвы во время ливней, взмучивания донных отложений и продукция фитопланктона. Осенью при тех же, что и летом, источниках осадкообразующего материала, но меньшем объеме его поступления в водоемы, содержание взвесей снижается.

Распределение мутности по длине прудов для большинства из них характеризуется ее увеличением по направлению к плотине (табл. 25), что связано с поступлением продуктов ветрового взмучивания поверхностного слоя отложений в открытую часть пруда и размывом плотины. Среднее соотношение между мутностью воды в верховье прудов № 5–8, обычно заросшем тростником, и мутностью в их приплотинной части составляет 0.68–0.84 (табл. 25). пруду № 4 осветлению потока по длине водоема способствует подводная растительность, сдерживающая взмучивание донных отложений. Уменьшение мутности по длине пруда № 9 обусловлено частичным отложением продуктов взмучивания донных отложений, образовавшихся в верхней незаросшей части пруда, по пути их перемещения к плотине. В связи со слабой проточностью прудов большую часть года распределение мутности по их акватории определяется главным образом развитием ветрового волнения.

Мутность воды в прибрежной части прудов обычно больше, чем в стрежневой, за счет развития здесь ветрового взмучивания донных отложений. По измерениям Е.А.Юдина, вдольбереговая полоса повышенной мутности воды на пруду № 6 при скорости ветра 3–7 м/с. имела ширину 5–15 м. Мутность воды на расстоянии 0.5–1.0 м от уреза достигала 1.0–1.9 кг/м³, уменьшаясь до 0.1–0.2 кг/м³ в 10 м от уреза. При таких небольших скоростях ветра взмучиванию подвергались те участки дна, где глубина воды была менее 1 м.

Взвеси прудов содержат в среднем от 22 до 38% (табл. 26) органического вещества (потеря при прокаливании), количество которого возрастает с уменьшением коэффициента водообмена ($\gamma = -0.80$). Наименьшим содержание органического вещества бывает после вскрытия прудов (апрель), когда под влиянием ветрового перемешивания водной массы и сточных течений интенсивно минерализуются его остатки, сохранившиеся в течение зимнего периода.

По данным Е.А.Юдина, механический состав взвесей, отобранных из прудов 1 VIII 1975 г., характеризовался преимущественным содержанием частиц более 0.005 мм (73–94%), которые включали

Т а б л и ц а 25

Изменение мутности воды по длине прудов на б.Каракубанской (1973-1976 гг.)

Номер пруда	Число съемок	Средняя мутность воды, г/м ³			Парные коэффициенты корреляции			$\frac{\rho_3}{\rho_2}$
		пруда (ρ_1)	у плотины (ρ_2)	в верховье (ρ_3)	$r_{\rho_1\rho_2}$	$r_{\rho_1\rho_3}$	$r_{\rho_2\rho_3}$	
4	16	66	53	82	0.90	0.97	0.82	1.55
5	19	65	70	59	0.94	0.92	0.88	0.84
6	19	63	76	52	0.93	0.75	0.57	0.68
7	18	53	59	40	0.71	0.80	0.46	0.68
8	19	95	95	66	0.94	0.52	0.40	0.69
9	19	107	93	122	0.94	0.96	0.88	1.31
Среднее		75	74	70				0.95

Т а б л и ц а 26

Среднее содержание органического вещества (потери при прокаливании, %) во взвесах прудов на б.Каракубанской (1973-1976 гг.)

Месяц	Число съемок	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 7а	№ 7б	№ 8	№ 9	Среднее для кас- када
III*	2	30	38	39	34	40	42	37	40	37
III	2	28	24	46	41	60	18	12	30	35
IV	1	13	2	7	1	(2)	3	1	(1)	4
У I	2	40	30	33	25	27	18	30	32	30
У II	2	46	30	31	15	31	21	20	20	27
У III	1	23	22	24	-	27	22	19	18	22
Среднее		32	24	38	27	35	22	23	26	28

* Пруды покрыты льдом.

29–89% органического вещества. Частицы крупностью 0,001–0,005 мм содержат от 12 до 100% органического вещества, а частицы менее 0,001 мм – от 50 до 100%.

3.2. Сравнительная характеристика мутности воды водохранилищ

Наиболее сопоставимой является мутность воды в приплотинной части водохранилищ, которая возрастает при переходе из лесной зоны в лесостепную и степную (табл.27) в соответствии с изменением мутности наполняющих их водотоков. Мутность речных вод, поступающих в водохранилища волжского каскада (лесная зона), не превышает 25 г/м^3 . В зоне размещения Куйбышевского и Новосибирского водохранилищ (лесостепная зона) она составляет $500\text{--}1000 \text{ г/м}^3$ и увеличивается до 1.4 кг/м^3 у временных водотоков, наполняющих водохранилище Боршенское и Успенское. Мутность степных рек и временных водотоков превышает 2 кг/м^3 и уменьшается до 0.5 кг/м^3 , если водотоки зарегулированы прудами (водохранилище „Волчи Ворота“).

Наибольшей мутностью характеризуются малые водохранилища лесостепной (Боршенское, Успенское) и степной (каракубанский каскад) зон. Этому способствует большая мутность склоновых вод, водотоков, небольшая длина водоемов, в пределах которой не успевают оседать поступающие наносы, мелководность самих водоемов, обуславливающая развитие ветрового волнения и связанного с ним взмучивания донных отложений, размыва берегов и плотины. Средняя годовая мутность воды в приплотинной части прудов на б.Каракубанской значительно больше мутности воды, сбрасываемой из изученных нами водохранилищ Предкавказья – Отказненского и „Волчи Ворота“ (табл.24, 27), а также зарегулированных рек Азово-Кубанской равнины (Прыткова, 1973а). Водохранилища Боршенское и Успенское имеют значительно большую мутность воды в приплотинной части, чем расположенное в той же зоне Куйбышевское водохранилище, особенно весной, когда они получают из ручьев воду с мутностью $10\text{--}25 \text{ кг/м}^3$ (Лопатин, 1961, 1963).

Мутность малых водохранилищ в течение отдельных сезонов подвергается большим изменениям под влиянием зимних оттепелей, выпадающих летних ливней и взмучивания донных отложений. В период между оттепелями происходит довольно быстрое осветление воды в результате осаждения наносов. Например, потепление с 6 по 11 марта 1958 г. вызвало поступление в Боршенское водохранилище большого количества наносов, повысившего мутность воды в его приплотинной части 12 марта до 78 г/м^3 , которая уже 31 марта снизилась до 2 г/м^3 (Лопатин, 1961). В связи с небольшой длиной малых водохранилищ мутность воды в их приплотинной части реагирует на все изменения мутности основных водотоков.

Т а б л и ц а 27

Средняя мутность воды (в г/м³) в озерной части водохранилищ

Номер водо- хранилища (табл.7)	Притока	Сброса	Зима	Весна	Лето	Осень	Источник
Зона тайги и смешанных лесов							
1	21	22	2	6-24	8-4	4-2	Зиминова, 1974
2	22	19	2-3	8-20	6-4	2-4	
3	20	7	1-2	1-10	2-6	2-50	Зиминова, 1963, 1967
4	10	4	4-6	20-30	2-16	4-16	Виноградова, Эдельштейн, 1971
5	80	8	3-8	20-40	3-9	6-10	Виноградова, 1973а
Лесостепная зона							
6	-	-	5-15	30-60	10-20	10-20	Широков, 1961
7	1440	67	10-20	100-360	20-30	-	Лопатин, 1961
8	1390	24	10-20	100-520	6-17	-	Лопатин, 1963
15	435	-	-	25-75	10-80	20-40	Лысенко, 1968
Степная зона							
21	550	15	15	15-22	-	-	Прыткова, Юдин, Шеховцов, 1971
22	2500	22	20-25	35-60	30-60	20-50	Прыткова, Юдин, 1973
Горная область							
30	2010	60	1-12	8-31	8-31	1-12	Тарвердиев, 1974, 1978

Сезонное распределение взвесей в водохранилищах зависит от размещения водоемов в той или иной природной зоне. В водохранилищах лесной и лесостепной зон максимальное содержание взвесей связано с весенним половодьем рек (табл.27), поставляющих в это время основную массу наносов. Летом оно заметно снижается с уменьшением их притока из рек. Некоторая часть взвесей в этот период образуется за счет абразии берегов и дна водохранилищ, развития фитопланктона. Осенью их содержание увеличивается в связи с выпадающими дождями, вызывающими паводки на небольших реках, и штормами. Наименьшим содержанием взвесей характеризуется зимний сезон: водная масса водохранилищ содержит те взвеси, которые сохранились в ней с осени. В отличие от водохранилищ лесной и лесостепной зон в водохранилищах степной зоны наибольшая мутность воды наблюдается летом (табл.24, 27), благодаря поступлению продуктов ливневой эрозии со склоновым и речным стоком, а также развитию береговой и донной абразии.

Таким образом, сезонное содержание взвесей в водохранилищах в значительной степени согласуется с сезонным изменением мутности воды основных водотоков, наполняющих водохранилища, а зональный характер содержания взвесей в водохранилищах обусловлен зональностью мутности речных вод. Другие источники взвесей, преимущественно автохтонного происхождения, влияют на их содержание в отдельные сроки наблюдений, но фоновое содержание взвесей определяется их поступлением с водосбора. Поскольку размер водохранилищ в конкретных природных условиях оказывает определенное влияние на содержание взвесей, то о мутности воды в малых водохранилищах нельзя судить по ее значению в крупных. Для этого необходима организация исследований режима взвесей малых водохранилищ в разных природных условиях.

Мутность воды, сбрасываемой из водохранилищ, различается меньше, чем мутность притока (табл.27). Разница между ними, характеризующая отстойный эффект водохранилищ, возрастает при переходе из лесной зоны в лесостепную и степную. В связи с этим можно считать, что способность водохранилищ удерживать речные наносы изменяется в соответствии с географической зональностью.

3.3. Физико-механический и химический состав донных отложений

Из прудов каскада в 1973-1975 гг. отобрано от 10 до 23 проб поверхностных (0-10 см) отложений (табл.28) и, кроме того, взяты колонки отложений длиной 40-60 см и более, преимущественно из приплотинной части. Механический состав донных отложений определялся по методике Гидрометеослужбы (Наставление..., 1957), а часть проб анализировалась методом Н.А.Качинского для сопоставления механического состава почв (табл.2), берегового грунта (табл.29) и донных отложений (табл.30). Для изучения агрохимиче-

Т а б л и ц а 28

Средние физико-механические свойства поверхностного слоя (0-10 см)
отложений прудов на б.Каракубанской

Номер пруда	Количество проб	Песок		Пыль	
		>0.25 мм	0.25-0.10 мм	0.10-0.05 мм	0.05-0.01 мм
4	22	0.59	3.41	1.50	31.54
5	23	1.10	2.41	1.63	33.80
6	23	1.51	2.54	2.50	32.26
7а	15	3.81	3.17	2.22	30.02
7б	10	0.73	2.20	3.25	42.39
8	19	2.70	2.28	1.87	30.41
9	23	1.34	2.09	2.45	33.44
Среднее		1.68	2.58	2.20	33.42

Номер пруда	Количество проб	Ил		Глина	Средний диаметр частиц, мм	Потери, %		Плотность, т/м ³
		0.01-0.005 мм	0.005-0.001 мм	<0.001 мм		при прокаливании	при обработке HCl	
4	22	14.82	27.43	20.71	0.021	7.58	18.88	0.73
5	23	16.05	28.47	16.54	0.022	8.09	15.56	0.65
6	23	13.54	26.67	20.98	0.024	6.75	23.80	0.56
7а	15	15.68	29.42	15.68	0.033	9.05	15.49	0.53
7б	10	13.88	22.57	14.98	0.023	5.80	13.44	0.84
8	19	13.81	29.20	19.73	0.027	8.69	26.89	0.50

Т а б л и ц а 29

Средние физико-механические свойства поверхностного горизонта
берегового грунта прудов на б.Каракубанской

Номер пруда	Песок		Пыль			Ил	Средний диаметр частиц, мм	Потери, %		Плотность, т/м ³
	>0.25 мм	0.25– 0.05 мм	0.05– 0.01 мм	0.01– 0.005 мм	0.005– 0.001 мм	<0.001 мм		при про- каливании	при обра- ботке HCl	
Левый берег										
4	0.53	22.82	21.58	7.23	11.46	36.39	0.044	6.73	18.04	1.21
5	1.17	16.41	30.03	7.86	11.05	33.48	0.039	5.91	14.41	1.34
6	0.36	23.51	20.36	7.59	10.34	37.84	0.044	5.14	20.69	1.47
76	1.37	10.80	30.23	10.05	13.69	33.86	0.032	10.68	9.10	1.10
8	1.11	20.42	20.64	6.26	10.96	40.61	0.042	6.82	17.24	1.35
9	1.79	22.73	22.21	6.28	9.59	37.40	0.048	7.65	9.19	1.26
Среднее	1.06	19.45	24.17	7.54	11.18	36.60	0.041	7.16	14.78	1.29
Правый берег										
4	6.00	7.13	29.34	9.20	12.46	35.87	0.043	26.19	6.78	0.62
5	1.48	10.90	27.93	8.81	12.79	38.09	0.032	7.16	7.68	1.28
6	0.10	15.52	25.63	9.20	11.98	37.57	0.032	6.20	10.16	1.08
76	0.21	14.09	33.38	6.80	12.78	32.74	0.033	5.85	11.68	1.24
8	0.66	17.65	25.82	5.64	12.81	37.42	0.038	6.63	13.08	1.06
9	2.26	12.43	27.84	7.96	14.25	35.26	0.027	24.31	11.92	0.61
Среднее	1.78	12.95	28.32	7.94	12.84	36.17	0.034	12.72	10.22	0.98
Среднее для кас- када	1.42	16.20	26.24	7.74	12.01	36.39	0.039	11.60	14.60	1.32

Т а б л и ц а 30

Средний механический состав поверхностного слоя
донных отложений прудов на б.Каракубанской (по методике Н.А.Качинского)

Номер пруда	Количество проб	>0.25 мм	0.25-0.05 мм	0.05-0.01 мм	0.001-0.005 мм	0.005-0.001 мм	<0.001 мм	Средний диаметр частиц, мм
4	6	0.18	0.72	25.51	10.97	15.62	46.92	0.011
5	8	0.22	1.66	21.24	10.55	19.15	47.18	0.011
6	5	0.23	1.62	25.93	11.38	23.22	37.62	0.013
7а	7	2.45	4.62	23.33	19.38	23.14	27.08	0.025
7б	6	0.27	2.78	33.55	10.50	15.14	37.76	0.017
8	6	1.06	1.28	23.34	10.64	13.46	50.22	0.014
9	7	0.36	3.06	22.34	9.11	16.71	48.42	0.014
Среднее		0.68	2.25	25.03	11.79	18.07	42.18	0.015

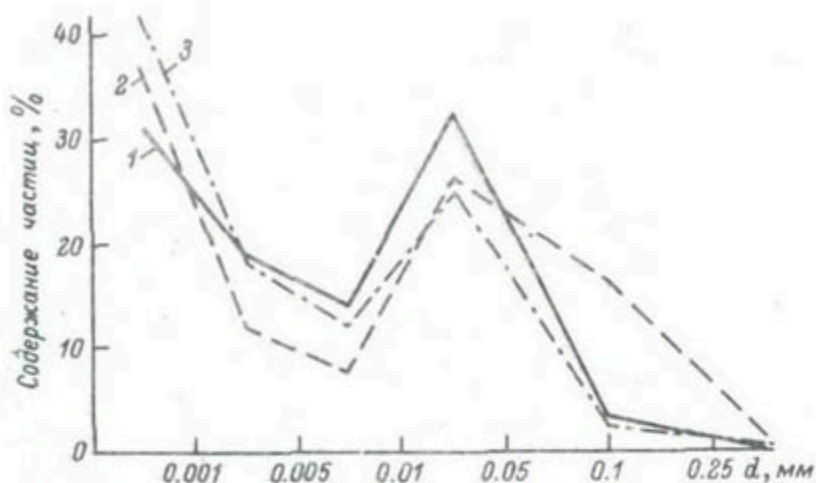


Рис.15. Гистограмма среднего механического состава поверхностного горизонта почвы водосбора (1) б.Каракубанской, берегового грунта (2) и донных отложений (3) прудов.

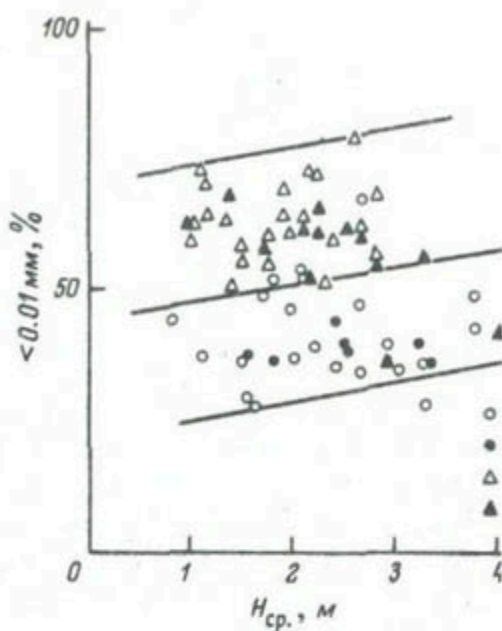
ских свойств прудового ила в течение 1973–1974 гг. шесть раз отбирались пробы поверхностных отложений, преимущественно из приплотинной части прудов. Анализы прудового ила выполнялись по общепринятым методикам (Агрохимические методы исследования почв, 1975).

Механический состав поверхностного слоя отложений всех прудов каскада имеет большое сходство (табл.28) и характеризуется преобладанием фракций мелкой пыли (0.01–0.05 мм) и мелкого ила (0.001–0.005 мм). Средний диаметр поверхностного слоя отложений значительно изменяется по длине каскада (0.021–0.033 мм) и зависит как от уклона частного водосбора пруда ($r = 0.64$), так и среднего диаметра берегового грунта ($r = 0.61$). Это может служить косвенным показателем участия в формировании донных отложений прудов продуктов склонового смыва и размыва берегов.

Между средним механическим составом поверхностного слоя отложений прудов, берегового грунта и почв водосбора заметно большое сходство (рис.15). Средняя крупность поверхностных отложений прудов составляет 0.015 мм и практически равна крупности поверхностного горизонта почвы водосбора (0.016 мм), тогда как средняя крупность поверхностного горизонта берегового грунта (0.039 мм) превышает эти значения в связи с большей подверженностью наиболее крутых прирусловых склонов балки эрозии и дефляции.

Сходство механического состава донных отложений прудов и почв водосбора, отмеченное рядом авторов (Яковлева, 1958, 1960; Сорокин, Яковлева, 1961; Юдин, 1969), является результатом слабой проточности и гидродинамической активности водоемов, а также однообразия механического состава основных источников осадконакопления. В этих водоемах не происходит переработки посту-

Рис.16. Связь среднего содержания частиц $< 0,01$ мм в донных отложениях со средней глубиной прудов Курской области (1), междуречья Хопер-Медведица (2), Азово-Кубанской равнины (3) и Ставропольского плато (4).



павшего осадочного материала, и он откладывается без изменений механического состава (Страхов и др., 1954). Грунт берегов прудов, кроме его поверхностного горизонта, имеет такой же механический состав, что и почвообразующая порода и почва водосбора (табл.2). При большой активности прилегающих склонов в состав осадочного материала возможно некоторое укрупнение механического состава донных отложений по сравнению с таковым почв водосбора, так как по длине инсолируемого склона, являющегося основным поставщиком продуктов склонового смыва, отмечается укрупнение механического состава почвы как в ЦЧО, так и в Предкавказье (Фролов, 1961; Заррин, 1975). Левый инсолируемый склон Каракубанской также имеет более крупный механический состав почвы, чем правый затененный (табл.2). То же относится к механическому составу поверхностного горизонта грунта берегов (табл.29).

Отмеченная рядом исследователей зональность состава донных отложений водохранилищ есть не что иное, как отражение географической зональности почв. Покажем это на примере прудов, изученных Институтом озероведения АН СССР в Курской области (Сорокин, Яковлева, 1961), междуречья Хопер-Медведица (Яковлева, 1958, 1960) и Предкавказья (Шеховцов, Юдин, 1975). Мощные среднегумусные черноземы ЦЧО последовательно сменяют обыкновенные и южные черноземы междуречья Хопер-Медведица, предкавказские карбонатные черноземы и каштановые почвы с параллельным укрупнением механического состава этих типов почв: от суглинистых в ЦЧО к среднесуглинистому во втором районе и тяжелосуглинистому и глинистому в Предкавказье. В связи с этим и донные отложения прудов Предкавказья имеют более тонкозернистый состав, чем отложения прудов ЦЧО и междуречья Хопер-Медведица (рис.16). Данные по последнему району на рис.16 отклонились в пол-

точек лесостепной зоны, что обусловлено положением района на границе лесостепной и степной зон.

Сопоставляя состав донных отложений прудов, необходимо учитывать азональное влияние на него рельефа водосбора или морфометрических характеристик водоемов, зависящих от местоположения водоема в гидрографической сети и в какой-то степени отражающих его высотное положение (Прыткова, 1979). В частности, средняя глубина прудов уменьшается с увеличением порядка водотока, на котором они расположены, т.е. с понижением высоты местности. К тому же, средняя глубина характеризует коэффициент водообмена водоемов (рис.14). В результате отмечается прямая связь между средней глубиной прудов и содержанием частиц менее 0.01 мм в донных отложениях (рис.16).

Аналогичное зональное изменение крупности донных отложений прудов прослеживается на территории УССР (Дрозд, 1954), где наиболее мелким механическим составом отложений характеризуются пруды степной зоны, а самым крупным — водоемы зоны смешанных лесов и лесостепи Донецкого края.

В донных отложениях прудов на б.Каракубанской содержится от 6 до 9% органического вещества (потеря при прокаливании), при этом более высокие его количества — в значительно заросших тростником ($r = 0,70$). Отмеченное в донных отложениях пруда № 9 повышенное содержание органического вещества (8.5%) при относительно небольшой его зарастаемости тростником (13%) объясняется поступлением в него стоков из конного двора, расположенного в приплотинной части правого берега пруда. Проточность прудов (коэффициент водообмена) способствует уменьшению содержания органического вещества в отложениях ($r = -0.73$) за счет более интенсивной его минерализации и выноса в нижний бьеф.

Содержание органического вещества (гумус) в поверхностном слое отложений приплотинной части прудов мало меняется в течение года (табл.31) и остается всегда больше его содержания в почвах водосбора. Вместе с образованием органического вещества в донных отложениях происходит его разрушение и тем интенсивнее, чем больше проточность водохранилища (№ 76) и перемешивание воды ветровым волнением (№ 6). В таких водоемах содержание органического вещества в поверхностном слое отложений остается значительно меньше такового в почвах водосбора (табл.32).

По сравнению с другими обследованными нами прудами Предкавказья (Шеховцов, Юдин, 1975) донные отложения прудов каскада содержат меньше всего органического вещества. По этому показателю пруды каскада также отличаются от прудов на балках Грузской и Плоской, расположенных также в верховьях р.Еи. Донные отложения последних содержат 12–13% органического вещества. Небольшое содержание органического вещества в донных отложениях прудов каскада, несмотря на их значительную зарастаемость тростником, можно объяснить малым содержанием гумуса в почвах

Т а б л и ц а 31

Внутригодовое изменение среднего агрохимического состава
поверхностного слоя прудового ила на б.Каракубанской

Показатели	1973 г.			1974 г.		
	25 VI	23 VII	15 VIII	7-10 III	11-12 VI	15 VI
pH	-	-	-	8.0	8.2	8.0
Карбонатность (CaCO_3), %	-	-	-	10.5	9.1	8.7
Сухой остаток вод- ной вытяжки, мг/100 г	-	-	-	898	1065	1270
Поглощенный Ca, мг-экв./100 г	17.3	16.3	20.0	29.0	25.3	30.6
Поглощенный Mg, мг-экв./100 г	15.3	15.1	14.6	9.8	34.1	35.0
Поглощенный Na, мг-экв./100 г	-	-	-	23.1	7.6	7.9
$\Sigma (\text{Ca} + \text{Mg})$	32.6	31.4	34.6	38.8	59.4	65.6
Ca, % суммы	53.0	52.0	58.0	74.6	42.6	46.6
Ca: Mg	1.14	1.09	1.70	3.00	0.73	0.8
Ппп, %	7.4	7.1	7.4	-	-	-
Гумус, %	4.7	4.3	5.0	4.9	4.5	4.6
Подвижный фос- фор (P_2O_5), мг/100 г	1.9	2.0	2.2	2.2	4.2	3.5
Обменный калий (K_2O), мг/100 г	-	-	-	93.3	101.5	101.0

водосбора (3.8-4.1%) и быстрой минерализацией органического вещества в условиях мелководных водоемов.

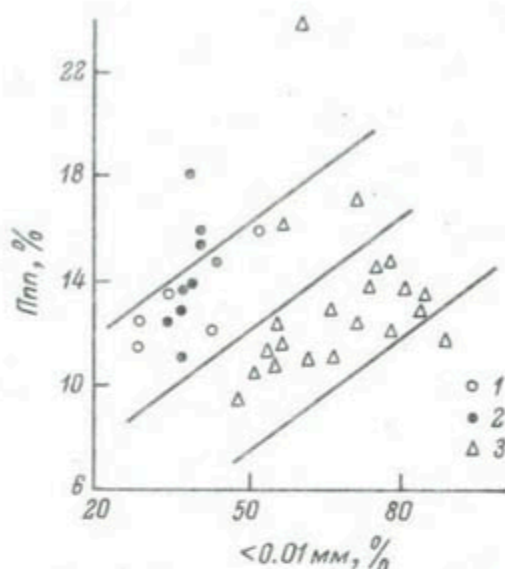
Пруды Предкавказья характеризуются меньшим содержанием органического вещества в донных отложениях, чем пруды Курской области и междуречья Хопер-Медведица (рис.17). Это является отражением зонального изменения содержания гумуса в почвах водосбора. Влияние органического вещества автохтонного происхож-

Т а б л и ц а 32

Изменение среднего агрохимического состава поверхностного слоя ила по длине каскада прудов на б.Каракубанской

Номер пруда	рН	Карбо- натность (CaCO_3), %	Сухой остаток водной вытяжки, мг/100 г	Поглощенные основания, мг-экв./100 г грунта				$\frac{\text{Ca}}{\text{Ca}+\text{Mg}}$, %	Органическое вещество, %		Питательные ве- щества, мг/100 г. грунта	
				Ca	Mg	Na	Ca+Mg		Ппп	гумус	подвиж- ный фосфор	обмен- ный ка- лий
4	8.0	10.0	1097	22.6	20.0	11.7	42.6	53.0	7.3	4.7	2.2	87.4
5	8.1	6.4	962	26.7	19.7	12.6	46.4	57.8	7.7	5.0	1.9	73.3
6	8.1	13.2	1065	21.8	21.4	13.0	43.2	50.4	6.3	3.3	1.7	82.2
7	7.9	9.4	1390	30.2	24.0	14.3	54.2	55.6	—	6.1	5.3	90.4
7а	8.0	6.8	1047	23.1	26.6	7.6	49.7	46.6	8.0	5.1	3.0	126.0
7б	8.0	6.1	683	17.5	22.2	6.6	39.7	44.0	4.8	3.1	2.7	59.2
8	8.1	12.0	1195	23.7	20.7	12.0	44.4	53.5	8.8	5.5	3.0	106.0
9	8.2	9.4	1100	23.8	22.6	15.5	46.4	51.4	8.3	5.2	3.8	159.0

Рис.17. Связь содержания органического вещества (потери при прокаливании) с содержанием частиц $< 0,01$ мм в донных отложениях прудов Курской области (1), междуречья Хопер-Медведица (2) и Предкавказья (3).



дения на общее его содержание в отложениях проявляется через отклонение данных по отдельным прудам от общей закономерности, свойственной природной зоне. Особенно это относится к прудам степной зоны, где в связи с большой биомассой тростников ($4-8 \text{ кг/м}^2$ в сыром весе) заросшие и незаросшие пруды значительно различаются по содержанию органического вещества в донных отложениях. Пруды Курской области относятся к числу незаросших, и органическое вещество в донных отложениях имеет преимущественно аллохтонное происхождение (Яковлева, 1960). Следовательно пруды разных природных зон различаются не только по количеству органического вещества в донных отложениях, но и его генезису.

Общее содержание солей в донных отложениях прудов характеризуется потерями при обработке образца HCl (Наставление..., 1957) в связи с подготовкой его к механическому анализу. В процессе обработки образец освобождается от солей, преимущественно карбонатных, вызывающих коагуляцию частиц в растворе. Отложения прудов на б. Каракубанской содержат от 13 до 27% солей (табл. 28), тогда как почвы водосбора — только 4.5% (Агрохимическая характеристика..., 1964), а поверхностный слой берегового грунта — 7–21% (табл. 29). При этом грунт левого инсолируемого берега засолен значительно больше (в среднем 15%), чем правого затененного (10%). Между содержанием солей в донных отложениях и грунтах берега существует тесная связь ($r = 0.96$), которую можно объяснить водообменом прудовых и грунтовых вод в берегах, способствующим накоплению солей в берегах. Поскольку почвы водосбора и береговой грунт содержат солей меньше, чем донные отложения, то можно предположить о существовании дополнительного источника их образования, которым может быть их выпадение из водной массы (Тарасов, 1961; Баранов, Кодича, 1964; Кожухарь, 1964; Бочков, 1965; Баранов, Быстров, 1973). Пруды отличаются высокой фотосинтетической активностью водорослей, обусловленной большой прогреваемостью воды, застойным

характером водоемов, обилием в них фитопланктона. Поэтому часто в период „цветения“ прудов образуется карбонат кальция в виде минералов кальцита и арагонита, выпадающих в осадок (Коненко, Кузьменко, 1971).

Содержание солей в донных отложениях прудов на б.Каракубанской превышает таковое в донных отложениях ранее обследованных прудов Предкавказья (Шеховцов, Юдин, 1975) и сопоставимо лишь с их содержанием в донных отложениях прудов на р.Этоке (21–27%). Отложения прудов на балках Плоской и Грузской (бассейн р.Еи) содержат всего 13–16% солей. Донные отложения прудов УССР, согласно Н.И.Дрозду (1954, 1962), в зависимости от их механического состава содержат от 10–40% (глинистые отложения) до 0.1–1.0% солей (гравелисто-щебенчатые отложения).

Карбонатность донных отложений прудов на б.Каракубанской изменяется от 6 до 13% (табл.32) и почти в четыре раза превышает таковую почв водосбора (2.4–3.6%). В период ледостава (март 1974 г.) содержание CaCO_3 в отложениях несколько возрастает (табл.31) по сравнению с летним сезоном. В составе труднорастворимых солей на долю карбоната кальция приходится в среднем 50% (табл.28, 32). Содержание CaCO_3 в илах прудов сопоставимо с его величиной в донных отложениях водохранилищ Молдавии (Кожухарь, 1964), где отмечается уменьшение карбоната кальция от 6–14% в поверхностном слое до 4–7% в глубинных слоях в связи с растворением в толще илов карбонатов выделяющейся углекислотой.

Прудовый ил содержит в 5–15 раз больше водно-растворимых солей, чем почвы водосбора (0.12%). Сухой остаток водной вытяжки из отложений увеличивается в летние месяцы до 1.3%, тогда как в подледный период не превышает 0.9% (табл.31).

Таким образом, донные отложения прудов на б.Каракубанской содержат солей (потери при обработке HCl , карбонат кальция, сухой остаток водной вытяжки) больше, чем почвы водосбора. Содержание солей в отложениях возрастает в заросших тростником прудах, которые характеризуются слабой проточностью. Последняя наибольшее влияние оказывает на содержание водно-растворимых солей ($r = -0.81$).

Донные отложения прудов исследованного каскада содержат меньше поглощенного кальция (табл.32), чем почвы водосбора (33–34 мг-экв./100 г почвы). Это связано с большой зарастаемостью прудов тростником. При отмирании тростника происходит распад его биомассы и возврат солей и органических веществ в воду и частично в толщу иловых отложений (Временные указания..., 1957). Поэтому отмечается тесная связь ($r = 0.85$) между содержанием поглощенного кальция в донных отложениях и относительной площадью тростников.

Прудовый ил по сравнению с почвами водосбора характеризуется более высоким содержанием поглощенного магния (табл.32), которое превышает таковое в илах днепровских водохранилищ (2–6 мг-

экв./100 г) (Паламарчук, 1972). В подледный период его содержание в прудовом илу падает до 10 мг-экв./100 г и возрастает до 35 мг-экв./100 г в летние месяцы (табл.31).

Сумма поглощенных оснований $\text{Ca} + \text{Mg}$ в донных отложениях составляет в среднем 46 мг-экв./100 г и сопоставима с таковой в верхнем горизонте почвы (44–47 мг-экв./100 г). Соотношение $\text{Ca} : \text{Mg}$ в отложениях прудов в среднем равно 1.4 против 2.7–3.3 в почвах водосбора и 5–14 в отложениях днепровских водохранилищ (Паламарчук, 1972).

Не ставя перед собой задачу оценки удобрительных свойств прудового ила, которая входит в компетенцию специалистов другого профиля, отметим, что в отложениях малых водохранилищ накапливаются многие химические соединения, в том числе и питательные вещества (табл.31, 32).

Химический состав ила в удобряемых прудах, используемых для рыборазведения, отличается от такового обычных прудов, какими являются пруды каракубанского каскада. Анализ образцов ила, взятых в июне 1973 г. из пруда Калниболотского рыбхоза, показал, что среднее содержание гумуса в поверхностном слое отложений составляет 5.5% против 4.8% в отложениях каракубанских прудов. Содержание подвижного фосфора в отложениях пруда рыбхоза было равно 7.4 мг/100 г, тогда как в это же время в прудах на б.Каракубанской оно составляло 1.9 мг/100 г.

Колонки отложений, отобранные из прудов на б.Каракубанской, показали, что средний диаметр отложений в приплотинной части пруда № 4 увеличивается по направлению к поверхности (рис.18, а), в средней части — уменьшается в том же направлении (рис.18, б), и в самой верхней — почти не меняется по глубине (рис.18, в). Укрупнение механического состава отложений по направлению к поверхности в приплотинной части прудов № 4 и 6 (рис.18, а, а) связано с накоплением здесь продуктов размыва плотины. В средней части пруда № 4 откладываются преимущественно продукты взмучивания донных отложений на мелководных участках, а в тростниках, где донные отложения не подвержены взмучиванию, механический состав отложений по вертикали стабилен. Для сравнения на том же рисунке показано изменение механического состава отложений по длине колонок, отобранных из прудов на водосборе р.Томузловки (Прыткова, 1966; Шеховцев, 1969). Здесь сильные ливни способствуют поступлению в водоем крупнозернистого материала, особенно если на водосборе есть действующие овраги (пруды №№ 2, 63). Более резко изменение механического состава отложений выражено на совсем малых водоемах — объемом менее 5 тыс.м³ (пруды № 2, 63). В пруду № 21, объем которого равен 13 тыс.м³, изменение среднего диаметра отложений по длине колонки еще хорошо заметно, а в пруду № 22 ($V = 35$ тыс.м³) — уже слабо.

Содержание органического вещества на разных горизонтах в одном случае связано с изменением механического состава отложений (рис.18, е–и), а в другом — почти не зависит от него (рис.

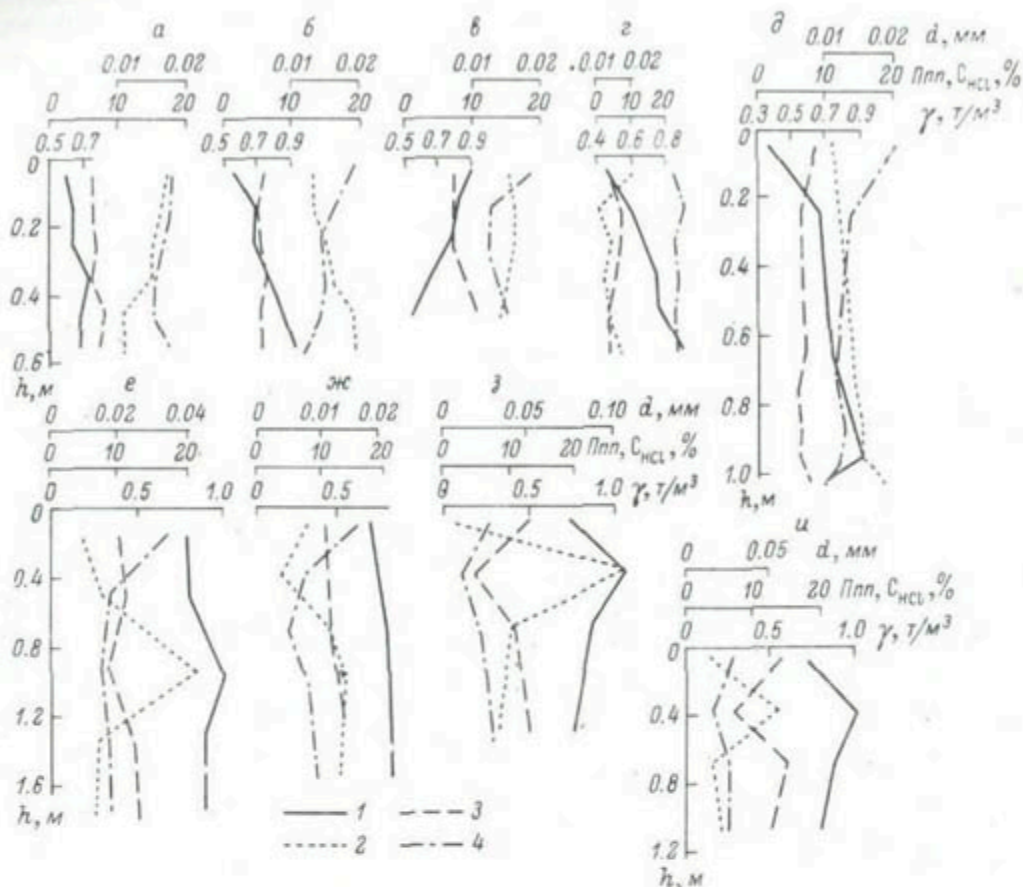


Рис.18. Изменение физико-механических свойств отложений по длине колонок, отобранных из прудов Предкавказья.

ВОДОСБОР Б.КАРАКУБАНСКОЙ: а-в - пруд № 4 (а - приплотинная часть, б - средняя, в - верхняя); г - пруд № 6; д - пруд № 9. ВОДОСБОР р.ТОМУЗЛОВКИ: е - пруд № 2; ж - пруд № 22; з - пруд № 63; и - пруд № 21.

1 - плотность; 2 - средний диаметр; 3 - потери при прокаливании; 4 - потери при обработке HCl.

18, а-д). Очевидно, в первом случае органическое вещество имеет преимущественно аллохтонное происхождение, а во втором - автохтонное. Увеличение содержания органического вещества в поверхностном слое отложений прудов ЦХО по сравнению с более глубокими горизонтами, отмеченное Л.В.Яковлевой (1960) и связанное с осадением на дно отмирающего фитопланктона, на прудах Предкавказья наблюдается не всегда (рис.18).

Обращают на себя внимание большие потери от обработки HCl в поверхностном слое отложений (рис.18). Видимо, это обусловлено выпадением солей из водной массы прудов и растворением карбонатов в толще илов. На глубине более 30-40 см от поверхности отложений содержание солей относительно стабильное.

Т а б л и ц а 33

Средний состав (в %) донных отложений прудов на б.Каракубанской

Номер пруда	Потери		Минеральные частицы	Отношение содержания минеральных частиц в донных отложениях к таковому в почве водосбора
	при прокаливании	при обработке HCl		
4	6.3	16.1	77.6	0.85
5	8.8	19.2	72.0	0.78
6	4.9	22.7	72.4	0.79
7а	8.4	15.1	76.5	0.84
7б	5.9	13.2	80.9	0.88
8	7.9	17.0	75.1	0.82
9	7.6	15.1	77.3	0.84
Среднее	7.1	16.9	76.0	0.83

Годичная и сезонная слоистость донных отложений, наблюдаемая в озерах (Перфильев, 1972) и некоторых водохранилищах (Виноградова, 1969), в прудах не выявлена. В этих мелководных водоемах поверхностный слой отложений подвергается взмучиванию на значительной площади и трансседиментация нарушает хронологическую последовательность в накоплении частиц. Этому же способствует сползание разжиженного поверхностного грунта по уклону.

Среднее содержание органического вещества и солей по всей массе отложений (табл.33), полученное с учетом всех проб (поверхностных и глубинных), отличается от состава поверхностных отложений (табл.28). Если представить, что отложения состоят из наносов (минеральных частиц), органического вещества и солей которые в сумме составляют 100%, то окажется, что наносы в отложениях содержится от 72 до 81% (табл.33), в то время как в почве водосбора - 91.5%. Соотношение между содержанием наносов в донных отложениях и почве водосбора для отдельных прудов каскада изменяется от 0.78 до 0.88 и использовано нами, как будет показано в следующей главе, для определения склонового смыва почвы в пруды каскада.

3.4. Мощность отложений

Неравномерность распределения мощности отложений по ложу свойственна всем водоемам замедленного водообмена и обусловлена морфологией чаши, с которой связана гидродинамическая активность ее отдельных частей, количеством и механическим составом грунтообразующего материала, размещением его источников по длине водоема, а также сползанием разжиженного поверхностного слоя отложений по уклону.

Продольный профиль отложений в прудах каскада характеризуется увеличением мощности отложений по направлению к плотине (табл.34). Это свойственно большинству прудов, отличающихся слабой проточностью и небольшой длиной, благодаря которой в период проточности прудов к плотине подходит поток с большим содержанием наносов. Кроме того, в приплотинной части прудов откладываются продукты размыва и оползания верхнего откоса плотины, а также взмучивания донных отложений в прибрежной части. Коэффициент неравномерности распределения отложений по длине бьефа (отношение среднего слоя отложений в водоеме к его значению в приплотинной части), как правило, меньше 1.0 (табл.34). Его значение для 55 прудов Молдавии и юга Украины изменялось от 0.42 до 0.45 (Молдованов, 1965), а для 92 прудов Северного Кавказа — от 0.22 до 0.50 (Юдин, 1971).

Форма чаши водохранилища, показателем которой автор принял отношение длины водоема к наибольшим ширине и глубине, в значительной степени определяет продольный профиль отложений. В прудах с показателем формы чаши более $3-4 \text{ м}^{-1}$ формируется продольный профиль отложений с наибольшей мощностью у плотины. Водохранилища, показатель формы чаши которых составляет $0.6-2.0 \text{ м}^{-1}$ („Волчы Ворота“, Борщенское, Успенское), имеют неустойчивый продольный профиль отложений. В зависимости от выноса в водоем наносов основными водотоками в дождевые паводки равномерное распределение отложений по длине его бьефа сменяется неравномерным. При этом наибольший слой отложений может быть как в верхней, так и приплотинной части водохранилища, а коэффициент неравномерности слоя отложений — больше и меньше 1.0 (табл.34). В водохранилищах с показателем формы чаши менее 0.1 м^{-1} (Отказненское, Мингечаурское), расположенных на реках с большим содержанием наносов (2.5 кг/м^3), есть все предпосылки для образования гряды или дельты из речных наносов в верхней части водохранилища. Можно заметить, что коэффициент неравномерности распределения мощности отложений по длине бьефа растет с увеличением наибольшей глубины водохранилища ($r = 0.74$) и уменьшением показателя формы чаши водоема ($r = -0.82$).

Таким образом, устойчивой формой продольного профиля отложений характеризуются самые малые водохранилища (пруды) с показателем формы чаши более 3 м^{-1} и глубоководные водохранилища с показателем формы чаши менее 0.1 м^{-1} . В первом случае

Т а б л и ц а 34

Коэффициент неравномерности распределения мощности
отложений в водохранилищах

Водохранилище	Год обсле- дова- ния	Слой отло- жений, м		$\frac{h_{\text{ср}}}{h_{\text{пл}}}$	Пока- за- тель фор- мы чаши, м ⁻¹	Источ- ник
		сред- ний ($h_{\text{ср}}$)	у пло- тины ($h_{\text{пл}}$)			
Каракубанский каскад	№ 4	1975	0.49	0.81	0.6	5.4
	№ 5		0.36	0.47	0.8	5.5
	№ 6		0.63	0.94	0.7	11.0
	№ 7а		0.32	0.32	1.0	3.4
	№ 7б		0.53	0.54	1.0	1.0
	№ 8		0.34	0.42	0.8	4.4
Борщенское	№ 9		0.53	0.99	0.5	1.9
		1956	0.22	0.20	1.1	2.1
Успенское		1959	0.29	0.25	1.2	Лопатин 1961
		1956	0.08	0.07	1.1	1.3
„Волчьи Ворота“		1959	0.10	0.12	0.8	Лопатин 1963
		1964	0.12	0.20	0.6	0.6
Отказненское		1967	0.20	0.20	1.0	Юдин, 1
		1966	0.07	0.04	1.8	0.08
		1968	0.27	0.17	1.6	Юдин, 18
Мингечаурское		1970	0.36	0.17	2.1	
		1964	0.35	0.19	1.8	0.06
		1966	0.43	0.23	1.9	Тарверд ев, 197

продольный профиль отложений характеризуется наибольшей мощностью в приплотинной части, а во втором — в верхней части водохранилища. Промежуточным значениям показателя формы чаши соответствует неустойчивый продольный профиль отложений.

Распределение слоя отложений по ложу водоема, наряду с изолиниями мощности отложений на плане водохранилища, можно представить в виде графика связи мощности отложений на вертикали с ее рабочей или начальной (до заиления) глубиной (Матарзин, Мацкевич, Сорокина, 1968; Виноградова, Мартынова, 1973; Прыткова, 1975б, 1979).

На графиках связи слоя отложений с начальной глубиной вертикали выделяется одна (рис.19, а) или несколько линий связи (рис. 19 б, в). В первом случае можно говорить об однородных условиях осадконакопления в водоеме, а во втором — о неоднородных. Приплотинный створ 1, как правило, характеризуется большим слоем отложений, чем вышерасположенный створ 2, при одном и том же значении глубины на вертикали (рис.19, б, в) в связи с отложением здесь продуктов размыва берегов и ложа, взмучивания донных отложений, а также наносов, образовавшихся за счет размыва и оползания верхового откоса плотины. Начиная со створа 2, интенсивность заиления возрастает по направлению к верховью пруда, заросшему тростником. Это видно по смещению линий связи мощности отложений с глубиной вертикали на отдельных створах прудов (рис.19). При одной и той же глубине в верховье пруда осаждается больше наносов, чем в приплотинной части. Этому способствует зарастание его тростником, задерживающим наносы и дающим органический опад.

При детальном (через 1.0–2.5 м по ширине) зондировании отложений береговой зоны прудов на графиках связи $h = f(H_0)$, построенных для отдельных створов, выделяется нижний участок линии связи, характеризующийся слабым нарастанием слоя отложений с увеличением начальной глубины вертикали и относящийся к прибрежной зоне пруда. Здесь благодаря частому взмучиванию отложений их накопления не происходит. Зоне аккумуляции наносов на графике связи $h = f(H_0)$ соответствует верхний участок линии связи, отличающийся от нижнего более интенсивным нарастанием слоя отложений с увеличением глубины вертикали.

Этот способ представления распределения мощности отложений по ложу водохранилища имеет ряд преимуществ перед способом изолиний слоя отложений. Прежде всего построение графика связи $h = f(H_0)$ ведется в полевых условиях, и в процессе зондирования мощности отложений есть возможность проконтролировать сомнительные данные. Далее, отпадает вопрос о необходимом количестве зондировочных вертикалей, поскольку исполнитель при построении графика следит за равномерным освещением зондировочными данными всего диапазона глубин на створе. С помощью таких графиков связи можно более обоснованно произвести районирование

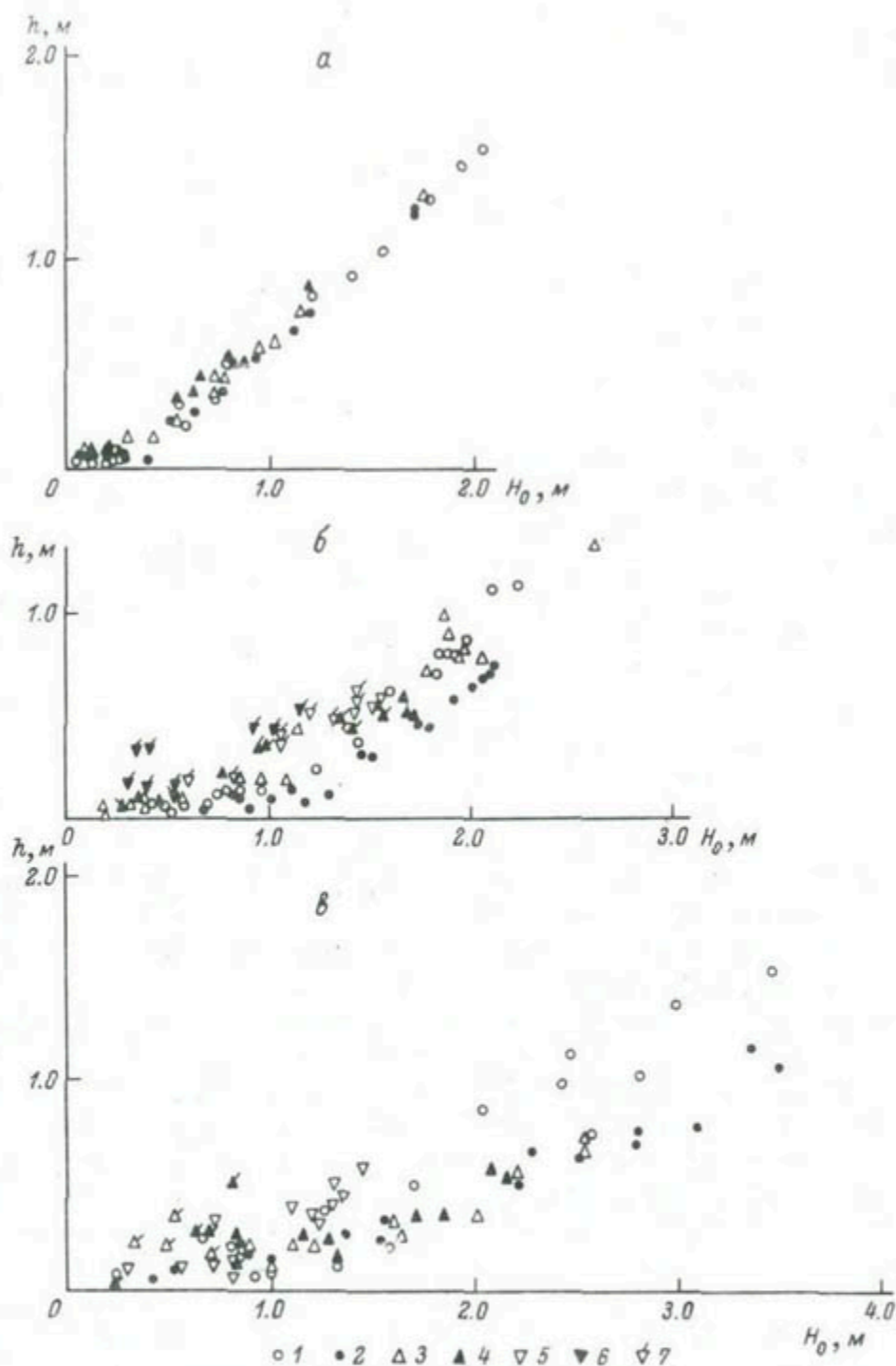


Рис.19. Связь мощности отложений с начальной (до заиления) глубиной на вертикали прудов № 4(а), № 6(б) и № 9(в) на б. Каракубанской.

1-6 - номера створов от плотины соответственно, 7 - вертикаль в тростниках.

водохранилища по условиям осадконакопления с выделением прибрежной полосы и участков по его длине в зависимости от числа линий связи на графике.

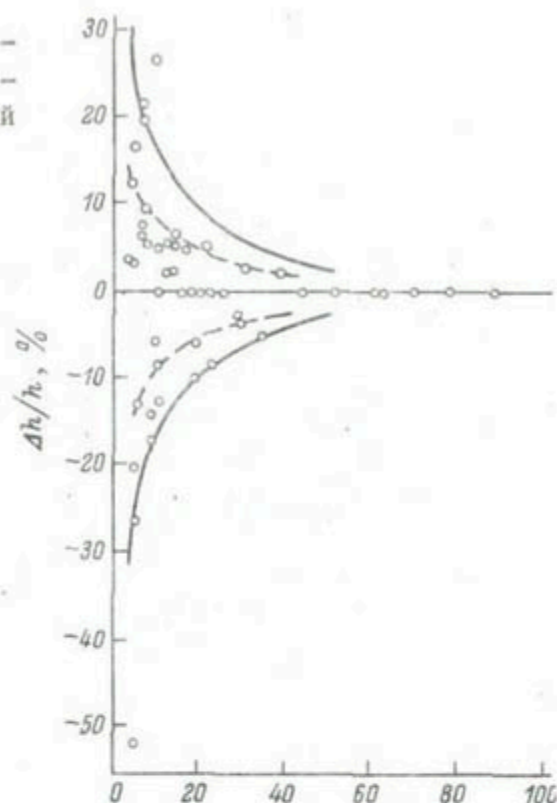
3.5. Точность определения объема отложений

В связи с использованием данных по заилению прудов для оценки стока наносов временных водотоков и разработки методов расчета этого явления необходимо знать точность определения объема отложений в процессе полевых и камеральных работ. Средняя квадратическая ошибка определения объема отложений в прудах вычислялась методом частных погрешностей с учетом ошибок отдельных операций (Карасев, 1971). Полевые работы, связанные с мензурной съемкой прудов, промером глубин по перекинутому через пруд тросу, выполняются достаточно точно ($\pm 4-5\%$). Ошибка зондирования мощности отложений при илистых и слабоуплотненных грунтах также не выходит из указанного предела, но значительно возрастает на песчаных и уплотненных грунтах.

Выполненные в 1975 г. детальные зондировочные работы на прудах каскада, где в зависимости от размера водоема назначалось от 18 до 88 зондировочных вертикалей, позволили статистическим методом определить ошибку дискретности, обусловленную количеством зондировочных вертикалей и их размещением по акватории пруда. Для этого путем последовательного сокращения числа зондировочных вертикалей были вычислены для каждого случая средние арифметические значения слоя отложений, а затем их средние квадратические отклонения от среднего слоя отложений при наибольшем количестве зондировочных вертикалей. Расчеты показали, что ошибка дискретности при сокращении числа зондировочных точек от 30 до 10 увеличивается от 2,6 до 14,6% (рис.20). При количестве зондировочных вертикалей 20-25 ошибка дискретности составляет 7-8%. Приведенные данные относятся к случаю, когда зондировочные вертикали распределяются по ширине пруда неравномерно: в береговой зоне через 1,0-2,5 м, а в глубоководной — через 5-10 м по ширине.

Объем отложений в прудах определялся планиметрированием изолиний слоя отложений на планах водоемов — способом, хорошо известным (Юдин, 1971) и считающимся наиболее точным (Heinemann, Dvorak, 1963). Кроме того, объем отложений может быть вычислен по площади заиления на поперечных профилях (Воскресенский, 1956) или среднему слою отложений на тех же профилях (Наставление..., 1973). Простой и, как будет показано ниже, достаточно точный способ оценки объема отложений по их среднему слою в разных интервалах глубин водоема (Зиминова, Кудрин, 1968) при обработке данных по заилению прудов не применялся.

Рис.20. Изменение ошибки дискретности в зависимости от числа зондировочных вертикалей на прудах б.Каракубанской.



Все методы, различающиеся трудоемкостью, проверены на материалах по заилению прудов каракубанского каскада и показали вполне сопоставимые результаты. Если в качестве эталонного принять способ изолиний слоя отложений, то относительная средняя квадратическая ошибка определения объема отложений в пруд каскада по среднему слою отложений в интервалах глубин состав $\pm 10.6\%$, а по площади заиления на поперечниках — $\pm 12.2\%$. Близкие результаты получил Е.А.Юдин (1973) для прудов Северного Кавказа.

В результате полевых и камеральных работ объем отложений прудов каскада, как показал расчет средней квадратической ошибки способом частных погрешностей, вычисляется при благополучном сочетании ошибок элементов (при их минимальных значениях: с погрешностью $\pm 14.4\%$, а при неблагоприятном — $\pm 18.4\%$. Следовательно, общий объем отложений в прудах при количестве зондировочных вертикалей не менее 20–25 и освещении ими всего диапазона изменения глубин может быть получен с приемлемой точностью (± 14 – 18%).

Зондировочные работы на прудах обычно производятся в летнее время, когда часть отложений находится уже в осушаемой зоне. На долю этой части отложений в прудах каскада приходится 127–35% общего их объема. В старых прудах (№ 6) зондировочная трубка не всегда проходит всю толщу уплотненных отложений, определение неотзондированной их части производится путем сопоставления поперечных профилей в приплотинной части пруда и ниж

Т а б л и ц а 35

Показатели заиления прудов на водосборе б.Каракубанской

Но- мер пруда	Период эксплуата- ции		Началь- ный объ- ем прудов, тыс.м ³	Площадь зеркала, тыс.м ²	Объем отло- жений		Средний слой отложений, см		Относитель- ный объем заиления, %		Средняя плот- ность отложе- ний, т/м ³	Масса отложений	
	годы	число лет			общий, тыс.м ³	за год, м ³	общий	за год	общий	за год		общая, тыс.т	за год, т
1	1947-1960	14	-	4.3	0.84	60	20	1.4	-	-	(0.75)	0.63	45
2	1955-1960	25	-	11.2	1.12	44	10	0.4	-	-	(0.75)	0.92	33
3	1905-1960	56	-	9.9	3.2	58	32	0.6	-	-	(0.75)	2.4	44
4	1930-1975	45	83.0	61.8	24.0	534	39	0.9	29.0	0.6	0.74	17.7	394
5	1958-1975	17	25.6	26.9	7.44	438	28	1.6	29.0	1.7	0.77	5.7	336
6	1894-1975	81	137.0	73.5	52.0	640	87	1.1	38.0	0.5	0.71	36.9	455
7а	1901-1975	74	62.0	21.4	37.0	500	173	2.3	59.5	0.8	0.75	27.8	375
7б	1966-1975	9	3.4	2.69	1.26	140	47	5.2	37.0	4.1	0.99	1.2	139
8	1951-1975	24	34.3	27.5	9.69	404	35	1.5	28.3	1.2	0.79	7.6	320
9	1941-1975	34	84.5	41.0	21.0	618	51	1.5	24.9	0.7	0.68	14.3	420
10	1950-1975	25	10.9	13.0	5.0	200	38	1.5	45.8	1.8	0.88	4.4	176

нем бьефе. С учетом как покрытых, так и не покрытых водой положений показатели заиления прудов каскада представлены табл.35.

3.6. Плотность отложений

Для перехода от объема отложений к их массе необходимо знать плотность не только отдельных проб, но и среднюю всей толщи отложений. Отбор проб отложений с ненарушенной структурой входит в состав полевых работ по обследованию заиления прудов.

Наиболее изученной оказалась плотность поверхностного слоя отложений в прудах и факторы, ее определяющие (Мялковский Дрозд, 1947; Прыткова, 1960, 1966; Яковлева, 1960, 1961а, 1961б; Лисицына, 1960; Шеховцов, 1969, 1971). Для ее определения построены различные графические зависимости, которые учитывают влияние на плотность влажности образца, содержания органического вещества, среднего диаметра отложений или содержания в них частиц менее 0.01 мм (Яковлева, 1960, 1965; Шеховцов, 1969; Буторин, Зимникова, Курдин, 1975).

Плотность поверхностного слоя отложений прудов на б.Каракубанской составляет 0.5-0.8 т/м³ (табл.28) и значительно меньше плотности берегового грунта (1.0-1.3 т/м³). В обсыхающей части прудов плотность поверхностного слоя отложений, по данным В.А. Лепской, достигает 1.4-1.6 т/м³ и уменьшается до 1.2-1.3 т/м³ на глубине 50-55 см от поверхности. В обсохших прудах МСС плотность поверхностного слоя отложений составляла 1.0-1.4 т/м³ (Прыткова, 1960). Ежегодным пересыханием прудов Северного Кавказа объясняет К.Н.Лисицына (1960) большую плотность отложений в них (1.0-1.2 т/м³). Отложения в обсохшей части прудов подвергаются необратимым изменениям: уплотняются и при очередном покрытии их водой не восстанавливают своего первоначального объема. Подтверждением этому служит сохранение комковатой структуры отложений в колонках. Поэтому более высокие значения плотности отложений в прибрежной и верхней частях прудов связаны не только с механическим составом отложений и содержанием в них органического вещества, но и уплотнением отложений в результате их пересыхания.

По мере накопления отложений нижние их слои подвергаются гравитационному уплотнению, и плотность отложений возрастает по направлению от их поверхности к начальному ложу пруда (рис.18). В отдельных случаях эта закономерность нарушается поступлением в пруд наносов с аномальной крупностью (рис.18, з, и). Уплотнение отложений по вертикали хорошо выражено в прудах на б.Каракубанской (рис.18, а, б, г, д). В приплотинной и средних частях пруда № 4 отмечается увеличение плотности по длине колонки, тогда как в верхней его части (рис.18, в), подверженной периодическому обсыханию, плотность отложений увеличивается по

направлению к поверхности, достигая $0,9 \text{ т/м}^3$ и значительно превышая таковую в прилотинной части водоема ($0,4\text{--}0,6 \text{ т/м}^3$). В расчетных зависимостях для определения средней плотности отложений в водохранилищах уплотнение их учитывалось введением в формулу продолжительности эксплуатации водоема (Мялковский, Дрозд, 1947; Lane, Koelzer, 1943; Miller, 1953) или мощности отложений (Прыткова, 1966; Heinemann, 1962).

Формула автора для определения средней плотности отложений в прудах имеет вид

$$\gamma_{\text{ср}} = \gamma_{0,\text{ср}} \left(1 + \frac{\alpha}{n+1} h_{\text{ср}}^n \right), \quad (3.1)$$

где $\gamma_{\text{ср}}$ — средняя плотность отложений, г/см^3 ; $\gamma_{0,\text{ср}}$ — средняя плотность поверхностного слоя отложений, г/см^3 ; $h_{\text{ср}}$ — средний слой отложений, см; α и n — параметры.

Плотность свежевывавших (неуплотненных) отложений вычисляется по формуле

$$\gamma_0 = 1,7d^{0,15} - 0,3l^{0,2} + 0,01C_{\text{HCl}}^{0,9}, \quad (3.2)$$

где d — средний диаметр отложений, мм; l — потери при прокаливании, %; C_{HCl} — потери при обработке HCl , %.

Показатель степени n в формуле (3.1) определяется в зависимости от крупности отложений из выражения

$$n = \frac{0,064}{d^{0,27}}. \quad (3.3)$$

Параметр α в формуле (3.1) в ее начальном варианте был принят постоянным (0,27). Исследования на прудах каракубанского каскада показали связь параметра α с коэффициентом водообмена (коэффициент корреляции $r = 0,98$), которую можно представить в виде

$$\alpha = 0,06 \left(\frac{C}{W} \right)^{0,6}, \quad (3.4)$$

где C/W — коэффициент водообмена прудов.

Средняя квадратическая ошибка расчета параметра α по формуле (3.4) равна 20,4%. Возможность использования этой формулы для прудов других природных районов требует дополнительной проверки, которая в настоящее время затруднена в связи с отсутствием фактических данных о проточности прудов. Имеющиеся в нашем распоряжении сведения о составе донных отложений по длине колонок, отобранных из водохранилищ „Волчьих Ворота“, Отказненского, Мингечаурского (Тарвердиев, 1974), для которого примени-

Т а б л и ц а 36

Значение параметра α в формуле (3.1)

Водоток, на котором расположен каскад прудов	Число колонок отложений	Средний диаметр, мм	Ппп,	C_{HCl}	α
			%		
Водосбор р.Томузловки					
Ручей Халявинский	5	0.009-0.024	9,5-11.7	5.9-18.6	0.18-0.2
Балка Горькая	1	0.025	11.9	5.9	0.18
Река Дубовка	1	0.010	11.6	8.8	0.23
Балка Исакова	2	0.022-0.045	9.7-13.4	5.3-7.4	0.17-0.2
Балка Грушевка	2	0.023-0.029	9.0-10.1	6.7-11.1	0.16-0.2
Балка Грязнушка	1	0.012	13.2	15.1	0.22
Река Калиновка	1	0.005	14.9	11.9	0.27
Балка Журавочка	2	0.011-0.014	12.6-12.8	9.6-11.7	0.21-0.2
Водосбор р.Кумы					
Река Татарка	1	0.043	9.4	5.7	0.15
Река Мокрый Карамык	5	0.008-0.018	11.3-14.2	5.6-11.0	0.19-0.2
Река Этока	4	0.008-0.015	11.3-19.0	13.5-27.7	0.20-0.2
Река Мокрая Буйвола	2	0.012-0.033	11.9-14.0	7.5-14.1	0.19-0.2
Река Дурнушка	1	0.013	12.3	7.8	0.21
Водосбор р.Еи					
Балка Грузская	1	0.017	9.7	13.8	0.19
Балка Каракубанская	9	0.014-0.022	4.9-7.9	15.1-22.7	0.008-0.2

доема (органическое вещество, продукты хемогенной седиментации); R_c - сброс наносов в нижний бьеф; R_x - изъятие наносов при заборе воды на хозяйственные нужды; R_0 - осадконакопление; R_{63} - изменение количества взвесей за расчетный период ΔR - невязка баланса. Все составляющие в уравнении (4.1) имеют размерность массы.

мость формулы (3.1) проверялась Р.Б.Тарвердиевым на большом материале, Борщенского (Яковлева, 1961б), показали, что расхождения между вычисленными по формуле (3.4) и фактическими значениями параметра α для водохранилищ Отказненского и Борщенского соответственно равны -11 и -29%. Для двух других водохранилищ эти расхождения больше. Фактическое значение параметра α для водохранилища „Волчьих Ворота“ равно 0.16, а для Мингечаурского - 0.12.

Значение параметра α для конкретных водоемов может быть установлено на основе анализа изменения плотности отложений по длине колонок (табл.36). Обращают на себя внимание в табл.36 довольно устойчивые в пределах отдельных каскадов прудов значения параметра α , что может быть косвенным показателем относительно одинаковой проточности этих водоемов. Для большинства прудов на водосборе р.Кумы параметр α меняется в небольшом пределе (0.18-0.23) и в среднем равен 0.21.

Средняя плотность отложений прудов на б.Каракубанской (табл. 35) вычислена по формуле (3.1). При этом для прудов № 4, 6, 7б, 8 и 9 приняты фактические значения параметра α , а для прудов № 5 и 7а - определены по формуле (3.4).

Г л а в а 4. СЕДИМЕНТАЦИОННЫЙ БАЛАНС ПРУДОВ

Способ выражения процессов превращения вещества и энергии в водоемах замедленного водообмена в форме баланса был предложен Л.Л.Россолимо (1934) и в настоящее время широко используется в лимнологических исследованиях. Седиментационный баланс прудов позволяет дать не только количественную оценку отдельным источникам накопления донных отложений, наносодерживающей способности водоемов, но и методически обосновать возможность использования многочисленных данных по заилению прудов для оценки слабо изученного стока наносов малых водотоков и склонового смыва.

Седиментационный баланс водохранилищ в отличие от водного составляется обычно за период их эксплуатации, поскольку современные методы исследований не позволяют надежно определить за короткие периоды (год и меньше) отдельные его составляющие.

В общем виде уравнение седиментационного баланса пруда записывается следующим образом:

$$R_n + R_b + R_p + R_z + R_g = R_c + R_x + R_o \pm R_{bz} \pm \Delta R, \quad (4.1)$$

где R_n - поступление наносов (взвешенных и влекомых) по основному водотоку; R_b - боковая приточность наносов и склоновый смыв почвы на участке пруда; R_p - поступление наносов от размыва берегов, дна и верхового откоса плотины; R_z - продукты дефляции на зеркало пруда; R_g - продукты внутренней жизни во-

4.1. Элементы приходной части баланса

В осадконакоплении участвуют источники аллохтонного и автохтонного происхождения. К первым относятся продукты эрозии и дефляции водосбора, перемещаемые водными (сток наносов водотока, склоновый смыв почвы) и воздушными потоками, а вторые включают продукты размыва берегов, ложа, плотины и внутренней жизни водоема.

Поступление наносов из вышерасположенного пруда (R_{Π}). Сведения о мутности воды в приплотинной части прудов (табл. 24) были использованы для определения стока взвешенных наносов, идущих на сброс из данного пруда и поступающих в нижерасположенный пруд каскада. Эти данные характеризуют зарегулированный сток наносов балки, который был подсчитан сначала для каждого месяца, а затем для сезона и года (табл. 37).

В среднем за 1973–1976 гг. пруды сбрасывали от 0.1 т (пруд № 6) до 2.5 т (пруд № 76) взвешенных наносов в год в зависимости от величин зарегулированного стока воды ($r = 0.97$). Основной сброс наносов происходит весной, составляя для отдельных прудов каскада 52–100% годовой величины (табл. 37). Распределение стока наносов в году более равномерное, чем стока воды (табл. 9), благодаря участию в его формировании автохтонных источников.

На участке между прудами происходит уменьшение мутности потока за счет осаждения части наносов в тростниках и главным образом за счет разбавления потока выклинивающимися фильтрационными водами. Измерения показали, что в зависимости от длины участка мутность потока уменьшается в 2–3 раза и более. В связи с увеличением расхода воды в среднем на 0.1 л/с на каждые 10 м длины участка между прудами изменение расхода взвешенных наносов находится в пределах точности гидрометрических измерений и не учитывалось при составлении баланса наносов прудов.

Приток наносов из вышерасположенных прудов, вычисленный за 1973–1976 гг., входящие в цикл повышенной водности, был принят для всего периода составления баланса наносов. Поэтому возможно некоторое завышение этой составляющей баланса наносов тех прудов, период эксплуатации которых по водности близок к среднему многолетнему или ниже его.

Склоновый смыв почвы с прилегающего водосбора (R_6). Учет этой составляющей баланса наносов за период эксплуатации прудов представляет сложную задачу, поскольку охватить измерениями все склоны прудов каскада, различающиеся морфометрией, ориентацией, сельскохозяйственным использованием, в течение многолетнего периода практически невозможно.

Отдельные измерения склонового смыва почвы, выполненные в экспедиционный период (см. гл. 1), не дают представления о выносе наносов со склонов всех прудов каскада даже за период одного и того же дождя, тем более за период эксплуатации прудов.

Т а б л и ц а 37

Средний годовой зарегулированный сток взвешенных наносов б. Каракубанской и его сезонное распределение (1973-1976 гг.)

Номер пруда	Площадь водосбора балки, км ²	Годовой, т			Среднее		Сезонный, % годового			
		1973-1974	1974-1975	1975-1976	т	т/км ²	XI-II	III-V	VI-VIII	IX-X
3	15.9	2.2	1.6	0.8	1.5	0.094	28.8	54.2	17.0	-
4	17.5	1.8	1.3	0.3	1.1	0.063	23.0	73.7	3.3	-
5	18.5	2.6	2.6	1.6	2.3	0.12	18.0	68.4	6.6	7.0
6	19.3	-	0.4	-	0.1	0.010	-	100	-	-
7а	19.7	0.2	0.6	0.5	0.4	0.020	5.1	77.8	17.1	-
7б	19.8	1.8	2.6	3.0	2.5	0.13	13.0	52.2	27.1	7.7
8	21.8	0.8	2.1	1.7	1.5	0.069	20.4	56.6	19.0	4.0
9	22.6	0.9	1.8	1.9	1.5	0.066	11.0	71.5	17.5	-
Среднее		1.3	1.6	1.2	1.4	0.062	14.9	69.3	13.5	2.3

Склоновый смыв почвы с прилегающего водосбора прудов за период их эксплуатации может быть определен как остаточный член уравнения баланса (4.1), если известны остальные его составляющие. Поскольку в число неизвестных составляющих этого уравнения, помимо склонового смыва почвы, входят продукты внутренней жизни водоема, то для определения склонового смыва использован приближенный способ, содержание которого изложено ниже.

Обозначим через ΔR_0 ту часть массы донных отложений, которая образовалась за счет продуктов склонового смыва (R_6) и внутренней жизни водоема (R_8), тогда

$$\Delta R_0 = R_6 + R_8. \quad (4.2)$$

Величина ΔR_0 определяется из уравнения (4.1) и равна

$$\Delta R_0 = R_0 - (R_n + R_p + R_3) + (R_c + R_x \pm R_{83} \pm \Delta R). \quad (4.3)$$

Донные отложения прудов (табл.33), как и продукты склонового смыва, содержат наносы (минеральные частицы), органическое вещество и соли, тогда как продукты внутренней жизни водоема — только органическое вещество и соли. Поэтому уравнение (4.2), удовлетворяющее содержанию наносов в составляющих баланса, может быть представлено в виде

$$\Delta R_0 \cdot p_{0,n} = R_6 \cdot p_{6,n}, \quad (4.4)$$

где $p_{0,n}$ и $p_{6,n}$ — соответственно содержание (% массы) наносов в донных отложениях и продуктах склонового смыва (почве водосбора).

Из уравнения (4.4) можно определить склоновый смыв почвы:

$$R_6 = \frac{p_{0,n}}{p_{6,n}} \Delta R_0. \quad (4.5)$$

Таким образом, для оценки склонового смыва почвы методом баланса необходимо знать содержание органического вещества и солей в общей массе донных отложений и почве водосбора.

По формуле (4.5) вычислен средний годовой склоновый смыв почвы с частных водосборов прудов каскада с учетом соотношений между содержанием наносов в донных отложениях и почве водосбора, приведенных в табл.33.

Продукты эолового переноса (R_3). Согласно определению Е.А.Юдина, основанному на измерении мутности воды растаявшего льда прудов, на зеркало водоемов в течение зимнего периода выпадает до 73 т/км² эолового материала, количество которого возрастает с усилением скорости ветра, как это было зимой 1973/74 г. Летом, согласно измерению отложений

в испарителе, установленном на пруду № 5, за короткий период (с 10 VI по 30 VII) 1974 г. на поверхность пруда выпало 107 т/км^2 эловых продуктов, что намного превышает их зимнее количество. Значение этой составляющей баланса для многолетнего периода принято равным 130 т/км^2 на основе исследований Гидрохимического института в западной части Северного Кавказа в течение 1967–1972 гг. (Башмакова, Ткачева, Крупеня, Матвеев, 1973).

Размыв берегов, ложа и плотины (R_p). Берега прудов сложены лёссовидными суглинками тяжелого механического состава, почти однообразного по всей длине каскада (табл.29). Преобладающими в механическом составе грунта являются фракции крупной пыли (0.01–0.05 мм) и илистая (менее 0.001 мм), как и в почве водосбора и почвообразующей породе (табл.2, рис.15). Грунт левого инсолируемого берега имеет более крупный механический состав, содержит меньше органического вещества и больше солей, чем правого затененного (табл.29). Плотность поверхностного горизонта берегового грунта на левом берегу больше, чем на правом.

Надводный берег прудов, как правило, обрывист и носит местами свежие следы обрушения. Среди форм обрушения встречаются осыпи (пруды № 4, 6, 9), обвалы (пруды № 5, 8, 9), оползни (пруд № 7б), сползание дернового покрова (пруды № 6, 8), ниши в вертикальной стенке берега на отметке уровня (пруды № 5, 8, 9). Постоянной формой переформирования берегов является отмыв, отмучивание и унос глинистых и пылеватых частиц под действием волнения. Все эти формы обрушения берегов имеют место и на крупных водохранилищах (Вендров, 1958; Качугин, 1969; Караушев, 1964; Золотарев, 1955).

На прудах каскада, особенно в приплотинной части, преобладают абразионные берега с береговым уступом (клифом) и абразионной частью береговой отмели (рис.21). Аккумулятивная часть береговой отмели не выделяется, так как сливается с донными отложениями более глубокой зоны. В верхней, обычно заросшей тростником, части прудов поступающие со склонов наносы способствуют выполаживанию берега.

Берега прудов № 5, 7–9 почти по всей длине характеризуются небольшой высотой (менее 1 м). Наиболее высокие берега, особенно в приплотинной части, имеют пруды № 4 и 6. Высота берегов, как правило, уменьшается по направлению от плотины к верховью пруда.

Уклон берегового уступа значительно превышает угол естественного откоса балки и достигает на отдельных створах $70-90^\circ$ (рис.21). Ширина абразионной части береговой отмели на прудах № 6, 8 и 9 достигает 15–20 м.

Береговой процесс на прудах каскада подчиняется определенным закономерностям. Так, среднее значение уклона берегового уступа зависит от средней амплитуды колебания уровня, а его средняя высота от глубины размыва при скорости ветра 10 м/с (Прытко-

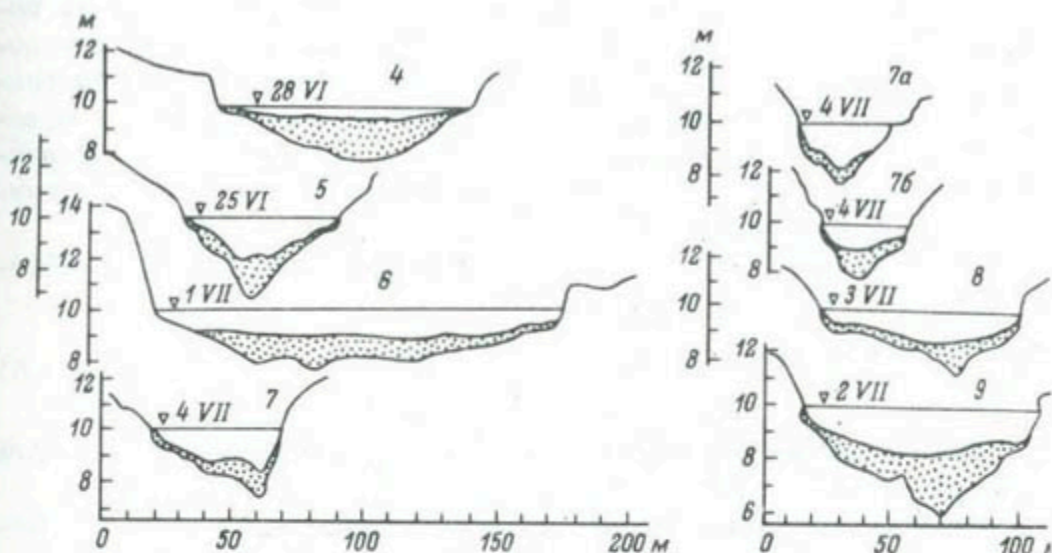


Рис.21. Поперечные профили приплотинной части прудов на б.Каре кубанской (1975 г.).

Ц и ф р ы над поперечником – номер пруда.

ва, 1979). Обрушению подвергается около 72% длины береговой линии прудов. При этом длина обрушаемой береговой линии на левом берегу в 1.2 раза больше, чем на правом.

Из сопоставления поперечного профиля пруда в его приплотинной части с аналогичным профилем нижнего бьефа, условно характеризующим начальный профиль балки, следует, что приплотинная часть пруда № 4 расширилась за 45 лет его эксплуатации на 12 м, пруд № 5 за 17 лет на 6.5 м и пруда № 6 за 81 год на 56 м. Средняя годовая скорость отступления берега составляла 0.2–0.4 м.

Площадь размыва берегов и ложа за период эксплуатации пруд определена раздельно для левого и правого берегов путем сопоставления современного профиля берега с начальным. Последний реконструирован по частично или полностью сохранившимся на современном профиле берега абразивным частям береговых отмелей каждая из которых соответствует определенной отметке НПУ. Для этой цели может быть использован также метод Н.Н.Виноградова (1973в), если на пруду велись уровенные наблюдения, охватившие экстремальные годы.

Наибольшая площадь размыва берега и дна для большинства прудов каскада наблюдается на левом берегу и составляет в среднем 6.8 м^2 , тогда как на правом – 5.2 м^2 . Это является результатом различной подверженности размыву грунта берегов в связи отмеченными выше особенностями физико-механического состава. Объем размыва берегов и ложа на участке пруда, расположенном между створами, определен как произведение полусуммы площади размыва на этих створах на расстояние между ними.

Ежегодно в пруды каскада за счет размыва берегов и ложа поступает 13-290 т грунта (табл.38) в соответствии с объемом водоемов (коэффициент корреляции $r = -0.83$). Влияние продолжительности эксплуатации прудов на среднюю годовую массу размываемого берегового грунта выражено слабо ($r = -0.51$) и в значительной степени учитывается величиной их объема, тесно коррелирующего с продолжительностью эксплуатации ($r = 0.81$).

Уравнение связи средней годовой массы размыва берегов прудов каскада с их объемом имеет вид

$$R_p = 15.8 W^{0.5}, \quad (4.6)$$

где R_p - средняя годовая масса размыва берега, т; W - объем пруда при НПУ, тыс.м³.

Средняя квадратическая ошибка расчета продуктов размыва берегов прудов по формуле (4.6) равна 40%. Учитывая слабую изученность процесса размыва берегов на прудах, автор считает возможным рекомендовать для использования формулу (4.6) в аналогичных условиях.

В связи с относительно большой плотностью берегового грунта (табл.29) по сравнению с донными отложениями (табл.35) продукты размыва берегов занимают под водой объем в 1.5-2.0 раза больше, чем на суше и составляют значительную долю в общей массе отложений (табл.38).

Продукты размыва плотин ($R_{пл}$). Плотины прудов каскада земляные, возведены из однородных, обычно береговых грунтов. Неукрепленные верховые откосы плотин под воздействием волнобоя быстро размываются и являются источником осадочного материала, часть которого поступает в пруд также при ремонте плотин.

Размыв плотин происходит при ветрах западного направления, повторяемость которых возрастает в открытый период и достигает наибольшего значения в июне. Грунт надводной части плотины сносятся на подводную, в результате чего мощность отложений в приплотинной части значительно возрастает по сравнению со смежным вышерасположенным створом. Это видно из графиков связи мощности отложений, с начальной глубиной пруда (рис.19). Общий объем размыва плотины прудов № 6, 7, 7б и 9 за период их эксплуатации определен как произведение разности между мощностью отложений на приплотинном и смежном створах на площадь зеркала участка пруда между этими створами. Его величина составляет для этих прудов 1.1-12.0 м³ в год в соответствии с их объемом. Для других прудов каскада средний годовой объем размыва плотины определен ориентировочно по графику связи его с объемом прудов №№ 6, 7, 7б и 9. Грунт от размыва плотины, плотность которого принята равной 1.3 т/м³, составляет в среднем около 8% ежегодной массы продуктов размыва берегов и ложа.

Т а б л и ц а 38

Показатели обрушения берегов и размыва дна прудов на б.Каракубанской

Номер пруда	Число лет эксплуа- тации	Длина обрушаемо- го берега, м	Объем породы, тыс.м ³			Плотность грунта, т/м ³	Масса породы, тыс.т.	
			общий	за год	общий на 100 м берега		общая	за год
4	45	870	6.0	0.134	0.69	1.0	6.0	0.134
5	17	1120	0.9	0.053	0.080	1.3	1.17	0.069
6	81	2090	14.3	0.176	0.68	1.3	18.6	0.229
7а	74	312	4.2	0.068	1.3	1.2	5.10	0.069
7б	9	145	0.24	0.027	0.16	1.2	0.29	0.032
8	24	430	1.9	0.079	0.44	1.2	2.28	0.095
9	34	1090	5.4	0.159	0.50	1.0	5.40	0.159

Органическое вещество внутри-водоемного происхождения (R_{opr}). Органическое вещество в прудах каскада образуется за счет продукции гидробионтов (высшая водная растительность, фито- и зоопланктон, бентос). Часть этой продукции минерализуется, а оставшая участвует в формировании взвесей и донных отложений. По сведениям В.А.Лепской, биомасса тростников в сухом весе на прудах каскада составляет $1.4-2.4 \text{ кг/м}^2$, а их годовая продукция равна $0.3-37.0 \text{ т}$. М.А.Иванов оценивает годовую продукцию сухого вещества фитопланктона в прудах №№ 4-6, 9 от 2 до 47 г/м^3 , зоопланктона - от 3.3 до 137 г/м^3 и зообентоса - $10.8-137 \text{ г/м}^3$.

Степень минерализации остатков различных видов гидробионтов принята условно, исходя из имеющихся сведений по водохранилищам волжского каскада (Буторин, Зимина, Курдин, 1975), а также на основе рекомендации специалистов Института озераведения АН СССР. Пруды каскада, как уже отмечалось, различаются водообменом и условиями ветрового перемешивания водной массы. Поэтому степень минерализации органического вещества в них будет разной, но учесть это без специальных исследований не представляется возможным. Для всех прудов каскада принято, что минерализуется 50% продукции тростников, 85% - фитопланктона; 75% - зоопланктона и 80% - зообентоса. Таким образом, на формирование взвесей и донных отложений идет 50% продукции тростников, 15% - фитопланктона, 25% - зоопланктона и 20% - зообентоса. Рассчитанное с учетом указанных допущений годовое количество органического вещества автохтонного происхождения в отдельных прудах каскада составляет $0.16-18.8 \text{ т}$ (табл.39). Причем главную роль в его образовании играет высшая водная растительность, которой заросло от 8 до 91% площади зеркала прудов (табл.6). Эти данные характеризуют участие гидробионтов в заилении прудов в современный период, но их, видимо, нельзя распространить на весь период эксплуатации прудов, в течение которого менялись условия развития и хозяйственное использование тростников. Последний в довоенный период и первые послевоенные годы в значительной степени выкашивался для хозяйственных нужд.

Органическое вещество (потери при прокаливании), образовавшееся в прудах за период их эксплуатации, может быть определено методом баланса вещества, но для этого необходимо знать его содержание во всех составляющих баланса. Поскольку такие сведения отсутствуют, то автохтонное органическое вещество оценено приближенно. Превышение содержания органического вещества в донных отложениях (5-9%) над таковым в почвах водосбора (4%) рассматривалось как показатель возможности его внутриводоемного образования. В отдельных случаях увеличение содержания органического вещества в донных отложениях прудов связано также с размещением ферм на их берегах (пруд № 9), использованием водоемов для разведения водоплавающей птицы (пруд № 76).

Т а б л и ц а 39

Годовое количество органического вещества (в т)
автохтонного происхождения в прудах на б.Каракубанской

Номер пруда	За счет продуцирования				Итого	По седи- ментацион- ному балан- су
	трос- ников	фито- планктона	зооплан- ктона	зообен- тоса		
4	9.9	0.4	2.0	0.7	13.0	7.1
5	5.9	0.004	0.08	0.06	6.0	14.9
6	18.5	0.03	0.07	0.2	18.8	3.6
7а	12.1	-	-	-	12.1	15.2
7б	0.16	-	-	-	0.16	2.4
8	17.3	-	-	-	17.3	10.0
9	5.6	0.4	0.5	0.5	7.0	10.0

Т а б л и ц а 40

Годовая масса продуктов (в т) хемотренной седиментации
в прудах на б.Каракубанской

	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7а	№ 7б	№ 8	№
Потери при обработке HCl	29.7	41.0	38.9	32.4	9.9	28.7	28
CaCO ₃	18.2	9.8	22.0	16.9	3.7	20.5	16
Невязка солевого ба- ланса за 1973-1975 гг	-38	12	62	22	-4	23	4

Из уравнения (4.2) определим сначала общую массу продуктов
внутренней жизни водоема (R_g):

$$R_g = \Delta R_0 - R_5. \quad (4.3)$$

Относительное содержание (в процентах) органического веществ
в общей массе продуктов внутренней жизни водоема определ
ется из уравнения

$$P_{\text{г},0} = \frac{\Delta R_0 \cdot P_{0,0} - R_{\text{г}} \cdot P_{\text{г},0}}{R_{\text{г}}}, \quad (4.8)$$

где $P_{\text{г},0}$, $P_{0,0}$, $P_{\text{г},0}$ — процентное содержание органического вещества соответственно в продуктах внутренней жизни водоема, донных отложениях и почве водосбора.

Масса органического вещества внутриводоемного происхождения определяется как произведение его процентного содержания ($P_{\text{г},0}$) на общую массу вещества того же происхождения ($R_{\text{г}}$).

Расхождения между массой органического вещества, вычисленной по продукции гидробионтов и методу баланса вещества, неизбежно (табл.33), так как первый способ характеризует его массу в современный период и не учитывает различную степень его минерализации в разных прудах, а второй — дает массу органического вещества за период эксплуатации пруда с учетом особенностей его минерализации в каждом водоеме, но, в то же время, допускает неточность в его определении в связи с погрешностями в оценке других составляющих баланса наносов.

Продукты хемогенной седиментации ($R_{\text{хем}}$). Как отмечалось в гл.III, потери от обработки HCl донных отложений (13–23%) превышают таковые почв водосбора (4,5%). Также различается содержание CaCO_3 в почвах водосбора (2,5%) и отложениях (6–13%). Это позволяет предположить наличие хемогенной седиментации солей в прудах и определить ее методом баланса вещества. Для этого может быть использовано уравнение, аналогичное уравнению (4.7). Масса продуктов хемогенной седиментации может быть определена также по разности между общей массой продуктов внутренней жизни водоема ($R_{\text{г}}$), известной из уравнения (4.7), и массой органического вещества внутриводоемного происхождения ($R_{\text{орг}}$). Этот путь был использован в настоящей работе.

Расчеты показали, что в донные отложения ежегодно поступает из водной массы прудов от 9 до 38 т солей, образовавшихся в результате внутриводоемных процессов (табл.40). Оценка массы карбоната кальция, выпадающего в осадок, выполнена по уравнению (4.8). Эти соли ежегодно увеличивают массу отложений на 4–22 т (табл.40). Расчет хемогенной седиментации в прудах каскада методом баланса вещества хорошо согласуется с данными солевого баланса (см.гл.V). Невязки последнего имеют такой же порядок величин как и масса солей хемогенного происхождения (табл.40).

Общее поступление вещества (ΣR) в пруды каскада находится в соответствии с их объемом ($r = 0.97$), так как с последним тесно коррелирует автохтонное вещество ($r = 0.98$). Пруды каскада ежегодно получают 142–456 т осадкообразующего материала.

4.2. Элементы расходной части баланса

С б р о с н а н о с о в в н и ж н и й б ъ е ф (f)
Это чрезвычайно важный, мало изученный элемент седиментационного баланса малых водохранилищ, позволяющий оценить осадконакопление в них по разности между общим поступлением наносов (приходная часть баланса) и сбросом их из водоема без производства трудоемких зондировочных работ. Наоборот, если известна масса отложений в водохранилище и сброс наносов из него, то можно определить общее поступление вещества в водоем и его на соудерживающую способность (Brune, 1953; Roehl, Holem, 1973; Heinemann, Holt, Rausch, 1973). Кроме того, изучение стока наносов из водохранилища и их качественного состава позволяет составить представление о трансформации речных наносов водохранилищем (Виноградова, 1973а; Зимина, 1974).

При каскадном размещении водохранилищ, когда расстояние между ними невелико, сток наносов из вышерасположенного водохранилища практически равен притоку наносов в данное. В связи с этим режим сбросов наносов рассмотрен при анализе элементной приходной части седиментационного баланса каскада прудов.

Среднее годовое количество обрасываемых из прудов каскада наносов в 1973–1976 гг. составило 0,1–2,5 т (табл.37) и возросло с увеличением объемов сбросов (коэффициент корреляции $r = 0,97$) и коэффициента водообмена ($r = 0,85$).

И з ъ я т и е н а н о с о в п р и з а б о р е в о д н а х о з я й с т в е н н ы е н у ж д ы (R_x). Этот элемент баланса определен за 1973–1976 гг. с учетом забора воды на полив огородов с апреля по сентябрь и мутности прудовой воды. Расчет сначала выполнен для каждого месяца, а затем суммированием месячных значений получена годовая величина изъятия наносов, которая была принята для всего периода эксплуатации прудов. Ее годовое значение для прудов составляет сотые доли тонны.

О с а д к о н а к о п л е н и е (R_o). Объем отложений в прудах каскада, как уже отмечалось в главе III, определен при интрузионном измерении изолиний слоя отложений на планах прудов. Точность его определения составляет 14–18%. Переход от объема к массе отложений вносит дополнительную погрешность в определение осадконакопления, обусловленную несовершенством методов определения средней плотности отложений.

Осадконакопление (табл.35) и сброс наносов (табл.37) определяются одними и теми же факторами, поскольку представляют взаимно противоположные процессы. Поэтому в относительно однородных природных условиях осадконакопление определяется, прежде всего, проточностью водоема (коэффициент корреляции $r = -0,8$ тесно связанной с его размерами. Еще Г.И.Шамов (1939) отмечал, что глубокие водохранилища задерживают наносы больше, чем мелкие.

В связи с использованием данных по заилению прудов для оценки стока наносов временных водотоков важно установить, какую долю составляет масса отложений в общем поступлении грунтообразующего материала в водоем и может ли она характеризовать сток наносов (Указания..., 1973).

Изменение количества взвесей в водохранилище за расчетный период ($R_{взв}$). Изменение мутности прудовой воды и объема водной массы в течение года приводит к изменению количества взвесей как за отдельные сезоны, так и за год в целом. Однако величина этого изменения незначительная и составляет за год менее 1 т.

Расходная часть седиментационного баланса прудов каскада (ΣR), включающая два основных элемента (сброс наносов в нижний бьеф, осадконакопление), определяется значительно точнее ($\pm 20\%$) приходной. Это обстоятельство позволяет использовать метод баланса вещества для определения отдельных составляющих приходной части. В связи с последним баланс наносов прудов не замкнут. Его приходная часть принята равной расходной и, как показано выше, находится в соответствии с объемом прудов ($r = -0.97$).

4.3. Седиментационный баланс прудов каскада

Роль отдельных источников в заилении прудов видна из седиментационного баланса (табл.41), составленного за период их эксплуатации.

Поступление наносов из основного водотока при каскадном размещении прудов практически не влияет на их заиление, так как составляет в приходной части баланса небольшую долю (менее 1%). Также невелика роль в заилении прудов каскада продуктов эолового переноса, составляющих 0.2–2.2% всего поступления вещества за год. Из аллохтонного вещества наибольшую опасность для заиления прудов представляет склоновый смыв почвы с прилегающего водосбора, на долю которого в приходной части баланса приходится 35.6–67.7% общего поступления вещества. Осуществление противоэрозионных мероприятий в этой части водосбора, характеризующейся наибольшими уклонами, может существенно снизить заиление прудов. В целом аллохтонное вещество составляет в приходной части баланса отдельных прудов каскада 38 (пруд № 6) – 68% (пруд № 7а).

Из всех источников автохтонного вещества в прудах каскада главное место принадлежит размыву берегов, плотины и ложа, на долю которого в приходной части баланса отдельных прудов приходится от 19.4 (пруд № 7а) до 41.4% (пруд № 9).

Органическое вещество внутриводоемного происхождения играет небольшую роль в заилении прудов каскада, несмотря на большую

Т а б л и ц а 41

Средний годовой седиментационный баланс прудов на б.Каракубанской

Номер пруда	Период эксплуатации, годы	Приход, %							Итого, т	Расход, %		
		$R_{\text{п}}$	$R_{\text{б}}$	$R_{\text{э}}$	$R_{\text{р}}$	$R_{\text{пл}}$	$R_{\text{орг}}$	$R_{\text{зем}}$		$R_{\text{с}}$	$R_{\text{о}}$	$R_{\text{взв}}$
4	1930-1975	0.4	52.3	1.7	33.9	2.4	1.8	7.5	395.5	0.3	99.6	0.1
5	1958-1975	0.3	60.0	0.7	20.4	1.4	4.4	12.8	338.5	0.7	99.3	0
6	1894-1975	0.5	35.6	2.2	50.2	2.1	0.8	8.6	456.1	0	99.9	0.1
7а	1901-1975	0	67.7	0.3	18.4	1.0	4.0	8.6	375.5	0.1	99.9	0
7б	1966-1975	0.3	63.4	0.2	22.6	4.8	1.7	7.0	141.5	1.8	98.2	0
8	1951-1975	0.8	55.0	1.0	29.6	1.5	3.1	9.0	321.4	0.5	99.6	-0.1
9	1941-1975	0.4	47.9	1.2	37.7	3.7	2.4	6.7	421.3	0.4	99.7	-0.1

П р и м е ч а н и е. Обозначения элементов баланса - в соответствии с уравнением (4.1)

площадь зеркала их, занятую тростниками. Этому способствует его быстрая минерализация в условиях жаркого лета и интенсивного ветрового перемешивания водной массы прудов. На долю этой составляющей приходится менее 5% общего поступления вещества за год. Хемогенная седиментация является заметным источником осадконакопления в прудах каскада. На долю ее продуктов в приходной части седиментационного баланса прудов приходится 7-13% общего поступления вещества.

В целом продукты автохтонного происхождения составляют в приходной части седиментационного баланса отдельных прудов каскада от 32 (пруд № 7а) до 62% (пруд № 6). Их значение в заилении прудов возрастает с увеличением размера последних. Коэффициент корреляции средней годовой массы и относительного количества продуктов автохтонного происхождения с объемом прудов соответственно равен 0.98 и 0.68. Заиление прудов каскада объемом более 60 тыс.м³ происходит главным образом продуктами автохтонного происхождения, составляющими в приходной части баланса более 50%. Этот вывод важен как для разработки мер борьбы с заилением прудов, так и при использовании данных по заилению прудов для оценки стока наносов временных водотоков. В последнем случае автохтонное вещество должно быть исключено из всей массы отложений.

В расходной части седиментационного баланса прудов преобладает осадконакопление (табл.41). Сброс наносов в нижний бьеф не превышает 2%. В связи с этим осадконакопление определяет практически всю массу поступления вещества в пруды, т.е. приходную часть седиментационного баланса. Это важно иметь в виду при использовании данных по заилению прудов для оценки стока наносов временных водотоков.

Все пруды каскада характеризуются высокой наносоудерживающей способностью (отношение массы отложений к приходной части баланса), составляющей 98.2-99.9% (табл.41). Ее значения зависят от объема прудов (коэффициент корреляции $r = 0.92$), коэффициента водообмена ($r = -0.82$), относительной площади тростников ($r = 0.66$).

Наносоудерживающая способность прудов со времени опубликования работы американского исследователя Г. Бруне (Brune, 1953) привлекала внимание многих авторов (Дрозд, 1962; Прыткова, 1965; Караушев, 1966; Лисицина, 1969; Молдованов, 1971; Кочубей, 1972; Папазов, Амиорков, Георгиев, Монеv, 1966). Чаше ее оценивали косвенным путем или по теоретическим зависимостям, проверка которых не могла быть выполнена из-за отсутствия фактических данных по наносоудерживающей способности прудов. Для ее оценки, как видно из табл.41, достаточно измерить сброс наносов в нижний бьеф и массу отложений в пруду, которые в сумме определяют общее поступление вещества в пруд. Такие работы в настоящее время в большом объеме ведутся на прудах США (Roehl, Holeman, 1973; Heinemann, Holt, Rausch, 1973).

Высокая наносоудерживающая способность прудов каскада делает возможным обобщение данных по заилению водоемов без учета влияния на него их проточности.

4.4. Особенности седиментационного баланса прудов

Водохранилища, седиментационный баланс которых в настоящее время изучен (табл.42), различаются размером, размещением разных звеньев гидрографической сети и разных природных зон. Сопоставление седиментационного баланса этих водоемов позволит выявить его особенности для малых водохранилищ и, в частности, для прудов, а также зональные особенности поступления осадкообразующего материала из отдельных источников в водохранилища одинакового объема.

Преобладающими составляющими приходной части седиментационного баланса всех водохранилищ являются продукты эрозии водосбора, абразии берегов и дна (табл.41, 42). Относительное значение притока наносов из основного водотока возрастает вместе с увеличением относительного притока воды (табл.14, 18), но остается всегда меньше последнего. При этом водохранилища лесных зон получают из основного водотока наносов относительно меньше (3-29%), чем водохранилища лесостепной (41-77%) и степной (85%) зон. Значительно сокращается относительный приток наносов из основного водотока в степные водохранилища („Волчий Ворота“) пруды (каракубанский каскад), если сток в них зарегулирован вышерасположенными прудами (табл.41, 42).

С уменьшением размера водохранилищ растет доля наносов, поступающих с прилегающего водосбора, в приходной части седиментационного баланса. Если выносы наносов из оврагов дают в общем поступлении вещества в Новосибирское и Минчугаурское водохранилища всего 1.1%, то с собственного водосбора малых водохранилищ ЦЧО и Донбасса поступает 13-80% годового количества наносов (табл.42). В общем поступлении вещества в степные водохранилища Крыма (1У группа), а также пруды Крыма и Северного Кавказа на долю этой составляющей баланса приходится 50-80%.

Размыв берегов является важным источником осадконакопления крупных водохранилищ (I группа), составляя в общем поступлении наносов 58-82%, но и в балансе наносов самых малых водохранилищ, особенно при каскадном их размещении, на долю этого источника приходится 18-50% общего прихода наносов (табл.41). В каждой группе водохранилищ увеличение средней глубины ведет к уменьшению продуктов размыва берегов. Самые малые водохранилища (У группа) при небольшом диапазоне изменения их средней глубины (0.7-1.4 м) — значительно различаются по количеству продуктов размыва берегов, что связано с влиянием на размыв

Т а б л и ц а 42

Седиментационный баланс водохранилищ

Номер водо- храни- лища (табл. 7)	Период, годы	Приход, %				Итого, 10 ³ т	Расход, %		Итого, 10 ³ т	Источник
		приток наносов из рек	размыв берегов и дна	про- дукция гидро- бион- тов	смыв с прилега- ющего во- досбора		сброс в ниж- ний бьеф	осад- кона- копле- ние		
Зона тайги и смешанных лесов										
1	1937-1968	29	66	5		681	29	71	681	Зиминова, Курдин, 1974
2	1940-1968	39	58	3		635	44	56	496	Зиминова, Курдин, 1972б
3	1941-1965	18	75	2		4340	5	95	4340	Зиминова, Курдин, 1972а
4	1957-1960	18	82			3697	5	95	3697	Ярославцев, Шмелева, 1969
5	1968	28	65	7		78.5	2	98	95.6	Виноградова, 1972б
Лесостепная зона										
6	1956-1966	38	54	1	3	43400	0.2	99.8	43400	Широков, 1974
7	1956-1958	73	26	1		8.6	3.6	96.4	8.6	Лопатин, 1961
8	1959-1961	77	20	3		6.6	0.6	99.4	6.6	Лопатин, 1963
10	1932-1939	15	4	1	80	47.0	-	-	-	Дрозд, Горечкая, 1967
11	1932-1939	24	22		54	29.2	-	-	-	То же
12	1931-1959	-	24	1	75	8.7	-	-	-	" "
13	1951-1962	100				46.3	-	-	-	" "
14	1932-1939	30	16	2	52	88.2	-	-	-	" "

Т а б л и ц а 42 (продолжение)

Номер водо- храни- лища (табл. 7)	Период, годы	Приход, %				Итого, 10^3 т	Расход, %		Итого, 10^3 т	Источник
		приток напо- сов из рек	размыв бере- гов и дна	продук- ция гидро- бион- тов	смыв с прилега- ющего водосбора		сброс в ниж- ний бьеф	осад- кона- коп- ление		
15	1957-1968	50	45	1	1	13950	2	98	13950	Широков, 1974
Степная зона										
16	1935-1964	1	39		60	14.4	-	-	-	Дрозд, Хлоева, 1966
17	1938-1964	1	30		69	4.7	-	-	-	
18	1895-1964	11		28	61	0.64	-	-	-	
19	1950-1964	5	3	4	79	0.67	-	-	-	
20	1952-1964	2			89	1.02	-	-	-	
21	1964-1967	13	86	1		123	0.4	99.6	118	Прыткова, 1971в
22	1965-1970	85	12	1		1334	0.7	99.3	1290	Прыткова, 1973б
Горная область										
30		90	9		1	30640	2	98	-	Халилов, 1969

берегов всей водной массы водоемов и защищенности их берегов древесной растительностью.

Влияние других составляющих седиментационного баланса водохранилищ (органическое вещество, продукты хемотренной седиментации) на осадконакопление в них менее значительно, чем первых двух (сток наносов, продукты размыва берегов).

Водохранилища одинакового размера (объема) в разных природных зонах получают из одного и того же источника разное количество осадкообразующего материала. Это видно из составленных на основе данных табл.42 уравнений регрессии каждого источника с объемом водохранилища (табл.43). Общий вид уравнения

$$\lg R_i = \alpha_0 + \alpha_1 \lg W, \quad (4.9)$$

где R_i – среднее годовое поступление вещества из i -го источника, тыс.т; W – объем водохранилища, млн.м³.

Уравнения регрессии характеризуются высокими значениями коэффициента корреляции ($R_k > 0.9$). Средняя квадратическая ошибка расчета по ним того или иного источника осадконакопления возрастает при переходе из лесной зоны (23–29%) в лесостепную (36–78%) и степную (88–140) за счет использования в двух последних зонах данных по водохранилищам, относящимся к разным генетическим группам (рис.7). Аналогичные уравнения, составленные только для прудов степной зоны имеют значительно большую точность (19–58%), чем уравнения для водохранилищ всех размеров той же зоны (табл.43). Отдельные из уравнений регрессии могут быть использованы для расчетных целей, другие – только для качественной оценки зонального изменения того или иного источника.

Непосредственно из значений коэффициента регрессии α_0 (табл. 43) следует, что водохранилища одинакового объема (1 млн.м³) наибольшее количество продуктов эрозии водосбора получают в лесостепной зоне, а продуктов размыва берегов – в степной. Этот вывод, полученный на основе обобщения данных по седиментационному балансу водохранилищ Русской равнины, не противоречит известным представлениям о зональности речных наносов (Маккавеев, 1955; Лисицына, 1977), стока наносов временных водотоков (Прыткова, 1979) и интенсивности размыва берегов водохранилищ (Вендров, Стеженская, 1969; Качугин, 1969, 1975; Широков, 1974). Общее поступление вещества в водохранилища указанного объема в лесостепной и степной зонах примерно одинаково и значительно превышает таковое в водохранилища лесной зоны.

Таким образом, даже ограниченные сведения о седиментационном балансе водохранилищ разных природных зон и разного размера позволяют выявить зональный характер поступления осадкообразующего материала из основных источников (сток наносов водотоков и склоновый смыв, размыв берегов и ложа). При этом необходимо учитывать размер (объем) водоемов, который оказывает

Т а б л и ц а 43

Уравнения регрессии вида (4.9)

Зона	Число водо-храни-лищ	Коэффициенты регрессии		Полный коэффициент корреляции (R_k)	Ошибка уравнения (E_r), %
		α_0	α_1		

В о д о х р а н и л и щ а и п р у д ы

Приток наносов с водосбора ($R_n + R_b$)

Лесная	5	-0.050	0.71	0.92	29
Лесостепная	8	0.65	0.74	0.99	36
Степная	14	0.45	0.74	0.92	140
Среднее из	27	0.47	0.72	0.96	90

Размыв берегов и дна (R_p)

Лесная	5	-0.27	0.91	0.97	24
Лесостепная	7	-0.06	0.87	0.95	78
Степная	12	0.15	0.81	0.92	88
Среднее из	26	0.10	0.82	0.92	76

Общее поступление вещества (ΣR)

Лесная	5	0.070	0.85	0.97	23
Лесостепная	8	0.70	0.79	0.98	52
Степная	14	0.72	0.77	0.93	116
Среднее из	29	0.70	0.76	0.98	63

П р у д ы

Приток наносов с водосбора

Степная	10	-0.014	0.40	0.73	50
---------	----	--------	------	------	----

Размыв берегов и дна

	8	-0.66	0.29	0.44	58
--	---	-------	------	------	----

Общее поступление вещества

	10	0.18	0.39	0.92	19
--	----	------	------	------	----

большое влияние на размыв берегов, а через приток воды с водосбора – на поступление наносов. Поскольку между объемом водоемов и площадью зеркала существует тесная корреляция (Прыткова, 1979, с. 21), то для характеристики размера водохранилищ при выявлении зональных особенностей поступления в них осадкообразующего материала можно использовать любой из этих морфометрических показателей. Для этой же цели можно привлечь показатель открытости водоемов. В относительно однородных природных условиях размер водоемов оказывает большое (табл. 43) и азональное влияние на поступление материала из основных источников.

Важной характеристикой седиментационного баланса водохранилищ является соотношение между аллохтонным и автохтонным веществом, которое практически равно соотношению между продуктами эрозии водосбора и размыва берегов и ложа водоема. Это соотношение изменяется, обычно увеличивается, в течение периода эксплуатации водохранилища в связи с нестационарностью процесса размыва берегов и свидетельствует о динамичности седиментационного баланса водоема. Последнее пока еще не может быть подтверждено имеющимися данными о седиментационном балансе водохранилищ (табл. 41, 42), составляемом не за отдельные годы, а за длительные периоды эксплуатации водоемов.

Соотношение между аллохтонным и автохтонным веществом в приходной части седиментационного баланса водохранилищ является количественной характеристикой связи водоема и осадконакопления в нем с водосбором, и чем оно больше, тем эта связь теснее. Очевидно, что в процессе эксплуатации водоема влияние водосбора на осадконакопление усиливается в связи с уменьшением интенсивности размыва берегов и увеличением доли аллохтонного вещества в приходной части седиментационного баланса.

Если по уравнениям регрессии (табл. 43) сначала рассчитать поступление продуктов эрозии водосбора и размыва берегов в водохранилища разного размера (от 100 тыс. м³ до 100 млн. м³), а затем соотношение между ними (табл. 44), то окажется, что во всех зонах его наибольшее значение относится к самым малым водохранилищам – прудам. Следовательно, значительное преобладание продуктов эрозии водосбора над продуктами размыва берегов является отличительной чертой седиментационного баланса прудов, особенно в лесостепной зоне. Этим и объясняется большое влияние водосбора на осадконакопление и состав донных отложений в прудах, обуславливающее зональный характер изменения этих характеристик (Прыткова, 1979, с. 112). Из изложенного видно, что результаты исследования седиментационного баланса крупных водохранилищ нельзя механически переносить на малые.

Т а б л и ц а 44

Расчетные значения поступления осадкообразующего материала в водохранилища разного размера

Зона	Приток наносов с водосбора ($R_n + R_6$), 10^3 т	Продукты размыва берегов и дна (R_p), 10^3 т	Общее поступление (ΣR), 10^3 т	$\frac{R_n + R_6}{R_p}$
Водохранилища объемом 100 тыс. м ³				
Лесная	0.17	0.07	0.17	2.43
Лесостепная	0.81	0.12	0.81	6.74
Степная	0.51	0.22	0.89	2.30
Водохранилища объемом 1 млн. м ³				
Лесная	0.89	0.54	1.18	1.65
Лесостепная	4.46	0.87	5.0	5.14
Степная	2.82	1.41	5.2	2.00
Водохранилища объемом 10 млн. м ³				
Лесная	4.56	4.36	8.30	1.04
Лесостепная	24.6	6.45	30.9	3.82
Степная	15.5	9.15	30.9	1.69
Водохранилища объемом 100 млн. м ³				
Лесная	23.5	35.5	58.9	0.66
Лесостепная	135	47.9	191	2.82
Степная	85.2	58.9	182	1.44

4.5. Наносоудерживающая способность водохранилищ

В расходной части седиментационного баланса водохранилищ (табл. 41, 42) преобладает аккумуляция вещества (R_0). Ее относительное значение ($R_0 / \Sigma R$) характеризует наносоудерживающую способность водохранилищ — отношение (в процентах) массы отложений к приходной (расходной) части седиментационного баланса.

Наносоудерживающая способность всех водохранилищ, независимо от их размера, достаточно высокая и, как правило, превышает 95% (табл.45). Ее значение увеличивается при переходе от водохранилищ лесной зоны (56.0–97.7%) к водохранилищам лесостепной (96.4–99.8%) и степной (98.2–99.9%) зон. Наносоудерживающая способность самых малых водохранилищ – прудов б.Каракубанской составляет 98.2–99.9%.

Водохранилища лесостепной и степной зон в связи с большой мутностью поступающих в них вод (более 1 кг/м^3) задерживают практически все наносы. На сброс идет менее 4% общего поступления наносов, что находится в пределах точности определения объема отложений в прудах (14–18%). Поэтому при обобщении массовых материалов по заилению прудов лесостепной и степной зон можно не учитывать влияние на осадконакопление их проточности, сведения о которой обычно отсутствуют.

Если на водохранилищах ведутся наблюдения только над притоком взвешенных наносов из основного водотока (R_n) и сбросом их в нижний бьеф (R_c), то разность между ними, отнесенная к притоку взвешенных наносов, характеризует способность водохранилищ удерживать взвешенные наносы. Строго говоря, сбрасываются из водохранилища не только дошедшие до плотины речные наносы, но и взвеси, образовавшиеся в результате размыва берегов и ложа водоема. Однако учесть роль отдельных источников в формировании стока наносов из водохранилища пока не представляется возможным. В отличие от полной наносоудерживающей способности водохранилищ ($R_o/\Sigma R$) назовем их способность удерживать взвешенные наносы ($1 - \frac{R_c}{R_n}$) частной.

Значения частной наносоудерживающей способности водохранилищ, как и полной, возрастают при переходе от водохранилищ лесной зоны (11.5–90.1%) к водохранилищам лесостепной (95.0–99.4%) и степной (96.8–99.9) зон (табл.45). При этом с увеличением мутности речных вод уменьшается разница между полной и частной наносоудерживающей способностью водохранилищ, и в степной зоне их значения практически равны.

Связь между полной и частной наносоудерживающей способностью водохранилищ лесной и степной зон характеризуется коэффициентами корреляции, соответственно равными 0.96 и 0.72. Переход от частной наносоудерживающей способности водохранилищ к полной может быть осуществлен по следующим формулам:

для водохранилищ лесной зоны

$$R_o/\Sigma R = 27.3 \left(1 - \frac{R_c}{R_n}\right)^{0.24} \quad \text{и} \quad (4.10)$$

для водохранилищ степной зоны

Т а б л и ц а 45

Наносоудерживающая способность водохранилищ

Номер водохранилища	Наносоудерживающая способность, %		Средняя годовая мутность при-тока, г/м ³	Коэффициент водообмена
	полная	частная		
Зона тайги и смешанных лесов				
1	71.0	14.4	21	8.4
2	56.0	11.5	22	10.6
3	95.0	72.4	20	1.2
4	94.7	70.6	40	7.0
5	97.7	90.1	80	1.9
Лесостепная зона				
6	99.8	99.4	500	4.2
7	96.4	95.0	1440	5.5
8	99.4	99.2	1390	0.7
15	98.0	96.0	435	6.0
Степная зона				
21	99.4	96.8	550	0.4
22	99.3	99.1	2500	3.1
4/23	99.6	99.5	2400	2.2
5/24	99.3	98.9	2000	6.0
6/25	99.9	99.9	1000	0.05
7а/26	99.9	99.8	5500	1.3
7б/27	98.2	97.2	2000	27.8
8/28	99.6	99.2	2600	1.9
9/29	99.7	99.3	2000	0.6
Горная область				
30	98.0	97.8	2010	0.6

П р и м е ч а н и е. В графе первой дробный номер — по табл.1, остальные — по табл.7.

$$R_0/\Sigma R = 18.9 \left(1 - \frac{R_c}{R_n}\right)^{0.36}, \quad (4.11)$$

где $R_0/\Sigma R$ – наносоудерживающая способность водохранилищ, %, $1 - R_c/R_n$ – частная наносоудерживающая способность водохранилищ, %.

Средняя квадратическая ошибка расчета наносоудерживающей способности водохранилищ по выражениям (4.10) и (4.11) соответственно равна 5.6 и 0.4%.

Частная наносоудерживающая способность водохранилищ зависит главным образом от их проточности и мутности речных вод и может быть определена по следующим формулам:

для водохранилищ лесной зоны

$$\lg \left(1 - \frac{R_c}{R_n}\right) = 0.88 - 0.65 \lg (C/W) + 0.74 \lg \rho \quad (4.12)$$

и для водохранилищ степной зоны

$$\lg \left(1 - \frac{R_c}{R_n}\right) = 1.94 - 0.005 \lg (C/W) + 0.016 \lg \rho, \quad (4.13)$$

где C/W – коэффициент водообмена; ρ – средняя годовая мутность речных вод, г/м³.

Зависимости (4.12) и (4.13) характеризуются значением полного коэффициента корреляции $R_k = 0.88$, а точность расчета по ним соответственно равна 30 и 0.5%.

Изучение внутригодового режима притока взвешенных наносов и их сброса из водохранилищ позволяет составить представление о режиме осадконакопления в течение года, особенно в водохранилищах лесостепной и степной зон. По нашим данным, при мутности речных вод более 1.2–1.5 кг/м³ водохранилища „Волчьи Ворота“ и Отказненское задерживают почти все поступающие в них речные наносы (Прыткова, 1971в, 1973б).

Для определения полной наносоудерживающей способности водохранилищ по данным табл.45 составлены следующие уравнения регрессии:

для водохранилищ лесной зоны

$$\lg \frac{R_0}{\Sigma R} = 1.78 - 0.16 \lg \frac{C}{W} + 0.16 \lg \rho \quad (4.14)$$

и для водохранилищ степной зоны

$$\lg \frac{R_0}{\Sigma R} = 1.98 - 0.003 \lg \frac{C}{W} + 0.004 \lg \rho. \quad (4.15)$$

Полный коэффициент корреляции уравнений (4.14) и (4.15) соответственно равен 0.82 и 0.91, а их точность 11.5 и 0.2%.

Наносоудерживающая способность прудов на б.Каракубанской с точностью 0.1% может быть определена по уравнению

$$\lg \frac{R_0}{\Sigma R} = 1.99 + 0.004 \lg W + 0.002 \lg F_{\text{тр}}, \quad (4.)$$

где W – объем пруда, тыс.м³; $F_{\text{тр}}$ – площадь тростников, %.

Полный коэффициент корреляции этого уравнения равен 0.98.

Помимо уравнений (4.14) и (4.15), составлены с учетом в данных, приведенных в табл.45, общие уравнения регрессии для определения наносоудерживающей способности водохранилищ, имею вид

$$\lg \frac{R_0}{\Sigma R} = 1.89 + 0.06 \lg \frac{W}{\Sigma Q} + 0.04 \lg \rho \quad \text{и} \quad (4.)$$

$$\lg \frac{R_0}{\Sigma R} = 1.85 - 0.026 \lg \frac{C}{W} + 0.046 \lg \rho, \quad (4.)$$

где $W/\Sigma Q$ – время водообмена (отношение объема водоема к годовому притоку воды в него).

Полный коэффициент корреляции уравнений (4.17) и (4.18) равен соответственно 0.73 и 0.69, а их точность 8.2 и 9.7%.

Проверка зависимости (4.17) выполнена по данным о наносоудерживающей способности водохранилищ США (Brune, 1953). Для 31 водохранилища с относительно надежными исходными данными среднее квадратическое отклонение расчетных значений наносоудерживающей способности от фактических составило 6.5%. Поэтому зависимость (4.17), построенная по данным о наносоудерживающей способности водохранилищ Русской равнины, может быть использована для определения этой характеристики неизученных водохранилищ других равнинных территорий.

Все приведенные уравнения получены на основе обобщения фактических данных по наносоудерживающей способности водохранилищ (табл.45) в отличие от косвенных приемов ее расчета (Дрозд 1962; Пряткова, 1965; Лисицына, 1969; Молдованов, 1971; Кочубей, 1972). Они позволяют с указанной точностью выполнить оценку, не ориентируясь на данные американских исследователей (Brune, 1953).

4.6. Естественный (восстановленный) сток наносов временных водотоков

Зарегулированный сток взвешенных наносов, измеренный в нем бьефе прудов, составляет небольшую величину того естественного стока наносов, который транспортировал бы водоток, если не было прудов. Благодаря высокой наносоудерживающей способности пруды задерживают почти все поступающие в них наносы.

В связи с аккумуляцией части наносов в неровностях рельефа в процессе их транспорта по склону (Лопатин, 1952; Маккавеев, 1955; Караушев, 1977) в пруды с прилегающего водосбора поступает только часть продуктов склонового смыва, образовавшихся на водосборе. Ее значение можно ориентировочно оценить на основе ограниченных сведений о балансе наносов в пределах небольших водосборов и склонов (Лисицына, 1963; Лисицына, Боголюбова, 1964; Дрозд, Горещкая, Шкрябий, 1974; Старостина, 1972; Маркочева, 1967, 1972). Эти данные показывают, что транзитная часть стока наносов убывает с увеличением площади водосбора (коэффициент корреляции $r = -0.90$) и при значении последней 250 км^2 через створ измерений проходит всего 10% количества продуктов эрозии, образовавшихся на водосборе. С водосборов менее 1 км^2 выносятся 50–90% продуктов эрозии.

Упомянутые данные позволили определить с точностью 17.6% транзитную долю наносов в зависимости от площади водосбора по уравнению

$$\lg \alpha_R = 1.66 - 0.22 \lg F, \quad (4.19)$$

где α_R – доля стока наносов (процент общего количества продуктов смыва на водосборе); F – площадь водосбора, км^2 .

Естественный сток наносов в расчетном створе зарегулированного водотока, где основным источником наносов является склоновый смыв почвы, равен

$$R_e = R_c + \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_{R,i} \cdot R_i, \quad (4.20)$$

где R_e и R_c – соответственно естественный и зарегулированный сток наносов, т; R_i – истинный склоновый смыв почвы с частного водосбора i -го пруда, т; $\alpha_{R,i}$ – транзитная часть эрозии в долях продуктов склонового смыва почвы, образовавшихся на водосборе того же пруда.

Величина α_R в пределах каскада прудов на б.Каракубанской, согласно уравнению (4.19) уменьшается по его длине от 40% в створе плотины пруда № 1 (рис.1) до 30% в створе плотины пруда № 9 и в среднем составляет 35% истинного склонового смыва почвы. Последний примерно на 30% больше поступления продуктов склонового смыва в пруды каскада. Поэтому в формировании стока наносов балки участвует 50% продуктов склонового смыва, поступивших в пруды, или 35% общего количества продуктов эрозии на водосборе.

Средний годовой модуль стока наносов, поступивших с частного водосбора прудов каскада (табл.46), изменяется в значительном пределах ($36\text{--}640 \text{ т/км}^2$) и зависит главным образом от величины этого водосбора (коэффициент корреляции $r = -0.96$). Влияние среднего уклона частного водосбора пруда ($r = 0.33$) и среднего за период эксплуатации пруда модульного коэффициента годовой суммы

Т а б л и ц а 46

Средний годовой склоновый смыв почвы с прилегающего водосбора прудов на б.Каракубанской

Номер пруда	Период эксплуатации, годы	Площадь водосбора, км ²		Уклон водосбора, %		Модульный коэффициент годовой суммы осадков	Среднее годовое поступление наносов с прилегающих склонов				Средний годовой сток наносов балки за 1924-1976 гг.	
		общего	частного	общего	частного		за период эксплуатации пруда		за 1924-1976 гг.			
							т	т/км ²	т	т/км ²	т	т/км ²
1	1947-1960	13.2	13.2	5	5.0	0.49	-	-	204	15.5	102	7.7
2	1935-1960	15.1	8.2	5	7.6	0.78	-	-	166	20.2	185	12.2
3	1905-1960	15.9	8.9	6	7.4	1.0	-	-	209	23.5	289	18.2
4	1930-1975	17.5	1.6	6	9.0	1.03	207	130	192	120	386	22.0
5	1958-1975	18.5	1.0	7	20.0	1.25	203	203	190	190	482	29.2
6	1894-1975	19.3	4.6	8	22.4	1.0	163	36	201	43.6	580	30.0
7а	1901-1975	19.7	0.4	9	38.0	1.0	254	635	182	457	671	34.1
7б	1966-1975	19.8	0.14	9	24.0	1.39	89.7	640	172	1230	760	38.4
8	1971-1975	24.8	2.1	11	25.0	1.14	177	84	198	94.2	858	34.6
9	1941-1975	25.6	1.5	12	25.0	0.82	202	135	195	130	956	37.4

осадков ($r = 0.39$), характеризующего водность этого периода, на поступление наносов со склонов слабое. Для оценки смыва почвы с единицы площади водосбора значения последней, как и среднего уклон водосбора, вычислено с учетом наличия вышерасположенных прудов в отдельные периоды эксплуатации данного пруда (табл. 46).

Влияние хозяйственного использования водосбора (распаханности) на величину смыва почвы расчетом парных коэффициентов корреляции выявить не удастся, поскольку оно проявляется в сочетании с уклоном водосбора. Кроме того, степень распаханности водосбора может изменяться в течение периода эксплуатации водоема, а для очень равнинных водосборов важнее знать состояние наиболее крутых прилегающих к прудам склонов, активно участвующих в формировании стока воды и наносов.

Среднее годовое поступление наносов со склонов в пруды на б.Каракубанской с точностью 21,6% может быть определено по уравнению

$$\lg M_{R, \text{скл}} = 2.26 - 0.95 \lg \Delta F + 0.014 \lg J_{\Delta F} - 1.066 \lg k_x, \quad (4.21)$$

где $M_{R, \text{скл}}$ - средний годовой модуль стока наносов с прилегающего водосбора, т/км²; ΔF - площадь частного водосбора за период эксплуатации пруда, км²; $J_{\Delta F}$ - средний уклон частного водосбора за тот же период, %; k_x - средний модульный коэффициент годовой суммы осадков.

Уравнение (4.21) было использовано для приведения данных по стоку наносов с прилегающего водосбора прудов к общему периоду (при $k_x = 1.0$), а также для определения стока наносов с водосборов прудов №№ 1-3, баланс наносов которых не изучался.

Средний годовой модуль естественного стока наносов б.Каракубанской за 1924-1976 гг. увеличивается по длине водотока (табл. 46). Связь годового стока наносов с морфометрическими характеристиками водосбора балки характеризуется высокими значениями парных коэффициентов корреляции. В частности, он тесно связан с площадью водосбора (коэффициент корреляции $r = 0.94$) и средним его уклоном ($r = 0.93$). Его значение увеличивается вместе с увеличением среднего за период эксплуатации прудов модульного коэффициента годовой суммы осадков ($r = 0.73$). Связь среднего годового модуля стока наносов с площадью водосбора ($r = 0.89$) и его уклоном ($r = 0.87$) менее тесная, чем годового стока наносов. Поскольку между площадью водосбора и его уклоном существует тесная корреляция ($r = 0.96$), то эти характеристики могут быть взаимозаменяемы в расчетных зависимостях для определения годового стока наносов балки.

Уравнения регрессии для определения годового стока наносов б.Каракубанской имеют вид

$$\lg R = -0.781 + 2.71 \lg F + 0.79 \lg k_x \quad \text{и} \quad (4.22)$$

$$\lg M_R = -0.73 + 1.67 \lg F + 0.85 \lg k_x, \quad (4.21)$$

где R – средний годовой сток наносов, т; M_R – средний годовое модуль стока наносов, т/км²; F – площадь водосбора, км²; k_x – средний за период эксплуатации пруда модульный коэффициент годовой суммы осадков.

Полный коэффициент корреляции уравнений (4.22) и (4.23) соответственно равен 0.98 и 0.97, а их точность 10.9 и 10.0%. Эти уравнения могут быть использованы для ориентировочной оценки стока наносов балок, аналогичных б.Каракубанской.

4.7. Заиление каскадов прудов

В настоящее время наиболее изучено заиление верховых прудов и менее – каскадов. Последние обследованы главным образом Институтом озераведения АН СССР на территории Предкавказья (Каскады прудов..., 1975).

Уже первые обследования заиления каскадов прудов не показали ожидаемого уменьшения средней интенсивности заиления водоемов (отношения среднегодового объема отложений к начальному объему пруда) по длине каскада (Прыткова, 1971б). Теперь, когда исследован седиментационный баланс прудов на б.Каракубанской стало ясно, что пруды в связи с высокой наносоудерживающей способностью задерживают почти все поступающие в них наносы, сброс наносов в нижний бьеф, составляющий менее 2% общего и поступления, не влияет на заиление нижерасположенного пруда. Поэтому каждый пруд каскада можно рассматривать как изолированный водоем, получающий продукты эрозии не со всего водосбора а только с собственного (частного).

Осадконакопление в прудах практически равно общему поступлению наносов в пруд, которое находится в тесной зависимости от их объема водной массы, определяющего поступление наносов от размыва берегов и плотин и в какой-то степени с прилегающего водосбора. Продолжительность эксплуатации прудов способствует снижению средней интенсивности заиления прудов (Прыткова, 1971б) главным образом за счет уменьшения интенсивности размыва берегов и частично за счет уплотнения отложений. Ее влияние на заиление прудов в данных природных условиях частично учитывается величиной объема водной массы, который тесно коррелирует с ней. Водность периода эксплуатации прудов влияет на их заиление через поступление наносов с водосбора и за счет размыва берегов. В годы повышенной водности пруды стоят в высоком наполнении и интенсивность берегового процесса возрастает. Увеличения смыва наносов с водосбора в такие годы может не наблюдаться в связи с повышением общей увлажненности территории и защитных свойств растительного покрова (Langbein, Schumm, 1958). Поэтому

влияние водности периода эксплуатации прудов, оцениваемой средним модульным коэффициентом годовой суммы осадков, на их заиление не всегда выявляется.

Помимо перечисленных факторов, на заиление прудов влияет морфологическое строение чаши водоема и хозяйственное использование прилегающей территории. Мелководные водоемы при одном и том же объеме водной массы подвержены большему зарастанию тростником, чем глубоководные. Последние, как правило, имеют более крутые прилегающие склоны и в их заилении продукты смыва почвы принимают большее участие, чем в заилении мелководных прудов. Деление прудов на мелководные и глубоководные выполнено условно на основе графиков связи средней глубины с объемом пруда. Для каждой группы прудов составлены уравнения связи между указанными морфометрическими характеристиками (табл. 47) вида

$$\lg W_0 = \alpha_0 + \alpha_1 \lg H_0, \quad (4.24)$$

где W_0 – объем водной массы до заиления, тыс.м³; H_0 – средняя глубина до заиления, м.

В табл.48 приведены расчетные уравнения для определения среднего годового объема отложений в прудах исследованных нами каскадов на территории Предкавказья.

Общий вид уравнений регрессии следующий:

$$\lg R_0 = \alpha_0 + \alpha_1 \lg W_0 + \alpha_2 \lg T + \alpha_3 \lg k_x, \quad (4.25)$$

где R_0 – средний годовой объем отложений, тыс.м³; W_0 – начальный (до заиления) объем пруда, тыс.м³; T – продолжительность эксплуатации, годы; k_x – средний модульный коэффициент годовой суммы осадков за период эксплуатации пруда.

Для определения среднего модульного коэффициента годовой суммы осадков использованы данные, приведенные в работе Ф.З. Батталова (1968) и дополненные нами за последние годы.

Уравнения регрессии характеризуются высокими значениями полного коэффициента корреляции (0.83–0.99), а средняя квадратическая ошибка расчета по ним среднего годового объема отложений в прудах составляет для большинства каскадов менее 40% (табл. 48). Эти уравнения позволяют выполнить сравнительную оценку интенсивности заиления прудов различных каскадов Предкавказья по величине свободного члена (α_0), который представляет средний годовой объем заиления прудов при $W_0 = 1$ тыс.м³, $T = 1$ году и $k_x = 1.0$.

Заиление каждого каскада прудов имеет свои особенности, обусловленные различными эрозионными условиями на их водосборах. Например, на водосборе р.Мокрой Буйволы сочетается большое эрозионное расчленение рельефа (0.8 км/км²) со значительной распаханностью (78%), а на водосборе р.Этоки расчлененность

Т а б л и ц а 47

Уравнения регрессии вида (4.24)

Водоток	Группа водо-храни-лищ	Количе-ство водо-храни-лищ	Коэффициенты регрессии		Коэфф-циент корреляции
			α_0	α_1	
Каскады прудов					
Томузловка	1	41	1.170	2.114	0.84
	2	49	0.223	1.801	0.85
Этока	1	13	0.830	2.113	0.90
	2	8	0.071	1.719	0.82
Татарка	1	20	1.296	2.700	0.90
	2	10	0.522	2.453	0.80
Мокрый Карамык	1	11	0.246	3.424	0.88
	2	7	-0.334	4.110	0.96
Мокрая Буйвола	1	12	1.375	2.091	0.91
	2	16	0.710	2.103	0.90
Грузская, Плоская, Каракубанская	1	8	1.897	2.496	0.97
	2	25	1.401	2.855	0.80
Верховые пруды					
Азово-Кубанская равнина	1	12	1.786	2.130	0.78
	2	11	0.720	3.408	0.83
Ставропольское плато	1	12	1.158	2.902	0.93
	2	27	0.687	2.873	0.97

П р и м е ч а н и е. Во второй графе здесь и далее под цифрой 1 значатся мелководные пруды, под цифрой 2 - глубоководные

рельефа еще больше (1.7 км/км^2), а распаханность меньше (48%). В итоге пруды на Этоке заиляются менее интенсивно, чем на И крой Буйволе (табл.48). Вместе с тем размещение каскадов прудов на территории одного природного района определяет общность процесса их заиления и отличие от такового каскадов прудов других территорий.

Т а б л и ц а 48

Уравнения для расчета среднего годового объема отложений в прудах каскадов (вида 4.25)

Водоток	Группа водо-храни-лищ	Число водое-мов	Коэффициенты регрессии				Полный коэффициент корреляции (R_k)	Средняя квадратическая ошибка расчета R_0 , %
			a_0	a_1	a_2	a_3		
Река Томузловка	1	41	-0.534	0.661	-0.606	5.520	0.83	51
	2	49	-0.588	0.926	-0.865	0.108	0.91	96
Река Этока	1	13	-1.365	0.842	-0.088	19.162	0.94	29
	2	8	-0.414	0.616	-0.576	0.941	0.96	15
Река Татарка	1	20	-0.352	0.911	-0.901	4.865	0.94	41
	2	10	-0.147	1.096	-1.209	4.220	0.92	49
Река Мокрая Буйвола	1	12	-0.079	0.958	-1.215	6.409	0.94	38
	2	16	0.178	0.642	-1.096	-6.748	0.88	42
Река Мокрый Карамык (без р.Татарки)	1	11	1.442	1.209	-2.333	-49.826	0.99	27
	2	7	-0.972	1.451	-0.877	-16.399	0.96	39
Балки Грузская, Плоская, Каракубанская	1	8	-0.012	1.079	-1.209	-12.208	0.99	27
	2	25	-0.453	0.941	-0.989	-3.177	0.91	41

Уравнения регрессии для определения среднего годового объема отложений в каскадах прудов, составленные без учета морфологии водоема и водности периода его эксплуатации, имеют вид:
для западного Предкавказья

$$\lg R_0 = -0.48 + 0.99 \lg W_0 - 1.0 \lg T, \quad (4.24)$$

для восточного Предкавказья

$$\lg R_0 = -0.51 + 0.88 \lg W_0 - 0.82 \lg T, \quad (4.25)$$

где условные обозначения соответствуют уравнению (4.24).

Аналогичные уравнения для верховых прудов западного и восточного Предкавказья (Прыткова, 1979) записываются в виде

$$\lg R_0 = -0.81 + 0.94 \lg W_0 - 1.0 \lg T, \quad (4.26)$$

$$\lg R_0 = -0.56 + 0.74 \lg W_0 - 0.69 \lg T. \quad (4.27)$$

Из сопоставления уравнений регрессии (4.26)–(4.29) следует, что расчет заиления каскадов и верховых прудов Восточного Предкавказья может производиться по одним уравнениям регрессии. Западном Предкавказье каскады прудов, обследованные после пыльных бурь 1969 г., показали большую интенсивность заиления, чем верховые пруды. В связи с этим уравнение регрессии для каскадов прудов (4.26) может быть использовано для расчета заиления верховых прудов, оказавшихся в зоне действия пыльных бурь.

Расчетные уравнения для определения среднего годового объема отложений в прудах каскадов (табл. 48) соответствуют некоторым средним эрозионным условиям на их водосборах, отклонение от которых вызывает расхождение между фактическими и расчетными значениями этого показателя заиления. Поэтому появляется возможность дать ориентировочную оценку влияния эрозионных условий на водосборе на заиление водоема. Для этого все изученные пруды Предкавказья по состоянию прилегающих склонов были разбиты на три группы. В первую группу вошли пруды, прилегающие склоны которых распаханы до уреза и заняты под сады и огороды сельскохозяйственные культуры. Ко второй группе отнесены пруды, где интенсивной обработке подвергнут один склон, а второй залужен и используется под выпас скота. К этой же группе отнесены пруды с осуществлением частичных мероприятий против заиления (обвалование одного из берегов). В третью группу вошли пруды, прилегающая полоса к которым залужена, хотя в ее по склону может находиться пахота. Наличие оврагов на водосборе резко увеличивает заиление прудов, независимо от выполнения защитных мер вблизи водоема.

Каскады прудов характеризуются большим разнообразием использования прилегающих склонов, чем верховые пруды Предкавказья. Вокруг прудов на реках Татарке и Этоке, как правило, прохо-

залуженная полоса, используемая для выпаса скота, а выше ее по склону находится пахота. Прилегающая часть водосбора прудов на балках Грузской, Плоской и Каракубанской обычно распаханна до уреза, и по берегам расположены сады и огороды. Только в редких случаях один из склонов остается нераспаханным и используется под выпас скота.

В результате группировки верховых прудов Предкавказья по состоянию прилегающих склонов в первую группу вошло 17 прудов со средним уклоном водосбора 17.5‰ и распаханностью 88%, во вторую – 13 прудов, средний уклон водосбора которых равен 32.5‰, а распаханность 87%, и в третью – 17 прудов со средним уклоном водосбора 41.2‰ и распаханностью 80%. Из этих данных видно, что распашке до уреза подверглись пологие склоны (I группа прудов), а при крутых склонах вокруг водоема сохраняется или создается залуженная полоса (3 группа прудов). Следовательно, сочетание малого уклона водосбора с большой его распаханностью и, наоборот, большого уклона водосбора с малой распаханностью – закономерность, но она затрудняет выявление влияния каждого из этих факторов в отдельности на заиление прудов.

Пруды первой группы в среднем заиляются в 2.1 раза интенсивнее, чем пруды третьей группы. Это видно по величине соотношения между фактическим и расчетным значением среднего годового объема отложений ($R_{0,ф}/R_{0,р}$), равного для прудов 1 и 3 группы соответственно 1.76 и 0.83. Это соотношение зависит от уклона водосбора (рис.22), причем в наибольшей степени – для водоемов 1 и 2 групп (коэффициенты корреляции соответственно равны 0.84 и 0.92). Для водоемов 3 группы эта связь слабая ($r = 0.36$), так как залуженная полоса надежно защищает водоемы от заиления продуктами эрозии, независимо от уклона водосбора. Данные по каскадам прудов на реках Татарке и Этоке, балках Плоской, Грузской и Каракубанской (рис.22, б) подтверждают зависимость соотношения $R_{0,ф}/R_{0,р}$ от уклона водосбора, установленную для верховых прудов (рис.22, а).

Таким образом, через соотношение между фактическим и расчетным значением среднего годового объема отложений в прудах оказалось возможным оценить влияние на осадконакопление эрозионных условий водосбора и эффективность залуженной полосы вокруг водоема в снижении интенсивности его заиления.

Величина $R_{0,ф}/R_{0,р}$ представляет поправку к уравнениям регрессии (табл.48) и для ее определения составлены следующие уравнения:

для прудов 1 группы

$$\lg \frac{R_{0,ф}}{R_{0,р}} = -0.6 + 0.7 \lg J_v, \quad (4.30)$$

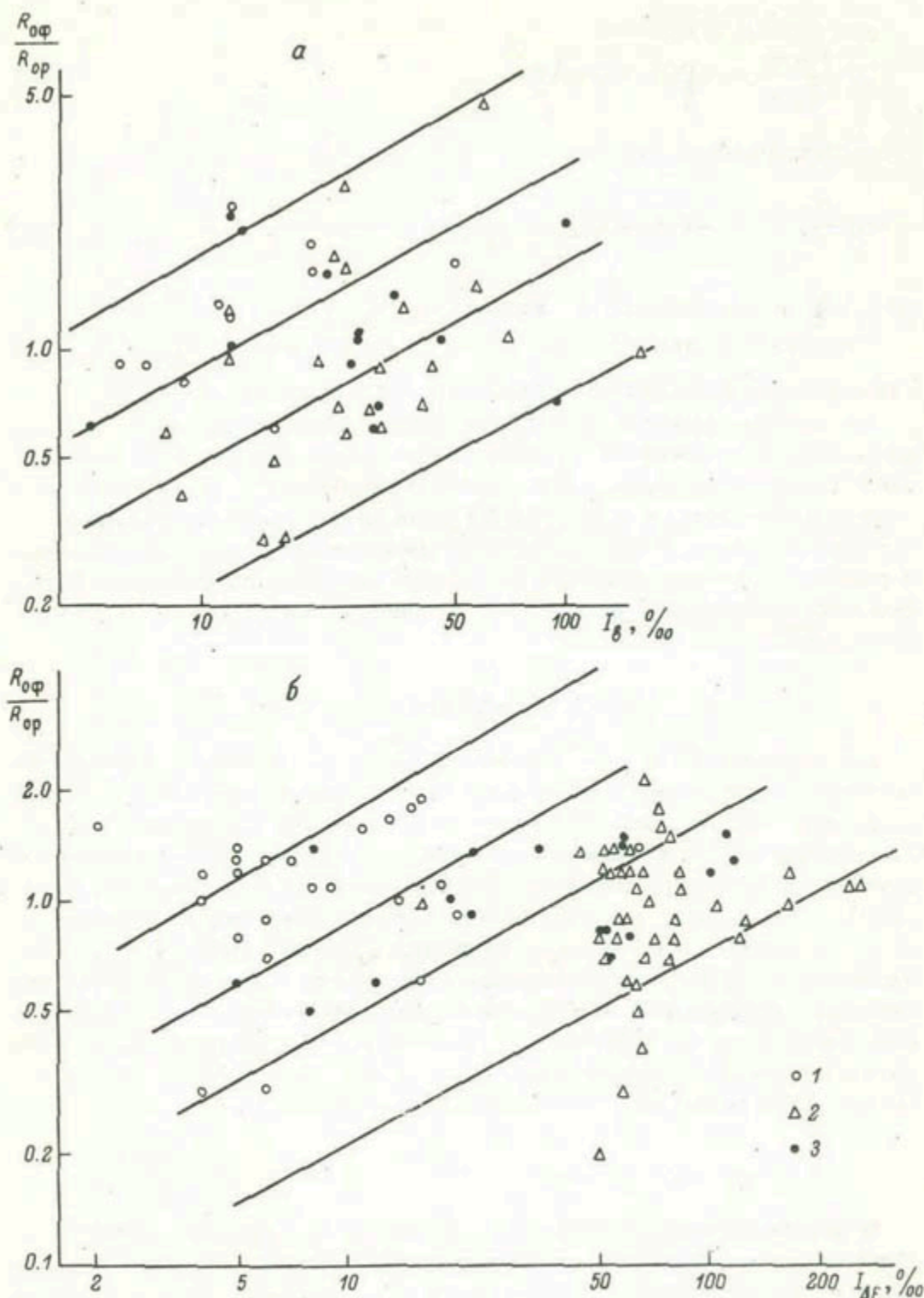


Рис.22. Связь соотношения между фактическим и расчетным значениями среднего годового объема отложений со средним уклоном водосбора верховых (а) и каскадов (б) прудов Предкавказья.

1 - прилегающие к пруду склоны распаханы до уреза; 2 - прилегающие склоны залужены; 3 - один прилегающий склон залужен, второй - распахан до уреза.

для прудов 2 группы

$$\lg \frac{R_{0, \Phi}}{R_{0, P}} = -0.6 + 0.4 \lg J_8 \quad (4.31)$$

и для прудов 3 группы

$$\lg \frac{R_{0, \Phi}}{R_{0, P}} = -0.5 + 0.2 \lg J_8, \quad (4.32)$$

где J_8 – средний уклон водосбора, %.

Средняя квадратическая ошибка определения $R_{0, \Phi}/R_{0, P}$ по приведенным уравнениям соответственно равна 29, 14 и 56%.

На основе уравнений (4.30)–(4.32) можно заключить, что защитная роль залуженной полосы вокруг водоема растет с увеличением уклона водосбора. При уклоне водосбора 10, 20 и 30% пруды 1 группы заиляются в 2.2, 2.9 и 3.1 раза интенсивнее по сравнению с прудами 3 группы. Наиболее неблагоприятным для заиления водоемов и развития эрозии является сочетание небольшого уклона с большой распаханностью водосбора и прилегающих склонов (1 группа водоемов).

Глава 5. СОЛЕВОЙ БАЛАНС ПРУДОВ*

Исследования солевого баланса каскада прудов на б.Каракубанской были организованы в целях выявления возможного участия продуктов хемогенной седиментации в осадконакоплении. Эти исследования имеют и самостоятельное значение в связи со слабой изученностью внутригодового режима химического состава воды прудов, работающих в каскаде. Имеющиеся сведения по этому вопросу относятся к меженному периоду (Тарасов, 1961; Форш, 1970; Позднякова, 1975), когда водная связь между прудами каскада ослаблена. Наблюдения над составом главных ионов проводились с июня 1973 по июнь 1976 гг., а химический баланс каскада прудов составлен за два гидрологических года (XI 1973–X 1974 и XI 1974–X 1975 гг.).

5.1. Состав главных ионов

В формировании химического состава воды прудов принимают участие воды следующих генетических категорий: атмосферные, поверхностно-склоновые и подземные. Соотношение ионов в них и минерализация неодинаковы. Минерализация атмосферных вод составляла всего 6–20 мг/л (табл.49). В большинстве отобранных проб преобладали гидрокарбонаты и кальций, что связано с соста-

* Автор главы – Г.В.Позднякова

Т а б л и ц а 49

Химический состав вод, питающих пруды на б.Каракубанской

Дата отбора	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Σ U, мг/л	Индекс, по О.А. Алекину
	экв. %							
Атмосферные воды								
14 VI 1973	47.1	21.6	35.3	52.9	35.6	11.5	13.4	C _{II} ^{Ca}
15 VIII 1974	37.9	15.6	46.5	64.1	23.4	12.5	19.8	C _I ^{Na, Ca}
23 VIII 1976	59.7	14.9	19.4+6.0	49.4	33.7	16.9	6.0	C _{II} ^{Ca}
Поверхностно-склоновые воды								
22 VI 1973	77.0	18.2	4.8	60.4	27.8	11.8	136.0	C _{III} ^{Ca}
16 VIII 1976	64.7	14.6	12.5+2.2	59.6	35.0	5.4	168.6	C _{II} ^{Ca}
21 VIII 1976	49.3	15.4	21.5+14.2	54.5	34.7	10.8	236.3	C _{II} ^{Ca}
Верховодка								
18 XI 1973	22.4	39.3	38.3	18.2	78.2	3.6	3130	S _{II} ^{Mg, Na}
23 III 1974	25.8	42.8	31.4	17.9	77.6	4.5	2578	S _{II} ^{Mg}
12 VI 1974	20.5	41.3	38.2	10.9	85.5	3.6	3722	S _{II} ^{Mg, Na}
Воды постоянного водоносного горизонта								
7 III 1974	18.0	39.4	42.6	11.8	83.8	4.4	4158	S _{II} ^{Na, Mg}
12 VI 1974	15.2	36.0	48.8	16.0	79.3	4.7	5345	S _{II} ^{Na, Mg}
12 VIII 1974	18.5	32.5	49.0	15.5	80.0	4.5	5516	S _{II} ^{Na}
3 III 1975	20.1	35.6	44.3	17.0	78.7	4.3	4024	S _{II} ^{Na, Mg}

вом растворимой части пыли, поднимаемой с почвенного покрова Азово-Кубанской равнины (Гиренко, 1959).

Минерализация поверхностно-склоновых вод изменялась от 136 до 236 мг/л с преобладанием, как и в атмосферных водах, гидрокарбонатов и ионов кальция (табл.49). Невысокая минерализация этих вод и соотношение ионов в них определяются присутствием в почвенном разрезе балки карбонатов кальция.

Эрозионным врезом балки вскрываются воды двух водоносных горизонтов – верховодки, наиболее активно действующей в период осенних морозящих дождей и зимних оттепелей, и первого от поверхности грунтового горизонта. Минерализация грунтовых вод балки в течение периода наблюдений составляла 3.7–5.5 г/л. Ее колебания являются результатом поступления в грунтовой водоносный горизонт менее минерализованных вод верховодки, сумма ионов которых изменялась от 2.6 до 4.1 г/л. По преобладающим компонентам воды обоих горизонтов принадлежат к сульфатно-магниево-натриевым, причем при повышении минерализации на первое место выступают ионы натрия, при ее понижении – ионы магния.

Колебания минерализации в воде каскада прудов были в основном близки к пределу изменения этой величины в грунтовых водах (2.7–7.0 г/л). Закономерного увеличения минерализации воды в прудах по длине балки не отмечалось. Пониженной минерализацией воды выделялся верхний пруд каскада № 4 в связи с поступлением в него большего объема вод верховодки, чем в остальные пруды каскада. Это явление мы связываем с большим удельным водосбором пруда (рис.6), а также слабым эрозионным врезом балки в ее верхней части, не достигающим уровня грунтовых вод.

Катионный и анионный состав воды большинства прудов был аналогичен составу грунтовых вод. Для него характерно следующее содержание основных компонентов: ионов кальция – 21–41 экв.%, магния – 30–43 экв.%, натрия и калия – 41–57 экв.%, гидрокарбонатов – 11–15 экв.%, сульфатов – 81–83 экв.%, хлоридов – 4–5 экв.%. Близость химического состава прудовых и грунтовых вод подтверждается общностью связи содержания в них сульфатов с суммой ионов. Уравнение связи для грунтовых вод записывается в следующем виде:

$$\Sigma U = 3.18 (SO_4^{2-})^{0.92}, \quad (5.1)$$

а для прудовых вод

$$\Sigma U = 4.72 (SO_4^{2-})^{0.87}, \quad (5.2)$$

где ΣU – минерализация воды, г/л; SO_4^{2-} – содержание сульфатов, г/л.

Ошибка расчета суммы ионов по этим уравнениям составляет соответственно 4.7 и 5.4%. Коэффициент полной корреляции уравнения (5.1) равен 0.97, а уравнения (5.2) – 0.96.

Т а б л и ц а 50

Растворимость CaCO_3 в воде прудов б. Каракубанской

Номер пруда	pH	$\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$, мг-экв.		
		вода пруда 14.VIII 1976 г.	вода пруда + CaCO_3	разница
4	8.4	7.20	6.40	-0.80
	8.4	7.20	6.40	-0.80
5	8.2	10.00	8.76	-1.24
	8.0	9.80	10.00	+0.20
6	8.3	8.40	6.44	-1.96
	8.3	8.40	7.60	-0.80
7а	8.0	12.70	11.60	-1.10
	7.8	13.00	12.20	-0.80
7б	8.2	11.40	10.30	-1.10
	7.8	11.64	11.00	-0.64
8	8.2	10.56	9.60	-0.96
	8.0	10.56	9.90	-0.66
9	8.6	7.60	6.90	-0.70
	8.3	7.98	7.30	-0.68

П р и м е ч а н и е. Числитель — поверхностные пробы, знаменатель — донные.

Несколько иные соотношения ионов отмечались лишь в воде прудов № 4 и 6. При повышении величины pH от 8.4–8.6 до 8.7–9.2 в летний период в их воде уменьшалось относительное содержание ионов HCO_3^- от 11–15 до 3–7 экв.%, а содержание ионов SO_4^{2-} увеличивалось от 81–83 до 89–92 экв.%. При этом абсолютная концентрация гидрокарбонатов падала от 400–670 до 100–190 мг/л. Очевидно, колебания величины pH, связанные с активностью фотосинтетической деятельности фитопланктона и макрофитов в прудах, приводили к сдвигу карбонатного равновесия. Степень насыщенности воды прудов карбонатом кальция в этот период достигала 2.7–13.4 кратности (Алекин, Моричева, 1955).

Хотя многими исследователями установлена способность природных вод образовывать пересыщенные растворы без заметного выделения в осадок карбоната кальция, мы все же полагаем, что в прудах б. Каракубанской, несмотря на невысокую степень пере-

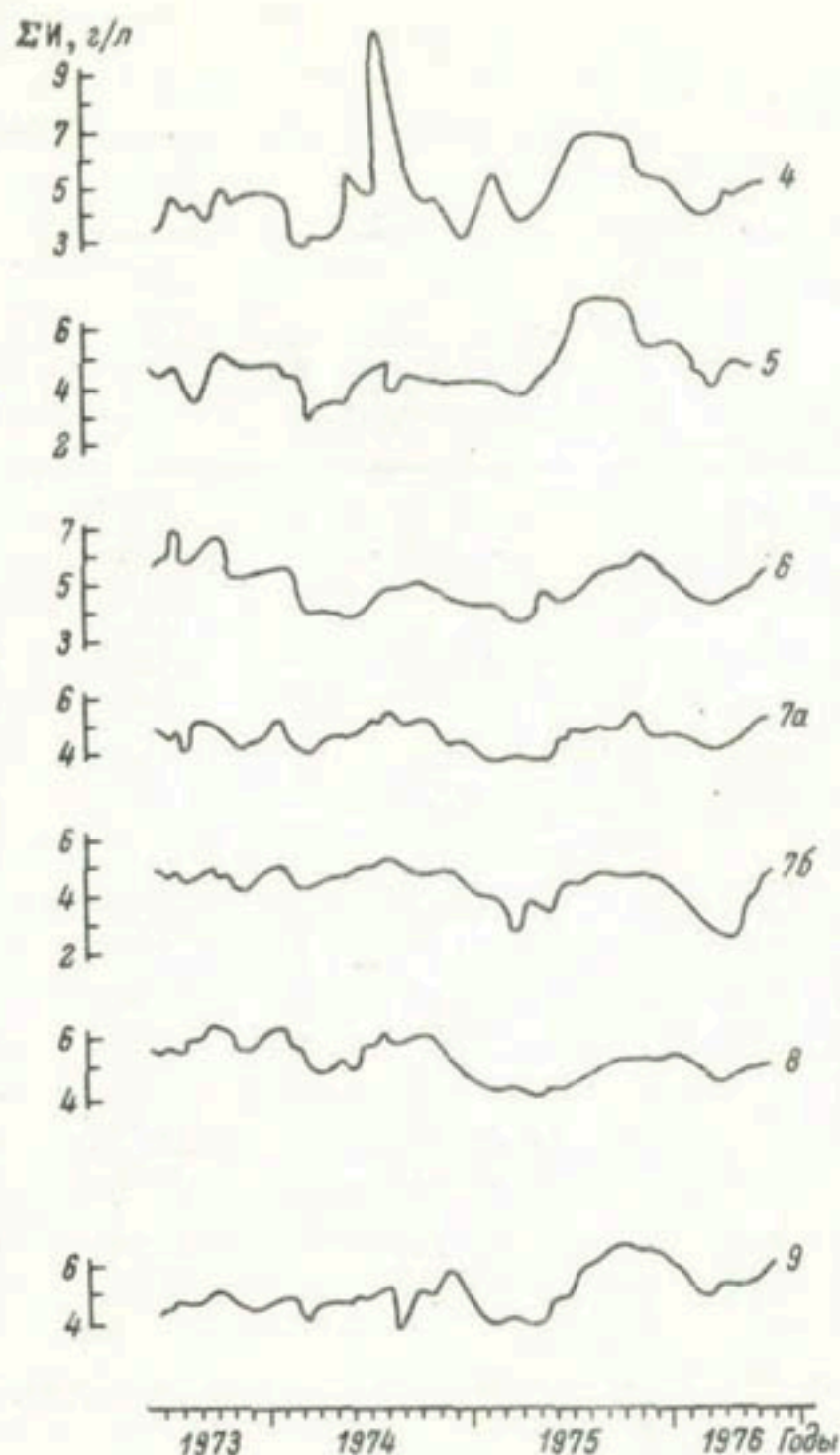


Рис.23. Изменение средней месячной минерализации воды прудов на б.Каракубанской.

сыщения, выпадение карбоната кальция имеет место. Этот вывод основывается на эксперименте по определению растворимости CaCO_3 в воде рассматриваемых прудов. После добавления в пробы воды карбоната кальция и трехдневного контакта воды и карбоната содержание ионов HCO_3^- в пробах не только не возросло, а, наоборот, уменьшилось (табл.50). Результаты эксперимента свидетельствуют, что физико-химические показатели воды прудов не способствуют дополнительному растворению карбонатов и их переходу в водную фазу. Они показывают также достаточную насыщенность воды прудов карбонатом кальция, при которой введение избыточного карбоната кальция, являющегося в данном случае стимулятором процесса кристаллизации, вызвало выделение карбоната кальция в осадок.

Вместе с тем выпадение карбоната кальция не приводило к существенным изменениям химического состава воды в течение трех лет наблюдений. Сезонные изменения выражались в основном в колебании минерализации, амплитуда которых в верхнем пруду каскада (№ 4) была значительно больше, чем в нижерасположенных (рис.23). Так, коэффициент вариации суммы ионов в воде пруда № 4 составлял 25.2%, в воде пруда № 9 – 13.1%. Сглаживание амплитуды колебаний минерализации воды несомненно является результатом каскадного расположения прудов. Это явление отмечалось и в других каскадах, например в каскаде водохранилищ на р.Днепр (Денисова, 1971).

Пруды б.Каракубанской на гидрохимической карте, составленной для территории Азово-Кубанской равнины Н.В.Веселовским и М.Н.Тарасовым (1957), относятся к району с водой сульфатного класса и суммой ионов 3–8 г/кг. Наши исследования подтвердили это. Следовательно, изучаемый каскад прудов типичен для территории верховий правобережных притоков р.Еи, бассейна р.Егорлык и левобережных притоков р.Сал.

5.2. Солевой баланс каскада прудов

Расчет химического баланса каскада прудов на б.Каракубанской производился на основе водного баланса (табл.14, 16) с учетом минерализации воды каждого элемента последнего. В приходной части химического баланса прудов за 1973–1975 гг. (табл.51) основная роль принадлежит поступлению солей со сбросами воды из вышерасположенного пруда (Π_0). Эта статья прихода солей преобладает над другими как в количественном, так и в процентном отношении (рис.24, табл.51). Объем и доля этих вод особенно велики весной (III–V), когда пруды, наполненные в осенне-зимний период за счет активного поступления вод верховодки, начинают сбрасывать воду. Летом и осенью роль этих вод ослаблена (рис. 24).

В притоке солей в пруды вторым по значению является их принос с родниковыми водами (Π_p), роль которых особенно возрастает в осенний период (рис.24), когда приход солей со сбросными водами еще невелик. Зимой и весной доля притока солей с родниковыми водами уменьшается, несмотря на увеличение дебита родников и их большую роль в водном питании прудов, так как в этот период родниковые воды наименее минерализованы.

Объем поступления солей с грунтовыми водами и водами верховодки (Π_n^1), залегающими в берегах балки, значительно меньше, чем их принос из сосредоточенных родниковых выходов, но тенденция внутригодового распределения их поступления в пруды примерно та же, что и для родниковых вод (рис.24).

Т а б л и ц а 51

Средний годовой солевой баланс прудов каскада на б.Каракубанской
(X1 1973-X 1975 гг.)

Номер пруда	Приход, %						Итого, т	Расход, %			Итого, т	А, т	Невязки	
	П _о	П _{скл}	П _{ос}	П _п	П _р	Ф'		С	З	Ф			т	%
4	37.1	0	0.1	0.4	45.0	17.4	265.5	47.2	0	52.8	340.8	-37.6	-37.7	14
5	40.8	0.1	0.1	3.5	27.2	28.3	416.3	70	1.1	28.9	407.8	-3.3	11.8	3
6	43.2	0.2	0	3.0	40.3	13.3	669.1	3.4	0.8	95.8	398.1	208.9	62.1	9
7а	31.6	0.5	0.1	24.5	39.1	4.2	176.1	34.2	1.2	64.6	152.8	1.0	22.3	13
7б	25.6	0.05	0.05	0.3	27.9	46.1	201.8	74.4	0	25.6	205.3	0.6	-4.1	2
8	51.8	0.2	0.1	24.2	3.1	20.6	304.8	54.4	1.2	44.4	282.6	-0.5	22.7	8
9	31.7	0.2	0.1	0	49.0	19.0	477.2	40.2	0.6	59.2	443.9	-8.3	41.6	9

П р и м е ч а н и е. Условные обозначения по тексту.

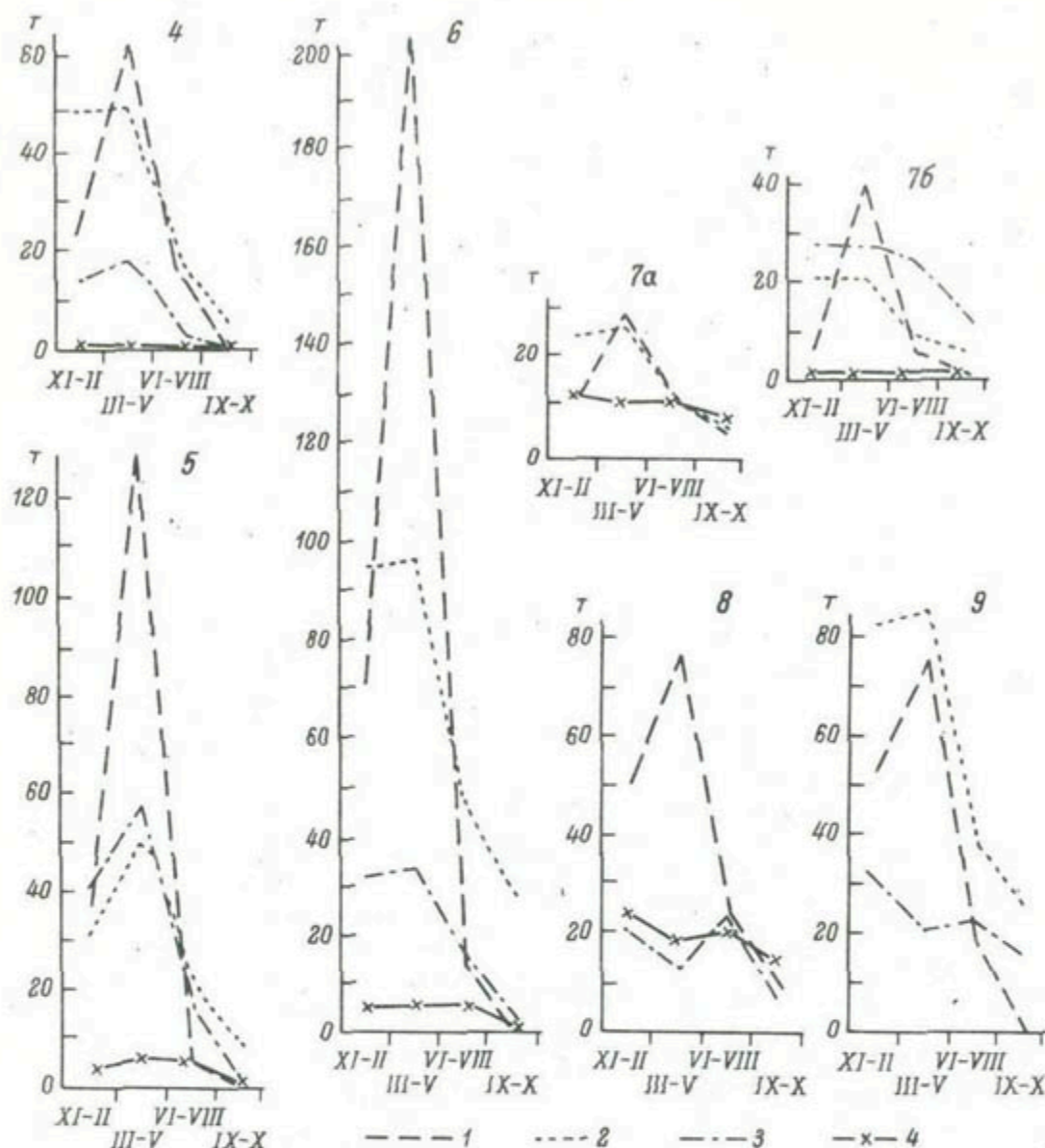


Рис.24. Среднее сезонное поступление солей в пруды на б.Каракубанской (1973-1975 гг.).

1 - со сбросами воды из прудов; 2 - с родниковыми водами; 3 - с фильтрационными; 4 - из постоянного водоносного горизонта.
Ц и ф р ы над графиком - номер пруда

Воды фильтрационного потока, образующегося при фильтрации воды прудов через основание и тело плотины (Φ^1), в количественном отношении играют значительно меньшую роль в формировании химического состава воды в прудах (рис.24), чем вышеперечисленные составляющие. Но для отдельных прудов, например для пруда № 76, их роль велика - до 46,1% от общего поступления солей (табл.51). Она особенно возрастает в летний и осенний пе-

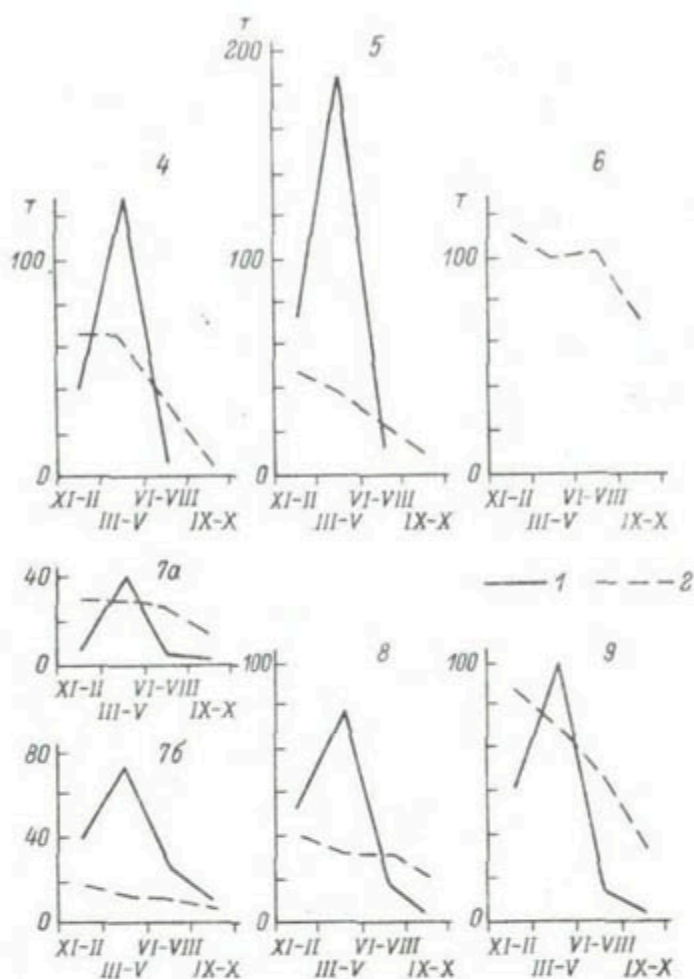


Рис.25. Средний сезонный расход солей из прудов б.Каракубанской.

1 — со сбросными водами; 2 — путем фильтрации.

Ц и ф р ы под графиком — номер пруда.

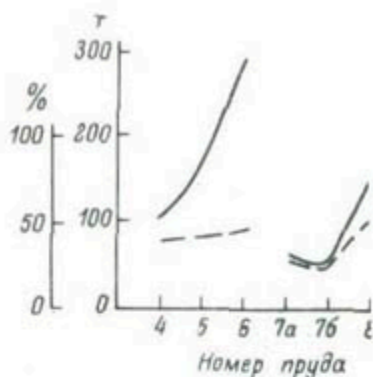
риоды, когда поступление солей со сбросными водами снижается (рис.25).

Значение поступления солей в пруды с атмосферными водами ($P_{ос}$) и водами поверхностно-склонового стока ($P_{скл}$) ничтожно мало по сравнению с другими статьями прихода и составляет всего 0.1–0.2% для атмосферных вод и 0.1–0.6% для поверхностно-склоновых (табл.51). Уменьшение их роли в химическом балансе прудов по сравнению с водным (26–34%) связано с невысокой минерализацией этих вод.

Выносятся соли из прудов в основном с водой, сбрасываемой через водосбросное устройство (С) и фильтрующейся через тело и основание плотины (Ф). Роль сбросных вод наиболее значительна в весенний период (рис.25), а фильтрационных — зимой. Удаление солей из прудов на хозяйственные нужды (З) невелико и составля-

Рис.26. Изменение сброса солей из прудов на б.Каракубанской по длине каскада.

1 - в т.; 2 - в % расхода.



ет для большинства прудов не более процента. Наибольший р сброс солей на эту статью отмечался летом в прудах № 5, № 7а, № 8.

Невязки, полученные при составлении химического баланса вод, не превышают допустимых при гидрологических расчетах, составляют 2-14% приходной части. Во всех прудах, кроме № 4, они имеют положительный знак, что указывает на недостаток в расходе солей. Возможно, большую часть невязок можно отнести за счет выпадения карбоната кальция. Количественно невязки баланса и ежегодный прирост карбоната кальция в донных отложениях прудов, ориентировочный расчет которого приведен в 1, вполне сопоставимы (табл.40).

При формировании химического состава воды пруда, как указывалось ранее, важным является положение пруда в каскаде, длине каскада нами было отмечено уменьшение амплитуды годовых изменений минерализации. В химическом балансе пруда это нашло отражение в увеличении по длине каскада как объема так и роли сбросных вод, являющихся основным поставщиком солей в пруды. Кривые, показывающие изменение этой составляющей по длине балки на рис.26, на участке пруда № 6 разрываются, как большой объем пруда и глухая плотина способствует задержке стока воды по руслу и аккумуляции в нем воды и солей.

Морфометрия прудов, их гидрологический режим не оказывают заметного влияния на изменение в соотношении составляющих приходной части химического баланса. Размеры прудов больше влияют на относительные составляющие в расходе солей, что отмечалось и для водного баланса каскада. В маленьких проточных прудах, примером которых в каскаде может служить пруд № 7б, вышена роль сбросных вод, в больших малопроточных - наоборот велика роль фильтрационных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые выполненные комплексные исследования каскада из 7 прудов, включающие изучение эрозионных условий на водосборе б. Каракубанской, морфометрических характеристик водоемов, их гидрологического режима, водного, седиментационного и солевого балансов, гидробиологии, позволили разработать методику исследований и получить новые данные, касающиеся источников наполнения и заиливания водоемов, их наносодерживающей способности. Результаты исследований сопоставлены с аналогичными данными по другим водохранилищам, что дало возможность выявить особенности морфологии чаши прудов, их водного и седиментационного балансов.

Осадконакопление рассматривается как сложный нестационарный многофакторный процесс, требующий комплексного подхода к изучению. В основу исследования положено известное представление о связи водоема с водосбором, проявляющейся через все виды баланса водоема и обуславливающей географическую зональность показателей осадконакопления и состава донных отложений в прудах. Результаты исследований каскада прудов, анализируемые в книге в географическом, гидрологическом и водохозяйственном аспектах, сводятся к следующим основным выводам.

Выделение прудов в особую группу малых водохранилищ обусловлено особенностями морфологического строения их чаши, тесно связанного с размещением водоемов в верхних звеньях гидрографической сети, имеющей небольшую глубину вреза и пологие склоны. В отличие от других водохранилищ в прудах небольшому изменению средней глубины соответствует резкое изменение объема водной массы. Объем прудов обычно менее 1 млн. м^3 , а показатель открытости менее $0,1 \text{ км}^2/\text{м}$.

Структура водного баланса прудов отличается от таковой водохранилищ другого размера и поэтому результаты исследования водного баланса наиболее изученных крупных водохранилищ не могут быть перенесены на пруды. С уменьшением размера водохранилищ возрастает роль в их наполнении осадков на зеркало, стока с прилегающего водосбора, родникового стока и уменьшается — притока из основного водотока. При каскадном размещении прудов в их наполнении значительную роль играют фильтрационные воды из вышерасположенных прудов. Элементы расходной части водного

баланса прудов (испарение, фильтрация) находятся в большой зависимости от их размера, следствием которой является уменьшение сброса воды из них и коэффициента водообмена с увеличением объема прудов.

Изменение свойств донных отложений прудов, по механическому составу сходных с почвами водосбора и грунтом берегов, подчиняется закону географической зональности: донные отложения степной зоны обычно мельче, чем лесостепной. Содержание в донных отложениях прудов и береговом грунте тесно коррелирует с содержанием органического вещества, которое зависит от зарастания прудов тростником. Донные отложения прудов накапливают органическое и питательные вещества.

Вода прудов содержит значительно больше взвесей, чем более крупных водохранилища того же природного района. способствует постоянное взмучивание поверхностного слоя донных отложений ветровым волнением, поступление в пруды мутных новых вод, небольшая длина водоемов, в пределах которой не успевают выпасть в осадок поступившие наносы. В связи с малой глубиной прудов обычно не наблюдается уменьшения мутности по направлению к плотине. Чаше, наоборот, мутность прудовой воды возрастает в этом направлении за счет поступления в эту часть водоема продуктов взмучивания донных отложений при размыве берегов и плотины.

Основными источниками заиления прудов являются процессы склонового смыва почвы с прилегающего водосбора и размыва берегов. Другие источники — органическое вещество внутриводоемного происхождения, продукты хемогенной седиментации имеют второстепенное значение. При каскадном размещении прудов наносы из вышерасположенного пруда не влияют на заиление нижнего.

В расходной части седиментационного баланса прудов основным элементом является осадконакопление, объем которого в результате полевых работ определяется с точностью 14-18%. Пруды задерживают более 98% поступающих в них наносов. Их наносоудерживающая способность зависит от коэффициента водообмена, уклона склонового стока, зарастаемости тростником. В связи с высокой наносоудерживающей способностью пруды эффективно защищают от заиления более крупные реки и водоемы. По этой же причине данные по заилению прудов большой территории могут обобщать и учитывать доли наносов, сбрасываемых в нижний бьеф.

На основе сопоставления седиментационного баланса водоемов Русской равнины с учетом их размера установлено, что водохранилища получают наибольшее количество продуктов водосбора в лесостепной зоне, а продуктов размыва берегов — в степной. Общее поступление осадкообразующего материала в водохранилища лесостепной и степной зон примерно одинаково.

Важной характеристикой седиментационного баланса водоемов является соотношение между аллохтонным и автохтонным

ществом, практически равное соотношению между продуктами эрозии водосбора и размыва берегов в приходной части баланса. Это соотношение количественно характеризует связь водоема и осадконакопления с водосбором и убывает с увеличением объема водохранилищ, определяя отличительную черту поступления осадкообразующего материала в пруды, состоящую в преобладании продуктов эрозии водосбора над продуктами размыва берегов, особенно в лесостепной зоне. Большим влиянием водосбора на осадконакопление в прудах объясняется географическая зональность показателей заиления и состава донных отложений этих водоемов.

Осадконакопление в прудах практически равно приходной части седиментационного баланса и находится в зависимости от объема водоема и периода его эксплуатации. При построении расчетных зависимостей для определения среднего годового объема отложений в каскадах прудов Предкавказья сделана попытка учесть также морфологию чаши водоема и водность периода эксплуатации. Составленные уравнения регрессии позволяют выполнить расчет заиления прудов в каскадах и сопоставить интенсивность заиления этих водоемов, расположенных на разных водотоках. В связи с общностью процесса заиления прудов одного природного района интенсивность заиления верховых прудов и в каскадах практически одинакова и может определяться по одним расчетным зависимостям. Пруды в каскаде, как показали исследования седиментационного баланса, следует рассматривать как изолированные водоемы, получающие продукты эрозии с собственного (частного) водосбора.

На водосборах прудов обычно сочетается небольшой уклон со значительной распаханностью и, наоборот, малая распаханность территории с большим ее уклоном, что затрудняет выявление роли в осадконакоплении каждого из этих факторов в отдельности. Влияние на осадконакопление в прудах состояния прилегающих склонов выявлено через отклонение расчетных значений среднего годового объема отложений от фактических. В результате установлено, что пруды, прилегающие склоны к которым распаханы до уреза, заиляются в 2 раза быстрее по сравнению с прудами, вокруг которых имеется залуженная полоса. Защитная роль этой полосы растет с увеличением уклона водосбора.

Выполненные исследования позволили оценить средний годовой сток воды и наносов б.Каракубанской как элементы водного и седиментационного балансов прудов соответственно.

Исследования солевого баланса каскада прудов подтвердили принципиальную возможность выпадения карбонатов из водной массы и их участие в формировании донных отложений. Расположение прудов в каскаде приводит к сглаживанию амплитуды колебания минерализации воды по длине каскада.

Л и т е р а т у р а

- А г р о к л и м а т и ч е с к а я характеристика Ново-Покровского района Краснодарского края. Ростов-на-Дону, 1963. 39с.
- А г р о х и м и ч е с к а я характеристика почв СССР. Районы Северного Кавказа. М., 1964. 365 с.
- А г р о х и м и ч е с к и е методы исследования почв. М., 1975. 656 с.
- А л е к и н О.А., М о р и ч е в а Н.П. Расчет характеристик карбонатного равновесия. - В кн.: Современные методы химического анализа природных вод. М., 1955, с.158-171.
- Б а р а н о в В.А., Б ы с т р о в И.А. Солевые балансы как метод определения величины и направленности внутриводоемных процессов. Водные ресурсы, 1972, № 3, с.190-207.
- Б а р а н о в В.А., К о д и ц а Н.И. Седиментация взвешенного вещества и выпадение карбонатов в Старо-Крымском водохранилище (Донбасс). - Тр. Всес. н.-и. ин-та "ВодГео", 1964, вып.10, с.3-23.
- Б а р б а р Я.Л. Исследование гидрологического режима водоемов и местного стока в условиях моренно-холмистого рельефа Латвийской ССР. Автореф. канд. дис. Елгава, 1968.
- Б а т т а л о в Ф.З. Многолетние колебания атмосферных осадков и вычисление норм осадков. Л., 1968. 184 с.
- Б а ш м а к о в а О.М., Т к а ч е в а В.И., К р у п е н я Л.М. М а т в е е в А.А. Оценка поступления веществ из атмосферы с пылью и атмосферными осадками. - В кн.: Тезисы докладов 1У Всесоюзного гидрологического съезда. Секция качества вод и научн. основ их охраны. Л., 1973, с.38.
- Б о й к о И.С. Водный баланс водохранилища "Волчьи Ворота". - В кн. Заиление водохранилища "Волчьи Ворота" и цепочек прудов на его водосборе. Л., 1971, с.167-182.
- Б о й к о И.С. Микрорельеф обработанного склона и его роль в стокообразовании. - ДАН СССР, 1977, т.235, № 2, с.479-482.
- Б о й к о И.С., З а р р и н М.П. Склоновый линейный сток воды наносов на Приазово-Кубанской равнине. - ДАН СССР, 1976, т.226, № с.198-200.
- Б о р с у к О.Н. К вопросу изучения стока зарегулированных рек. - Тр. ГИ, 1955, вып.47(101), с.4-19.
- Б о р с у к О.Н. Искусственная зарегулированность стока малых рек Европейской части СССР. - Тр. ГИ, 1957, вып.62, с.3-23.
- Б о ч к о в Н.М. Формирование и прогнозирование качества воды в водохранилищах как метод улучшения проектирования и эксплуатации их для производственного водоснабжения. - В кн.: Тезисы докладов на Всесоюзном научно-техническом совещании по созданию и комплексному освоению водохранилищ. Сб. № 2, М., 1965, с.10-14.

- Браславский А.П., Шергина К.Б. Потери воды на испарение из водохранилищ засушливой зоны Казахстана. Алма-Ата, 1965. 228 с.
- Буторин Н.В. О прозрачности и мутности воды Горьковского водохранилища. - Тр. Ин-та биологии водохр. АН СССР, 1959, вып.2(5), с.204-211.
- Буторин Н.В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах волжского каскада. Л., 1969. 321 с.
- Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Курдин В.П. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л., 1975. 158 с.
- Вендров С.Л. О русловых процессах на больших водохранилищах. - В кн.: Русловые процессы. М., 1958, с.228-248.
- Вендров С.Л., Дьяконов К.Н. Водохранилища и окружающая природная среда. М., 1976. 136 с.
- Вендров С.Л., Стеженская И.Н. О масштабах и характере процессов заносимости при формировании берегов и дна крупных водохранилищ на равнинах и в предгорьях. - В кн.: Труды Совещания по изучению берегов водохранилищ и вопросов дренажа в условиях Сибири. Вып.1. Новосибирск, 1969, с.26-37.
- Веселовский Н.В., Тарасов М.Н. Гидрохимическая карта прудов некоторых засушливых районов юго-востока европейской части СССР. - Гидрохим.матер., 1957, т.ХХУ1, с.163-176.
- Викulina З.А. Роль подземных компонентов в водном балансе озер и водохранилищ. - Тр.ГГИ, 1977, вып.240, с.96-112.
- Виноградова Н.Н. Формирование и распределение грунтов дна Можайского водохранилища. - Вестн.Московск. ун-та, сер. геогр., 1969, № 6, с.37-40.
- Виноградова Н.Н. Некоторые вопросы трансформации взвешенного вещества в малых водохранилищах. - В кн.: Круговорот вещества и энергии в озерах и водохранилищах. Сб.Г. Лиственничное на Байкале, 1973а, с.57-59.
- Виноградова Н.Н. Баланс взвешенного вещества в Можайском водохранилище. - В кн.: Комплексные исследования водохранилищ. Вып.11. М., 1973б, с.46-49.
- Виноградова Н.Н. О подсчете объема переработки берегов малых водохранилищ. - В кн.: Эрозия почв и русловые процессы. Вып.3. М., 1973в, с.285-289.
- Виноградова Н.Н., Мартынова М.В. Особенности распределения органического вещества в илах Можайского водохранилища. - Вестн.МГУ, сер. геогр., 1973, № 5, с.97-99.
- Виноградова Н.Н., Эдельштейн К.К. К характеристике взвесей и грунтов Горьковского водохранилища. - В кн.: Комплексные исследования водохранилищ. Вып.1. М., 1971, с.112-121.
- Воскресенский К.П. Сток рек в южном Заволжье и Прикаспийской низменности. Л., 1953. 96 с.
- Воскресенский К.П. Гидрологические расчеты при проектировании сооружений на малых реках, ручьях и временных водотоках. Л., 1956. 468 с.
- Временные указания по прогнозу качества воды при проектировании водохранилищ. М., 1957. 47 с.
- Гвахария В.К. Испарение с водной поверхности водоемов Кавказа. Тбилиси, 1973. 186 с.

- Гирейко А.Х. Некоторые закономерности в химии атмосферы. Гидрохим.матер., 1959, т.ХХУІІІ, с.101-111.
- Денисова А.И. Влияние каскадного расположения водохранилищ на их гидрохимический режим. - Гидробиол.журн., 1971, № 5, с.15-20.
- Дрозд Н.И. Материалы по заилению водохранилищ УССР. - 1. Прогнозы элементов водного режима р.Днепра. Киев, 1954, с.176-200.
- Дрозд Н.И. Твердий стік річок і замулення водосховищ. - Гідрологічні розрахунки для річок України. Киев, 1962, с.209-238.
- Дрозд Н.И., Горецкая З.А. Заиление водоемов. - Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.6, вып.3, Л. 1967, с.432-441.
- Дрозд Н.И., Горецкая З.А., Шкрятый П.А. Формирование стока воды и наносов в период весеннего половодья на сибирском-балочном водосборе. - Тр.ГГИ, 1974, вып.210, с.31-39.
- Дрозд Н.И., Хлоева Е.В. Сток взвешенных наносов и заиление прудов и водохранилищ. - В кн.: Ресурсы поверхностных вод (Т.6, вып.4, Л., 1966, с.241-254.
- Дроздов К.А. Пруды и водохранилища ЦЧО как антропогенные ландшафтные комплексы (урочище и группы урочищ). - В кн.: Вопросы физической географии, геоморфологии, гидрологии и экономической географии. Воронеж, 1974, с.36-46.
- Зайков Б.Д. Испарение с водной поверхности прудов и малых водохранилищ на территории СССР. - Тр.ГГИ, 1949, вып.21(75), 54 с.
- Заррин М.П. Эрозионная характеристика водосборов каскадов. - В кн.: Каскады прудов на водосборе р.Кумы. Л., 1975, с.120.
- Зиминова Н.П. Элементы гидрологического режима и водный баланс Ивановского водохранилища за 1951-1956 гг. - Тр.Ин-та бис. водохр. АН СССР, 1959, вып.2(5), с.212-228.
- Зиминова Н.А. Количественная характеристика взвесей Рыбинского водохранилища. - В кн.: Биологические аспекты изучения водохранилищ. Л., 1963, с.230-249.
- Зиминова Н.А. Факторы, определяющие количество и состав взвешенных веществ в Рыбинском водохранилище. - В кн.: Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. М., 1967, с.124-131.
- Зиминова Н.А. Количественная трансформация стока взвешенных наносов Волги каскадом верхневолжских водохранилищ. - Тр.Ин-та биологии внутр.вод АН СССР, 1974, вып.26(29), с.68-80.
- Зиминова Н.А., Курдин В.П. Накопление донных отложений в Рыбинском водохранилище. - Тр. Ин-та биологии внутр. вод СССР, 1968, вып.18(21), с.142-151.
- Зиминова Н.А., Курдин В.П. Баланс взвешенных веществ в Рыбинском водохранилище. - Тр. Ин-та биологии внутр.вод., 1 вып.23(26), с. 199-210.
- Зиминова Н.А., Курдин В.П. Баланс взвешенных веществ в Угличском водохранилище. - Тр. Ин-та биологии внутр.вод., 1 вып.23(26), с.211-220.
- Зиминова Н.А., Курдин В.П. Баланс взвешенных веществ в Ивановском водохранилище. - Тр.Ин-та биологии внутр. вод, вып.26(29), с.89-94.
- Золотарев Г.С. Инженерно-геологическое изучение берегов склонов водохранилищ и оценка их переработки. - Тр.Лаб.гидрогеологии АН СССР, 1955, т.12, с.180-235.

- К а р а с е в И.Ф. Точность гидрометрических данных и усовершенствование методов определения стока рек с неустойчивым руслом (например р.Амударьи). - Тр.ГГИ, 1971, вып.185, с.3-38.
- К а р а у ш е в А.В. Взмучивание и распространение зон мутности в водохранилищах. - Тр.ГГИ, 1964, вып.III, с.81-95.
- К а р а у ш е в А.В. Теория и метод расчета заиления малых водохранилищ и прудов. - Тр.ГГИ, 1966, вып.132, с.68-81.
- К а р а у ш е в А.В. Водная эрозия и наносы. - В кн.: Сток наносов, его изучение и географическое распределение. Л., 1977, с.5-16.
- К а с к а д ы прудов на водосборе р.Кумы. Заиление и гидробиология. Отв.ред.Г.В.Назаров и М.Я.Прыткова. Л., 1975. 256 с.
- К а с ы м о в А.Г., С л е п у х и н а Т.Д. Гидробиологическая характеристика каскадов прудов. - В кн.: Каскады прудов на водосборе р.Кумы. Л., 1975, с.219-237.
- К а ч у г и н Е.Г. Вопросы теории процесса размыва берегов водохранилищ. - В кн.: Труды совещания по изучению берегов водохранилищ и вопросов дренажа в условиях Сибири. Вып.1. Новосибирск, 1969, с.62-84.
- К а ч у г и н Е.Г. Геологическое изучение динамики берегов водохранилищ. М., 1975. 147 с.
- К о ж у х а р ь И.Ф. О физико-механических свойствах донных отложений малых водохранилищ Молдавии. - В кн.: Биологические ресурсы водоемов Молдавии. Вып.2. Кишинев, 1964, с.60-67.
- К о з м е н к о А.С. Борьба с эрозией почвы. М., 1957. 207 с.
- К о н е н к о А.Д., К у з ь м е н к о Н.М. Пруды и малые водохранилища. - В кн.: Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.6. вып.2, Л., 1971, с.507-509.
- К о ч у б е й С.Г. Исследование формирования твердого стока рек Украинских Карпат. Автореф. канд. дис. Киев, 1972.
- К р е м е з С.А. Опыт строительства и эксплуатации малых водохранилищ ЦЧО. Воронеж, 1965. 138 с.
- К р и в о н о с А.В. Определение трансформирующих емкостей существующих прудов. - В кн.: Гидравлика и гидротехника. Вып.6. Киев, 1968, с.117-120.
- К у р д и н а Т.Н. Элементы гидрологического режима и водный баланс Угличского водохранилища. - Тр.Ин-та биологии водохр., 1959, вып.2(5), с.229-245.
- К у ц е н к о Я.И., С о л о д у х и н Л.А., Ч у ч м а й Г.Г. Степковильная. - В кн.: Краснодар. Краснодар, 1968, с.7-22.
- Л и с и ц ы н а К.Н. Формирование стока наносов водотоков и заиление прудов на территории Северного Казахстана. - Тр.ГГИ, 1960, вып.86, с.92-119.
- Л и с и ц ы н а К.Н. Изучение стока наносов в первичной гидрографической сети. - Тр.ГГИ, 1963, вып.100, с.122-135.
- Л и с и ц ы н а К.Н. Расчет заиления прудов. - Тр.ГГИ, 1969, вып.175, с.199-208.
- Л и с и ц ы н а К.Н. Зональность водноэрозионных характеристик на территории СССР. - Метеорология и гидрология, 1977, № 2, с.77-80.
- Л и с и ц ы н а К.Н., Б о г о л ю б о в а И.В. Изучение стока наносов ручьев. - Тр.ГГИ, 1964, вып.111, с.5-33.
- Л о п а т и н Г.В. Наносы рек СССР. М., 1952. 366 с.
- Л о п а т и н Г.В. Изучение процесса заиления малых водоемов в условиях Курской области. - В кн.: Гидрологический режим малых водоемов Курской области. М.-Л., 1961, с.150-184.

- Л о п а т и н Г.В. Процесс заиления Успенского водохранилища. - В кн. Вопросы гидрологии Успенского водохранилища. М.-Л., 1963, с.212-268.
- Л о п а т и н Г.В. Малые водохранилища и пруды Центрально-Черноземных областей РСФСР. В кн.: Водный баланс и заиление малых водохранилищ Черноземного Центра РСФСР. М.-Л., 1965, с.4-13.
- Л ы с е н к о В.В. Режим взвешенных наносов и формирование донных отложений Новосибирского водохранилища. - В кн.: Региональные исследования водных ресурсов бассейна р.Оби. Новосибирск, 1968, с.10-22.
- М а г а к я н Г.Л. Степь и вода. М., 1977. 191 с.
- М а к к а в е е в Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М., 1955. 34 с.
- М а л и н и н а Т.И. Водный баланс пруда Поливного за летне-осенний период 1951-1954 гг. - Тр.Лаб.озероведения АН СССР, 1960, т.1X, с.221-269.
- М а р к о ч е в а К.М. Изучение формирования стока наносов на распаханном склоне. - Тр.ГГИ, 1967, вып.141, с.89-107.
- М а р к о ч е в а К.М. Особенности транспорта наносов на распаханном склоне. - Тр.ГГИ, 1972, вып.167, с.169-175.
- М а т а р з и н Ю.М., Б о г о с л о в с к и й Б.Б., М а ц к е в и ч И.К. Специфика водохранилищ и их морфометрия. Пермь, 1977. 68 с.
- М а т а р з и н Ю.М., М а ц к е в и ч И.К., С о р о к и н а Н. О формировании рельефа дна Камских водохранилищ. - В кн.: Гидрология и метеорология. Вып.3. Пермь, 1968, с.92-111.
- М а т р е н и н с к а я З.Д. Испарение с водной поверхности в зарослях тростника дельты Амударьи. - Тр.Лаб.озероведения АН СССР, 1957, т.1Y, с.171-190.
- М е т о д и ч е с к и е указания управлениям Гидрометеослужбы. № 3 Л., 1953. 25 с.
- М е т о д и ч е с к и е указания управлениям Гидрометеослужбы. № 5 Л., 1958. 34 с.
- М е т о д ы расчета водных балансов. Л., 1976. 120 с.
- М и л ь к о в Ф.Н. Человек и ландшафты. М., 1973. 224 с.
- М о л д о в а н о в А.И. Морфологические исследования водоемов Молдавии. - Вопросы водного хозяйства Молдавии. Вып.1. Кишинев, 1966, с.92-106.
- М о л д о в а н о в А.И. Использование корреляции между морфологическими элементами при исследовании заиления водоемов. - Гидротехника и мелиорация. 1965, № 5, с.21-25.
- М о л д о в а н о в А.И. Наносоудерживающая способность малых водохранилищ. - Тр.Укр.НИГМИ, 1971, вып.120, с.166-176.
- М я л к о в с к и й М.В., Д р о з д Н.И. Розрахунки замулен водосховищ. - В кн.: Гідрологічні розрахунки для річок УРСР. Київ 1947, с.239-260.
- Н а в о з о в а Ф. Краснодарский край. Краснодар, 1955. 417 с.
- Н а с т а в л е н и е гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6, ч.1. Л., 1957. 400 с.
- Н а с т а в л е н и е гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. ч.1. Л., 1973. 476с.
- П а л а м а р ч у к И.К. О составе обменных катионов в грунтах днепровских водохранилищ. - Гидробиол.журн., 1972, № 5, с.75-79.
- П е р ф и л ь е в Б.В. Микрозональное строение иловых озерных отложений и методы его исследования. Л., 1972. 215с.
- П о з д н я к о в а Г.В. Гидрохимия каскадов прудов. - В кн.: Каскады прудов на водосборе р.Кумы. Л., 1975, с.197-218.

- Потанов М.В. Сочинения. В 3-х т. Т.3. М., 1951. 479 с.
- Прыткова М.Я. Отложение наносов в водохранилищах и прудах. - Тр.ГГИ, 1960, вып.86, с.67-91.
- Прыткова М.Я. Расчет продолжительности заиления прудов. - В кн.: Водный баланс и заиление малых водохранилищ Черноземного Центра РСФСР. М.-Л., 1965, с.216-223.
- Прыткова М.Я. Уплотнение отложений в водохранилищах. - Вестн. ЛГУ, сер.геол. и геогр., 1966, № 18, с.99-106.
- Прыткова М.Я. Заиление малых водохранилищ степной части Северного Кавказа и его расчет. - В кн.: Заиление малых водохранилищ Предкавказья. Л., 1969, с.130-140.
- Прыткова М.Я. Природные условия и пруды на водосборе р.Томузловки. - В кн.: Заиление водохранилища "Волчьих Ворота" и цепочек прудов на его водосборе. Л., 1971а, с.5-23.
- Прыткова М.Я. Заиленность водоемов на водосборе р.Томузловки. - В кн.: Заиление водохранилища "Волчьих Ворота" и цепочек прудов на его водосборе. Л., 1971б, с.122-155.
- Прыткова М.Я. Седиментационный баланс водохранилища "Волчьих Ворота". - В кн.: Заиление водохранилища "Волчьих Ворота" и цепочек прудов на его водосборе. Л., 1971в, с.183-192.
- Прыткова М.Я. Сток наносов. - В кн.: Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.8. Л., 1973а, с.217-258.
- Прыткова М.Я. Водный и седиментационный балансы Отказненского водохранилища. - В кн.: Отказненское водохранилище. Л., 1973б, с.104-136.
- Прыткова М.Я. Природные условия на водосборе р.Кумы. - В кн.: Каскады прудов на водосборе р.Кумы. Л., 1975а, с.6-50.
- Прыткова М.Я. Сравнительная оценка заиленности прудов. - В кн.: Каскады прудов на водосборе р.Кумы. Л., 1975б, с.159-196.
- Прыткова М.Я. Малые водохранилища лесостепной и степной зон СССР. Осадконакопление. Л., 1979. 172с.
- Прыткова М.Я., Юдин Е.А. Количественный учет и режим взвесей. - В кн.: Отказненское водохранилище. Л., 1973, с.85-103.
- Прыткова М.Я., Юдин Е.А., Шеховцов О.А. Перемещение наносов в водохранилище "Волчьих Ворота". - В кн.: Заиление водохранилища "Волчьих Ворота" и цепочек прудов на его водосборе. Л., 1971, с.193-207.
- Россолимо Л.Л. Задачи и установки лимнологии как науки. - Тр. Лимнол. ст. в Косине, 1934, вып.17, с.5-20.
- Руководство по обработке и подготовке к печати материалов наблюдений на озерах и водохранилищах. Л., 1972. 252 с.
- Рутковский В.И., Курдина Т.Н. Водный баланс Рыбинского водохранилища за период с 1947 по 1955 г. - Тр. Ин-та биологии водохр., 1959, вып.1(4), с.5-24.
- Семенов И.В. Исследование прудов Ростовской области как главной формы использования местного стока. Автореф.канд.дис. Ростов-на-Дону, 1973.
- Симакин А.И. Агрохимическая характеристика кубанских черноземов и удобрения. Краснодар. 1969. 278 с.
- Скорняков В.А. Водный баланс Можайского водохранилища. - В кн.: Комплексные исследования водохранилищ. Вып.1. М., 1971, с.11-26.
- Сластухин В.В. Вопросы мелиорации склонов Молдавии. Кишинев, 1964. 211 с.

- Слепухина Т.Д. Материалы по бентосу прудов степной части Северного Кавказа. — В кн.: Заиление малых водохранилищ Предкавказья. Л., 1969, с.167-175.
- Смольянинов В.И. Комплекс водорегулирующих мероприятий для борьбы с эрозией и искусственного пополнения подземных вод в условиях Центрально-Черноземных областей. Воронеж, 1972. 126с.
- Сорокин И.Н. Опыт изучения водного баланса малых водоемов Курской области. — В кн.: Малые водоемы равнинных областей СССР и их использование. М.-Л., 1961, с.58-64.
- Сорокин И.Н. Водный баланс Успенского водохранилища. — В кн. Вопросы гидрологии Успенского водохранилища и его водосбора. М.-Л. 1963, с.98-127.
- Сорокин И.Н., Яковлева Л.В. Некоторые результаты исследования заиленности водоемов юго-западной части Курской области. — В кн.: Гидрологический режим малых водоемов Курской области. М., 1961, с.222-246.
- Старостина И.В. Формирование стока наносов и возможности его прогноза во время весеннего половодья. Автореф.канд.дис. М., 1972
- Страхов Н.М., Бродская Н.Г., Князева Л.М. др. Образование осадков в современных водоемах. М., 1954. 792с.
- Сухарев И.П. Влияние прудов на грунтовые воды береговой зоны. — В кн.: Малые реки и водоемы Курской области. Воронеж, 1968, с.12-149.
- Сухарев И.П., Сухарева Е.М. Пруды Центрально-Черноземной полосы. Воронеж, 1957. 215с.
- Тарасов М.Н. Формирование ионного состава и гидрохимический режим прудов северо-восточного Приазовья. — В кн.: Малые водоемы равнинных областей СССР и их использование. М.-Л., 1961, с.225-230.
- Тарвердиев Р.Б. Заиление Мингечаурского водохранилища. Еку, 1974. 156 с.
- Тарвердиев Р.Б. Расчет стока наносов рек, впадающих в Мингечаурское водохранилище. — В кн.: Комплексные исследования водохранилищ. Вып.1У. М., 1978, с.87-94.
- Темникова Н.С. Климат Северного Кавказа и прилегающих степей. Л., 1959. 312 с.
- Указания по расчету заиления водохранилищ при строительном проектировании. Л., 1973. 55с.
- Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л., 1983 с.
- Форш Л.Ф. Испарение и транспирация в дельте Аму-Дарьи. — Тр.Л. озероведения АН СССР, 1957, т.1У, с.35-170.
- Форш Л.Ф. Испарение с водной поверхности малых водоемов Курской области и некоторые черты динамики их водных масс. — Тр.Лаб. озероведения АН СССР, 1961, т.XIII, с.22-25.
- Форш Т.Б. Минерализация и ионный состав воды прудов, расположенных цепочкой. — В кн.: Озера семиаридной зоны СССР. Л., 1970, с.1-197.
- Фролов В.Я. Водная эрозия в Курской и Воронежской областях. Тр.Лаб.озероведения АН СССР, 1961, т.XIII, с.104-121.
- Халилов Ш.Б. Заиление Мингечаурского водохранилища продуктами разрушения берегов и смыва со склонов. Автореф.канд.дис. Баку, 1966
- Шамов Г.И. Заиление водохранилищ. М.-Л., 1939. 140с.

- Шеховцов О.А. Плотность отложений в малых водохранилищах степной части Северного Кавказа. - В кн.: Заиление малых водохранилищ Предкавказья. Л., 1969, с.106-120.
- Шеховцов О.А. Плотность отложений в водохранилище „Волчьи Ворота“ и прудах на его водосборе. - В кн.: Заиление водохранилища „Волчьи Ворота“ и цепочек прудов на его водосборе. Л., 1971, с.110-121.
- Шеховцов О.А., Юдин Е.А. Донные отложения каскадов прудов. - В кн.: Каскады прудов на водосборе р.Кумы. Л., 1975, с.144-158.
- Шикломанов И.А. Влияние хозяйственной деятельности на водные ресурсы и гидрологический режим. Обнинск, 1976. 110 с.
- Широков В.М. Некоторые вопросы режима прозрачности и мутности воды на примере Куйбышевского водохранилища. - Изв.Казанск.фил. АН СССР. Сер.энергет. и водн. хоз., 1961, вып.3, с.290-299.
- Широков В.М. Формирование берегов и ложа крупных водохранилищ Сибири. Новосибирск, 1974. 172 с.
- Шумаков Б.Б. Использование местного стока. М., 1966. 103 с.
- Эдельштейн К.К. Морфология и морфометрия Можайского водохранилища. - В кн.: Комплексные исследования водохранилищ. Вып.11. М., 1973, с.24-40.
- Юдин Е.А. Распределение отложений и их крупности по ложу водоемов. - В кн.: Заиление малых водохранилищ Предкавказья. Л., 1969, с.121-129.
- Юдин Е.А. Распределение толщи и крупности отложений в прудах и водохранилище „Волчьи Ворота“. - В кн.: Заиление водохранилища „Волчьи Ворота“ и цепочек прудов на его водосборе. Л., 1971, с.99-109.
- Юдин Е.А. Отложение наносов. - В кн.: Отказненское водохранилище. Л., 1973, с.74-79.
- Яковлева Л.В. Состав отложений малых водоемов междуречья Хопра и Медведицы. - Тр.Лаб.озероведения АН СССР, 1958, т.УП, с.40-46.
- Яковлева Л.В. Механический состав и плотность донных отложений малых водоемов ЦЧО. - Тр.Лаб.озероведения АН СССР, 1960, т.Х, с.167-192.
- Яковлева Л.В. Плотность иловых отложений малых водоемов ЦЧО. - В кн.: Малые водоемы равнинных областей СССР и их использование. М.-Л., 1961а, с.191-196.
- Яковлева Л.В. Характеристика донных отложений Боршенского водохранилища. - В кн.: Гидрологический режим малых водоемов Курской области. М.-Л., 1961б, с.103-113.
- Яковлева Л.В. Характеристика заиленности малых водоемов Центрально-Черноземных областей и расчета плотности донных отложений. - В кн.: Водный баланс и заиление малых водохранилищ Черноземного Центра РСФСР. М.-Л., 1965, с.184-197.
- Ярославцев Н.А., Шмелева Е.А. Исследование и расчет мутности воды Горьковского водохранилища. - В кн.: Сборник работ Горьковской и Волжской ГМО. Вып.6. Л., 1969, с.55-71.
- Brune G. M. Trap efficiency of reservoirs. - Trans. Amer. Geophys. Union, 1953, v. 34, N 3, p. 407-418.
- Heinemann H. G. Volume-weight of reservoir sediment. - Hydraul. Div. Amer. Soc. Civil Eng., 1962, N 95, p. 181-197.

- Heinemann H. G., Dvorak V. I. Im volumetric survey computation procedures for small voirs. - In: Proc. Feder. Inter-Agency Sedimental Jackson, Miss., 1963. Washington, 1965, p. 845-856.
- Heinemann H. G., Holt R. F., Rausc Sediment and nutrient research on selected Corn B servoirs. - In: Man-Made Lakes: their Problems and e mental Effects. Pap. Symp. Knoxville, Tenn., 1971. W ton, 1973, p. 381-386.
- Kennon F. W. Hidrologic effects of small reser Sandstone Creek watershed, Beckam and Roger Mill: ties, western Oklahoma. - Geol. Surv. Water Supply 1966, N 1839-c, p. 39.
- Lane E. W., Koelzer V. A. Density of ments deposited in reservoirs. - Report N 9, U.S. 1 partment Committee, St. Paul District, Corps. Engrs., ber, 1943.
- Langbein W. B., Shumm S. A. Yield c ment in relation to mean annual precipitation. - Trans Geophys. Union, 1958, vol. 39, N 6, p. 1076-1084.
- Miller C. R. Determination of the unit weight ment for use in sediment volume computation. - U. reau Reclamation Memorandum, February 17, 1953.
- Мичев М. Определяне притока на малките язовири по метода ните денонощни водни количества. - Хидротехн. и мелиор., 1 № 8, с. 247-248.
- Папазов Р., Амиорков М., Георгиев Б., не в Е. Изследване на затлачването на малките язовири. - И водни проблеми, 1966, т. 5, с. 147-170.
- Roehl J. W., Holeman J. N. Sediment pertaining to small reservoir design. - In: Man-Made their Problems and environmental Effects. Pap. Symp. ville, Tenn., 1971. Washington, 1973, p. 376-380.
- Volosinas P. Tvenkinių charakteristikų nustė Мелиорация и гидротехника, 1977, № 55, с. 46-47.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	3
Глава 1. Природные условия и пруды на водосборе б.Каракубанской . . .	6
1.1. Природные условия, определяющие формирование стока во-	
ды и наносов	6
1.2. Пруды на водосборе	17
1.3. Особенности морфологии чаши прудов	21
Глава 2. Гидрологический режим и водный баланс прудов	26
2.1. Общая характеристика гидрологического режима прудов	
каскада	26
2.2. Водный баланс прудов каскада	29
2.3. Особенности водного баланса прудов	49
2.4. Естественный (восстановленный) сток зарегулированного	
водотока	54
2.5. Роль прудов в регулировании местного стока	59
Глава 3. Взвеси и донные отложения прудов	62
3.1. Взвеси прудов	62
3.2. Сравнительная характеристика мутности воды водохрани-	
лищ	68
3.3. Физико-механический и химический состав донных отло-	
жений	70
3.4. Мощность отложений	84
3.5. Точность определения объема отложений	88
3.6. Плотность отложений	91
Глава 4. Седиментационный баланс прудов	94
4.1. Элементы приходной части баланса	85
4.2. Элементы расходной части баланса	105
4.3. Седиментационный баланс прудов каскада	106
4.4. Особенности седиментационного баланса прудов	109
4.5. Наносоудерживающая способность водохранилищ	115
4.6. Естественный (восстановленный) сток наносов временных	
водотоков	119
4.7. Заиление каскадов прудов	123
Глава 5. Солевой баланс прудов	130
5.1. Состав главных ионов	130
5.2. Солевой баланс каскада прудов	135
Заключение	140
Литература	143

3584

1 р. 50 к.



«НАУКА»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ
ОТДЕЛЕНИЕ