

И мы бы хотели чтобы наш теоретический и практический опыт был максимально использован новыми поколениями специалистов по геоинформатике, признанной как отдельное научно и научно-прикладное направление. Именно поэтому мы самое активное участие в программах Tempus и Erasmus+ по разработке новых курсов по различным аспектам — от бакалаврского до докторского уровня.

Мы хотели бы выразить признательность проектам ECAP и DSinGIS а также нашим европейским коллегам за поддержку наших усилий в развитии геоинформатики в Узбекистане.

Использованная литература:

1. Нигматов А.Н., Реймов П.Р., Абдиреймов С.Ж. Геоэкологическая оценка и мониторинг агроландшафтов дельты Амударьи (на примере Чимбайского оазиса). Ташкент 2006
2. D.J. Wright, M.F. Goodchild, J.D. Proctor Demystifying the Persistent Ambiguity of GIS as "Tool" Versus "Science" // The Annals of the Association of American Geographers, 87(2): 346-362, 1997.
3. Wellar, B., Cameron, N., and Sawada, M. 1994. Progress in Building Linkages Between GIS and Methods and Techniques of Scientific Inquiry//Computers, Environment, and Urban Systems 18:67-80.

Мухамеджанов И.Д.¹, Лупян Е.А.², Уваров И.А.³. СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ ВОДОХРАНИЛИЩ ВАХШСКОГО КАСКАДА

Аннотация: В работе описана методика организации и анализа спутниковой информации о водохранилищах Вахшского каскада. Действующие системы дистанционного мониторинга дают различные результаты в зависимости от разрешающей способности. В статье рассматриваются результаты работы со спутниковыми изображениями сканирующей аппаратуры разрешения от 10 до 250 метров. Результаты исследования включают профили годовой динамики площади водного зеркала участков Вахшского каскада и сравнение точности её определения разными комплексами аппаратуры дистанционного мониторинга. Рассматривается обработка статистики осадков, что позволяет провести анализ зависимости площади водной поверхности объекта от количества выпавших осадков на гидропостях каскада. Исследование проводилось при помощи веб-сервиса спутникового мониторинга ВЕГА-Science (<http://sci-vega.ru>). Кроме того, были предприняты попытки поиска альтиметрической информации с целью построения профиля зависимости динамики уровня воды в водохранилищах Вахшского каскада от площади водного зеркала.

Ключевые слова: Нурекское водохранилище, спутниковый мониторинг, дистанционное зондирование, Вахшский каскад, водные ресурсы, пространственное разрешение, площадь водного зеркала, Амударья, альтиметрические измерения.

Abstract: The paper describes the techniques of organization and analysis of the satellite information on the Vaksh cascade. Actual remote sensing systems provide different results depending on the spatial resolution. The article deals with the results of working with satellite images of scanning equipment of resolution from 10 to 250 meters. The results of the study include profiles of the annual dynamics of the water surface area of the Vakhsh cascade and the comparison of the accuracy of its determination by different sets of remote sensing. Processing of precipitation statistics is considered, which makes it possible to analyze the dependence of the

¹ Мухамеджанов И.Д.- Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Факультет космических исследований, Москва, Россия. ildarmsu@gmail.com

² Лупян Е.А.- Институт космических исследований РАН, Москва, Россия. evgeny@d902.iki.rssi.ru

³ Уваров И.А.- Институт космических исследований РАН, Москва, Россия. uvarov@d902.iki.rssi.ru

water surface area of an object on the amount of precipitation at gauging stations of the cascade. The study was carried out using the web-service of satellite monitoring VEGA-Science (<http://sci-vega.ru>). In addition, attempts were made to search for altimetric information in order to construct a curve of the dependence of the water level in the reservoirs of the Vakhsh cascade on the water surface area.

Keywords: *Nurek reservoir, satellite monitoring, remote sensing, Vakhsh cascade, water resources, spatial resolution, water surface area, Amudarya, altimetric measurements.*

Введение. За последние несколько десятков лет водные ресурсы Средней Азии претерпели множественные изменения. Реки Сырдарья и Амударья являются главными водными артериями стран этой территории, в том числе и Узбекистана. На сегодняшний день в южных и северо-западных районах Узбекистана наблюдается дефицит пресной воды. К таким территориям страны относятся Кашкадарьинская, Хорезмская, Сурхандарьинская области, а также Республика Каракалпакстан (Рис. 1). Рекой, питающей эти области, является Амударья, самая полноводная в Средней Азии, образующаяся в результате слияния рек Вахш и Пяндж. Амударья протекает по территории четырех стран – Таджикистана (образуется при слиянии притоков), Афганистана, Туркменистана и Узбекистана. Вахш – горная река с преимущественно ледниково-снеговым питанием, берущая истоки в районе пика имени Е. Корженевской на Памире. На реке создан ряд гидросооружений, в совокупности образующих Вахшский каскад. В общем каскад состоит из девяти ГЭС, включая действующие, строящиеся и проектируемые [1]. Одно из таких сооружений – Рогунская ГЭС, верхняя ступень каскада, над которой в настоящее время ведутся работы. Запланированная высота плотины составляет 335 метров, а общий объем водохранилища – 13,3 км³ [2].

Поскольку Амударья в силу географических особенностей относится к трансграничным рекам и водные ресурсы Узбекистана во многом зависят от правления её водами и притоков соседними государствами, появляется необходимость в регулярном мониторинге водных ресурсов, в частности рек и водохранилищ. При помощи средств и технологий дистанционного мониторинга представляется возможным получать независимую, объективную информацию. Таким образом, методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) предоставляют актуальные данные, отражающие состояние водных ресурсов.

Методы исследования и организации данных. Современные средства дистанционного мониторинга позволяют получать и обрабатывать спутниковые данные различного пространственного и временного разрешения. Особенности орбитальных группировок ДЗЗ и сканирующей аппаратуры учитываются при мониторинге разного рода объектов.

Для оценки состояния водных ресурсов стран Средней Азии необходимо брать во внимание размеры объектов. Основными гидрообъектами в области интересов являются водохранилища и участки рек. Работа со спутниковыми изображениями и сбор данных проводились с помощью спутникового сервиса ВЕГА-Science [3].

ВЕГА-Science как основной инструмент исследования. Сервис позволяет просматривать и производить обработку спутниковых данных в онлайн-режиме, доступных благодаря ЦКП «ИКИ-Мониторинг» [4]. На Рис.1 приведено композитное изображение – бесшовное представление спутниковых данных за разные периоды 2017 года систем Landsat-TM/ETM+/OLI [5]. ВЕГА-Science – инструмент для решения задач спутникового мониторинга, разработанный и поддерживаемый Институтом космических исследований Российской академии наук. Сервис поддерживает работу с многолетними архивами данных различных систем ДЗЗ, обеспечивая доступ к данным более, чем за 20 лет. Функционала, предоставляемого ВЕГА-Science вполне достаточно для организации спутникового мониторинга различных объектов и явлений. Интерфейс системы поддерживает группировку постоянно пополняющихся данных по категориям в

зависимости от типа продуктов и разрешения: данные высокого разрешения, спутниковая информация среднего разрешения, композитные изображения (очищенные от влияния облаков и иных атмосферных явлений), радиолокационные изображения (РЛИ), а также фотографии, сделанные с Международной космической станции. Инструменты анализа данных в составе сервиса ВЕГА обеспечивают широкие функциональные возможности, подробно описанные в [6].



Рис.1. Композитное спутниковое изображение территории Узбекистана и соседних государств

Архивы многолетней информации и их непрерывное пополнение позволяют производить регулярные наблюдения, оперативно обрабатывать и сохранять результаты, а также при необходимости загружать их.

Сбор и организация спутниковой информации о состоянии водных объектов. Разрешение спутниковых снимков играет большую роль при обработке их соответствующими инструментами анализа. Экспериментальным путем было установлено, что чем больше размер пикселей имеет изображение, тем более низкую точность можно получить после его обработки (для водохранилищ Вахшского каскада). ВЕГА-Science обеспечивает доступ к спутниковой информации среднего разрешения (250 м) сканирующих систем AVHRR спутника NOAA и MODIS космических аппаратов TERRA и AQUA. В исследовании проводилась процедура оценки площади водного зеркала водохранилищ и участков реки Вахш между водохранилищами. Далее на примере Нурекского водохранилища будет показано, что результаты на среднем разрешении по точности уступают полученным при обработке снимков высокого разрешения. Таким образом, оценка площади водного зеркала водохранилищ Вахшского каскада в данном исследовании проводилась на данных высокого разрешения. На сегодняшний день приборами высокого разрешения оптического диапазона, по которым возможно получить спутниковую информацию о Вахшском каскаде и доступными в сервисе ВЕГА-Science, являются OLI-TIRS (Landsat-8) пространственного разрешения 30 м [9], MSI (КА Sentinel-2A, -2B) разрешения 10 м [10], аппаратура КМСС (КА Метеор-М №1, -М №2) с разрешением 60-120 м. Кроме того, в системе ВЕГА хранятся архивы данных по прибору Vegetation разрешения 100 м [11], установленного на европейском спутнике PROBA-V. Данные Vegetation представляют собой суточные композитные изображения периодичностью 4 дня.

Нередко получается так, что полный ряд наблюдений по данным единственной системы ДЗЗ не удастся собрать в силу погодных условий. Для того, чтобы компенсировать пробелы в наблюдениях, необходимо комбинировать данные нескольких систем. Так, MSI имеет наиболее высокое разрешение из доступных, но периодичность съемки составляет 5 дней [10] и нередко на снимках присутствует сильная облачность, не поддающаяся устранению. В таких случаях вполне оправдано использование данных более низкого разрешения при условии, что погрешность при подсчете площади будет незначительной. В осенне-зимний период зачастую невозможно получить пригодные для обработки данные при помощи оптических систем ДЗЗ. Технологии радиолокационного зондирования земной поверхности позволяют восполнить недостающие снимки. Одной из доступных систем пространственного разрешения 10 м в сервисе BEGA-Science является C_SAR_IW спутника Sentinel-1A, 1B [12]. Данная аппаратура позволяет получить изображение подстилающей поверхности даже при сильной облачности и в ночное время суток. Однако в силу физических особенностей системы РЛИ получается зашумленным, что несколько осложняет процесс выделения водной поверхности методами, пригодными для снимков в оптическом диапазоне. В таких случаях необходимо сначала произвести фильтрацию спекл-шума, который проявляется на снимке как зазерненность.

Оценка площади с помощью методов классификации. В системе BEGA-Science решение задачи нахождения площади объектов состоит из следующих этапов [6]:

1. выбор объекта;
2. выбор данных высокого разрешения;
3. интерактивное оконтуривание с использованием процедуры классификации;
4. интерактивная проверка корректности проведения оконтуривания.

Площадь водных объектов в данной работе определяется на основе алгоритма детектирования выгоревших участков поверхности (гарей), описанного в [7]. В основе этого подхода лежит классификация пикселей по спектральной яркости. Подобно разделению на классы «гарь» и «не гарь» для водных объектов выделяются два класса: «вода» и «суша».

В системе BEGA возможна как обучаемая, так и необучаемая классификация. В первом случае эксперт (пользователь) подает на вход классификатору образцы классов, во втором – классификатор на основе имеющихся данных автоматически разделяет множество пикселей на кластеры по спектральной яркости; дальнейшее разделение на результирующие классы проводится с участием эксперта. Основная идея способа, применяемого в работе, заключается в том, чтобы заменить визуальное оконтуривание объекта анализом результатов классификации, которая в конечном итоге сводится к выбору из достаточно ограниченного числа классов тех, которые относятся к гари (воде) [7].

На Рис.2 приведена блок-схема процедуры обработки оптических и радиолокационных спутниковых снимков, применяемой в исследовании. Как было сказано выше, на начальном этапе необходимо задать контур водохранилища, который в дальнейшем будет подаваться на вход обработчику. Далее пользователь подготавливает данные, оптического диапазона, и, при необходимости, радиолокационные изображения (РЛИ). Для классификации на оптических снимках также важно выбрать правильное сочетание каналов, а подготовка РЛИ подразумевает снижение влияния спекл-шума. Затем происходит процесс кластеризации, при котором эксперт сам задает число выделяемых классов, в дальнейшем объединяя те, что относятся к воде. Если пиксели были отнесены недостаточно корректно, то пользователь увеличивает число кластеров и повторяет процедуру с этими же данными. Рассмотрим подробнее процедуру подготовки оптических данных. Результат классификации без предварительной обработки не всегда дает желаемый результат. Это происходит, в частности, из-за сложности рельефа местности, в которой расположены водохранилища. Для наиболее надежной и точной

работы алгоритма необходимо предварительно провести топографическую коррекцию. Топографическая коррекция позволяет восстанавливать значения отражательной способности затененных участков, значения отражательной способности идентичных объектов, расположенных в областях с разным уровнем освещенности при этом, сближаются [13]. Как следствие, пиксели воды не сливаются с пикселями горной тени и точность отнесения увеличивается. Кроме того, в осенне-зимний период спутниковые изображения, сделанные при помощи аппаратуры КМСС требуется подвергать предварительной нормализации для того, чтобы выровнять яркость пикселей перед кластеризацией.

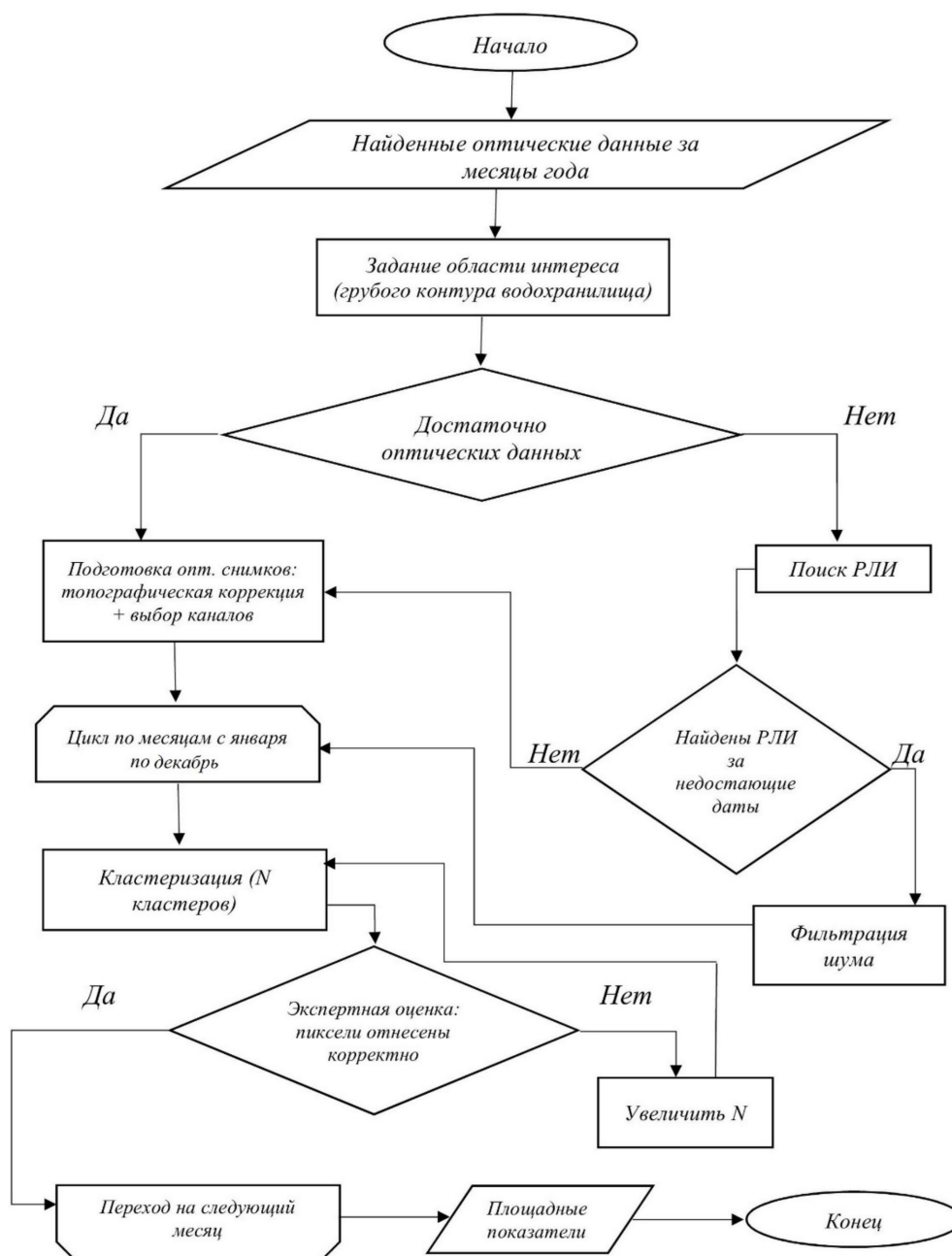
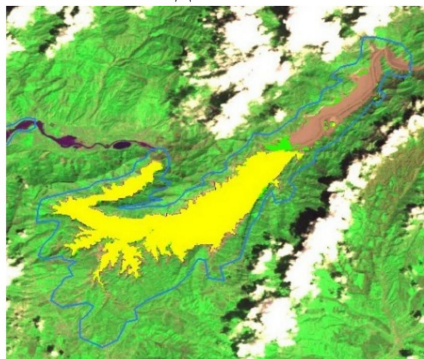


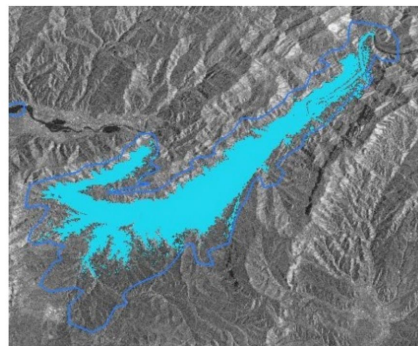
Рис. 2. Процедура обработки данных при оценке площади водохранилищ

Следует отметить, что в случае обмеления водохранилища работа с РЛИ дает результаты, значительно уступающие по точности кластеризации на оптических снимках (Рис. 3а). Поскольку РЛИ является полутоновым изображением, обмелевшая часть объекта сливается с покрытой водой, и погрешность значительно возрастает (Рис. 3б). В

теории данную проблему можно обойти путем задания обучающей выборки – множества пикселей, класс которых известен заранее. На практике же оказывается, что такой метод не всегда является решением, ибо даже большого количества элементов обучающей выборки может быть недостаточно для отделения обмелевших участков. При организации и отборе данных за 2017 год за основу были взят мониторинг Нурекского водохранилища, поскольку на данный момент оно является объектом с самым большим водным зеркалом на Вахшском каскаде.



а)



б)

Рис.3 а) Выделение водной поверхности по снимку системы OLI-TIRS

б) Выделение обмелевшего участка по снимку системы C_SAR_IW

Работа со статистикой осадков. Сервис BEGA-Science имеет возможность анализа временных рядов по указанным точкам спутникового изображения за выбранный период. Среди параметров для расчетов имеется детализация выпавших осадков в указанных точках и её экспорт в формате CSV. При дальнейшем усреднении величин возможно вычислить месячную величину выпавших осадков.

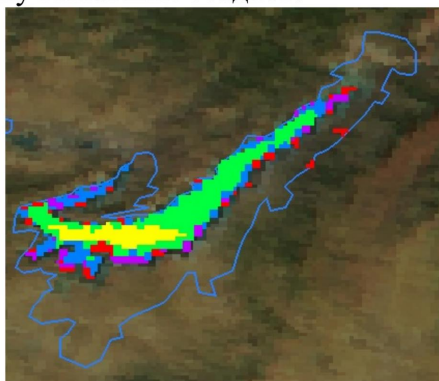


Рис. 4 Результат классификации снимка MODIS

Результаты и обсуждение. Исследование динамики Нурекского водохранилища проводилось согласно схеме на Рис. 2. В процессе изучения использовались данные сканирующих систем OLI-TIRS(OLI-SR), MSI, C_SAR_IW, Vegetation (PROBA-V), KMCC. Кроме того, была проведена работа по отбору безоблачных снимков аппаратуры MODIS. Пример классификации приведен на Рис. 4. Как можно заметить, размеры пикселей значительно больше, чем на снимках высокого разрешения, что влечет за собой грубое выделение водного зеркала. Общая схема выделения зеркала подразумевает субъективный отбор на заключительном этапе. В связи с этим в итоговый профиль динамики площадного показателя включаются только те результаты, которые по мнению эксперта удовлетворяют критериям.

При оценке площади зеркала Нурекского водохранилища производился подсчет погрешности и сравнение показателей имеющихся систем. На Рис.5 отображен разброс площадного показателя, взятого по данным приборов относительно эталона. За эталон в этом случае была выбрана аппаратура наибольшего разрешения MSI (10 м). Были подсчитаны величины, на которые разнятся показатели приведенных на Рис. 5 систем и

погрешность составила $<4\%$ (<200 Га). Отличие показателей систем меньше, чем площадь водного объекта, а значит допустимая погрешность не играет роли при анализе процессов, происходящих на водохранилище. Результаты, полученные по прибору со средним разрешением MODIS, достаточно заметно отличаются от найденных оптимальных в совокупности систем. Это хорошо видно на Рис. 6, поскольку установленные планки погрешностей MODIS выходят за пределы 4% . По этой причине площадные показатели, полученные по данной аппаратуре, не включаются в итоговый профиль динамики зеркала.

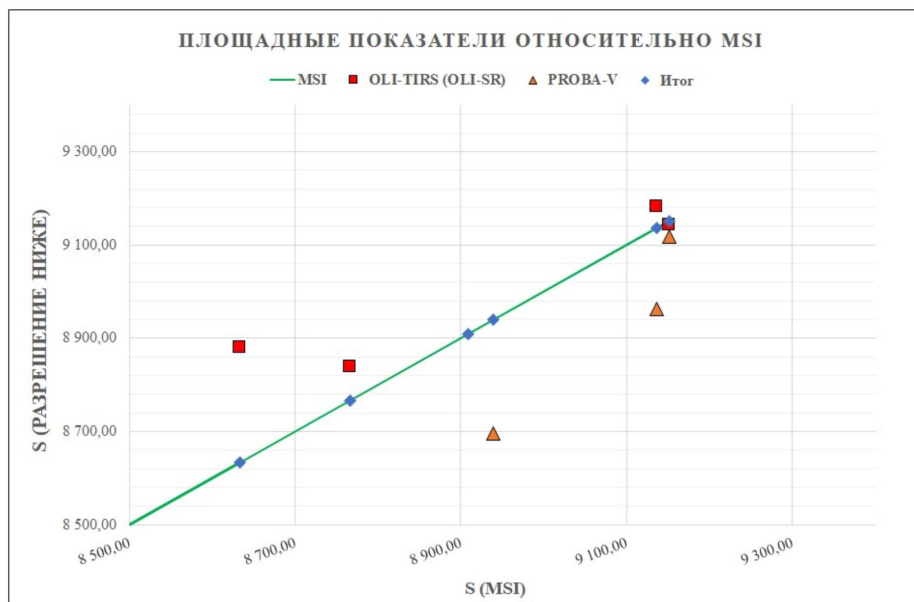


Рис. 5. Разброс показателей оптимальных в совокупности систем относительно MSI (площадь указана в Га)

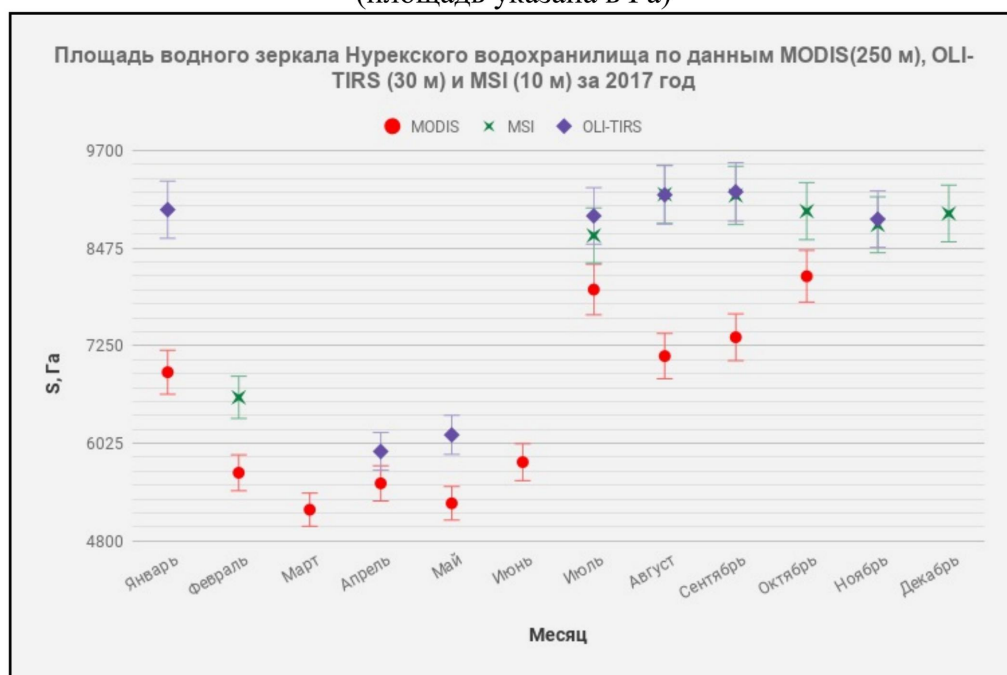


Рис. 6. Сравнение показателей оптимальных систем с MODIS

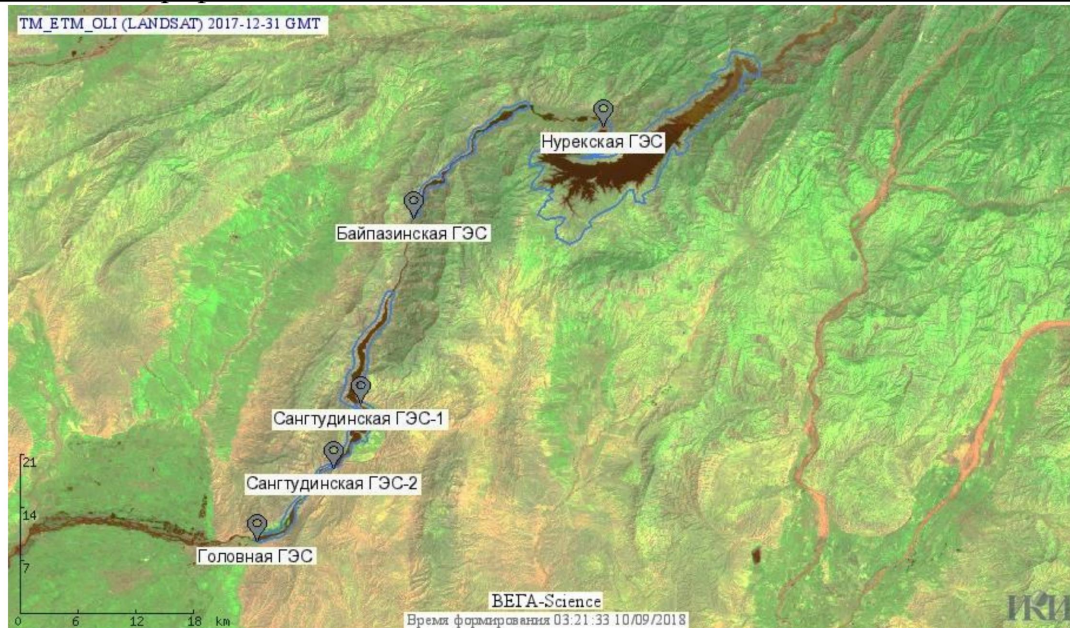


Рис.7 а) Участки реки Вахш

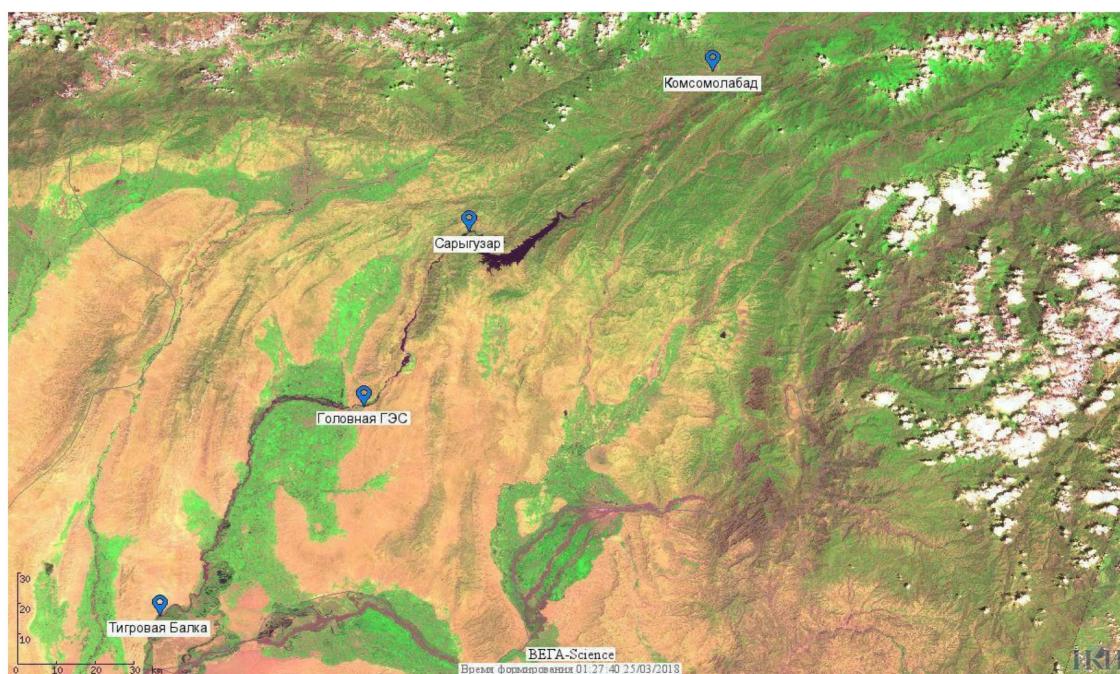


Рис.7 б) Гидропосты на реке Вахш

На основе описанных методов при помощи сервиса BEGA-Science были получены профили динамики площади водной поверхности участков Вахшского каскада за 2017 год. Участок реки Вахш был разделен на несколько частей, между водохранилищами, и Нурекское водохранилище (Рис. 7(а)). На Рис. 8 приведены профили динамики зеркала участков и данные по Нурекскому водохранилищу, а также статистика месячных осадков. Для удобства сравнения и отображения месячной динамики площадного показателя и количества осадков брались нормализованные величины (отношение площади в текущем месяце к максимальной площади в году).

Подсчет осадков производился на гидропостах выше по течению и в пределах заданных участков реки – Сарыгузар, Комсомолабад и Головная ГЭС (Рис. 7(б)). Осадки, подсчитанные на Тигровой Балке при этом, не учитывались.

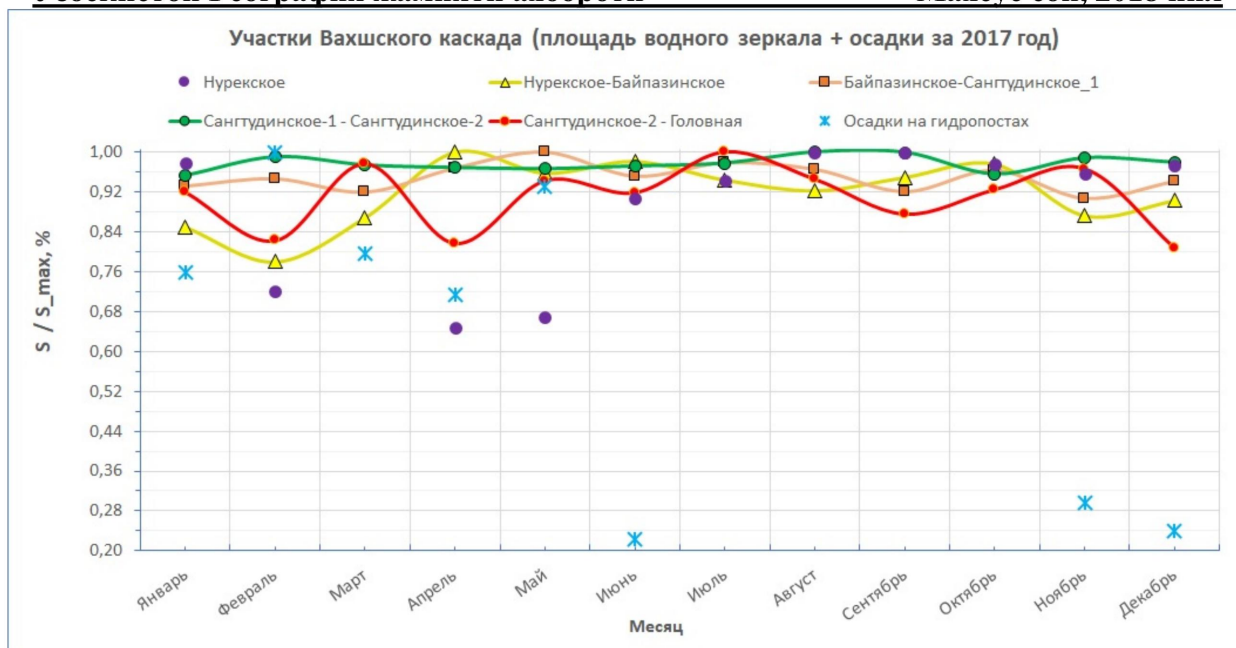


Рис.8. Итоговые профили динамики площади зеркала и статистика месячных осадков

Поиск альтиметрических измерений. В работе также предпринимались попытки поиска альтиметрических измерений с целью построения профиля зависимости высоты водного столба вблизи плотины от площади зеркала. Процедура производилась с помощью специального сервиса [14]. Запрашивались такие параметры, как коэффициент обратного рассеяния (backscatter coefficient) и уровень водной поверхности (sea level anomaly).

Единственным спутником с альтиметром на борту, проходящим неоднократно над рекой Вахш, оказался CryoSat-2 (треки на Рис. 9). На сегодняшний день пока не получено альтиметрических данных по объектам Вахшского каскада (результаты запросов не имеют данных по местности).

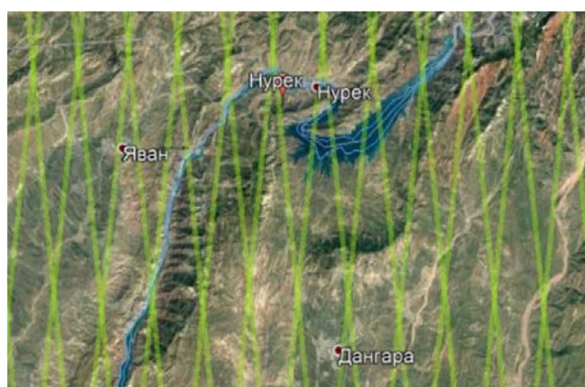


Рис. 9. Треки спутника CryoSat-2 (подготовлено при помощи сервиса Google Earth Pro)

Заключение. Описанная в статье методика позволяет упростить и оперативно оценить состояния водных объектов горной местности. Проведенная обработка и анализ за 2017 год при наличии снимков может быть проделана для любого требуемого периода, в том числе и для установления межгодовой динамики. Кроме того, сочетание информации с наземных станций и результатов спутникового мониторинга может дать полный детальный годовой отчет по водным объектам не только Вахшского каскада, но и других водных объектов, расположенных в горной местности. Наличие высотных измерений, в свою очередь, обеспечит надежность при проведении спутникового мониторинга.

Использованная литература:

1. Д.М. Маматканов, А.Р. Фазылов. Влияние водохранилищ на режим твердого стока рек горно-предгорной зоны Таджикистана // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2015. Сер. Архитектура и Строительство. Т. 15. № 3. С. 178-182.
2. Щербаков В.И., Кулмедов Б.М. Спорный гидроузел на реке Вахш: Рогунская ГЭС // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. Сер. Высокие технологии. Экология. С. 156-159.
3. Спутниковый сервис ВЕГА-Science. URL: <http://sci-vega.ru/>
4. Е.А. Лупян, А.А. Прошин, М.А. Бурцев, И.В. Балашов, С.А. Барталев, В.Ю. Ефремов, А.В. Кашницкий, А.А. Мазуров, А.М. Матвеев, О.А. Суднева, И.Г. Сычуглов, В.А. Толпин, И.А. Уваров. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
5. Колбудаев П.А., Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А., Матвеев А.М. Метод и технология формирования свободных от влияния облаков композитных изображений по спутниковым данным Landsat-TM/ETM+. // Десятая всероссийская открытая конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. Москва. ИКИ РАН, 12-16 ноября 2012. Сборник тезисов конференции, 2012. С. 42.
6. С.А. Барталев, Д.В. Ершов, Е.А. Лупян, В.А. Толпин. Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №1. С 49-56.
7. А.В. Кашницкий, Е.А. Лупян, С.А. Барталев, С.С. Барталев, И.В. Балашов, В.Ю. Ефремов, Ф.В. Стыценко. Оптимизация интерактивных процедур картографирования гарей в информационных системах дистанционного мониторинга природных пожаров. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 7-16.
8. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. – М.: ИКИ РАН, 2016. – 334 с.
9. U.S. Geological Survey, Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) and TIRS (Thermal Infrared Sensor). URL: <https://lta.cr.usgs.gov/L8>
10. European Space Agency. URL: <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>
11. European Space Agency. URL: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/p/proba-v>
12. European Space Agency. URL: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sentinel-1>
13. Лаборатория ГИТ и ДЗ. NRCGIT TOPOCORRECTION. Руководство пользователя 2009. URL: http://www.nrcgit.ru/topocorr/help_rus.pdf
14. Radar Altimeter Database System. URL: <http://rads.tudelft.nl/rads/rads.shtml>