

УДК 528.88

DOI: <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2018-3-137-151>

ОСОБЕННОСТИ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ГИДРОСООРУЖЕНИЙ ВАХШСКОГО КАСКАДА НА ПРИМЕРЕ НУРЕКСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

И.Д. Мухамеджанов¹, Е.А. Лупян^{1,2}, И.А. Уваров²

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

²Институт космических исследований РАН, Москва

В статье рассмотрена методика сбора данных при организации спутникового мониторинга водных объектов Вахшского каскада на примере Нурекского водохранилища. Рассматриваются системы дистанционного зондирования оптического диапазона с пространственного разрешения от 10 до 250 метров. По результатам наблюдений построены профили динамики площади водного зеркала за 2017 год и выявлены оптимальные в совокупности системы для мониторинга водохранилищ в местности со сложным горным рельефом. Итоговые профили могут быть полезны при выявлении сезонной корреляции между состоянием водных ресурсов на юге и северо-западе Узбекистана, а также при анализе зависимостей вегетационных индексов от объёмов речного стока за отдельно взятый сезон.

Ключевые слова: *Нурекское водохранилище, Вахшский каскад, Рогунская ГЭС, регион, ресурсы, спутниковый мониторинг, пространственное разрешение, плотина.*

Основу водных ресурсов Средней Азии составляют две крупные реки – Сырдарья и Амударья. В южных и северо-западных районах Узбекистана, в особенности Кашкадарьинской, Хорезмской, Сурхандарьинской областях, Республике Каракалпакстан наблюдается дефицит пресной воды. В связи с этим крайне важно регулярно контролировать состояние воды в реках и водных объектах. Основной водной артерией для этих зон является река Амударья, образующаяся при слиянии рек Вахш и Пяндж. Первая берет истоки на Памире, в районе пика им. Е. Корженевской. В настоящее время на реке ведутся работы по строительству объектов Вахшского каскада (система ГЭС и водохранилищ). Ниже по течению, на территории Таджикистана, располагается Нурекское водохранилище, на котором запланировано строительство 335-метровой плотины [1].

Территория Республики Узбекистан расположена в центральной части Средней Азии и включает в себя большую часть бывшего Аральского моря, которое стремительно усыхает уже более 30 лет.

Водные ресурсы страны из года в год претерпевают ряд изменений, чему способствует географическое расположение основных водных артерий, рек Сырдарьи и Амударьи.

Река Амударья – вторая по длине и самая полноводная в Средней Азии. Свое название Амударья река получает после слияния рек Пяндж и Вахш [3]. Первая берет истоки на склонах Гиндукуша, вторая – на Памире, в районе пика имени Е. Корженевской. В силу особенностей расположения границ Узбекистана, Амударья, начиная свое течение на территории Таджикистана, протекает вдоль узбекско-афганской границы, затем по территории Туркменистана, после чего попадает на территорию Республики Узбекистан.

Таким образом, водные ресурсы Узбекистана во многом зависят от управления водами рек соседними государствами. При этом не всегда есть доступ к территории, на которой расположены объекты контроля. В такой ситуации технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) могут предоставить уникальную возможность получения объективной, независимой информации, которая отражает актуальную обстановку гидроресурсов.

Организация контроля водных ресурсов при помощи технологий спутникового мониторинга

На рис. 1 красным контуром отображены проблемные зон страны с точки зрения состояния водных ресурсов.



Р и с. 1. Композитное спутниковое изображение территории Узбекистана и части соседних государств

Данное спутниковое изображение является композитным снимком, полученным в Институте космических исследований РАН и доступном в спутниковом сервисе ВЕГА-Science (<http://sci-vega.ru/>) [6].

Для решения многих задач мониторинга земного покрова используются очищенные от влияния облаков и других мешающих факторов композитные изображения, формируемые на основе данных спутниковых наблюдений за определенные интервалы времени. Композитное изображение на рис.1 – результат бесшовного представления спутниковых данных спутниковой комплекс спутниковой аппаратуры Landsat-TM/ETM+/OLI [7].

Возможности спутниковых систем для мониторинга водных ресурсов. Сегодня на околоземной орбите находится множество спутников с установленной на них аппаратурой различного пространственного и временного разрешения и спектральными характеристиками. Частота и пространственное разрешение зависят от числа аппаратов в орбитальной группировке.

При оценке состояния водных ресурсов территории Средней Азии с помощью технологий спутникового мониторинга, необходимо учитывать размер водных объектов. В данной работе больший размер пиксела приборов среднего разрешения MODIS (КА Terra и Aqua) и AVHRR (КА NOAA) делает выделение поверхности воды в прибрежной зоне более грубым, что приводит к занижению оценок площади водного зеркала водохранилища по сравнению с приборами OLI-TIRS и MSI. Далее это будет показано на диаграмме (рис. 4) при обсуждении полученных результатов.

Зачастую получению полного ряда спутниковых данных препятствуют погодные условия. В этом случае необходимые данные об объекте могут быть получены с помощью радиометра с синтезированной апертурой (PCA), C_SAR_IW, установленная на КА SENTINEL-1A и -1B [17]. Особенностью радиометрических данных является независимость от погодных условий. Даже при сильной облачности и в ночное время суток радиолокационное изображение (РЛИ) получается качественным и высокого разрешения (10 м) [17]. Однако некоторую сложность вызывает образующийся в силу физических особенностей сканирующей аппаратуры спекл-шум, зрительно проявляющийся как зернистость изображения и препятствующий выявлению однородных классов. Стоит отметить, что просмотр радиолокационного изображения отдельно в вертикальной, горизонтальной или перекрестной поляризации (синтез первых двух) позволяет детектировать различные объекты и явления различной природы [4].

Наибольшее пространственное разрешение из общедоступных оптических систем имеет MSI (КА SENTINEL-2A и -2B) [16], сканирующая аппаратура с 10-метровым разрешением каналов B2 (490 нм), B3 (560 нм), B4 (665 нм) и B8 (842 нм). Периодичность съемки

области интересов составляет 5 дней. Несмотря на довольно высокое временное разрешение, территория водного объекта часто может быть покрыта облаками, в результате ряд наблюдений может оказаться неполным и регулярность нарушится и, как следствие, статистические наблюдения будут иметь пробелы. Для того, чтобы компенсировать недостающие наблюдения гидрообъекта, выбирается иная доступная система оптического диапазона с более низким разрешением.

В сервисе BEGA-Science такими системами являются OLI-TIRS и OLI-SR (КА Landsat-8) разрешения 30 метров [18], KMCC (КА Метеор-М №1, -М №2) с пространственной разрешающей способностью 60-120 метров. Данные системы OLI-TIRS (OLI-SR) в сервисе BEGA используются для решения различных задач, в том числе картографирования различных объектов, например, гарей [9]. Сервис также располагает архивами данных спутникового прибора Vegetation, установленного на европейском спутнике PROBA-V. Vegetation имеет разрешение 100 метров, что заметно меньше MSI. Однако, как будет показано далее, такая разница не оказывает существенного влияния на формирование итогового профиля динамики водохранилищ.

Методика исследования

Сервис BEGA-Science как основной инструмент для работы. Для организации регулярного мониторинга и анализа состояния водных объектов необходим инструмент для работы с многолетними архивами данных различных спутниковых систем. Таким инструментом является сервис BEGA-Science, разработанный и поддерживаемый Институтом космических исследований Российской академии наук. BEGA является одной из систем, функционирующей на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Обеспечивая доступ к спутниковым снимкам более, чем за 20 лет, BEGA-Science имеет широкий функционал, которого вполне достаточно для проведения мониторинга различных объектов и явлений. Для удобства отображения информация группируется по видам информационных продуктов, включая: спутниковые данные высокого (Landsat-TM/ETM) и среднего (MODIS) пространственного разрешения, сельскохозяйственные земли, леса, природные пожары, метеорологическая и картографическая информация. Инструменты анализа данных в составе сервиса BEGA обеспечивают следующие функциональные возможности [11]:

- комплексный анализ спутниковых данных различного пространственные разрешения и результатов их обработки, картографических и атрибутивных данных;
- оценка многолетней динамики спектрального вегетационного индекса для определения причин и времени изменений в лесах;

– поддержка и обновление базы данных контуров и характеристик лесных участков для обеспечения возможности мониторинга их состояния;

– геоинформационный анализ спутниковых данных во времени и пространстве;

– оценка статистики и формирование аналитических форм, характеризующих состояние лесов на заданных участках.

Основной задачей системы ВЕГА является предоставление пользователям удобного удаленного доступа к постоянно пополняющимся архивам спутниковых данных и различным информационным продуктам, получаемым на их основе. При этом пользователям системы предоставляются не только возможности удобного поиска, но и различные инструменты для ее анализа [12].

При сборе данных и формировании ряда наблюдений объектов, в особенности со сложным рельефом, большую роль играет долговременное хранение имеющейся информации на сервере и получение актуальной.

Оценка состояния водных объектов различными системами. Полученный ряд данных спутниковых снимков подвергается дальнейшей обработке. Для оценки площади водных объектов применяется классификация данных на основе спектральной яркости. Возможно использование как алгоритмов обучаемой классификации, так и необучаемой. В первом случае обучающая выборка должна содержать образцы пикселей, относящихся к классам "вода" и "суша". Во втором случае алгоритм автоматически выделяет заданное число кластеров, а их последующая группировка в итоговые классы "вода" и "суша" происходит с участием эксперта. Подход, рассмотренный в работе, основан на схеме проведения картографирования, использующей неконтролируемую классификацию, принцип организации которой подробно описан в [9]. Основная идея данного подхода 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 [9]. Решение задачи определения площади объектов в системе ВЕГА-Science включает следующие основные этапы:

- выбор объекта;
- выбор данных высокого разрешения;
- интерактивное оконтуривание с использованием процедуры классификации;
- интерактивная проверка корректности проведения оконтуривания [11].

Обработка полученных данных для оценки площади водохранилищ. Основным показателем для спутникового мониторинга водохранилищ предлагается выбрать площадь водного зеркала,

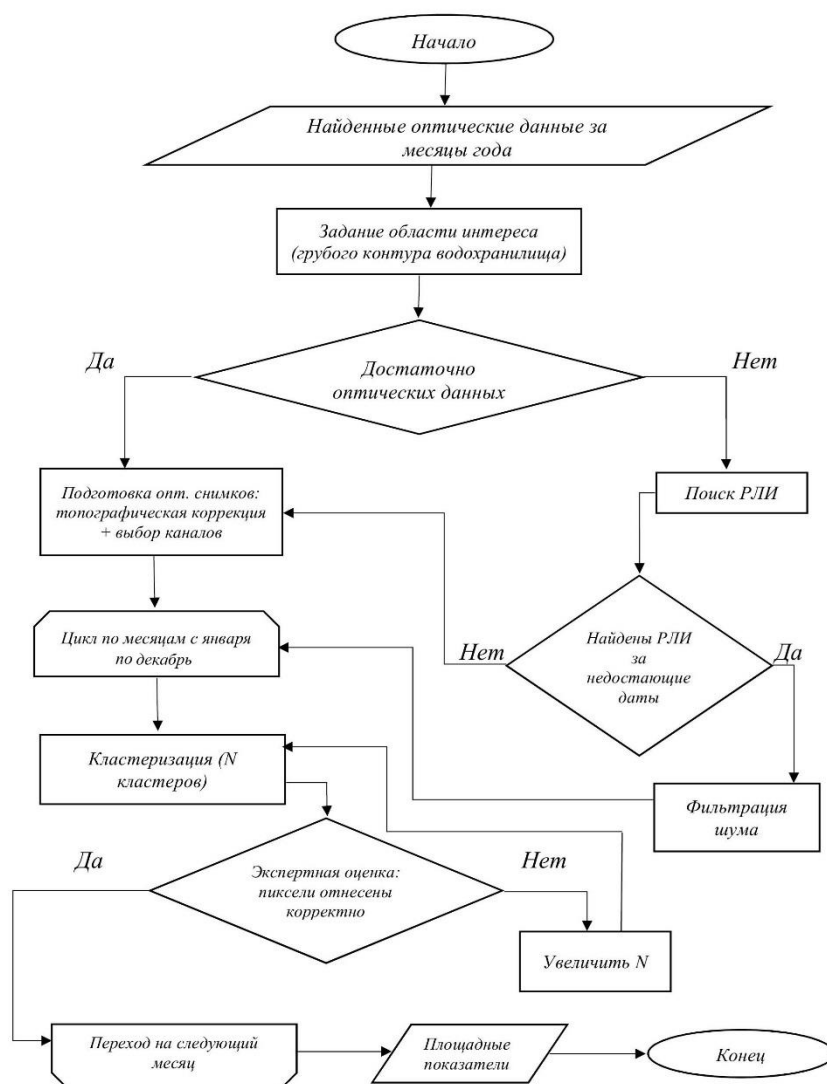
поскольку с позиции ДЗЗ этот ряд измерений этого параметра может быть наиболее полным и точным.

Построения динамики водного зеркала начинается с выбора спутниковых изображений наилучшего качества с доступных оптических и радиолокационных снимков. Исследование межсезонной динамики подразумевает наличие данных приемлемого качества один-два раза в месяц, даты в течение года должны идти с частотой в 25-30 дней. Спутниковые снимки в каждом месяце обрабатываются согласно блок-схеме на рис. 2.

Схема описывает алгоритм получения итогового профиля динамики водного зеркала водохранилища, который принимает на вход множество снимков оптического диапазона. Если за какие-то даты отсутствуют данные подходящего качества и разрешения, необходимо воспользоваться РЛИ за эти даты. В большинстве случаев множество снимков, полученных таким методом, образует полный ряд по месяцам. Далее, поскольку РЛИ подвержены влиянию спекл-шума, необходимо применить алгоритмы фильтрации.

Классификация на снимках оптического диапазона – один из наиболее удачных методов выделения водного зеркала. Однако в случае расположения объекта в горной местности, возникает существенное влияние теней. Спектральная яркость затененных участков суши приближается к яркости водной поверхности, в результате чего пиксель будет отнесён к неверному классу (суша к воде или наоборот). Во избежание таких ошибок при классификации применяется алгоритм топографической коррекции, который восстанавливает значения отражательной способности затененных участков.

Как было сказано выше, РЛИ не зависит от погодных условий. Тем не менее классификация участков такого снимка дает весьма серьезные погрешности при наличии приводного ветра. Рябь, образуемая в этом случае на водном зеркале, меняет яркость пикселей полутонового изображения (пиксель имеет один из 256 оттенков серого цвета) и классификатор относит пиксели к неверному классу. Кроме того, РЛИ не позволяет алгоритму классификации без обучения определить обмелевшие участки водохранилищ (рис. 3 б, в). Теоретически, данная проблема может быть решена путем формирования обучающей выборки по оптическому снимку за близкую дату – двух групп пикселей, определяющих воду и сушу. Практически же может оказаться, что даже большого числа пикселей может оказаться недостаточно для классификатора. Таким образом, РЛИ не может быть использовано при детектировании обмелевших участков водных объектов.



Р и с. 2. Общая схема обработки данных для оценки площади водохранилищ

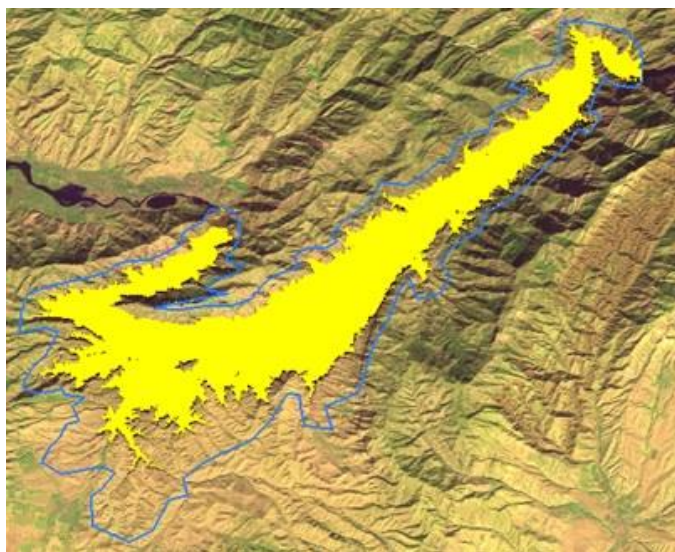
Классификация оптических снимков без предварительной обработки не всегда дает корректные результаты. Примером могут служить данные весенне-зимнего периода аппаратуры КМСС. Опытным путем было установлено, что спутниковые изображения горной местности, получаемые с сенсора КМСС, должны подвергаться предварительной нормализации, что способствует повышению точности при классификации участков водных объектов со сложным рельефом.

Для оптических данных необходимо провести операции цветовой коррекции и выбрать каналы для классификации (для видимого

диапазона каждый сенсор имеет собственные каналы). Подготовленные данные подвергаются необучаемой классификации с заданным числом кластеров N. Если пользователь (эксперт) считает, что классификация была проведена неудачно, следует увеличить число кластеров для того, чтобы повысить разделимость пикселей, и повторить классификацию. Описанные действия производятся со снимками за каждый месяц. В результате такого подхода можно определить, какая часть водохранилища занята водой.

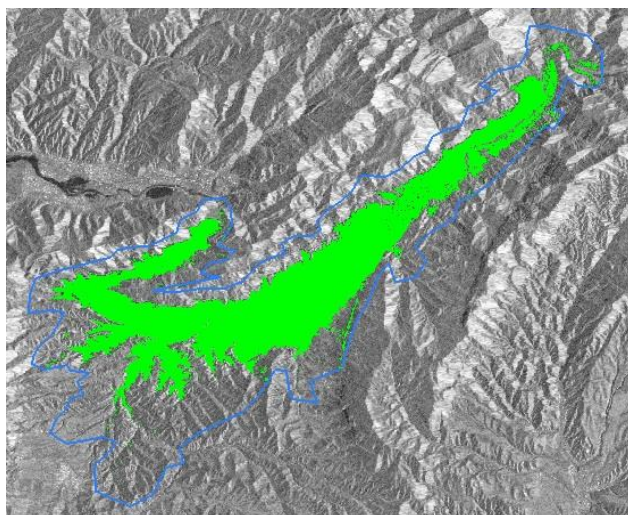
Результаты и обсуждение

Особенности показателей различных систем для Нурекского водохранилища. Состояние Нурекского водохранилища имеет важное значение при оценке водохозяйственной обстановки Узбекистана и территорий соседних государств. Гидрообъект является самым верхним сооружением на Вахшском каскаде, состоящим из нескольких водохранилищ и семи действующих ГЭС. На рис. 1 Нурекское водохранилище обведено синим контуром. В ходе исследования согласно схеме (рис. 2) были обработаны спутниковые данные за 2017 г. При этом были использованы спутниковые снимки сенсоров OLI-TIRS(OLI-SR), MSI, C_SAR_IW, Vegetation (PROBA-V), KMCC. Также, в качестве эксперимента были использованы данные MODIS. Некоторые примеры классификации в системе BEGA-Science показаны на рис. 3а-в.

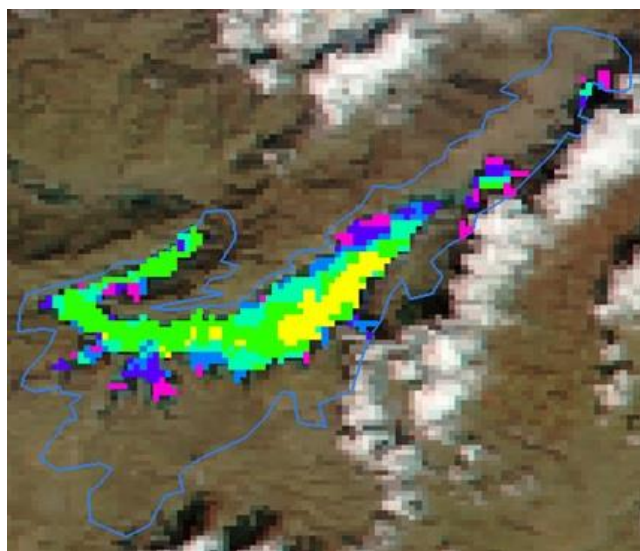


а)

Р и с. 3а. Результаты классификации некоторых спутниковых снимков



б)



в)

Рис. 3б, в. Результаты классификации некоторых спутниковых снимков:

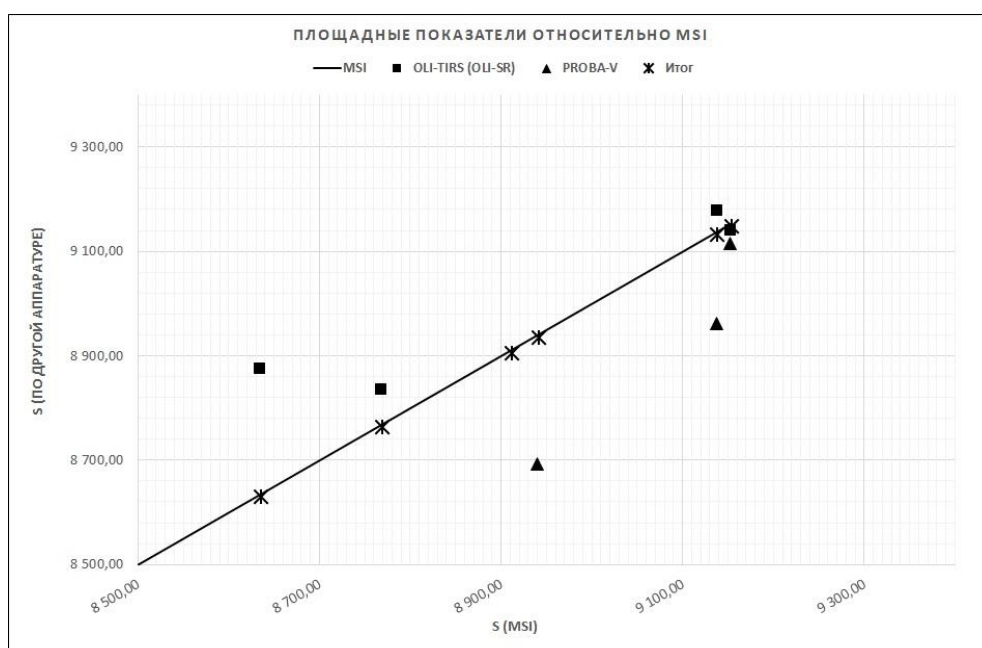
а) MSI (10 м);

б) Пример классификации РЛИ C_SAR_IW. Обмелевшая часть не выделена, за исключением контуров русла реки Вахш

в) Пример классификации снимка MODIS (250 м). Крупные пиксели снижают точность выделения

Стоит отметить, прошедшие классификацию данные отбираются субъективно, поэтому большую роль при включении результатов в итоговый профиль играет экспертная оценка.

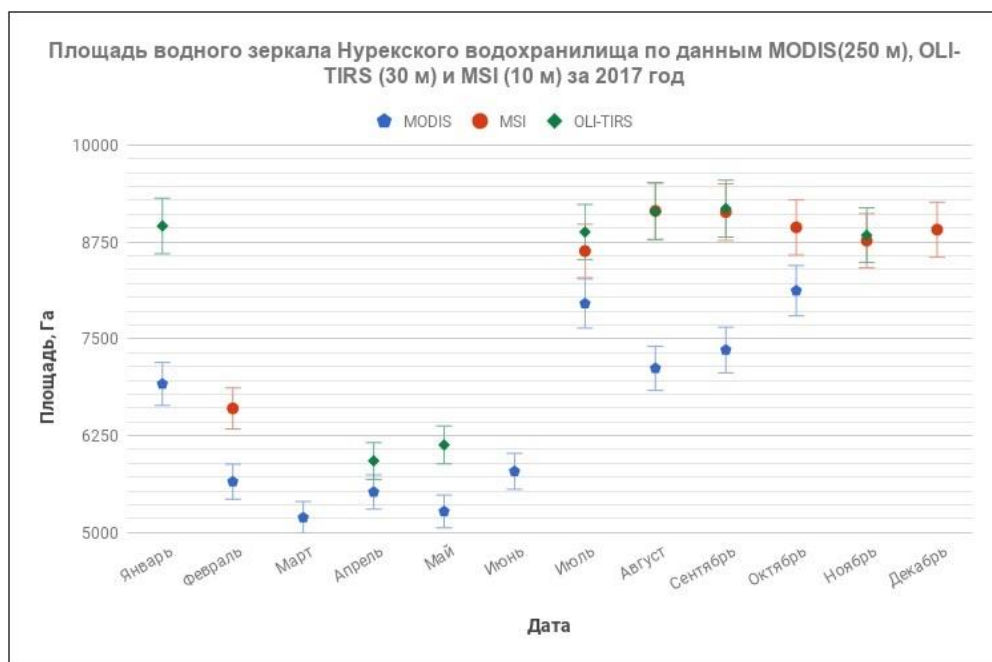
На примерах рис. 3 (б, в) показаны результаты классификации мартовских снимков с разницей в 6 дней. Можно заметить, что на примере рис. 3в детектирование обмелевшей части Нурекского водохранилища произведено незначительно, в том время на оптическом снимке среднего разрешения аппаратуры MODIS выделена только часть, занятая водой. Наряду с этим очень хорошие результаты дают системы MSI, OLI-TIRS, Vegetation и KMCC. На рис. 4 представлен сравнительный анализ имеющихся показателей трех приборов, без учета KMCC, так как результаты последнего комплекса могут быть включены только в весенне-летний период из-за ненормализованности данных осенне-зимнего периода, приходящих в систему из внешних источников.



Р и с. 4. Сравнительный анализ показателей спутниковых систем

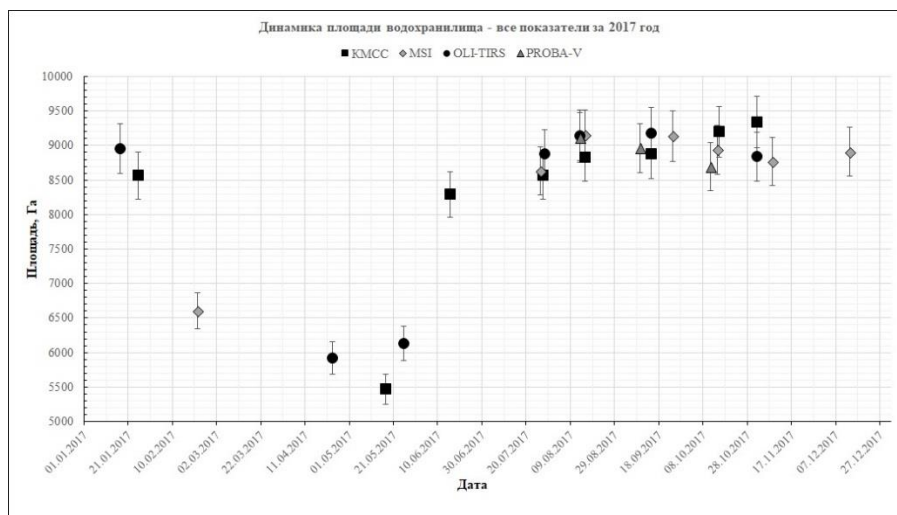
Было установлено, что значения, полученные с разных спутниковых систем, отличаются друг от друга менее, чем на 4% (<200 Га), а значит составление итогового профиля динамики водного зеркала объекта может проводиться по совокупному набору данных. За эталон показателя бралась прямая, составленная из показателей MSI. На графике также отмечены точки, вошедшие в итоговый профиль.

Таким образом, различие в показателях не играет существенной роли при анализе процессов на водохранилище, площадь которого меняется существенно больше, чем допустимая погрешность. Однако по диаграмме на Рис.5 видно, что показатели MODIS отличаются от эталонного MSI и OLI-TIRS более, чем на 4 процента. Следовательно, результаты классификации по данным MODIS не могут быть включены в итоговый ряд.



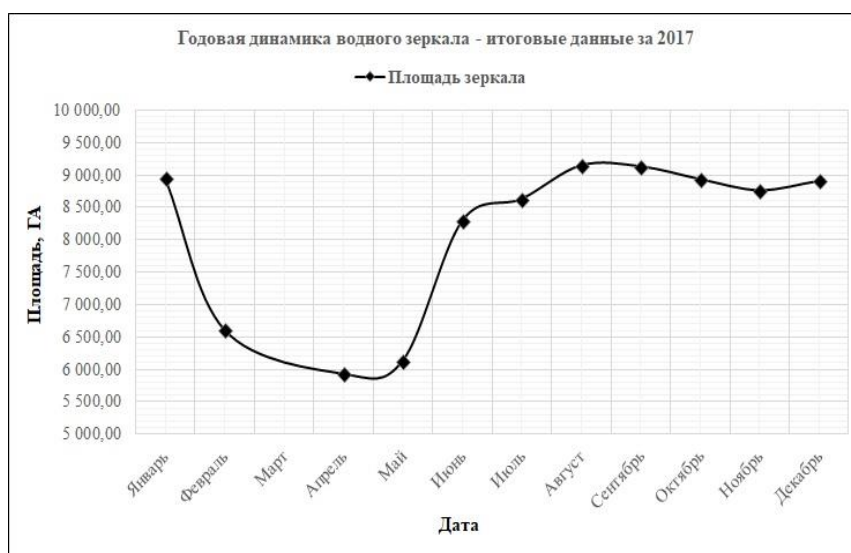
Р и с. 5. Сравнение показателей приборов среднего и высокого разрешения для Нурекского водохранилища. Погрешность MODIS относительно OLI-TIRS и MSI превышает 4%.

Итоговый профиль динамики площади водного зеркала. В результате проведенной работы были определены системы, с помощью которых с допустимой степенью погрешности удастся получить качественный профиль годовой динамики водного зеркала Нурекского водохранилища. Системы высокого разрешения MSI, OLI-TIRS и Vegetation являются оптимальными в совокупности, то есть дополняют показатели друг друга до полного ряда. В качестве дополняющей системы в весенне-летний период допустимо использование снимков КМСС. На Рис. 6 изображена диаграмма, отображающая все показатели, полученные при использовании схемы на рис. 2.



Р и с. 6. Совокупность всех полученных показателей спутниковых систем

Как было отмечено ранее, большую роль в формировании итогового профиля динамики водного зеркала играет экспертная оценка. Таким образом, если данные одной системы оказываются лучше по мнению эксперта, то именно они включаются в результирующий график динамики. На рис. 7 представлена итоговая кривая динамики водного зеркала водохранилища за 2017 год. Стоит отметить, что показатели за март были получены путем интерполяции, поскольку это случай, когда при недостатке оптических снимков РЛИ изображения не отражали динамику сезонного обмеления объекта.



Р и с. 7. Итоговый профиль динамики площади водного зеркала

Заключение

Разработанная методика обеспечивает возможность регулярного получения информации о площади водной поверхности Нурекского водохранилища на основе данных действующих спутниковых систем наблюдения Земли, с точностью, достаточной для оценки сезонных изменений состояния водохранилища.

Подобная методика может быть использована и для организации мониторинга других водохранилищ региона исследований. В перспективе на ее основе может быть организован мониторинг водохранилищ Вахшского каскада.

Список литературы

1. 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.
2. Спутниковый сервис ВЕГА-Science. URL: <http://sci-vega.ru/>.
3. Планета Земля. Историческая География. URL: <http://geosfera.org/aziya/2493-amudarya.html> (дата обращения 13.05.2018).
4. 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.
5. Фазылов А.Р., Харламова Н.П. Воздействия водохранилищ на динамику водного режима рек горно-предгорной зоны Таджикистана. // Наука и новые технологии №6. 2014. С. 34–41.
6. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. 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.
7. 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.
8. Лупян Е.А., Барталев С.А., Толпин В.А., Жарко В.О., Крашенинникова Ю.С., Оксюкевич А.Ю. Использование спутникового сервиса ВЕГА в

- региональных системах дистанционного мониторинга. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014. Т. 11. № 3. С.215–232.
9. Кашницкий А.В., Лупян Е.А., Барталев С.А., Барталев С.С., Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Стыценко Ф.В.. 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.
 10. Аванесов Г.А., Форш А.А. Проблемы научного космического приборостроения и их решение в рамках задач оптико-физического отдела ИКИ РАН // Космическое приборостроение. Таруса, 7–9 июня 2006. Сборник тезисов. 2006. С. 11.
 11. Барталев С.А., Ершов Д.В., Лупян Е.А., Толпин В.А.. 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.
 12. Лупян Е.А., Барталев С.А., Толпин В.А., Крашенинникова Ю.С., Оксюкевич А.Ю. Возможности и опыт использования спутникового сервиса Вега при организации регионального дистанционного мониторинга // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы международной научной конференции/ научн. ред. Е.А.Ваганов - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, ISBN 978-5-7638-3109-2, 2014. С. 3–6.
 13. Курбатова И.Е. Использование космической информации для мониторинга природно-территориальных комплексов побережья Цимлянского водохранилища. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 217–227.
 14. Жуков Б.С., Василейский А.С., Жуков С.Б., Зиман Я.Л., Полянский И.В., Бекренев О.В., Пермитина Л.И. Предварительная обработка видеоданных КМСС с КА «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 260–266.
 15. GIS-Lab. Географические информационные системы и дистанционное зондирование. URL: <http://gis-lab.info/> (дата обращения 13.05.2018).
 16. European Space Agency. URL: <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial> (дата обращения 19.05.2018).
 17. European Space Agency. URL: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sentinel-1> (дата обращения 19.05.2018).

18. U.S. Geological Survey, Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) and TIRS (Thermal Infrared Sensor). URL: <https://lta.cr.usgs.gov/L8> (дата обращения 19.05.2018).

THE PECULIARITIES OF SATELLITE MONITORING OF VAKHSH CASCADE BY THE EXAMPLE OF NUREK RESERVOIR

I.D. Mukhamedjanov¹, E.A. Loupian^{1,2}, I.A. Uvarov²

¹ Moscow State University, Moscow

² Space Research Institute RAS, Moscow

The paper describes the procedure of data acquisition in the organization of satellite monitoring of water objects of the Vakhsh cascade on the example of Nurek reservoir. Systems of remote sensing of the optical range with spatial resolution from 10 to 250 meters are considered. According to the results of the monitoring the graph expressing the dynamics of water surface area for 2017 is represented and the systems being optimal in combination for remote sensing of water reservoirs in zones with complex mountain terrain were found. Final diagrams could be useful in finding seasonal correlation between the state of water resources in the south and in the north-west of Uzbekistan, and also between vegetation values and the growing season streamflow for a defined period.

Keywords: *Nurek reservoir, Vakhsh cascade, water reservoir, Rogun hydroelectric power station, region, water resources, satellite monitoring, spatial resolution, dam.*

Об авторах:

МУХАМЕДЖАНОВ Ильдар Давлетович – студент I курса магистратуры факультета космических исследований МГУ имени М.В. Ломоносова по направлению 01.04.02 «Прикладная математика и информатика», e-mail: ildarmsu@gmail.com

ЛУПЯН Евгений Аркадьевич – доктор технических наук, заместитель директора Института космических исследований РАН, зав. кафедры Методов и технологий ДЗЗ Факультета космических исследований МГУ имени М.В. Ломоносова, email: evgeny@smis.iki.rssi.ru

УВАРОВ Иван Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института космических исследований РАН, email: uvarov@d902.iki.rssi.ru.