

Оценка возможностей спутникового мониторинга динамики речного стока на примере анализа состояния реки Амударьи

И. Д. Мухамеджанов¹, А. М. Константинова¹, Е. А. Лупян¹, Г. У. Умирзаков²

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: ildarmsu@gmail.com*

² *Национальный Университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека
Ташкент, 100174, Узбекистан
E-mail: g.umarzakov@gmail.com*

Работа посвящена описанию разработанного подхода спутникового мониторинга речного стока на основе технологии космических гидропостов (КГП) и данных наземных измерительных станций (гидропостов). В работе рассматриваются основные задачи и возможности предлагаемой технологии, в том числе задачи выбора оптимальных участков рек для КГП, схемы их установки и калибровки, а также объединения отдельных КГП во взаимосвязанные последовательности (сети). Для иллюстрации предлагаемых возможностей приводится пример построения сети КГП около стационарного гидропоста Керки (Туркменистан) на р. Амударье. Оценка эффективности работы сети КГП проводится на основе анализа временных рядов суммарных стоков в районе гидропоста Керки за три года: 2014, 2016, 2018 гг. Также приводится описание основных возможностей специализированной системы спутникового мониторинга EcoSatMS (<http://suvo.geosmis.ru>), которая была создана для реализации предлагаемых в работе подходов на основе использования возможностей Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>). Данная система ориентирована на использование и развитие предлагаемой технологии, в том числе создание сетей КГП на различных реках.

Ключевые слова: мониторинг водных ресурсов, спутниковый мониторинг, космический гидропост, ЦКП «ИКИ-Мониторинг», индекс MNDWI, река Амударья

Одобрена к печати: 14.03.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-87-103

Введение

Проблемы распределения водных ресурсов и их контроль в Центральной Азии стоят довольно остро в силу того, что основные протекающие в регионе реки снабжают водными ресурсами территории разных государств. При этом контроль водных ресурсов на основе использования только данных наземных измерительных постов, которые управляются службами различных государств, сталкивается с трудностями в получении однородной информации на протяжении всего течения трансграничных рек. Поэтому задача развития различных подходов и методов в получении объективной, однородной информации о состоянии рек региона на основе данных спутниковых наблюдений представляется крайне актуальной. Значимость таких методов во многом определяется тем, что они могут обеспечить получение объективной информации о состоянии различных участков русел рек и расходов водных ресурсов вне зависимости от государственной принадлежности территории, по которой данные реки протекают. Следует также отметить, что использование таких подходов и методов могло бы существенно упростить получение информации о состоянии водных объектов на труднодоступной территории. Работы в этом направлении в интересах обсуждаемого региона активно ведутся в последние годы (Константинова, Лупян, 2020; Терехов и др., 2020; Мухамеджанов и др., 2018; Терехов и др., 2021; Mukhamedjanov et al., 2020).

Информация, получаемая с наземных гидропостов (ГП), безусловно, выступает основной для оценки и прогноза состояния рек (в первую очередь водности). Однако и организация ГП, и получение информации от них могут быть затруднены. Это может быть связано как с особенностями политических границ (например, в случае прохождения рек по территории

различных государств), так и с физическими сложностями организации ГП (включая необходимость выделения финансовых ресурсов для создания и поддержки их функционирования, а также сложность их организации на труднодоступной территории). Поэтому задача разработки подходов и технологий, которые могли бы позволить получать информацию о состоянии рек на основе дистанционных данных, безусловно, становится актуальной.

В настоящей работе рассматривается возможность организации дистанционного контроля расхода воды в различных местах течения рек на основе регулярного мониторинга ширины русла реки с использованием данных спутникового мониторинга. Для решения данной задачи предлагается использовать так называемые космические гидропосты (КГП), представляющие собой привязанные к определённым участкам реки полигоны, в границах которых на основе спутниковых наблюдений проводится оценка площади, покрытой водой в конкретные моменты времени. В работе обсуждаются вопросы, связанные с возможностью использования КГП для оценки расхода воды на разных участках реки, особенности выбора полигонов для проведения таких оценок, построения сетей КГП (последовательно размещённых КГП) и организации автоматизированной технологии получения и обработки спутниковой информации по КГП. Анализируются основные задачи, для решения которых могут использоваться сети КГП, и преимущества их использования, включая возможность практически беззатратного создания и поддержки работы значительного числа КГП.

Также в работе представлены некоторые возможности разработанной в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) на базе технологий автоматизированной обработки, анализа и представления спутниковых данных действующей системы дистанционного мониторинга EcoSatMS (<http://suvo.geosmis.ru>) (Мухамеджанов и др., 2019), ориентированной на мониторинг водных ресурсов Центральной Азии, и полученные с её помощью оценки предлагаемых подходов дистанционного мониторинга водных ресурсов региона.

Особенности и преимущества космических гидропостов

Как уже было отмечено, КГП — виртуальный объект, определяемый как произвольный полигон, в пределах которого проводится расчёт площади водного зеркала на основе вычисления различных индексов, в первую очередь MNDWI (*англ.* Modified Normalized Difference Water Index — модифицированный нормализованный разностный водный индекс), определяемого по следующей формуле:

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{GREEN} - \text{SWIR}_1}{\text{GREEN} + \text{SWIR}_1}.$$

Пиксели с положительным значением индекса принимаются за водную поверхность. Для выделения водной поверхности могут, в частности, использоваться свободно распространяемые данные следующих спутниковых систем (Мухамеджанов и др., 2019): TM (*англ.* Thematic Mapper, спутники Landsat-4, -5), ETM+ (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus, Landsat-7), OLI (*англ.* Operational Land Imager, Landsat-8) (Ridwan et al., 2018; Rokni et al., 2014), MSI (*англ.* Multispectral Instrument, Sentinel-2A/B) (Phiri et al., 2020). Следует также отметить, что в перспективе для оценки площади водного зеркала в рамках КГП может использоваться и информация, поступающая от других спутниковых систем, в том числе радиолокационных.

КГП, которые фактически представляются виртуальными объектами (описанием границ территории, по которой происходит сбор данных, и наборами данных), по сравнению с наземным ГП обладают рядом очевидных преимуществ:

- 1) число КГП фактически ничем не ограничено;
- 2) отсутствуют затраты на техническое обслуживание;
- 3) отсутствуют ограничения на географическое положение объекта (например, труднодоступность и/или ограничения, связанные с госграницами);
- 4) КГП просты в использовании при появлении новых данных (новых спутниковых систем или наборов съёмок);

- 5) форма КГП легко может быть модифицирована, а данные по нему пересчитаны;
- 6) наличие значительного объёма спутниковых данных, находящихся в свободном доступе;
- 7) возможность использования как оперативных, так и исторических спутниковых данных (доступные архивы сегодня имеют глубину порядка 40 лет).

В то же время использование КГП для оценки водности рек может осуществляться только совместно с данными наземных станций, информация с которых необходима для пересчёта площадей водного зеркала, измеряемого на конкретном КГП, в показатели водности, измеряемые на наземных станциях.

Подходы к установке и калибровке космических гидропостов и их сетей

Для того чтобы создавать и использовать КГП, необходимо решить следующие основные проблемы:

- определить принципы выбора участков реки, на которых возможно осуществлять контроль водности с использованием оценок водного зеркала на КГП;
- разработать схему выбора оптимальной формы полигонов для конкретных мест расположения КГП;
- разработать схему калибровки КГП и их последовательности по данным ГП, в том числе определить подходы к оценке предельного расстояния от конкретного ГП, на котором его данные могут использоваться.

В настоящем разделе будут сформулированы основные подходы к решению данных задач.

Особенности и принципы выбора участков реки, на которых возможно осуществлять контроль водности с использованием оценок водного зеркала на космических гидропостах

Поскольку технология работы КГП не накладывает ограничений на заведение полигонов в связи с географическим расположением, необходимо определить, при каких условиях достигается максимальная эффективность работы КГП. Проведённый анализ позволил выявить факторы, которые следует учитывать, а также особенности участка реки при установке КГП.

Как уже отмечалось, для использования КГП и их сетей необходимо проведение калибровки по ГП, т.е. установление связи площади водного зеркала с параметрами, измеряемыми на КГП, например с суточным стоком или уровнем реки, по которому также может быть оценён суточный сток (Быков, Васильев, 1977; Карасев, 1980). Для обеспечения высокой и устойчивой корреляции и взаимосвязи между дистанционно и контактно измеряемыми показателями русло реки в месте установки КГП должно сохраняться, т.е. его морфология должна быть неизменной год от года. Однако, как показали исследования, данное условие не всегда выполнимо, в этом случае часто необходимо осуществлять перекалибровку КГП. Также следует иметь в виду, что в случаях, когда изменение уровня реки приводит к очень малым изменениям площади водной поверхности на конкретном участке русла, корреляция между параметрами ГП и установленном в таком месте КГП также может быть низкой. Таким образом, при установке КГП необходимо выбирать участки реки с максимально стабильным руслом, на которых происходят достаточно значительные изменения площади водного зеркала (ширины реки) при изменении уровня и расхода воды. Также при выборе участка для установки КГП следует стремиться к тому, чтобы полигон не включал (Mukhamedjanov et al., 2020):

- участки суши между рукавами реки, образуемые многолетним размытием и заметные в период межени;

- заливные поля;
- зоны с устойчивым снежным покрытием (это затрудняет оценки с использованием MNDWI);
- углубления в пойме или речной террасе реки, в результате которых появляется стоячая вода (возможно появление шума при расчёте площади по MNDWI).

Схема выбора оптимальной формы полигонов, используемых для космических гидропостов

Космические гидропосты, создаваемые на русле реки с учётом вышеперечисленных особенностей, служат структурными элементами для построения последовательностей взаимосвязанных объектов-полигонов, которые названы «сетями КГП». Для того чтобы построить сеть, необходимо провести процедуру выбора наиболее подходящих полигонов в различных местах реки, удаляясь от опорной наземной станции выше или ниже по течению. Выбор подходящих космических гидропостов основан на методах калибровки и оценки метрик, отражающих качество и устойчивость работы КГП. Таким образом, построение сети представляет собой итеративный процесс, где на каждом шаге происходит поиск параметров очередного объекта.

Выбор оптимальных полигонов. Подход, предлагаемый в работе, основан на выборе наиболее подходящего гидропоста из группы полигонов различной геометрии, установленных на русле реки около наземного измерительного пункта или в окрестности другого полигона. Схема выбора оптимальной формы является универсальной для ближайшего к станции полигона и всех последующих, располагаемых на русле реки. Принцип поиска наилучших параметров КГП основан на оценке показателей выбранной метрики, полученной при анализе рядов наблюдений текущего объекта (всегда КГП) и предыдущего, по которому также затем производится калибровка (наземная станция или предыдущий КГП).

Организация очередного полигона проводится анализом 10 возможных вариантов расположения на русле относительно эталонного объекта, которые образуют группу на каждом шаге. Для удобства обозначения полигонов и организации их в группе на каждом шаге использовался шаблон *<название физ. станции><направление течения от ГП><расстояние в км>kt_<номер полигона в группе>*. В таком шаблоне направление течения может быть обозначено знаками «+» (поворот по часовой стрелке относительно перпендикуляра к векторам частичных стоков) или «-» (против часовой стрелки). Номера полигонов в группе соответствуют следующим правилам:

- 1) 0° — узкий в месте удаления;
- 2) +45° — узкий в месте удаления;
- 3) -45° — узкий в месте удаления;
- 4) 0° — узкий выше по течению от места удаления;
- 5) +45° — узкий выше по течению от места удаления;
- 6) -45° — узкий выше по течению от места удаления;
- 7) 0° — узкий ниже по течению от места удаления;
- 8) +45° — узкий ниже по течению от места удаления;
- 9) -45° — узкий ниже по течению от места удаления;
- 10) 0° — широкий полигон в месте удаления.

На участках, имеющих русло, расчленённое на протоки, створы разбиваются отдельно в основном русле и в протоках, полный расход определяется как сумма частичных расходов (Быков, Васильев, 1977). При этом каждый проток русла будем называть *частичным стоком*, а вектор скорости речного протока — *вектором частичного стока*. Под «местом удаления» в данном случае следует понимать расположение предыдущего объекта в последовательности КГП: либо наземной станции, либо центра полигона предыдущего КГП. Угол поворота при установке полигонов выбирается относительно перпендикуляра к векторам частичных стоков. Площадь водного зеркала в пределах узкого полигона фактически выражает ширину реки, а значит, линия сечения полигона должна быть перпендикулярна направлению векто-

ров частичных стоков (Быков, Васильев, 1977). Однако эмпирически было определено, что в некоторых случаях поворот полигона на 45° по/против часовой стрелки повышает устойчивость его работы. Соответственно, схема выбора КГП из 10 возможных, описанных выше, помогает повысить качество работы всей сети КГП.

На каждом шаге при выборе полигона из группы используется модель полиномиальной регрессии, связывающая площадь водного зеркала калибруемого КГП либо с измерениями суточного стока (при калибровке КГП по данным наземной станции), либо со значениями площади водного зеркала на опорном КГП (при калибровке КГП по данным КГП, который уже был откалиброван).

Отметим, что для калибровки по данным ГП может быть выбран КГП, который заводится максимально близко к ГП. Для краткости в формулах далее при обозначении переменной, обозначающей площадь водного зеркала (рассчитанную по индексу MNDWI), измеряемую на космических гидропостах, будет использоваться MNDWI (вместо S_{MNDWI}). Как было сказано выше, площадь водной поверхности в пределах полигона выражает сумму площади пикселей с положительным значением индекса. Тогда связь между показателями Q (суточного стока, измеряемого в кубических метрах в секунду) и площадью водного зеркала (измеряемой в гектарах) может быть описана линейной моделью ($Q = a \cdot \text{MNDWI} + b$), работоспособность которой можно оценить, используя коэффициент корреляции (Пирсона) временных рядов наземных и спутниковых наблюдений (R) и величину среднеквадратической ошибки (MSE — *англ.* Mean Square Error). Получаемая регрессия фактически устанавливает связь между шириной русла реки, которая оценивается по спутниковым данным, и суточным стоком, измеряемым на ГП. Стоит учитывать, что такая зависимость будет стабильной только на тех участках русла, где нет сезонных «заливов», которые образуются в результате миграции русла около меандров. Также следует отметить, что изменение формы КГП (в том числе площади и ориентации) русла реки будет влиять на показатели регрессии и коэффициент корреляции.

Калибровка конкретного КГП может также происходить на основе поиска связи между данными, получаемыми на нём, и данными с ранее откалиброванного КГП. В этом случае связь измеряемой площади зеркала на калибруемом КГП осуществляется не с реальными измерениями суточного стока, а с нормированными на площадь полигона показателями площади водной поверхности ранее откалиброванного КГП. Так же как и в наземной станции, необходимо анализировать метрики качества работы КГП. В качестве таких метрик могут также выступать R , MSE и результаты F -теста (Dünki et al., 2011) — для оценки влияния полигона на работу всей сети КГП.

Построение сети и условия для её продолжения

Последовательность взаимосвязанных полигонов в результате образует сеть, которую можно продолжать, доставляя каждый следующий полигон. Для определения условий продолжения таких сетей необходимо на каждом шаге проводить калибровку текущего объекта по предыдущему. При калибровке в базу данных сохраняются коэффициенты полиномиальной регрессии, рассчитанные статистики, ссылка на ближний к наземной станции полигон, по которому откалиброван текущий КГП. Как было сказано выше, результат калибровки необходимо контролировать на каждом шаге построения, проводя оценку метрики качества и устойчивости работы КГП. На первом шаге необходимо выбрать участок русла, максимально отражающий ширину реки (в месте наибольшего разлива). Тогда основной метрикой оценки качества может быть выбран коэффициент корреляции R .

В соответствии с предложенным подходом для оценки качества работы очередного гидропоста необходимо провести F -тест, рассчитав его значения по следующей схеме:

1. Для двух временных рядов площади водного зеркала, MNDWI_1 (КГП, установленный ближе к ГП) и MNDWI_2 (находится дальше от ГП), выполнить построение диаграммы разброса интегральных значений водного зеркала, нормированных на площадь полигона. Заметим, что исходные значения рядов MNDWI_1 и MNDWI_2 не являются нормированными.

2. Разделить все измерения площади на тренировочное (*train*) и тестовое (*test*) множества в процентном соотношении 70 и 30 соответственно (Stone, 1974). При меняющейся год от года морфологии русла (смещение основной части, покрытой водой) такое разделение помогает сделать сформированную выборку для построения модели, включив измерения по всем годам и сезонам для определения коэффициентов регрессии, что в текущем подходе также должно быть соблюдено при оценке качества регрессионной модели. В данном подходе оба множества значений площади водного зеркала имеют одинаковую мощность, так как показатели выбираются только за совпадающие даты спутниковой съёмки.
3. Вычислить статистики F_{train} и F_{test} как отношение дисперсий тренировочной и тестовой выборок нормированных рядов. Данные статистики позволяют оценить степень разброса показателей одного полигона относительно другого.

Проведённые эксперименты показали, что достаточно хорошие результаты может давать полиномиальная регрессия третьего порядка вида:

$$\text{MNDWI}_2 = a_1 \cdot \text{MNDWI}_1^3 + a_2 \cdot \text{MNDWI}_1^2 + a_3 \cdot \text{MNDWI}_1 + b,$$

где a_1, a_2, a_3 — параметры модели; b — сдвиг по оси ординат.

В качестве дополнительных метрик рассчитываются коэффициент корреляции R и величина среднеквадратической ошибки модели MSE (Wackerly et al., 2008). Эти показатели также позволяют оценить точность построенной регрессионной модели для конкретного КГП и контролировать точность работы сети в целом.

Отметим, что одним из условий возможности расширения сети КГП может выступать то, что F -значения для тренировочной и тестовой выборок не должны превышать (с точностью до округления) 40 (<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda3673.htm#ONE-10-1-10>). Такое пороговое значение выбрано с учётом 10%-й значимости модели, т.е. нулевая гипотеза «дисперсии временных рядов наблюдений площади водного зеркала, нормированных на площадь полигона на двух последовательных полигонах, равны» не принимается с вероятностью $\alpha = 0,1$. Данный порог представляется наиболее высоким из общепринятых, для того чтобы получаемые на всей сети оценки суточного стока были значимы. Таким образом, расширение сети КГП продолжается до тех пор, пока рассчитанные статистики лежат в допустимых пределах.

Демонстрация возможностей использования предложенных подходов для построения сети космических гидропостов в районе ГП Керки

В настоящем разделе приводится пример применения изложенной выше методики с использованием наземных данных измерительного пункта (гидропоста) Керки на р. Амударье вблизи г. Атамырат в Туркменистане. На данном измерительном пункте регулярно проводятся измерения уровня воды, которые затем пересчитываются в величину суточного стока. Для работы с гидропостом Керки были выбраны временные ряды суточных стоков за несколько лет: 2014, 2016, 2018 гг. Наземные данные были получены в рамках проекта CAWa (*англ.* Central Asian Water, <http://cawa-project.net>), цель которого заключается в оказании содействия центрально-азиатским государствам в создании научно обоснованной и достоверной региональной базы данных для разработки устойчивой стратегии управления водными ресурсами.

Реализация выбора оптимальной формы полигона. Согласно описанной в предыдущем разделе схеме, для удобства выбора оптимальных параметров полигона около Керки применялась методика организации группы из 10 КГП различной формы и ориентации относительно векторов частичных стоков. Практически реализация схемы организации группы полигонов показана на *рис. 1* (см. с. 93). В данном случае около станции Керки место разлива находится в месте, где речные протоки имеют разнонаправленные векторы частичных стоков. Тогда описанная схема создания полигонов может применяться к участку русла, который

формирует большую часть водного зеркала в пределах гидропоста. На *рис. 1*(1–6, 10) в качестве большей части водного зеркала была выбрана расположенная южнее, в то время как на *рис. 1*(7–9) — часть русла, расположенная западнее. Коэффициент корреляции R наблюдений временных рядов площади водного зеркала в пределах полигона и суточного стока является метрикой качества при определении лучших параметров полигона.

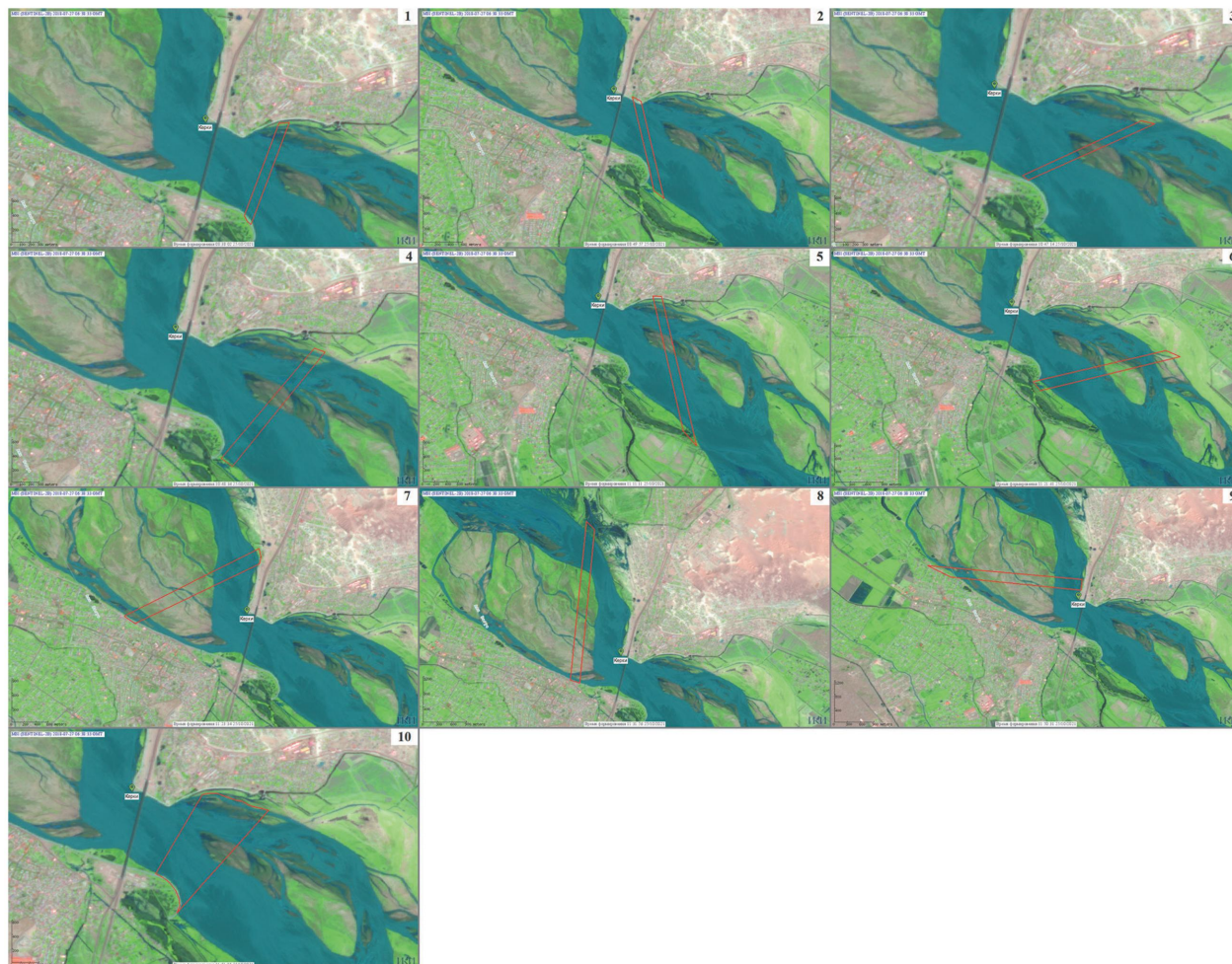


Рис. 1. Группа полигонов при выборе КГП около Керки, установленных по снимку от 27.07.2018 (Sentinel-2B, продукт «Тепловые аномалии»): 1 — Kerki-1km_1; 2 — Kerki-1km_2; 3 — Kerki-1km_3; 4 — Kerki-1km_4; 5 — Kerki-1km_5; 6 — Kerki-1km_6; 7 — Kerki-1km_7; 8 — Kerki-1km_8; 9 — Kerki-1km_9; 10 — Kerki-1km_10

Пример выбора лучшей формы КГП около ГП Керки

ID	Название КГП	S , га	R (Q , MNDWI)
229	Kerki-1km_1	15,0	0,82
343	Kerki-1km_2	22,0	0,52
230	Kerki-1km_3	13,4	0,82
322	Kerki-1km_4	28,0	0,88
338	Kerki-1km_5	49,0	0,74
342	Kerki-1km_6	60,0	0,90
340	Kerki-1km_7	63,0	0,87
339	Kerki-1km_8	78,5	0,69
341	Kerki-1km_9	94,0	0,89
281	Kerki-1km_10	89,5	0,85

В таблице приведены результаты анализа группы КГП, приведённых на *рис. 1*. В данном случае наиболее оптимальный КГП выбран с $R(Q, \text{MNDWI}) = 0,9$, т.е. узкий полигон, выражающий ширину реки и расположенный под углом -45° выше по течению от места удаления.

На *рис. 2* наглядно показано расположение полигона относительно Керки с наилучшими параметрами, а также диаграмма, на которую нанесены показатели площади водной поверхности, полученные с КГП около Керки, и соответствующие им измерения суточных стоков на Керки (даты измерений совпадают). Для краткости обозначения в уравнении регрессии Y выражает объём суточного стока в кубических метрах в секунду, X — величину площади водной поверхности на КГП в гектарах.

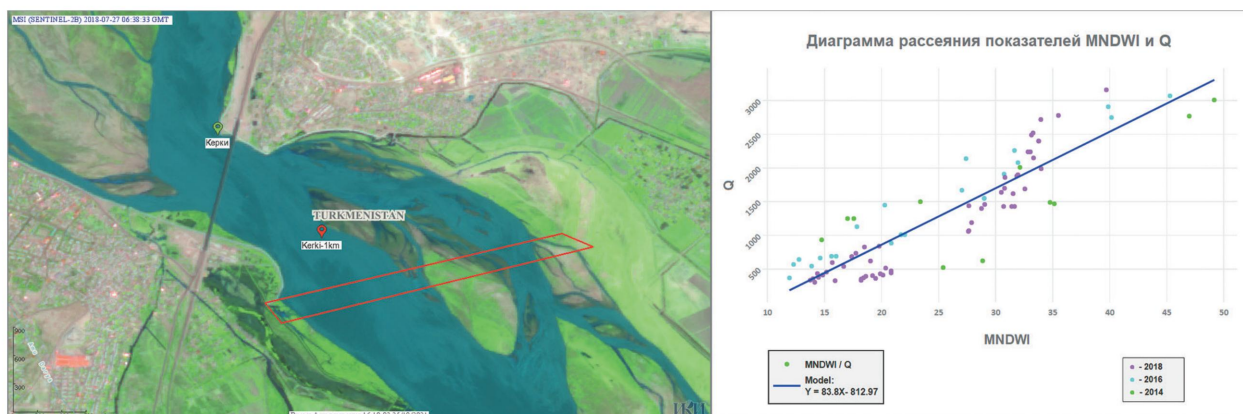


Рис. 2. Диаграмма (справа) разброса измерений за 2014, 2016, 2018 гг. для КГП, установленного в 1 км выше от Керки (Kerki-1km_6). MNDWI — площадь водного зеркала (га); Q — суточные стоки на Керки ($\text{м}^3/\text{с}$). Наблюдается линейная зависимость, коэффициент корреляции (Пирсона) равен 0,9



Рис. 3. Пример расположения объектов сети КГП выше от Керки. Полигон 1 связан с объектом-гидропостом Керки, полигон 2 связан с полигоном 1

Для удобства восприятия точки на диаграмме на *рис. 2* дифференцированы по цветам: розовым обозначены измерения 2018 г., голубым — 2016 г., зелёным — 2014 г. В данном случае коэффициент корреляции Пирсона, вычисленный по совокупности измерений за выбранные три года, равен 0,9, что свидетельствует о наличии линейной зависимости интегральной площади водного зеркала от величины суточного стока.

Построение сети КГП было проведено на основе предложенного выше подхода. На *рис. 3* (см. с. 94) приведено расположение объектов сети КГП, где зелёным маркером обозначена станция Керки, а красным и оранжевым контурами — ближайший (1) к станции и следующий за ним выше по течению (2) полигоны соответственно.

Калибровка и построение сети. В процессе формирования сети и калибровки выполняется построение диаграммы рассеяния показателей временных рядов, а также модели полиномиальной регрессии, пример которой приведён на *рис. 4*. Для краткости на диаграмме *рис. 4* переменная площади водной поверхности КГП (S_{MNDWI}), рассчитанная по индексу MNDWI, обозначена как MNDWI_i , где $i = 1, 2$. В уравнении регрессии Y выражает нормированную на площадь полигона величину площади водной поверхности на КГП дальше от Керки (MNDWI_2), X — нормированную на площадь полигона величину площади водной поверхности на КГП ближе к станции Керки (MNDWI_1).

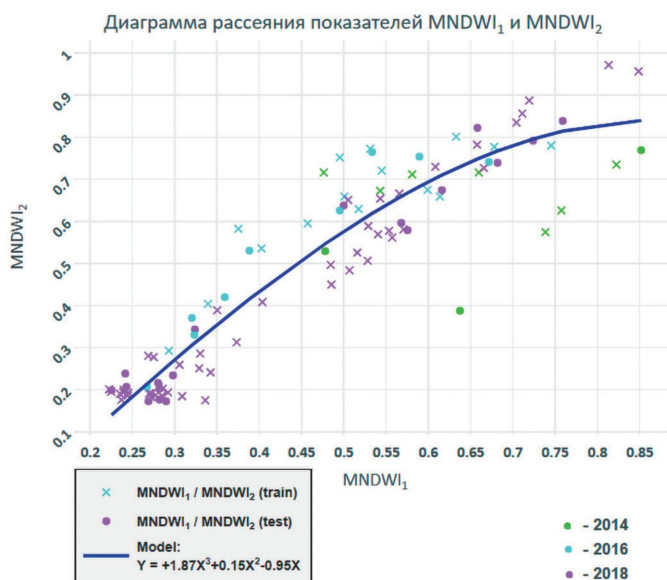


Рис. 4. Диаграмма, показывающая распределение данных по двум последовательным КГП в 8 км (MNDWI_1) и 11 км (MNDWI_2) выше от Керки соответственно. В данном случае $F_{\text{train}} = 1,9$, $F_{\text{test}} = 1,673$, $R = 0,92$, $\text{MSE} = 0,007$

Стоит отметить, что диаграмма рассеяния служит также характеристикой качества работы КГП в межгодовом и межсезонном аспектах. Полигоны, установленные в неблагоприятном месте, существенно снижают устойчивость отдельных гидропостов, а значит, и всей сети. В качестве примера влияния расположения КГП на *рис. 5* (см. с. 96) приведено сравнение диаграмм двух полигонов, которые были установлены в неподходящем и благоприятном для дальнейшего мониторинга местах.

Предыдущий полигон установлен в 14 км выше по течению от Керки (MNDWI_1), текущий — в 19 км (MNDWI_2). Жёлтым маркером обозначена отметка в 19 км выше от Керки, снимки для каждого полигона приведены с разностью в два года на 19.07.2016 (сезон полноводности). Как можно заметить, различие формы, ориентации КГП, а также место установки влияют на качество работы КГП и полиномиальной модели. Значения MSE в данном случае изменяются более заметно, так как наблюдения на диаграмме разброса распределены в виде кластеров.

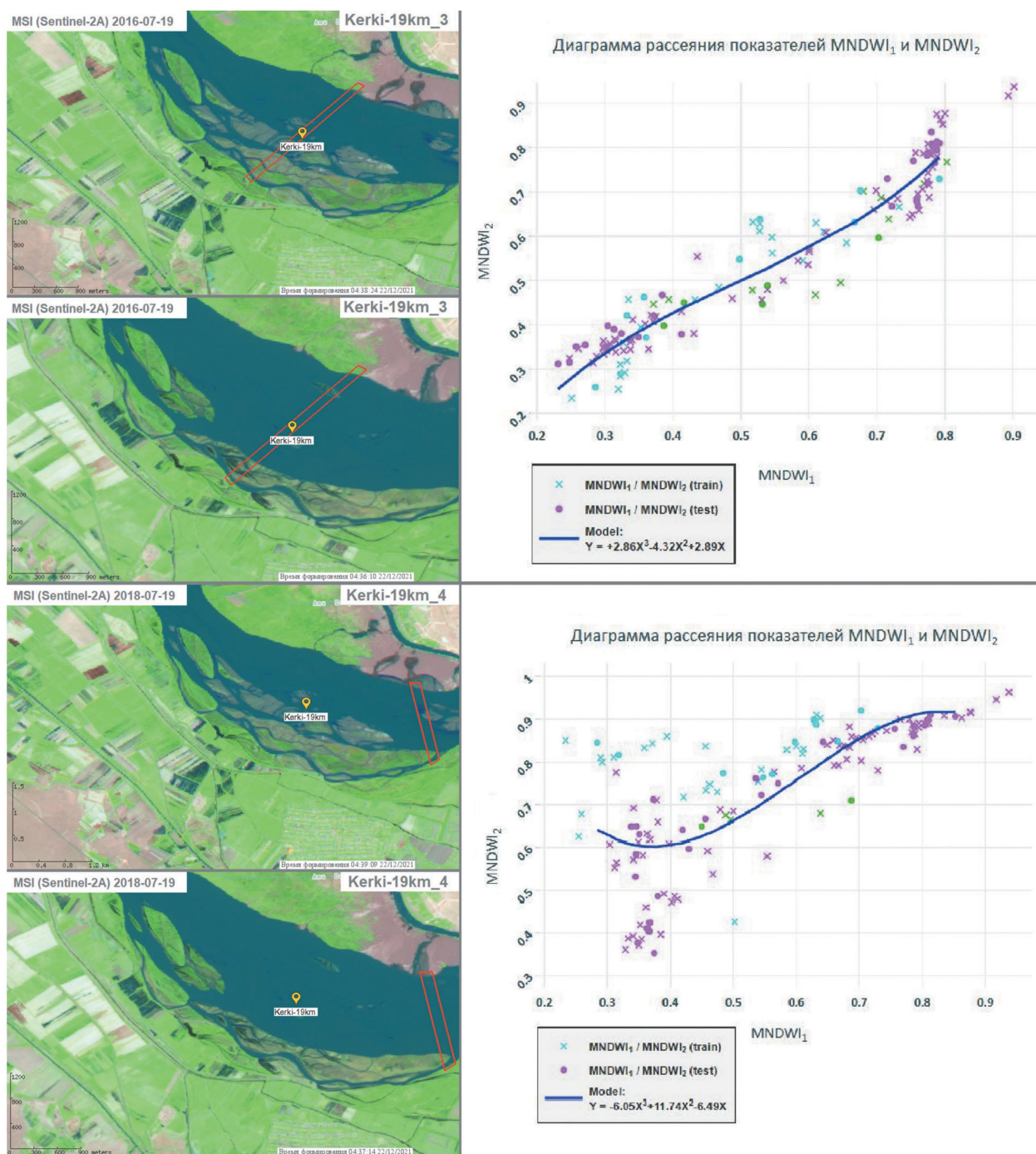


Рис. 5. Сравнение двух КГП, установленных на подходящем (вверху) и неблагоприятном (внизу) для работы полигона участках русла Амударьи в 19 км выше от Керки. В данном случае для подходящего КГП F_{test} (Kerki-19km_3, Kerki-14km_1) = 1,283, MSE (Kerki-19km_3, Kerki-14km_1) = 0,002, R (Kerki-19km_3, Kerki-14km_1) = 0,96; для неподходящего КГП F_{test} (Kerki-19km_4, Kerki-14km_1) = 1,1, MSE (Kerki-19km_4, Kerki-14km_1) = 0,011, R (Kerki-19km_4, Kerki-14km_1) = 0,72

Методика построения позволяет организовать сеть, которая, в свою очередь, служит средством оценки динамики водности Амударьи и состояния русла на некотором удалении от Керки. Контроль показателей на каждом шаге позволяет определить, на каком максимальном расстоянии КГП в таких сетях сохраняют устойчивую работу и какие факторы влияют на эффективность сетей.

Оценка работоспособности построенной сети КГП. На рис. 6 показан график изменчивости F -значения на выборке при построении тренировочной модели (маркеры красного цвета)

и на тестовом множестве (кривая синего цвета). График показывает, что на расстоянии 45 км F -значение становится неустойчивым, резко возрастаю или уменьшаясь, однако и не превышает допустимый порог (40). Вместе с тем на таком расстоянии и на следующих за этой отметкой гидропостах наблюдается нестабильность показателя, а разделение точек на кластеры на диаграмме разброса показывает рост дисперсии на тренировочной и тестовой выборках. Стоит отметить, что F -тест фактически указывает на то, насколько построенная модель адекватна на каждом шаге, но, как показывает проведённый эксперимент, не может выступать единственным условием принятия решения о продлении сети.



Рис. 6. Диаграмма, показывающая динамику F -значения на разных типах выборки за три года



Рис. 7. Диаграмма, показывающая динамику коэффициента корреляции R на текущем и предыдущем объектах на разных типах выборки за три года

В качестве дополнительной метрики на рис. 7 также приведён график величины R — коэффициента корреляции для последовательных объектов. На ближайшем КГП в 1 км выше от Керки величина рассчитана для суточных стоков и площади водного зеркала, на каждом следующем полигоне — для показателей площади водного зеркала (нормированных на площадь полигона) на текущем и предыдущем гидропостах. Как видно из диаграммы, корреляция также падает до 0,82 на расстоянии 43 км и далее после некоторого возрастания значение уменьшается до 0,77.

Динамика показателей обусловлена особенностью изменчивости русла Амударьи сначала на 22 км (Мухамеджанов и др., 2020а, б) (Амударья разделяется на основное русло и отдельный

ирригационный канал на север), затем на 45 км (морфологические изменения в межгодовом аспекте, пример приведён на *рис. 8*). Анализ расположения полигонов около русла Амударьи на расстоянии 45 км выше от Керки показал, что КГП, созданные по спутниковым данным 2014 г., не будут включать зоны, затопленные в 2018 г. Если же полигон создан исключительно по данным 2018 г., то зоны, которые не были затоплены в 2014 и 2016 гг., окажутся на более ранних спутниковых снимках заливными полями или небольшими заливами, что впоследствии создаст некоторый шум на графике кривой MNDWI и негативно повлияет на работу сети в целом. Таким образом, структура русла в 2018 г. будет значительно отличаться от той, что наблюдалась в 2013 г. и даже в 2016 г. Структурные изменения такого рода могут быть обусловлены водным режимом на Амударье в разные годы. В связи с этим при построении модели в процессе организации сети КГП также может быть полезным использование данных реанализа по осадкам согласно модели NCEP (*англ.* National Centers for Environmental Prediction — Национальный центр экологических прогнозов) NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США) и отвечающих за работу каскада водохранилищ на р. Вахш — одном из главных притоков Амударьи (Мухамеджанов и др., 2018).

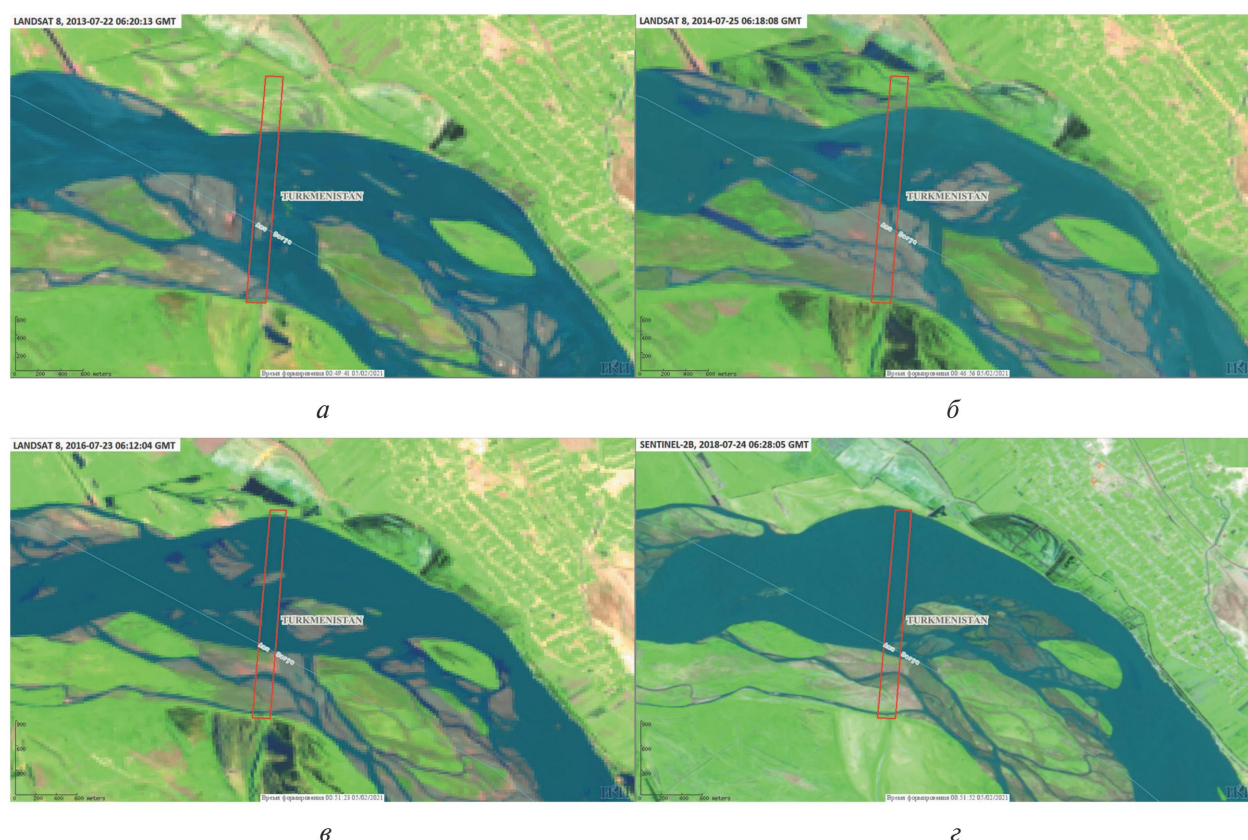


Рис. 8. Изменчивость расположения КГП относительно русла в 45 км выше от Керки в течение 6 лет (2013–2018), цветовой синтез «Тепловые аномалии»: *а* — Landsat-8, 22.07.2013, 06:20:13 GMT; *б* — Landsat-8, 25.07.2014, 06:18:08 GMT; *в* — Landsat-8, 23.07.2016, 06:12:04 GMT; *г* — Sentinel-2B, 24.07.2018, 06:28:05 GMT

Система работы с данными для реализации технологии космических гидропостов

Применение технологии КГП подразумевает процедуры, которые оператору приходится выполнять многократно. Большая часть этих процедур, таких как: поиск и фильтрация спутниковых данных при наличии облачности, расчёт площади водной поверхности в пределах

полигона, систематизация и анализ полученных временных рядов, может быть автоматизирована. Для организации регулярных наблюдений и распределённой работы операторов необходим единый сервис с интерфейсом, подходящим для решения задачи мониторинга водных ресурсов центральноазиатского региона. Система EcoSatMS (<http://suvo.geosmis.ru>) — некоммерческая разработка, которая в настоящее время поддерживается и развивается в ИКИ РАН. EcoSatMS входит в семейство систем «Созвездие-Вега» (<http://sozvezdie-vega.ru/>) (Lourian et al., 2022) и разработана с использованием ресурсов Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019). Отличительная особенность сервиса состоит в адаптации картографического интерфейса для региона Центральной Азии, в частности для Узбекистана: интегрированы базовые картографические слои и возможности работы с обновляющимися архивами спутниковых данных. Для работы с КГП в сервис был внедрены инструменты, позволяющие вести наблюдения в автоматическом режиме и контролировать их качество (Мухамеджанов и др., 2019, 2020а). Информационная система EcoSatMS поддерживает работу с объектами в интерактивном режиме, позволяет управлять обработкой спутниковых данных и анализировать динамику изменений объектов в веб-интерфейсе, в том числе заводить КГП (рис. 9) и анализировать поступающие по ним данные. В системе EcoSatMS организована технология космических гидропостов и обработки показателей, полученных в результате их работы. Последние хранятся в виде долговременных рядов наблюдений, что позволяет проводить анализ в межгодовом и межсезонном аспектах. Расчёт временного ряда по MNDWI для каждого гидропоста с прохождением по долговременным архивам спутниковых данных глубиной около 40 лет происходит в течение нескольких минут с момента появления объекта в базе данных системы. В инструменте онлайн-анализа КГП системы EcoSatMS также были реализованы изложенные выше схема оценки качества работы полигонов и методика калибровки космических гидропостов.

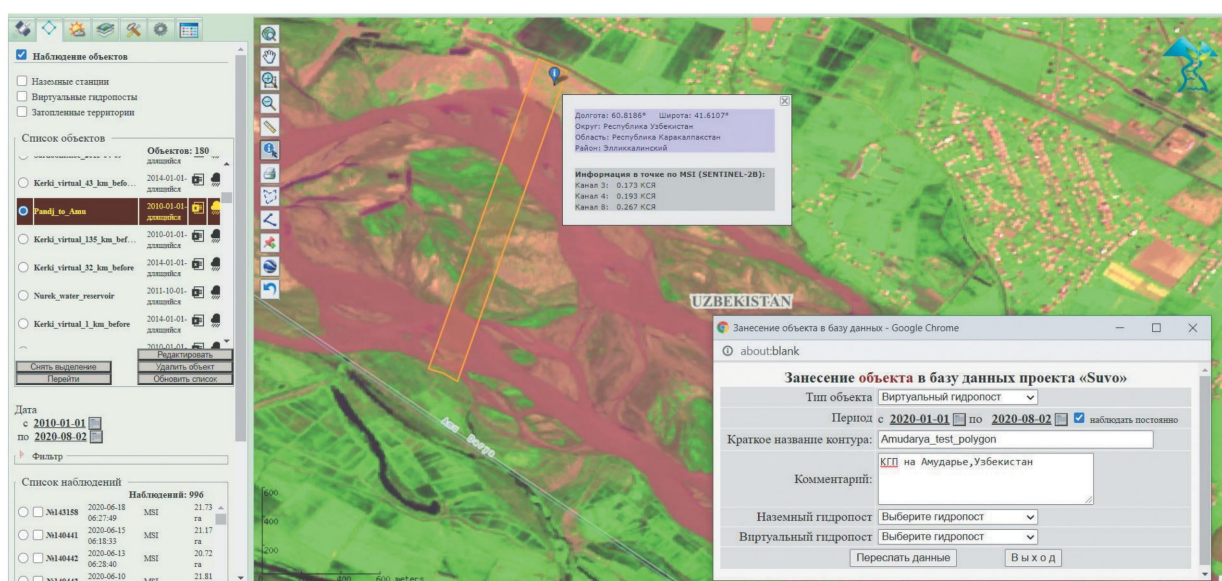


Рис. 9. Заведение КГП в системе EcoSatMS. Полигон может быть связан с физической станцией, таким же КГП или же не связанным вовсе

Таким образом, можно перейти от измерений, полученных в результате экспертной оценки при кластеризации водного зеркала объектов (Мухамеджанов и др., 2018), к автоматизированному дистанционному мониторингу водных объектов.

Заключение

Проведённые эксперименты показали, что увеличение количества КГП в сети при удалении от наземных станций влечёт усложнение моделей и необходимость включения большего количества факторов, при этом повышается требование к устойчивости участка русла реки, на котором устанавливается КГП, и стабильности его морфологии год от года. В противном случае изменения русла влекут за собой неустойчивость модели, что значительно снижает качество работы всех связанных КГП в совокупности.

В целом можно считать, что предложенная технология КГП и подходы к её реализации работоспособны и позволяют устанавливать и калибровать КГП и их сети. Предложенная технология может использоваться для расширения возможностей наземных сетей гидропостов с точки зрения более детального анализа состояния рек, в первую очередь на труднодоступных участках.

Рассмотренные в работе подходы могут служить основой для автоматизации процесса формирования сетей КГП и внедрения в сервис объекта сети КГП как отдельной сущности. Описанные инструменты онлайн-анализа рядов спутниковых данных с использованием полученных в работе результатов минимизируют ресурсы по ведению дистанционного мониторинга рек с использованием сетей КГП.

Следует также учитывать, что регулярность и оперативность получения данных дистанционного зондирования Земли в перспективе может позволить динамически обновлять и корректировать построенные модели, не зависящие напрямую от наземных данных.

Актуальными задачами для развития технологии КГП являются:

- 1) автоматизация процесса фильтрации сцен с облачностью на КГП. Сложность данного процесса обусловлена спектральными особенностями воды, поскольку наряду с полноводностью Амурарья — первая по мутности река региона;
- 2) автоматизация процесса выбора оптимального КГП из группы возможных полигонов на каждом шаге построения сети с учётом определённых правил;
- 3) апробация альтернативных нелинейных моделей для включения большего числа параметров, влияющих на водный режим и водность реки в целом;
- 4) расширение географии применения сетей КГП для других рек региона (с меньшей шириной русла) с увеличением глубины временных рядов наземных показателей;
- 5) расширение ряда спутниковых наблюдений путём включения радиолокационных изображений;
- 6) исследование вопроса о влиянии морфологии рельефа на динамику стока и водного зеркала;
- 7) оптимизация процесса выбора сцен с целью снижения чувствительности гидропоста к межгодовой динамике морфологии русла (см. *рис. 8*).

Работа выполнена с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019), развиваемого и поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 122012400187-6), а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-37-90114.

Литература

1. Быков В.Д., Васильев А.В. Гидрометрия. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 448 с.
2. Карасев И.Ф. Речная гидрометрия и учёт водных ресурсов. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 310 с.
3. Константинова А.М., Лупян Е.А. Анализ последствий прорыва дамбы Сардобинского водохранилища 1 мая 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 261–266. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-261-266.
4. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования си-

- стемами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
5. Мухамеджанов И.Д., Лузян Е.А., Уваров И.А. Особенности спутникового мониторинга гидросооружений Вахшского каскада на примере Нурекского водохранилища // Вестн. Тверского гос. ун-та. Сер. «География и геоэкология». 2018. № 3. С. 137–151. DOI: 10.26456/2226-7719-2018-3-137-151.
 6. Мухамеджанов И.Д., Константинова А.М., Лузян Е.А., Гафуров А.А. Подходы к построению системы дистанционного мониторинга реки Амударьи и ее притоков // Материалы Семнадцатой Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 11–15 нояб. 2019. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 111. DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a.
 7. Мухамеджанов И.Д., Константинова А.М., Лузян Е.А. (2020a) Использование спутниковых данных при мониторинге рек бассейна Амударьи // Материалы 6-й Международ. науч. конф. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Красноярск. 29 сент. – 2 окт. 2020. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2020. С. 265–270.
 8. Мухамеджанов И.Д., Константинова А.М., Лузян Е.А. (2020b) Построение сетей космических гидропостов для организации спутникового мониторинга Амударьи // Материалы 18-й Всерос. открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 16–20 нояб. 2020. М.: ИКИ РАН, 2020. С. 94. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
 9. Терехов А.Г., Абаев Н.Н., Лагутин Е.И. Спутниковый мониторинг Сардобинского водохранилища в бассейне реки Сырдарьи (Узбекистан) до и после прорыва дамбы 1 мая 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 255–260. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-255-260.
 10. Терехов А.Г., Абаев Н.Н., Маглинец Ю.А. Спутниковый мониторинг состояния оазисов реки Амударьи в период 2003–2020 гг. на основе анализа эффекта охлаждения территорий в результате их ирригации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 123–132. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-123-132.
 11. Dünki R. M., Dressel M. F-Ratio Test and Hypothesis Weighting: A Methodology to Optimize Feature Vector Size // J. Biophysics. 2011. V. 2011(4). Art. No. 290617. 11 p. DOI: 10.1155/2011/290617.
 12. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Radchenko M. V., Tolpin V. A., Uvarov I. A. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 1. Art. No. 77. DOI: doi.org/10.3390/rs14010077.
 13. Mukhamedjanov I. D., Konstantinova A. M., Loupian E. A. The use of satellite data for monitoring rivers in the Amu Darya basin // Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2020): E3S Web Conf. 2020. V. 223. 03008. DOI: doi.org/10.1051/e3sconf/202022303008.
 14. Phiri D., Simwanda M., Salekin S., Nyirenda V., Murayama Y., Ranagalage M. Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review // Remote Sensing. 2020. V. 12. Art. No. 2291. DOI: 10.3390/rs12142291.
 15. Ridwan M. A., Radzi N., Ahmad W. S. H. M. W., Mustafa I. S., Din N. M., Jalil Y. E., Isa A. M., Othman N. S., Zaki W. M. D. W. Applications of Landsat-8 Data: a Survey // Intern. J. Engineering and Technology (UAE). 2018. V. 7. P. 436–441. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.35.22858.
 16. Rokni K., Ahmad A., Selamat A., Hazini Sh. Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery // Intern. J. Remote Sensing. 2014. V. 6. P. 4173–4189. DOI: 10.3390/rs6054173.
 17. Stone M. Cross-Validatory Choice and Assessment of Statistical Predictions // J. Royal Statistical Society. Series B (Methodological). 1974. V. 36(2). P. 111–133. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1974.tb00994.x.
 18. Wackerly D., Mendenhall W., Scheaffer R. L. Mathematical Statistics with Applications. 7th ed. Belmont, CA, USA: Thomson Higher Education, 2008. 912 p.

Evaluation of satellite monitoring capabilities of stream runoff based on the Amu Darya River state analysis

I. D. Mukhamedjanov¹, A. M. Konstantinova¹, E. A. Loupian¹, G. U. Umirzakov²

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: ildarmsu@gmail.com

² Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan, Tashkent 100174, Uzbekistan
E-mail: g.umirzakov@gmail.com

The paper describes the developed approach for monitoring river runoff using optical satellite data based on the virtual gauging stations (VGS) technology and data from ground gauging stations. The main tasks and capabilities of the proposed technology are discussed. In particular, the problems of choosing optimal river sections for the VGS, their installation and calibration approaches, as well as the possibilities of combining such VGS into linked sequences (VGS networks) are considered. To demonstrate the capabilities of the proposed approach, an example of a VGS network production near the Kerki ground station (Turkmenistan) on the Amu Darya River is given. To estimate the efficiency of the constructed VGS network functionality, an analysis of the time series of daily runoff near Kerki hydropost for three years, 2014, 2016, and 2018, is carried out. The paper also describes the main capabilities of the specialized satellite monitoring system EcoSatMS (<http://suvo.geosmis.ru>) created to implement the approaches proposed in the research and based on the use of the capabilities of the Center for Collective Use (CCU) "IKI-Monitoring" (<http://ckp.geosmis.ru>). This system is focused on the use and development of the suggested technology, including VGS network production on rivers in the area of interests of CCU "IKI-Monitoring".

Keywords: water resources monitoring, satellite monitoring, virtual gauging station, CCU "IKI-Monitoring", MNDWI, Amu Darya River

Accepted: 14.03.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-87-103

References

1. Bykov V. D., Vasil'ev A. V., *Gidrometriya* (Hydrometry), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977, 448 p. (in Russian).
2. Karasev I. F., *Rechnaya gidrometriya i uchet vodnykh resursov* (River hydrometry and water resources accounting), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980, 310 p. (in Russian).
3. Konstantinova A. M., Loupian E. A., Analysis of the consequences of the dam failure of the Sardoba Reservoir on May 1, 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 261–266 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-261-266.
4. Loupian E. A., Proshin A. A., Bourtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
5. Mukhamedjanov I. D., Loupian E. A., Uvarov I. A., The peculiarities of satellite monitoring of Vakhsh cascade by the example of Nurek reservoir, *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Geografiya i geoekologiya"*, 2018, No. 3, pp. 137–151 (in Russian), DOI: 10.26456/2226-7719-2018-3-137-151.
6. Mukhamedjanov I. D., Konstantinova A. M., Loupian E. A., Gafurov A. A., Approaches to the design of the remote monitoring system for the Amu Darya River and its tributaries, *Materialy Semnadtsatoi Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 17th Open Conf. "Current problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 11–15 Nov. 2019, Moscow: IKI RAN, 2019, p. 111 (in Russian), DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a.
7. Mukhamedjanov I. D., Konstantinova A. M., Loupian E. A. (2020a), The use of satellite data for monitoring rivers in the Amu Darya basin, *Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Regional Problems of Remote Sensing of the Earth), Proc. 6th Intern. Scientific Conf., Krasnoyarsk, 29 Sept. – 2 Oct. 2020, Krasnoyarsk: Sibirskii federal'nyi universitet, 2020, pp. 265–270 (in Russian).

8. Mukhamedjanov I. D., Konstantinova A. M., Loupian E. A. (2020b), Virtual gauging station networks formation for the Amu Darya satellite monitoring organization, *Materialy 18-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 18th All-Russia Open Conf. "Current problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 16–20 Nov. 2020, Moscow: IKI RAN, 2020, p. 94 (in Russian), DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
9. Terekhov A. G., Abayev N. N., Lagutin E. I., Satellite monitoring of the Sardoba Reservoir in Syr Darya River basin (Uzbekistan) before and after a dam collapses on May 1, 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 255–260 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-255-260.
10. Terekhov A. G., Abayev N. N., Maglinets Yu. A., Satellite monitoring of River Amu Darya oases during 2003–2020 based on irrigation cooling effect, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 5, pp. 123–132 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-123-132.
11. Dünki R. M., Dressel M., F-Ratio Test and Hypothesis Weighting: A Methodology to Optimize Feature Vector Size, *J. Biophysics*, 2011, Vol. 2011(4), Art. No. 290617, 11 p., DOI: 10.1155/2011/290617.
12. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Radchenko M. V., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 1, Art. No. 77, DOI: doi.org/10.3390/rs14010077.
13. Muhamedjanov I. D., Konstantinova A. M., Loupian E. A., The use of satellite data for monitoring rivers in the Amu Darya basin, *Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2020): E3S Web Conf.*, 2020, Vol. 223, 03008, DOI: doi.org/10.1051/e3sconf/202022303008.
14. Phiri D., Simwanda M., Salekin S., Nyirenda V., Murayama Y., Ranagalage M., Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Art. No. 2291, DOI: 10.3390/rs12142291.
15. Ridwan M. A., Radzi N., Ahmad W. S. H. M. W., Mustafa I. S., Din N., Jalil Y., Isa A. M., Othman N., Zaki W. M. D. W., Applications of Landsat-8 Data: a Survey, *Intern. J. Engineering and Technology (UAE)*, 2018, Vol. 7, pp. 436–441, DOI: 10.14419/ijet.v7i4.35.22858.
16. Rokni K., Ahmad A., Selamat A., Hazini Sh., Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, pp. 4173–4189, DOI: 10.3390/rs6054173.
17. Stone M., Cross-Validatory Choice and Assessment of Statistical Predictions, *J. Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, 1974. Vol. 36(2), pp. 111–133, DOI: 10.1111/j.2517-6161.1974.tb00994.x.
18. Wackerly D., Mendenhall W., Scheaffer R. L., *Mathematical Statistics with Applications*, 7th ed., Belmont, CA, USA: Thomson Higher Education, 2008, 912 p.