

Спутниковый мониторинг речных отмелей трансграничной реки Или (Центральная Азия) в задаче оценки уровня воды

А. Г. Терехов^{1,2}, Н. Н. Абаев^{1,2}, Г. Н. Сагатдинова¹,
Р. И. Мухамедиев¹, Е. Н. Амиргалиев¹

¹ *Институт информационных и вычислительных технологий
Алматы, 050010, Казахстан
E-mail: aterekhov1@yandex.ru*

² *РГП «Казгидромет», Алматы, 050022, Казахстан
E-mail: abayev_n@meteo.kz*

Равнинные реки, протекающие через лёссовые породы, подвержены активным процессам русловых деформаций (меандрированию) на фоне переноса большого количества взвешенного материала. В руслах рек этого типа присутствует множество отмелей, которые постоянно видоизменяются, особенно в период многоводья. Реки не имеют стабильных гидрологических профилей, поэтому дистанционные оценки их водности представляют большой практический интерес. В периоды маловодья морфология русла относительно стабильна, а отмели находятся в полузатопленном состоянии. В этих условиях доля затопления отмелей весьма чувствительна к уровню воды в реке, что создаёт благоприятные условия для разработки спутниковых методик оценок водности. На примере центральноазиатской р. Или с годовым объёмом стока около 12 км³, являющейся основным притоком крупного оз. Балхаш, рассмотрена информативность спутниковых данных Sentinel-2 (разрешение 10 м) в задаче оценки уровня воды в реке в условиях относительного маловодья. Из архива спутниковых данных 2018–2022 гг. было отобрано 179 безоблачных спутниковых покрытий Sentinel-2 периода апрель–ноябрь в те дни, когда уровень воды, зарегистрированный на гидропосте «Или-Добынь» сети РГП «Казгидромет» опустился ниже 280 см. Этот уровень воды был типичен примерно для 80 % времени маловодного периода 2018–2022 гг. На 40-километровом участке русла реки была сформирована маска из 26 отмелей с общей площадью более 4 км². Для выделения на маске отмелей класса «вода» использовался водный индекс MNDWI1 (*англ.* Modified Normalized Difference Water Index) с пороговым значением +0,25. Доля подтопления отмелей противопоставлялась наземным данным гидропоста «Или-Добынь» об уровне воды во время пролёта спутника. Для периода апрель–ноябрь были получены линейные зависимости между долей затопления отмелей и уровнем воды. Достоверность линейной аппроксимации для сезонных данных была высока и варьировалась от $R^2 = 0,83$ (2022) до $R^2 = 0,96$ (2020). Весь период анализа (2018–2022) характеризовался $R^2 = 0,93$. Использование уравнения линейной регрессии в качестве модели для прогноза уровня воды в реке на основе доли подтопления тестовых отмелей обеспечило достаточно высокое значение (0,74) параметра эффективности гидрологического прогнозирования Нэша–Сатклиффа, что говорит о практической значимости разработанной методики.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, Sentinel-2, речной сток, русло реки, речная отмель, водное зеркало, прогноз уровня воды

Одобрена к печати: 10.08.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-227-238

Введение

Задача оценки расхода воды в реках на основе спутниковых данных представляет значительный интерес. Особенно это важно для рек, протекающих в малонаселённых территориях с редкой наземной наблюдательной сетью или при наличии технических сложностей, например для меандрирующих рек, переносящих большое количество взвешенного материала, у которых нет устойчивых гидрологических профилей. Существует достаточно большой набор методик для оценки расхода воды в реках на базе спутниковой информации (Bjerkle et al., 2003; Fok et al., 2022; Gleason, Durand, 2020; Schultz, 1996).

Для оценки расхода воды в реках используются спутниковые данные различных типов, радарная съёмка, тепловая съёмка, оптические каналы. Наиболее широко применяются подходы,

основанные на распознавании водного зеркала речного потока с последующим ассимилированием этой информации для оценки уровня воды или расхода воды через различные гидрологические модели либо эмпирические зависимости (например, (Bjerklie et al., 2018; Fok et al., 2021; Hirpa et al., 2013; Sichangi et al., 2016; Tarpanelli et al., 2021; Verma et al., 2017)). Лучшие результаты использования спутниковых данных получаются для мегарек, но повышение пространственного разрешения и периодичности спутниковой съёмки открывает дорогу для оценки водности относительно небольших рек и русловых водохранилищ (Kebede et al., 2020; Terekhov et al., 2020).

Среди направлений использования данных дистанционного зондирования можно отметить спутниковую альтиметрию (Koblinsky et al., 1993; Tarpanelli et al., 2018), радарные данные (Brakenridge et al., 2012), а также анализ параметров, косвенным образом связанных с объёмом водосбора в бассейне реки (Терехов и др., 2020; Zhang et al., 2021). Но типичным подходом всё-таки представляется оценка площади водной поверхности речных потоков и гидрологическое моделирование (Sun et al., 2015), дополняемое иногда учётом морфологии территорий и уклона местности (например, (Garambois, Monnier, 2015)).

Трансграничная (Китайская народная республика (КНР) – Казахстан) р. Или с длиной около 1400 км и площадью бассейна в 140 тыс. км² берёт своё начало в КНР (слияние рек Текес и Кунгес) и впадает в крупное оз. Балхаш площадью 17 тыс. км² (рис. 1). Средний расход воды в реке на границе с КНР составляет около 400 м³/с. В зависимости от погодных условий расход воды может меняться примерно от 80 до 1900 м³/с. Заходя на территорию Казахстана, река течёт по плоской, сухой равнине, сложенной лёссовыми породами со средним уклоном около 0,4 м на 1 км, перенося при этом значительное количество взвешенного материала, особенно при больших расходах воды. Река меандрирует, и в её русле отсутствуют стабильные гидрологические створы (рис. 2, см. с. 229). В таких условиях существуют технические сложности с организацией гидропостов для наземных измерений уровня (расхода) воды, и поэтому спутниковые данные, позволяющие получать объективную информацию о водности реки, представляют значительный практический интерес.



Рис. 1. Бассейн р. Или и территория обследования: фрагмент русла р. Или в районе границы Казахстан – КНР

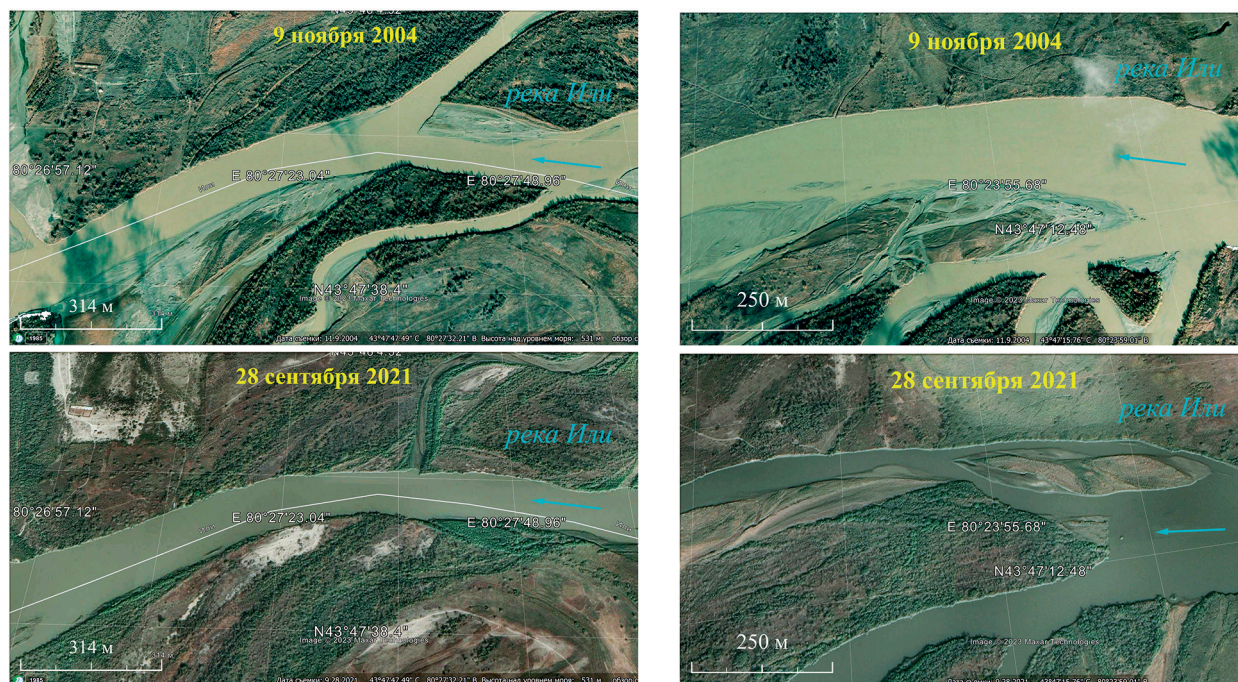


Рис. 2. Примеры трансформации русла р. Или в период с 2004 по 2021 г. Спутниковые снимки из системы Google Планета Земля (англ. Google Earth)

Водная поверхность по своим спектральным характеристикам значительно отличается от суши, что позволяет эффективно распознавать зеркало воды на основе данных дистанционного зондирования. Для р. Или, имеющей ширину около 100 м и более, спутниковые данные Sentinel-2 с разрешением 10 м могут служить основой для мониторинга заполненности речного русла водой, что однозначно связано с уровнем и расходом воды в реке.

Река, протекающая через галечно-песчаные наносы, характеризуется изменчивой морфологией русла. Возникают, трансформируются и исчезают отдельные отмели. Форма и крутизна берега, особенно на изгибах русла, также видоизменяется. Пологие берега реки, в отличие от крутобортных, обеспечивают выраженную связь между уровнем воды и площадью водного зеркала водных потоков. Фактически русло такой реки можно условно разбить на участки с разной чувствительностью между уровнем воды и площадью зеркала потоков воды. Для обеспечения лучшей точности спутниковых оценок уровня воды по данным мониторинга за водным зеркалом желательно анализировать только те участки русла, в которых доминируют пологие склоны берегов реки и отмели, расположенные в середине русла. Сложностью такого подхода видится нестабильность во времени русла реки, что ограничивает период высокой чувствительности к изменениям уровня воды первоначально отобранных участков. Большую роль в относительной устойчивости морфологии русла играет водность реки. Периоды маловодья характеризуются относительной стабильностью русла, и поэтому они привлекательны для использования спутниковых данных в задаче мониторинга водности реки.

Режим водности р. Или можно условно разделить на два типа. Первый тип — это режим относительного маловодья, когда вода находится только в русле и даже не заполняет его полностью. Второй режим, условное многоводье, — когда русло полностью заполнено водой, а в условиях паводка затоплению подвергаются также и поймы. Маловодный режим характеризуется более простыми условиями для спутникового мониторинга состояния реки. В русле меандрирующей реки всегда существуют отмели (рис. 3, см. с. 230), расположение и форма которых относительно стабильны в годы маловодья (рис. 4, см. с. 230). Эти периодически затопляемые при высокой воде объекты, как правило, не имеют развитой растительности, которая может экранировать водную поверхность. Кроме того, позиция уреза воды в случае пологих берегов и отмелей очень чувствительна к уровню воды, что обеспечивает высокую информативность спутниковой съёмки в задаче дистанционной оценки уровня воды.



Рис. 3. Примеры объектов мониторинга (речные отмели) в русле р. Или. Спутниковые снимки из системы Google Earth



Рис. 4. Спутниковые снимки русла р. Или, характеризующие масштаб изменений отмелей в районе границы КНР–Казахстан за маловодный период с 2018 по 2021 г. Информация о русле (из системы Google Earth) с указанием уровня воды по данным гидропоста «Или-Добынь» на момент пролёта спутника

Спутниковый мониторинг отмелей в русле реки может служить основой для оценки уровня воды при маловодье. Такой подход имеет преимущество перед мониторингом водного зеркала потоков реки во всём диапазоне вариаций её водности, так как позволяет анализировать однородные данные по подтоплению отмелей, которые более чувствительные к уровню воды, чем ширина реки в местах с крутыми берегами. В настоящем исследовании была рассмотрена информативность спутниковых снимков Sentinel-2 (разрешение 10 м) в задаче оценки уровня воды в р. Или по данным спутникового мониторинга отмелей.

Объект исследования

Река Или собирает воду в хребтах Тянь-Шаня, в основном на территории КНР. Нижняя часть реки относится к территории Казахстана. После КНР река течёт около 200 км, практически не получая притоков, по плоской и очень сухой равнине до крупного Капчагайского вдхр. (объём свыше 20 км³). Гидропост «Или-Добынь» (ID 14002) — единственный казахстанский объект измерительной сети РГП «Казгидромет», представительный для этой части р. Или (см. *рис. 1, 5*). В зависимости от режима водности реки уровень воды на гидропосте варьируется примерно от 120 до 580 см (от отметки «0» (518,50 БС)), что приводит к изменениям средней скорости воды от 0,5 до 1,9 м/с. Поток воды в р. Или в результате седиментационных процессов формирует и видоизменяет речные отмели, которые служили зонами интереса в данном исследовании (см. *рис. 2–4*).

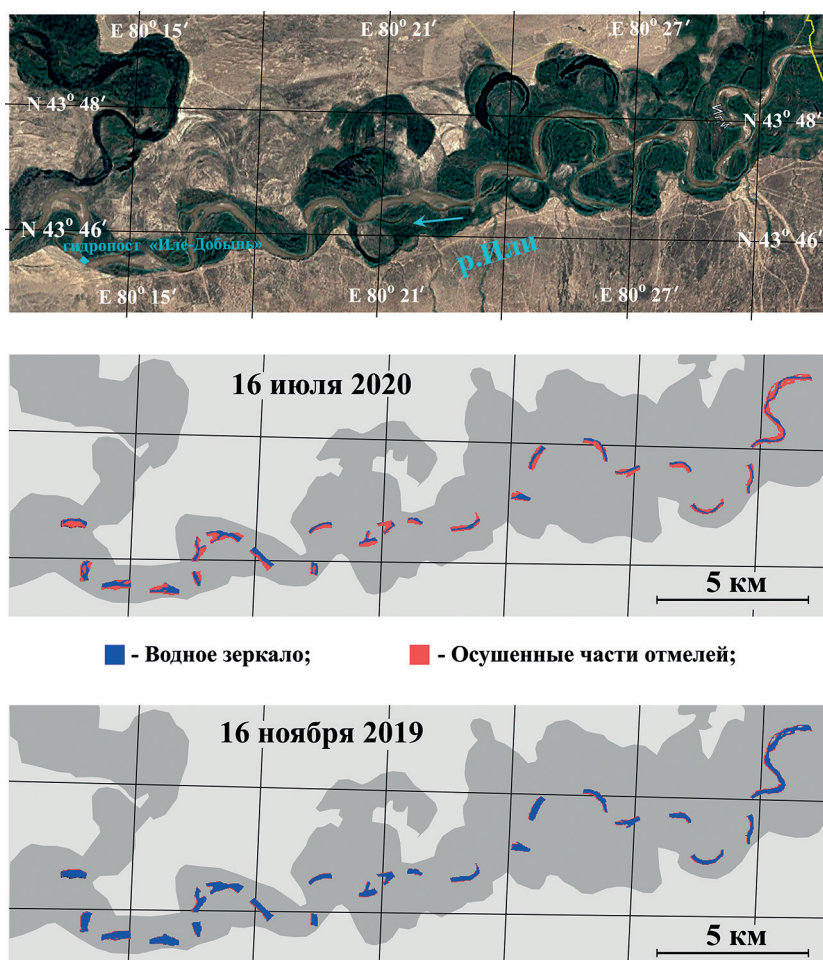


Рис. 5. Спутниковый снимок системы Google Earth, иллюстрирующий русло р. Или и тестовый полигон из 22 фрагментов и покрывающий 26 отмелей в русле реки, с примером распознавания классов «вода» и «суша» для двух дней: 16.11.2019 и 16.07.2020

Речные отмели представляют собой весьма динамичные объекты. Наиболее сильно они изменяются в период многоводья при высокой скорости воды. При маловодье речная вода осветляется, скорость течения существенно уменьшается и отмели находятся в относительно стабильном состоянии (см. *рис. 4*). При этом возвышенные части отмелей остаются выше уровня воды. Такой режим водности реки создаёт благоприятные условия для эффективного спутникового мониторинга заполненности русла водой на основе регистрации осушенной (затопленной) доли площади отмелей. Одиночные отмели по-разному реагируют на уровень воды в реке. Всё зависит от их размера, формы и места расположения. Устойчивые спутниковые оценки степени затопления отмелей базируются на основе анализа ансамбля отмелей, расположенных на протяжённой части русла в период относительно стабильной его морфологии (Shi et al., 2022).

Многоводные годы (2016–2017) с расходом воды 800 м³/с и выше были последними рельефообразующими сезонами для отмелей р. Или. В последующие годы расход воды в реке существенно снизился и отмели были относительно стабильны (см. *рис. 4*). В настоящем исследовании анализировалось русло р. Или длиной около 40 км, от границы КНР вглубь территории Казахстана (см. *рис. 1, 5*). Для спутниковой диагностики водности реки экспертным образом было выделено 26 участков русла, на которых доминировали пологие формы рельефа берега и отмели суммарной площадью 4,346 км² (см. *рис. 5*).

Исходные данные и методы их обработки

Наземные данные об уровне воды в р. Или были взяты с гидропоста «Или-Добынь» (43° 45' 31,15" с.ш., 80° 13' 53,04" в.д.) системы РГП «Казгидромет», расположенного примерно в 25 км от границы с КНР. Информация об уровне воды для периода 2018–2021 гг. представляла собой данные автоматических измерений. Замеры проводились 4 раза в сутки: в 08:00, 12:00, 16:00 и 20:00 LT (*англ.* Local Time). Гелиосинхронные спутники Sentinel-2A и Sentinel-2B сканируют земную поверхность утром, поэтому для калибровки спутниковых данных бралось среднее от двух измерений уровня воды: в 08:00 и 12:00 LT. Для 2022 г. имелись данные только ручного измерения уровня воды на 08:00 и 20:00 LT. В этот период использовались значения уровня воды на 08:00 LT.

Тематическая обработка спутниковой информации проводилась в системе Google Earth Engine (GEE). Архивные данные Sentinel-2 (разрешение 10 м) периода 2018–2022 гг. использовались для оценки наполненности водой русла р. Или в условиях относительного маловодья, который был определён как уровень воды, не превышающий 280 см. Такие условия соблюдалось примерно для 80 % времени периода 2018–2022 гг. Из архива снимков Sentinel-2 (разрешение 10 м) за 2018–2022 гг. было отобрано 179 безоблачных сцен марта – ноября, когда гидропост «Или-Добынь» фиксировал уровень воды не выше 280 см.

Водная поверхность может выделяться с помощью различных спектральных индексов. В настоящем исследовании использовался модифицированный нормализованный разностный водный индекс MNDWI1 (*англ.* Modified Normalized Difference Water Index), предложенный для обнаружения воды (McFeeters, 1996; Xu, 2006). Для данных Sentinel-2 индекс строился с использованием 3-го и 11-го каналов согласно формуле:

$$\text{MNDWI1} = (B3 - B11)/(B3 + B11),$$

где B3 — 3-й канал Sentinel-2 (559 нм); B11 — 11-й канал (1610 нм).

Индекс MNDWI1 имеет вариативность от –1 до +1. Водное зеркало характеризуется высокими значениями индекса. Оценка границы вода/суша проводилась с помощью порогового значения индекса MNDWI1. Число пикселей, отнесённых к классу «вода» на маске отмелей, нормировалось на общее число пикселей маски (43 456 пикселей), что давало долю затопленной площади тестовых отмелей и характеризовало уровень воды в реке.

Численное значение порога MNDWI1 связано с допустимой долей суши, присутствующей в составе пикселя «вода», а также со спектральными характеристиками самой воды

и суши на анализируемом снимке. Значения индекса MNDWI1 для воды и суши в условиях р. Или не являются константами. Если вода несёт большое количество взвешенного материала или суша покрыта растительным покровом, значения MNDWI1 несколько уменьшаются. Таким образом, присутствуют мешающие факторы, зависящие от состояния реки и растительности по её берегам. Предварительно на отдельном тестовом участке по данным 2019 г. были протестированы различные пороговые значения MNDWI1. Было получено, что лучшие корреляции между числом пикселей класса «вода» в маске отмелей и уровнем воды в реке, по данным гидропоста «Или-Добынь», даёт порог $MNDWI1 = +0,25$.

Таким образом, 179 спутниковых покрытий Sentinel-2 (разрешение 10 м) использовались для построения матриц индекса MNDWI1. Пороговое значение $MNDWI1 = +0,25$ служило критерием распознавания класса «вода». Доля пикселей этого класса внутри маски отмелей противопоставлялась уровню воды, зарегистрированному на гидропосте «Или-Добынь» в ближайшее к времени пролёта спутника время. Полученные зависимости между спутниковыми оценками доли покрытия отмелей водой и фактическим уровнем воды характеризовали информативность данных Sentinel-2 в задаче оценки уровня воды в р. Или на основе мониторинга отмелей в условиях ограниченной водности с уровнем воды не выше 280 см на гидропосте «Или-Добынь».

Полученные результаты и их обсуждение

Полученные зависимости между степенью затопления тестовых отмелей в русле р. Или и уровнем воды представлены на *рис. 6*. Вид зависимостей очень близок к линейному закону. Достоверность линейной аппроксимации варьировалась от $R^2 = 0,829$ (2022) до $R^2 = 0,960$ (2020). При этом уравнения линейной регрессии для отдельных лет были весьма близки между собой, что указывает на относительную стабильность морфологии анализируемых частей русла реки. Также это позволило получить хорошие результаты и для всего периода анализа в целом (2018–2022): $R^2 = 0,933$ (см. *рис. 6*).

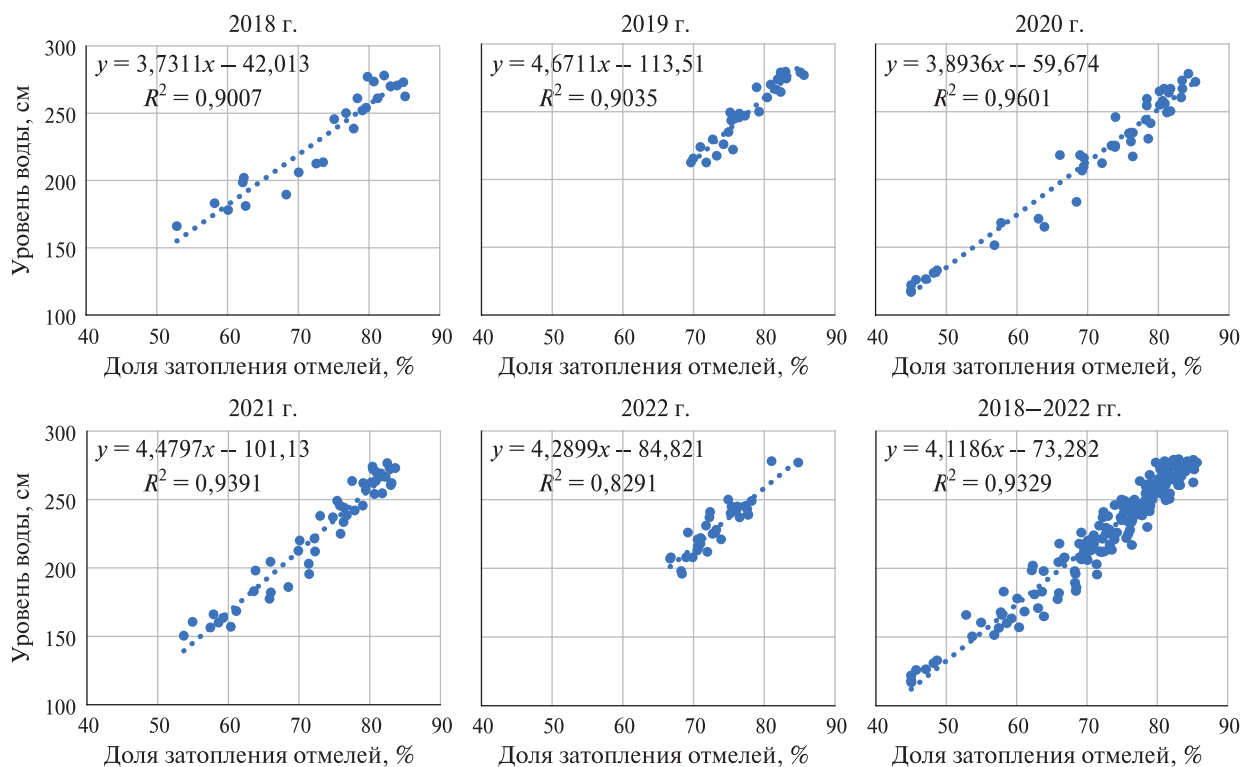


Рис. 6. Зависимость доли затопления тестовых отмелей в русле р. Или от уровня воды на гидропосте «Или-Добынь»

При использовании уравнения линейной регрессии, полученного для всего массива данных, в качестве модели для спутникового прогнозирования уровня воды в р. Или было получено довольно высокое значение критерия Нэша–Сатклиффа ($NS = 0,74$), характеризующего эффективность моделирования речного стока (Nash, Sutcliffe, 1970; Yu et al., 2023). Достигнутая точность прогнозирования была заметно выше, чем описанные ранее в литературе результаты, полученные на базе данных Sentinel-2 ($NS = 0,39–0,56$) для итальянских рек По ($1460 \text{ м}^3/\text{с}$) и Тибр ($240 \text{ м}^3/\text{с}$) (Filippucci et al., 2022).

Полученные линейные зависимости между долей затопления отмелей и уровнем воды в реке базируются на закономерностях формирования подводного склона галечно-песчаных наносов. Конечной устойчивой формой в этом случае по большей части представляется однородный склон, что и обеспечивает линейный вид полученных зависимостей. Исключение составляют маргинальные участки в самой верхней и самой нижней частях склона. В данном исследовании рассматривались условия со средней долей затопления отмелей в диапазоне от 45 до 85 %, т. е. преимущественно в однородной линейной части склона. На практике отдельные отмели могут иметь более сложную форму, что связано с неоднородным по времени режимом водности реки и вариациями уровня воды. Эти особенности вносят определённые искажения, однако ожидалось, что статистика, основанная на достаточно большом ансамбле отмелей, должна приближаться к линейной зависимости.

Следует отметить, что приведённые выше доводы корректны только в случае определённой стабильности морфологии русла реки во время мониторинга. Многоводный режим способен полностью изменить не только форму отмелей, но и их расположение (см. *рис. 2*). Тестирование стабильности формы и позиции одной из отмелей, расположенной на границе КНР–Казахстан, по снимкам сверхвысокого пространственного разрешения на 9 мая 2018 г. и 28 сентября 2021 г. (см. *рис. 4*) показало незначительность изменений, в отличие от кардинальных перестроек морфологии русла в некоторых местах за период 2004–2021 гг. (см. *рис. 2*).

Применимость полученных результатов не ограничивается дублированием наземных измерений уровня воды для повышения надёжности контроля над водностью р. Или на малонаселённой территории Казахстана. Эта методика также может стать частью дистанционных технологий виртуального гидропоста для оценки низких уровней воды в реке. Виртуальные гидропосты потенциально весьма востребованы для основных рек Центральной Азии. Крупные равнинные реки, переносящие большое количество взвешенного материала, а это кроме р. Или ещё и реки Сырдарья и Амударья, имеют проблемы с оценкой и мониторингом их водности. Данные спутникового мониторинга могли бы расширить возможности контроля над поверхностным стоком в регионах Центральной Азии.

Заключение

В результате проведённого исследования показано, что система отмелей, расположенных в русле р. Или, может служить в качестве объекта спутникового мониторинга с помощью Sentinel-2 (разрешение 10 м) в задаче оценки уровня воды в реке в условиях низкой воды. При уровне воды в р. Или, по данным на гидропосте «Или-Добынь», до 280 см (полный размах уровня 120–580 см) доля затопления выделенных отмелей линейным образом связана с уровнем воды. Достоверность линейной аппроксимации этой зависимости для периода 2018–2022 гг. весьма высока и превышает $R^2 = 0,93$. Значения эффективности Нэша–Сатклиффа для прогноза, основанного на уравнении линейной регрессии, составило 0,74, что указывает на достаточно высокую точность оценок. Подобная методика может представлять интерес для создания виртуальных гидропостов на крупных реках Центральной Азии, переносящих большое количество взвешенного материала (включая реки Сырдарью и Амударью), расширяя известные подходы (Мухамеджанов и др., 2022; Mukhamedjanov et al., 2020) для этих рек.

Работа выполнена при поддержке программно-целевого финансирования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, проект № BR18574144.

Литература

1. Мухамеджанов И. Д., Константинова А. М., Лупян Е. А., Умирзаков Г. У. Оценка возможностей спутникового мониторинга динамики речного стока на примере анализа состояния реки Амударьи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 87–103. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-87-103.
2. Терехов А. Г., Ивкина Н. И., Абаев Н. Н., Галаева А. В., Елтай А. Г. Реакция годового стока р. Урал на высоту снежного покрова в его бассейне в период 2001–2019 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 181–190. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-181-190.
3. Bjerklie D. M., Dingman S. L., Vorosmarty Ch. J. et al. Evaluating the potential for measuring river discharge from space // J. Hydrology. 2003. V. 278. Iss. 1–4. P. 17–38. DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00129-X.
4. Bjerklie D. M., Birkett C. M., Jones J. W. et al. Satellite remote sensing estimation of river discharge: Application to the Yukon River Alaska // J. Hydrology. 2018. V. 561. P. 1000–1018. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.04.005.
5. Brakenridge G., Cohen S., Kettner A. J. et al. Calibration of satellite measurements of river discharge using a global hydrology model // J. Hydrology. 2012. V. 475. P. 123–136. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.09.035.
6. Filippucci P., Brocca L., Bonafoni S. et al. Sentinel-2 high-resolution data for river discharge monitoring // Remote Sensing of Environment. 2022. V. 281. Article 113255. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113255.
7. Fok H. S., Chen Y., Wang L. et al. Improved Mekong Basin Runoff Estimate and Its Error Characteristics Using Pure Remotely Sensed Data Products // Remote Sensing. 2021. V. 13. Iss. 5. Article 996. DOI: 10.3390/rs13050996.
8. Fok H. S., Chen Y., Zhou L. Daily runoff and its potential error sources reconstructed using individual satellite hydrological variables at the basin upstream // Frontiers of Earth Science. 2022. V. 10. DOI: 10.3389/feart.2022.821592.
9. Garambois P., Monnier J. Inference of effective river properties from remotely sensed observations of water surface // Advances in Water Resources. 2015. V. 79. P. 103–120. DOI: 10.1016/j.advwatres.2015.02.007.
10. Gleason C. J., Durand M. T. Remote sensing of river discharge: A review and a framing for the discipline // Remote Sensing. 2020. V. 12. Iss. 7. Article 1107. DOI: 10.3390/rs12071107.
11. Hirpa F. A., Hopson T. M., De Groeve T. et al. Upstream satellite remote sensing for river discharge forecasting: Application to major rivers in South Asia // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 131. P. 140–151. DOI: 10.1016/j.rse.2012.11.013.
12. Kebede M. G., Wang L., Li X., Hu Z. Remote sensing-based river discharge estimation for a small river flowing over the high mountain regions of the Tibetan Plateau // Intern. J. Remote Sensing. 2020. V. 41. P. 3322–3345. DOI: 10.1080/01431161.2019.1701213.
13. Koblinksky C. J., Clarke R. T., Brenner A. C., Frey H. Measurement of river level variations with satellite altimetry // Water Resources Research. 1993. V. 29. Iss. 6. P. 1839–1848. DOI: 10.1029/93WR00542.
14. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // Intern. J. Remote Sensing. 1996. V. 17. Iss. 7. P. 1425–1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.
15. 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. Article 03008. DOI: 10.1051/e3sconf/202022303008.
16. Nash J. E., Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models. Part I — A discussion of principles // J. Hydrology. 1970. V. 27. No. 3. P. 282–290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
17. Schultz G. A. Remote sensing applications to hydrology: runoff // Hydrological Sciences J. 1996. V. 41. No. 4. P. 453–475. DOI: 10.1080/02626669609491520.
18. Shi Zh., Chen Q., Huang Ch. The Influence of River Morphology on the Remote Sensing Based Discharge Estimation: Implications for Satellite Virtual Gauge Establishment // Water. 2022. V. 14. Iss. 23. Article 3854. DOI: 10.3390/w14233854.
19. Sichangi A. W., Wang L., Yang K. et al. Estimating continental river basin discharges using multiple remote sensing datasets // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 179. P. 36–53. DOI: 10.1016/j.rse.2016.03.019.
20. Sun W., Ishidaira H., Bastola S., Yu J. Estimating daily time series of streamflow using hydrological model calibrated based on satellite observations of river water surface width: Toward real world applications // Environmental Research. 2015. V. 139. P. 36–45. DOI: 10.1016/j.envres.2015.01.002.
21. Tarpanelli A., Sant E., Tourian M. J. et al. Daily River Discharge Estimates by Merging Satellite Optical Sensors and Radar Altimetry Through Artificial Neural Network // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2018. V. 57. P. 329–341. DOI: 10.1109/TGRS.2018.2854625.
22. Tarpanelli A., Camici S., Nielsen K. et al. Potentials and limitations of Sentinel-3 for river discharge assessment // Advances in Space Research. 2021. V. 68. No. 2. P. 593–606. DOI: 10.1016/j.asr.2019.08.005.

23. Terekhov A., Makarenko N., Pak A., Abayev N. Using the Digital Elevation Model (DEM) and coastlines for satellite monitoring of small reservoir filling // Cogent Engineering. 2020. V. 7. Iss. 1. Article 1853305. DOI: 10.1080/23311916.2020.1853305.
24. Verma S., Verma R. K., Mishra S. K. et al. A revisit of NRCS-CN inspired models coupled with RS and GIS for runoff estimation // Hydrological Sciences J. 2017. V. 62. Iss. 12. P. 1891–1930. DOI: 10.1080/02626667.2017.1334166.
25. Xu H. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery // Intern. J. Remote. Sensing. 2006. V. 27. No. 14. P. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179.
26. Yu Z., Wu J., Yao H. et al. Calibrating a hydrological model in ungauged small river basins of the north-eastern Tibetan Plateau based on near-infrared images // J. Hydrology. 2023. V. 618. Article 129158. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129158.
27. Zhang J., Zhang Ch., Bao Zh. et al. Analysis of the effects of vegetation changes on runoff in the Huang-Huai-Hai River basin under global change // J. Advances in Water Science. 2021. V. 32. Iss. 6. P. 813–823. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.06.001.

Satellite estimation of river water level from shoal monitoring data: the case of the transboundary Ili River (Central Asia)

A. G. Terekhov^{1,2}, N. N. Abayev^{1,2}, G. N. Sagatdinova¹,
R. I. Mukhamediev¹, E. N. Amirgaliyev¹

¹ Institute of Information and Computational Technologies, Almaty 050010, Kazakhstan
E-mail: aterekhov1@yandex.ru

² RSE Kazhydromet, Almaty 050022, Kazakhstan
E-mail: abayev_n@meteo.kz

Lowland rivers flowing through the loess carry suspended materials and experience active processes of meandering. A large number of shoals, as a result of sediment deposition, exist in the riverbeds. Shoals often change, especially during the period of high water. Such rivers do not have stable hydrological profiles, so satellite estimates of their water content are of great practical interest. During the period of low water, the morphology of the riverbed is relatively stable and the shoals are in a semi-submerged state. Under these conditions, the proportion of flooding of shoals is very sensitive to the river water level, which creates favorable conditions for the development of satellite methods for assessing water levels. The study examined the Ili River in Central Asia with an annual outflow of about 12 km³, which is main tributary of the large lake Balkhash. The informative value of Sentinel-2 data (resolution 10 m) in the task of assessing water level in the river in conditions of relative low water was shown. 179 cloudless Sentinel-2 satellite images were selected for the period from April to November 2018–2022. An additional criterion for choosing the image was the water level at the Ile-Dobyn hydropost of Kazhydromet less than 280 cm. This water level was typical for about 80 % of the time of the low-water period 2018–2022. The Ili riverbed on the border of China and Kazakhstan with a length of about 40 km was used to create the shoal (sediments) mask with total area above 4 km². The MNDWI1 (Modified Normalized Difference Water Index) water index and its threshold value of +0.25 were used to identify the «water» class on the shoal mask. The proportion of flooding of shoals was compared with ground data on water level during the satellite passes. For the period April – November, linear dependences were obtained between the proportion of shoals flooding and the river water level. The reliability of the linear approximation for seasonal data was high and varied from $R^2 = 0.83$ (2022) to $R^2 = 0.96$ (2020). The entire period (2018–2022) of the analysis was characterized by $R^2 = 0.93$. The use of the linear regression equation as a model for predicting the water level in the river based on the proportion of flooding of test shoals provided a sufficiently high value (0.74) of the Nash – Sutcliffe hydrological forecasting efficiency parameter, which indicates the practical significance of the developed methodology.

Keywords: remote sensing, Sentinel-2, river outflow, river bed, shoals of river, water mirror, water level prediction

Accepted: 10.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-227-238

References

1. Mukhamedjanov I. D., Konstantinova A. M., Loupian E. A., Umirzakov G. U., Evaluation of satellite monitoring capabilities of stream runoff based on the Amu Darya River state analysis, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 1, pp. 87–103 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-87-103.
2. Terekhov A. G., Ivkina N. I., Abayev N. N., Galayeva A. V., Yeltay A. G., Streamflow response of the Ural River to basin snow depth changes during 2001–2019, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 181–190 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-181-190.
3. Bjerklie D. M., Dingman S. L., Vorosmarty Ch. J. et al., Evaluating the potential for measuring river discharge from space, *J. Hydrology*, 2003, Vol. 278, Issues 1–4, pp. 17–38, DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00129-X.
4. Bjerklie D. M., Birkett C. M., Jones J. W. et al., Satellite remote sensing estimation of river discharge: Application to the Yukon River Alaska, *J. Hydrology*, 2018, Vol. 561, pp. 1000–1018, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.04.005.
5. Brakenridge G., Cohen S., Kettner A. J. et al., Calibration of satellite measurements of river discharge using a global hydrology model, *J. Hydrology*, 2012, Vol. 475, pp. 123–136, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.09.035.
6. Filippucci P., Brocca L., Bonafoni S. et al., Sentinel-2 high-resolution data for river discharge monitoring, *Remote Sensing of Environment*, 2022, Vol. 281, Article 113255, DOI: 10.1016/j.rse.2022.113255.
7. Fok H. S., Chen Y., Wang L. et al., Improved Mekong Basin Runoff Estimate and Its Error Characteristics Using Pure Remotely Sensed Data Products, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Issue 5, Article 996, DOI: 10.3390/rs13050996.
8. Fok H. S., Chen Y., Zhou L., Daily runoff and its potential error sources reconstructed using individual satellite hydrological variables at the basin upstream, *Frontiers of Earth Science*, 2022, Vol. 10, DOI: 10.3389/feart.2022.821592.
9. Garambois P., Monnier J., Inference of effective river properties from remotely sensed observations of water surface, *Advances in Water Resources*, 2015, Vol. 79, pp. 103–120, DOI: 10.1016/j.advwatres.2015.02.007.
10. Gleason C. J., Durand M. T., Remote sensing of river discharge: A review and a framing for the discipline, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Issue 7, Article 1107, DOI: 10.3390/rs12071107.
11. Hirpa F. A., Hopson T. M., De Groeve T. et al., Upstream satellite remote sensing for river discharge forecasting: Application to major rivers in South Asia, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 131, pp. 140–151, DOI: 10.1016/j.rse.2012.11.013.
12. Kebede M. G., Wang L., Li X., Hu Z., Remote sensing-based river discharge estimation for a small river flowing over the high mountain regions of the Tibetan Plateau, *Intern. J. Remote Sensing*, 2020, Vol. 41, pp. 3322–3345, DOI: 10.1080/01431161.2019.1701213.
13. Koblinksky C. J., Clarke R. T., Brenner A. C., Frey H., Measurement of river level variations with satellite altimetry, *Water Resources Research*, 1993, Vol. 29, Issue 6, pp. 1839–1848, DOI: 10.1029/93WR00542.
14. McFeeters S. K., The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *Intern. J. Remote Sensing*, 1996, Vol. 17, Issue 7, pp. 1425–1432, DOI: 10.1080/01431169608948714.
15. 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, Vol. 223, Article 03008, DOI: 10.1051/e3sconf/202022303008.
16. Nash J. E., Sutcliffe J. V., River flow forecasting through conceptual models. Part I — A discussion of principles, *J. Hydrology*, 1970, Vol. 27, No. 3, pp. 282–290, DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
17. Schultz G. A., Remote sensing applications to hydrology: runoff, *Hydrological Sciences J.*, 1996, Vol. 41, No. 4, pp. 453–475, DOI: 10.1080/02626669609491520.
18. Shi Zh., Chen Q., Huang Ch., The Influence of River Morphology on the Remote Sensing Based Discharge Estimation: Implications for Satellite Virtual Gauge Establishment, *Water*, 2022, Vol. 14, Issue 23, Article 3854, DOI: 10.3390/w14233854.
19. Sichangi A. W., Wang L., Yang K. et al., Estimating continental river basin discharges using multiple remote sensing datasets, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 179, pp. 36–53, DOI: 10.1016/j.rse.2016.03.019.
20. Sun W., Ishidaira H., Bastola S., Yu J., Estimating daily time series of streamflow using hydrological model calibrated based on satellite observations of river water surface width: Toward real world applications, *Environmental Research*, 2015, Vol. 139, pp. 36–45, DOI: 10.1016/j.envres.2015.01.002.
21. Tarpanelli A., Sant E., Tourian M. J., et al., Daily River Discharge Estimates by Merging Satellite Optical Sensors and Radar Altimetry Through Artificial Neural Network, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2018, Vol. 57, pp. 329–341, DOI: 10.1109/TGRS.2018.2854625.
22. Tarpanelli A., Camici S., Nielsen K. et al., Potentials and limitations of Sentinel-3 for river discharge assessment, *Advances in Space Research*, 2021, Vol. 68, No. 2, pp. 593–606, DOI: 10.1016/j.asr.2019.08.005.

23. Terekhov A., Makarenko N., Pak A., Abayev N., Using the Digital Elevation Model (DEM) and coastlines for satellite monitoring of small reservoir filling, *Cogent Engineering*, 2020, Vol. 7, Issue 1, Article 1853305, DOI: 10.1080/23311916.2020.1853305.
24. Verma S., Verma R. K., Mishra S. K. et al., A revisit of NRCS-CN inspired models coupled with RS and GIS for runoff estimation, *Hydrological Sciences J.*, 2017, Vol. 62, Issue 12, pp. 1891–1930, DOI: 10.1080/02626667.2017.1334166.
25. Xu H., Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2006, Vol. 27, No. 14, pp. 3025–3033, DOI: 10.1080/01431160600589179.
26. Yu Z., Wu J., Yao H. et al., Calibrating a hydrological model in ungauged small river basins of the north-eastern Tibetan Plateau based on near-infrared images, *J. Hydrology*, 2023, Vol. 618, Article 129158, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129158.
27. Zhang J., Zhang Ch., Bao Zh. et al., Analysis of the effects of vegetation changes on runoff in the Huang-Huai-Hai River basin under global change, *J. Advances in Water Science.*, 2021, Vol. 32, Issue 6, pp. 813–823, DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.06.001.