Метод пространственно-временного синтеза высокочастотных альтиметрических наблюдений уровней воды

М. В. Врублевский, Е. А. Лупян, М. А. Бурцев

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: vrublevsky@d902.iki.rssi.ru

Предложен метод синтеза высокочастотных альтиметрических наблюдений уровней воды (метод СВАН) с использованием данных альтиметрии и ограниченного архива наземных измерений. Метод позволяет для периода времени доступного архива *in situ* данных получить на этапе калибровки ежедневные временные ряды уровня воды на гидропостах альтиметрии (АГП), включая расположенные на участках, не охваченных наземными наблюдениями, а также на период отсутствия архивов измерений восстановить временные ряды уровня воды с повышенным временным разрешением, превышающим частоту повторных пролётов спутника. Апробация метода в рамках эксперимента по реализации этого подхода на реке Амур говорит об его эффективности: сравнение полученных временных рядов на 38 АГП с данными от ближайших наземных гидрологических станций показало следующие результаты: средние коэффициент корреляции Пирсона и среднеквадратическая ошибка восстановленных рядов на период 2023–2025 гг. составили 0,89 и 0,65 м соответственно. Полученные оценки не хуже оценок других существующих подходов, упомянутых в статье. Использование рассмотренного метода позволило повысить временное разрешение ряда значений уровня воды на АГП от 1–3 измерений в месяц до примерно одного измерения раз в три дня. Помимо того, что предложенный метод легко переносим на другие реки России, он позволяет получить временные ряды уровня воды с дискретностью примерно один раз в три дня для участков рек с недостатком наземных наблюдений. Применение такого подхода повышает число участков, охваченных достаточно частыми по пространству и времени измерениями уровня воды, что расширяет объём информации, необходимый для прогнозирования паводковой опасности, а также может выступить механизмом для оптимизации расходов на содержание гидрологической сети.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, Sentinel-3, Sentinel-6, «Вега-Гидро», уровень воды, гидропосты альтиметрии, пространственно-временное разрешение, река Амур, метод СВАН

Одобрена к печати: 18.08.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-136-152

Введение

Большинство территорий России характеризуется дефицитом гидрометеорологической информации: здесь имеет место как недостаток гидропостов (ГП) на ряде территорий, включая отсутствие станций в малоизученных районах и в приустьевых участках рек, неравномерность расположения существующих пунктов наблюдения (Зуев и др., 2018; Пономаренко, Рыжаков, 2023), так и сложности модернизации наземной наблюдательной сети по финансовым и/или кадровым причинам (Обзор..., 2025). Введение в эксплуатацию автоматизированных гидрологических комплексов, конечно, снижает эксплуатационные затраты по сравнению с традиционным обслуживанием ГП, но оно ограничено территорией с благоприятным для приборов климатом и наличием связи для передачи оперативной информации (Бузмаков и др., 2025). В любом случае развитие и поддержка наземной наблюдательной сети требует высоких инвестиций.

Одним из путей сокращения расходов на поддержку гидрологической сети может быть внедрение технологий, основанных на использовании информации об уровне воды (высоте водной поверхности), получаемой на основе спутниковой альтиметрии (Nielsen et al., 2022; Schwatke et al., 2015), методе определения высоты водной поверхности на основе измерения времени распространения сигнала от спутника до исследуемой территории. Следует отме-

тить, что в последние годы сильно повысились точность и качество измерений спутниковых альтиметрических систем (Fang et al., 2025; Zakharova et al., 2026). Это во многом открыло новые возможности использования данных спутниковой альтиметрии в том числе и для мониторинга уровня воды внутренних водоёмов. Проследить процесс развития спутниковой альтиметрии этапа постоянного мониторинга позволяет хронология альтиметрических миссий (*рис. 1*). Отметим, что для измерения уровня воды внутренних водоёмов наиболее востребованы данные спутников SAR-альтиметрии (*англ.* Synthetic Aperture Radar) Sentinel-3 и Sentinel-6 (Kittel et al., 2021; Zakharova et al., 2026) вследствие высокого пространственного разрешения (около 300 м).

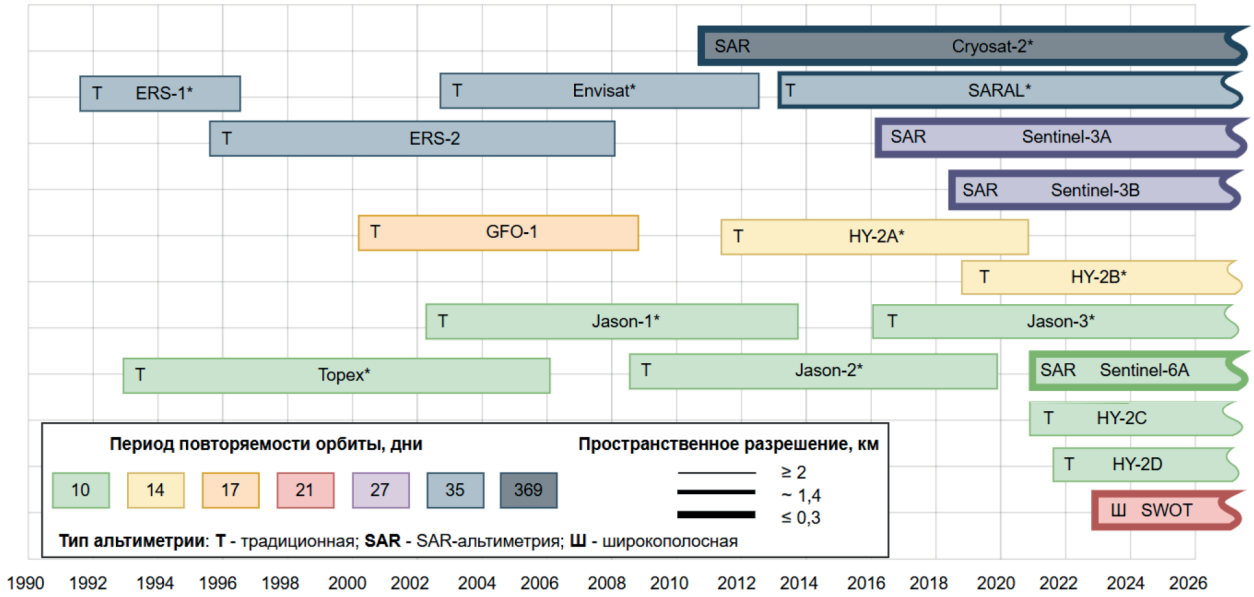


Рис. 1. Хронология миссий спутниковой радиолокационной альтиметрии. Миссии, отмеченные символом «*», имели несколько фаз, в том числе с отличным от указанного цветом периодом повторного наблюдения

Из уже сложившейся практики измерения уровня воды внутренних водоёмов на основе спутниковых альтиметрических систем ведутся в границах так называемых альтиметрических гидропостов (АГП), виртуальных полигонов, образованных пересечением трека спутника и границ водоёма, т.е. в постоянных точках наблюдения, что позволяет использовать АГП наряду с наземными гидропостами (НГП). При этом измерения на АГП происходят с относительно низкой частотой: от 10 дней (для спутников серии Jason, Sentinel-6), 27 дней (Sentinel-3) до 35 (SARAL).

Методам повышения частоты измерений уровня воды на АГП посвящён ряд работ (Мухамеджанов и др., 2025; Boergens et al., 2017, 2019; Hossain et al., 2014; Ke et al., 2022; Pham et al., 2018; Roux et al., 2008; Tourian et al., 2016; Wang, Wang, 2025). В то же время данную задачу нельзя считать полностью решённой.

Настоящая работа посвящена разработанному авторами подходу к решению обсуждаемой задачи, который основан на выявлении корреляционной связи между уровнями на разных ГП с учётом времени добегания (Борщ и др., 2017), т.е. времени, за которое вода перемещается вдоль русла из одной точки реки в другую. В исследовании представлено описание предлагаемого подхода, а также оценки точности результатов, полученные посредством сопоставления воссозданных учащённых рядов уровней воды на АГП с рядами на ближайших НГП. Также описаны результаты апробации разработанного подхода на примере использования сети АГП на реке Амур.

Возможные подходы к решению задачи повышения временной частоты данных об уровнях воды на АГП

Решению проблемы низкого временного разрешения измерений на АГП посвящено значительное число работ. В основном эти исследования направлены на разработку методов генерации данных с повышенным временным разрешением на основе моделирования уровня воды по данным наблюдений (натурных или дистанционных) на отдалённых участках рек или на основе взаимосвязи уровня воды с другими характеристиками подстилающей поверхности, полученными с помощью спутниковых измерений. Можно выделить несколько основных направлений разработки обсуждаемых методов, которые рассматриваются, в частности, в следующих работах:

1. В исследовании (Roux et al., 2008) для повышения временного разрешения на АГП была использована модель линейной регрессии, восстанавливающая отсутствующие значения уровня воды на основе измерений уровня воды на отдалённых НГП, что позволило достигнуть среднеквадратической ошибки RMSE (*англ.* Root Mean Square Error), не превышающей 40,9 см.

2. В работе (Hossain et al., 2014) процесс моделирования ежедневного уровня воды был основан на применении одномерной гидродинамической модели HEC-RAS (https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/), прогнозирующей уровень воды в точке ниже по течению, со средним значением RMSE не более 1,5 м (относительно *in situ* измерений). В качестве входных данных для модели использовались измерения альтиметрии на участках выше по течению.

3. В публикации (Tourian et al., 2016) предложен подход интеграции нескольких наборов данных соседних АГП для восстановления ряда значений уровня воды на каждом из них с интервалом около 3 дней. Оценка метода показала коэффициент корреляции Пирсона R в пределах 0,5–0,8 и RMSE не более 1,2 м.

4. В исследовании (Boergens et al., 2017) и последующем его развитии (Boergens et al., 2019) для решения рассматриваемой задачи был применён подход, основанный на пространственно-временном кригинге. Коэффициент детерминации предложенного подхода для ряда тестовых АГП находился в пределах 0,5–0,9, а RMSE не превышала 2,22 м соответственно.

5. В работах (Ke et al., 2022) и (Мухамеджанов и др., 2025) для восстановления уровня воды в реках с целью повышения временного разрешения был использован подход, анализирующий связь между площадью водного зеркала, полученной по данным оптической съёмки, и уровнем воды, измеренным с помощью альтиметрии. Были достигнуты следующие результаты: средний коэффициент детерминации 0,79 — в первой работе и средняя абсолютная ошибка менее 40 см — во второй.

6. В исследовании (Pham et al., 2018) восстановление высокочастотного ряда уровня воды на АГП реки Меконг проводилось с помощью моделирования уровня воды, основанного на взаимосвязи уровня и разницы температуры поверхности Земли в дневное и ночное время по данным о температуре поверхности суши с разрешением 1 км MYD11A1 (https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/MYD11A1), RMSE не превысила 1,9 м. Аналогичный метод, применённый в работе (Wang, Wang, 2025) для АГП на реке Дунцзян, дал результаты с R около 0,85.

Следует отметить, что задачу повышения временного разрешения данных об уровне воды на АГП в настоящее время нельзя считать полностью решённой, так как предлагаемые методы не достигают удовлетворительной точности, их применение ограничено периодом времени, соответствующим доступному архиву опорных данных, или (как в случае гидрологического моделирования) требует большого объёма входной информации. Поэтому с целью обеспечения мониторинга уровня воды на участках рек, не охваченных наземными наблюдениями, целесообразно продолжать разработку новых подходов и методов.

Метод пространственно-временного синтеза высокочастотных альтиметрических наблюдений уровней воды

В настоящей работе предлагается метод пространственно-временного синтеза высокочастотных альтиметрических наблюдений уровней воды (метод СВАН), т.е. метод восстановления значений уровня воды на АГП в моменты, когда на нём отсутствуют прямые спутниковые измерения. Метод основан на выявлении корреляционной связи между данными текущего АГП и опорных отдалённых наземных или альтиметрических ГП. В рамках этого подхода предлагается два последовательных этапа.

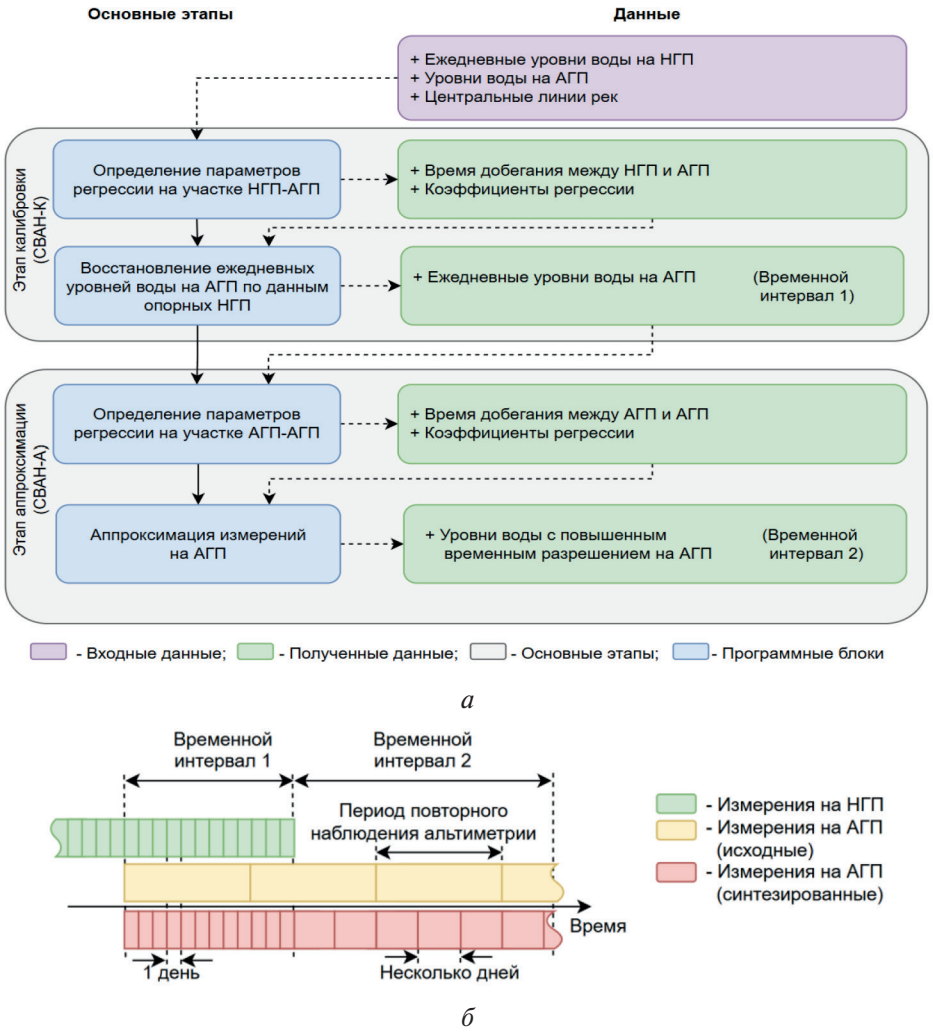


Рис. 2. Основные этапы и данные предложенного подхода: *а* — соответствующие этапы: СВАН-К — при наличии архивов измерений на сети НГП, СВАН-А — при их отсутствии; *б* — визуализация частоты измерений на разных временных интервалах

Первый этап — этап калибровки (СВАН-К) — на период доступных архивов наземных гидрологических наблюдений, в рамках которого с помощью метода соответственных уровней (Борщ и др., 2017) определяется среднее время добегания на участках реки и устанавливается корреляционная связь между временными рядами уровней воды на ГП. Этап калибровки позволяет получить ежедневные временные ряды уровней воды на АГП, восстановленные с помощью данных НГП на период времени наличия *in situ* измерений.

На следующем этапе — аппроксимации альтиметрических данных (СВАН-А) — полученные ежедневные уровни используются для определения времени добегания между АГП

и коэффициентов регрессии, связывающих уровни воды на АГП между собой, что в итоге применяется для восстановления уровней воды на каждом текущем АГП по данным отдалённых опорных АГП с помощью установленных корреляционных связей. Более детально предложенный подход рассмотрен ниже. Основные его этапы приведены на *рис. 2*.

Этап калибровки (СВАН-К): восстановление ежедневных уровней воды на АГП

Определение времени добегания на участке НГП-АГП основано на допущении о постоянстве скорости добегания на участке реки НГП-НГП.

1. Время добегания между НГП и НГП определяется методом, предложенным в работе (Наумов, 2020), а скорость добегания — как отношение соответствующих длины участка реки и времени добегания. Метод основан на поиске максимума функции $R = f(\tau)$, где R — коэффициент корреляции Пирсона между двумя временными рядами измерений на двух НГП, смещёнными друг относительно друга на время добегания τ.

2. Время добегания на участках НГП-АГП вычисляется как отношение соответствующих длины участка реки и средней скорости добегания.

Восстановление ежедневных уровней воды на АГП по данным опорных НГП базируется на построении регрессионной зависимости между измерениями на АГП и данными оптимального набора опорных постов, отобранных из общей сети НГП, и осуществляется следующим образом:

1. Для каждого АГП формируется оптимальный набор опорных НГП. Задача выбора оптимального набора опорных НГП обусловлена неоднородностью корреляционных связей между данными ГП. Качество связи снижается с ростом расстояния между ГП, а также из-за наличия притоков на участках между ними. Процедура выбора оптимального набора опорных НГП включает следующие шаги:

I. Отбор НГП, данные которых имеют коэффициент корреляции с измерениями АГП выше порогового значения. В качестве порогового значения допустимых корреляций в гидрологических данных обычно используется коэффициент детерминации, превышающий 0,5 (Moriasi et al., 2007). В настоящей работе предлагается более строгий $R \geqslant 0{,}75$.

II. Учёт расстояния между НГП и текущим АГП для исключения случайных корреляций, при этом предельное расстояние для каждого водного объекта устанавливается экспериментально.

III. Из сформированного перечня НГП выбирается комбинация НГП, обеспечивающая максимальную корреляцию между восстановленными данными и измерениями на АГП.

2. После формирования оптимального набора опорных НГП осуществляется восстановление ежедневных уровней воды. Ежедневные уровни воды на АГП получаются посредством выявления корреляционной связи между уровнями на опорных НГП и текущем АГП с учётом времени добегания. Такой метод широко используется в краткосрочном прогнозировании (Борщ и др., 2017). Так, уровень воды на текущем ГП определяется по формуле

$$wl(t) = a + \sum_{i=1}^{n} b_i \cdot wl_i(t - k \cdot \tau_i), \tag{1}$$

где k — коэффициент учёта относительного расположения опорного и текущего АГП:

$$k = \begin{cases} 1, & \text{опорный ГП расположен выше по течению от текущего,} \\ -1, & \text{опорный ГП расположен ниже по течению от текущего;} \end{cases} \tag{2}$$

$wl(t)$ — уровень воды в дату наблюдений t на текущем ГП; a, b_i — коэффициенты регрессии; n — количество опорных ГП; $wl_i(t - \tau_i)$ — уровень воды на i-м опорном ГП; τ_i — время добегания между i-м опорным ГП и текущим.

В результате на каждом АГП сети формируется ряд ежедневных уровней воды.

Этап аппроксимации (СВАН-А): восстановление уровней воды на АГП с временным разрешением, превышающим частоту фактических спутниковых измерений

Определение времени добегания на участке АГП-АГП реализуется с помощью поиска максимума коэффициента корреляции ежедневных уровней воды на АГП, полученных на этапе калибровки, путём итеративного сдвига по времени рядов данных друг относительно друга.

Повышение временного разрешения ряда уровня воды на АГП по данным опорных АГП для периода отсутствия данных наземных наблюдений основано на регрессионной связи между восстановленными на этапе калибровки ежедневными данными опорного и текущего АГП с учётом времени добегания τ_i и установленных коэффициентов регрессии d и c между парами АГП на основе ежедневных уровней. Уровни воды на текущем АГП определяются по данным опорных по формуле:

$$wl(t) = \frac{\sum_{j=1}^{m} d_j \cdot wl_j(t - k \cdot \tau_j) + c_j}{m}, \quad (3)$$

где m — число восстановленных уровней на текущем АГП на время t; d_j, c_j — коэффициенты регрессии.

По мере поступления новых данных от НГП необходимо уточнять коэффициенты регрессии, чтобы учесть возможные изменения корреляционных связей вследствие возможного изменения гидрологического режима.

Таким образом, обеспечены возможности восстановления ежедневных уровней воды на АГП по данным опорных НГП на этапе калибровки на период доступных измерений на сети НГП, а также восстановления уровней воды на АГП с временным разрешением, превышающим частоту фактических измерений, в период отсутствия данных наземных измерений с помощью установленных корреляционных связей.

Проверка работоспособности предложенного подхода

Для оценки работоспособности предложенного подхода был выбран район проведения эксперимента, получены необходимые общедоступные данные, реализован метод СВАН для аппроксимации уровней воды на АГП и оценена эффективность восстановления уровней воды на 38 АГП по метрикам R и RMSE на основе сопоставления с данными на ближайших НГП (менее 20 км), а для участков, не охваченных наземными наблюдениями, посредством качественного сравнения динамики полученных рядов с изменением площади водного зеркала. По результатам анализа эксперимента сделано заключение о соотношении получаемых точности и временной частоте значений уровня воды, а также применимости предложенного метода СВАН для рек России.

Район проведения эксперимента

Для оценки применимости предлагаемого подхода была выбрана река Амур. Её бассейн из-за климатических особенностей региона имеет выраженный паводочный режим и входит в число регионов России с наивысшим риском затопления (Данилов-Данильян и др., 2014). Помимо этого, для реки Амур необходимые для реализации и проверки метода данные находятся в свободном доступе.

Материалы и данные, используемые для анализа

Данные альтиметрии и положения АГП получены из системы мониторинга уровня воды (Врублевский и др., 2023) для 104 АГП (*рис. 3*) из информационной системы «Вега-Гидро», разработанной для решения задач гидрологии с помощью данных и технологий дистанци-

онного зондирования Земли (Бурцев и др., 2024). Данные наземных измерений, выступающие в качестве опорных, получены с 23 НГП (см. *рис. 3*) с геоинформационного портала «МетеоДВ» (https://meteo-dv.ru/) с февраля 2022 г. по настоящее время, а с 2008 по 2022 г. — из Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (https://gmvo.skniivh.ru/). Для измерения расстояний вдоль русла использованы данные о центральных линиях рек из базы данных SWORD (*англ.* Surface Water and Ocean Topography River Database) (Altenau et al., 2021).

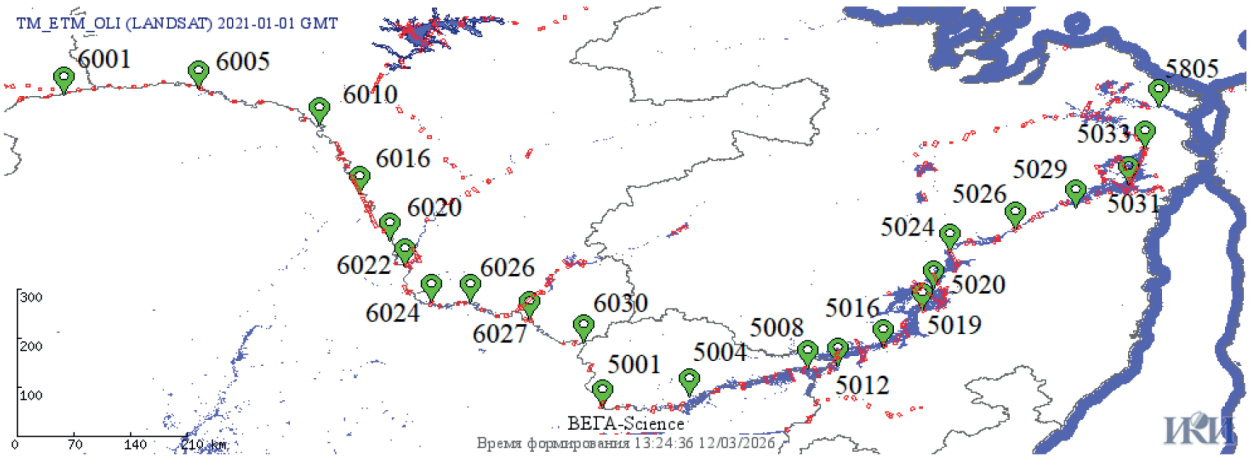


Рис. 3. Положение АГП (красные полигоны) и НГП (маркеры) на реке Амур. Подложка — максимальная площадь воды за 1984–2021 гг. (Pekel et al., 2016)

Стоит отметить, что измерения на НГП ведутся относительно нуля поста, высота которого дана в Балтийской системе координат. Для того, чтобы сопоставить ряды измерений АГП и НГП, ряды НГП были скорректированы на разницу медиан между анализируемыми парами НГП и АГП, что позволило избежать сложности перехода между системами координат и учесть систематическое смещение (Вуглинский и др., 2024).

Для валидации изменений восстановленных значений уровня на АГП, расположенных на участках без наземных наблюдений, использованы спутниковые снимки высокого пространственного разрешения (10–30 м) уровня обработки L2A (*англ.* bottom of atmosphere — BOA) приборов MSI (*англ.* Multi Spectral Instrument) спутников Sentinel-2 и OLI (*англ.* Operational Land Imager) и TIRS (*англ.* Thermal Infrared Sensor) Landsat и полученная на их основе маска воды. Динамика уровня воды была сопоставлена с изменением площади водного зеркала (Мухамеджанов и др., 2022; Пиотровский, Зенгина, 2018), выявленным с помощью данных, результатов их обработки и инструментов спутникового сервиса «Вега-Гидро» (Бурцев и др., 2024). Сбор, архивация, обработка и анализ спутниковых данных осуществлялись ресурсами Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019).

Реализация метода СВАН

Используя в качестве входных данных информацию, описанную в предыдущем разделе, был применён метод СВАН для повышения временного разрешения рядов уровней воды на сети АГП реки Амур.

На этапе калибровки (СВАН-К) были определены время добегания и средние скорости добегания. Оценки времени добегания согласуются с данными из работы (Борщ и др., 2017). Также были получены ежедневные временные ряды уровней воды на 90 АГП. Остальные АГП были отброшены из-за низкой корреляции ($R < 0{,}75$) с рядами измерений на НГП в силу разных причин: наличия сильно зашумлённых рядов измерений альтиметрии на АГП или некорректной оценки времени добегания на граничных участках реки.

Восстановленные на этапе СВАН-К временные ряды ежедневных уровней воды на АГП позволили оценить время добегания на участках реки, заключённых между парами АГП. Далее были определены коэффициенты регрессии, связывающие ежедневные уровни воды на каждом текущем АГП с данными опорных АГП. В качестве опорных использованы те АГП, расстояние от которых до текущего АГП не превышало предельное расстояние: было рассмотрено два случая — не более 300 км и не более 400 км. С помощью рассчитанных коэффициентов регрессии и времени добегания были восстановлены и сглажены для фильтрации выбросов оконным фильтром (размер окна равен 3) уровни воды на всех АГП за соответствующие даты. Доверительная область (разброс ошибки) (*рис. 4* и *5*) определяется как RMSE между рядами текущего и опорного АГП.

Удаление опорного АГП от текущего ведёт к росту времени добегания, снижению R и увеличению RMSE между рядами. Это хорошо иллюстрирует пример данных по произвольно выбранному АГП № 962 (см. *табл. 1*), но также явно присутствует и ошибка в определении времени добегания, которая, как покажет последующая оценка точности, не приводит к существенно большим погрешностям.

Таблица 1. Метрики, характеризующие точность восстановления измерений на АГП № 962 по данным опорных АГП

№ опорного АГП	Расстояние, км	Время добегания, сут.	R	RMSE, м
942	16,11	0	0,98	0,25
947	45,94	1	0,98	0,26
1227	56,32	1	0,97	0,33
6637	57,11	1	0,97	0,31
952	71,75	0	0,98	0,28
1250	91,35	2	0,99	0,23
920	114,92	0	0,97	0,36
938	116,95	0	0,95	0,45
1232	127,37	1	0,96	0,38
1242	150,06	3	0,97	0,33
975	154,34	2	0,97	0,36
953	158,25	2	0,96	0,40
1238	173,99	4	0,97	0,32
1241	187,22	2	0,97	0,34
1218	226,77	2	0,98	0,31
925	220,73	2	0,89	0,62
5792	249,67	1	0,97	0,34
959	236,47	3	0,92	0,53
707	263,39	3	0,92	0,54
1247	307,67	4	0,90	0,60
932	306,69	5	0,78	0,83
1222	343,95	4	0,92	0,53

Таким образом, на 90 АГП реки Амур (из которых 54 расположены на участках реки, не охваченных наземными наблюдениями) были получены временные ряды уровня воды с повышенным относительно периода повторного спутникового наблюдения временным разрешением. В зависимости от доступности архивов наземных наблюдений ряды имеют разную дискретность: для периода с 2008 по 2022 г. уровни воды ежедневные, с 2023 г. по настоящее время — учащённые относительно фактических измерений альтиметрии в границах АГП до одного раза в несколько дней в зависимости от используемых данных.

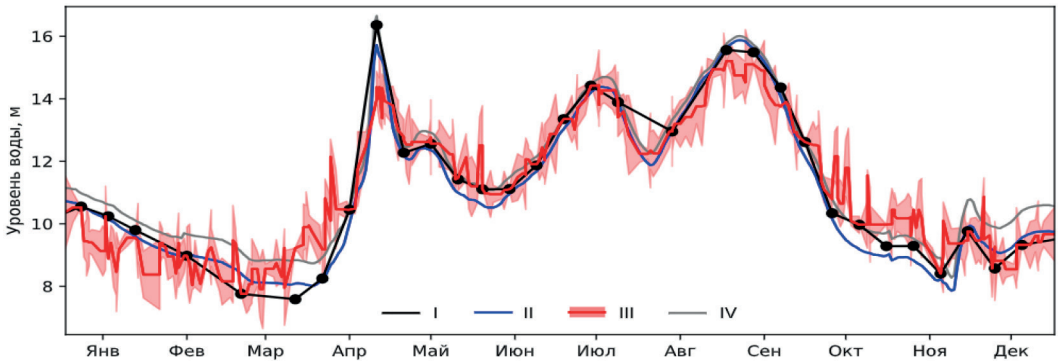


Рис. 4. Сравнение рядов уровня воды на АГП за 2024 г.: I — измеренные спутником альтиметрии в границах АГП; II — синтезированные на этапе СВАН-К; III — синтезированные на этапе СВАН-А и разброс ошибки; IV — наземные измерения

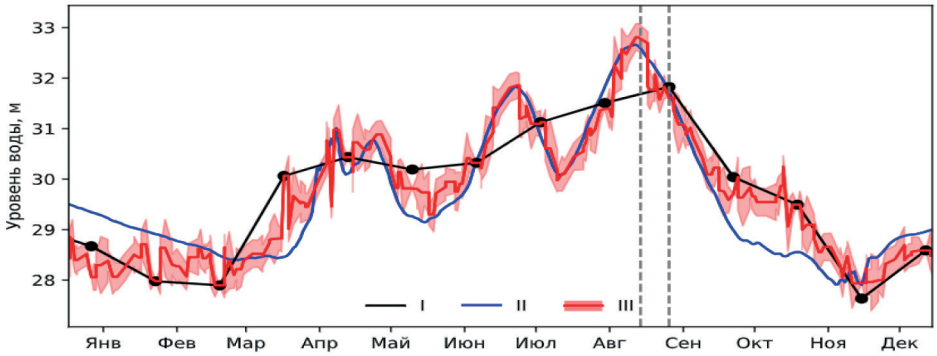


Рис. 5. Сравнение рядов уровня воды на АГП № 1250 за 2024 г.: I — измеренные спутником альтиметрии в границах АГП; II — синтезированные на этапе СВАН-К; III — синтезированные на этапе СВАН-А и разброс ошибки; пунктирными линиями обозначены даты оптической съёмки

Результаты анализа эксперимента

Для оценки точности воспроизведения фактических уровней воды были сформированы пары АГП и НГП, расстояние между которыми не превышало 20 км, для сопоставления уровней воды друг с другом.

Верификация результатов эксперимента на реке Амур выполнена сравнением синтезированных методом СВАН значений уровня воды с данными наземных измерений. На *рис. 4* приведён пример совмещения временных рядов данных наземных измерений на НГП № 5026 с данными альтиметрии и уровнями воды, восстановленными на АГП № 6639. Расстояние между НГП № 6639 и НГП № 5026 составляет около 6 км. Видно, что все ряды согласованы между собой, имеют общий тренд и воспроизводят уровень воды, близкий к полученному наземными измерениями.

Для количественной оценки точности восстановленных значений уровня воды на АГП относительно данных на ближайших к ним НГП по независимому ряду (информация, полученная на данном НГП не использовалась в процессе восстановления коэффициентов) от «МетеоДВ» за 2023–2025 гг. были рассчитаны метрики R и RMSE для временных рядов уровня воды, полученных на разных этапах: ежедневные на этапе СВАН-К и с повышенной относительно периода повторного спутникового наблюдения на этапе СВАН-А. Результаты оценки представлены в *табл. 2.* В ней приведены номера АГП, участвовавших в оценке, а также информация о результатах реализации этапов СВАН-К и СВАН-А для этих АГП. Для этапа СВАН-К указаны номера НГП в сети Росгидромета: данные которых использованы для оценки в качестве эталонных — НГП (эталон.), в качестве опорных — НГП (опорные). Расстояния между эталонным НГП и АГП указаны в графе Р. Также показаны метрики R и RMSE.

Таблица 2. Результаты проверки восстановленных рядов по данным НГП

АГП	СВАН-К					СВАН-А					
						Порог = 300 км			Порог = 400 км		
	НГП (эталон.)	Р, км	НГП (опорные)	R	RMSE, м	R	RMSE, м	Д, дни	R	RMSE, м	Д, дни
3438	6001	16	6005	0,98	0,17	0,89	0,69	7	0,88	0,77	5
3389	6001	20	6005	0,97	0,28	0,88	0,61	5	0,88	0,61	5
702	6005	3	6001, 6010	0,97	0,33	0,92	0,46	5	0,91	0,50	4
935	6005	13	6001, 6010	0,96	0,54	0,92	0,87	5	0,91	0,89	4
973	6005	20	6001	0,94	0,4	0,92	0,49	6	0,90	0,55	4
713	6010	20	6005, 6016	0,94	0,25	0,86	0,62	6	0,87	0,60	5
964	6016	3	6010, 6020, 6022	0,93	0,46	0,84	0,76	8	0,85	0,81	4
963	6016	15	6020, 6022, 6010, 6024	0,94	0,39	0,83	0,81	14	0,91	0,60	7
927	6020	19	6022, 6016, 6024, 6026	0,98	0,42	0,72	0,92	5	0,73	0,93	4
955	6024	3	6016, 6020, 6022, 6026	0,99	0,26	0,84	0,52	4	0,81	0,59	3
930	6024	15	6016	0,9	0,47	0,81	0,67	4	0,82	0,67	3
948	6026	20	6024, 6022	0,96	0,35	0,85	0,59	4	0,85	0,60	3
924	6026	15	6024, 6027, 6022, 6020	0,91	0,31	0,82	0,54	4	0,83	0,54	3
971	6027	3	6030, 6026, 6024, 6022	0,96	0,35	0,8	0,69	4	0,82	0,70	3
701	6030	12	6027, 6026, 6024, 5004	0,9	0,44	0,74	0,84	5	0,6	1,03	2
953	5004	20	5008, 5012, 5016	0,89	0,53	0,89	0,68	3	0,89	0,67	2
942	5008	6	5004, 5012, 5016	0,97	0,3	0,92	0,54	3	0,91	0,54	2
962	5008	10	5004, 5012, 5016	0,97	0,33	0,91	0,56	2	0,91	0,59	2
947	5012	12	5004, 5008, 5016	0,98	0,22	0,92	0,56	3	0,91	0,59	2
1227	5012	20	5004, 5008, 5016	0,98	0,26	0,92	0,58	2	0,91	0,60	2
6637	5012	20	5004, 5008, 5016	0,98	0,28	0,92	0,57	3	0,91	0,59	2
1232	5016	4	5008, 5012, 5019	0,98	0,28	0,91	0,56	2	0,91	0,56	2
1218	5019	5	5012, 5016, 5020	0,93	0,41	0,92	0,47	2	0,91	0,49	2
5792	5019	20	5020, 5016, 5012	0,94	0,46	0,92	0,59	2	0,91	0,61	2
1247	5020	20	5024, 5019, 5026, 5016	0,97	0,35	0,95	0,59	2	0,94	0,62	2
1226	5024	14	5019, 5020, 5026	0,98	0,33	0,96	0,51	2	0,94	0,60	2
1240	5026	10	5020, 5024, 5029	0,99	0,28	0,93	0,85	2	0,92	0,91	2
6639	5026	6	5020, 5024, 5029	0,99	0,38	0,93	0,82	2	0,92	0,90	2
1223	5029	19	5024, 5026	0,97	0,41	0,92	0,71	2	0,92	0,72	2
1259	5029	15	5020, 5024, 5026	0,96	0,49	0,92	0,66	2	0,91	0,69	2
1243	5029	20	5026, 5031, 5033, 5024	0,96	0,51	0,92	0,70	2	0,92	0,71	2
1229	5031	6	5029, 5033	0,98	0,45	0,96	0,57	3	0,96	0,56	2
7488	5031	15	5029, 5033, 5026, 5805	0,98	0,36	0,95	0,68	2	0,95	0,67	2
1765	5031	20	5033, 5029, 5026, 5805	0,97	0,39	0,96	0,64	2	0,96	0,62	2
1254	5033	8	5031	0,95	0,56	0,95	0,55	3	0,96	0,52	2
1762	5033	20	5031, 5029, 5805	0,98	0,37	0,95	0,66	3	0,96	0,64	2
1234	5805	16	5029, 5031, 5033	0,84	0,45	0,89	0,49	3	0,89	0,48	3
1235	5805	20	5029, 5031, 5033	0,92	0,33	0,88	0,51	3	0,89	0,50	3
Среднее				**0,96**	**0,37**	**0,89**	**0,64**	**3,7**	**0,89**	**0,65**	**2,8**
Максимальное				**0,99**	**0,56**	**0,96**	**0,92**	**14**	**0,96**	**1,03**	**7**

Этап СВАН-А реализован для двух вариантов порога, ограничивающего используемые в восстановлении опорные АГП. Для каждого варианта порога рассчитаны R, RMSE, а также среднее значение дискретности измерений Д как отношение количества полученных измерений к количеству дней соответствующего периода времени.

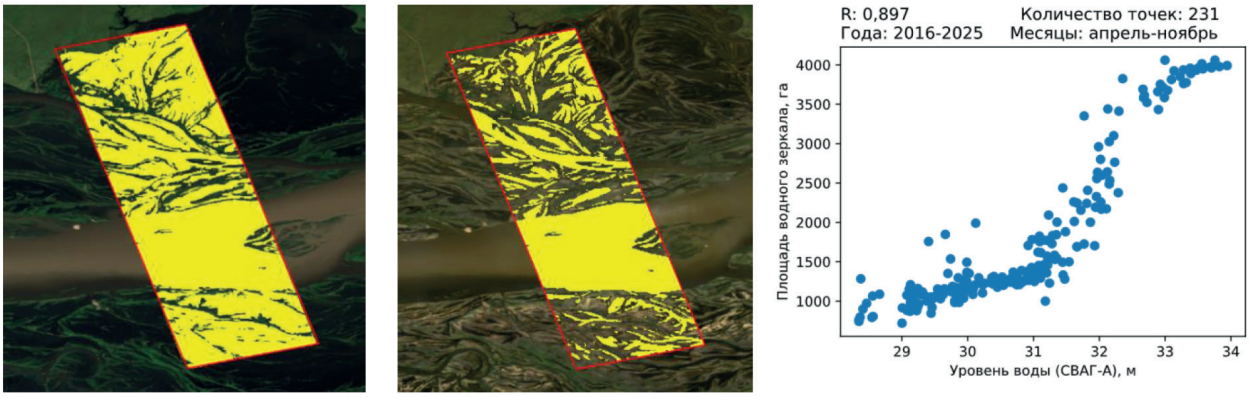
Анализируя полученные метрики, можно заключить:

1. Восстановленные на этапе СВАН-К ежедневные уровни воды имеют высокие значения корреляции с фактическими ($R > 0{,}84$, среднее — 0,96) и среднюю RMSE = 0,37 м. Такая среднеквадратическая ошибка сопоставима с ошибками альтиметрии, имеющими дециметровую точность на реках (Halicki et al., 2022), и с оценками в работе (Roux et al., 2008).

2. Восстановленные ряды уровня воды на АГП реки Амур на этапе СВАН-А характеризуются средним $R = 0{,}89$ и RMSE от 0,46 до 1,03 м, что сравнимо с оценками в работах, рассмотренных в разд. «Возможные подходы к решению задачи повышения временной частоты данных об уровнях воды на АГП».

Анализ результатов, полученных для разных предельных расстояний отбора опорных АГП на этапе СВАН-А, показал, что при увеличении предельного расстояния улучшается дискретность данных об уровне воды, но также растёт и RMSE. Следовательно, варьируя этот параметр, можно проводить выбор между повышением точности или временной частоты данных, получаемых в процессе восстановления, в зависимости от задачи применения.

Также для установления достоверности восстановленных данных на участках реки, не охваченных наземными наблюдениями, была проведена качественная оценка посредством сопоставления динамики уровня воды и площади водного зеркала.



а *б* *в*

Рис. 6. Изменение площади водного зеркала: *а* — 28.08.2024, 02:02:53, MSI BOA Sentinel-2A; *б* — 09.09.2024, 01:49:13, OLI-TIRS BOA Landsat-8. Красным полигоном заданы границы АГП № 1250, жёлтые области соответствуют маске воды в границах АГП. Связь уровней воды и площади водного зеркала (*в*)

Синтез высокочастотных альтиметрических наблюдений уровней воды позволяет выявить изменения уровня воды, вызванные различными непродолжительными гидрологическими явлениями, которые не регистрируются прямыми спутниковыми наблюдениями альтиметрии. На *рис. 5* видно, что прямые измерения не регистрируют пики и спады, которые получены с помощью метода СВАН. Достоверность этих событий можно подтвердить косвенно по согласованности динамики уровня воды и площади водного зеркала в границах АГП. Для этого были рассчитаны площади водного зеркала в даты регистрации методом СВАН (см. *рис. 6а*, *б*) пикового события уровня воды в августе 2024 г., незарегистрированного прямыми наблюдениями уровня на АГП № 1250. При сравнении хода уровня и динамики площади видно, что на дату 28.08.2024 регистрируется как максимальный уровень 32,8 м, так и максимальная площадь 3144 га, а 09.09.2024 уровень (как фактический, так и восстановленный) составил 31,7 м, а площадь — 1987 га. На *рис. 6в* показана диаграмма рассеяния

для уровней воды методом СВАН-А и площади водного зеркала в границах АГП № 1250. Коэффициент корреляции $R = 0{,}90$, что говорит о высокой согласованности синтезированных значений уровня воды и площади водного зеркала.

Этот пример иллюстрирует важность применения предложенного подхода для наблюдения изменений уровня воды. Каждый из результатов этапов восстановления — по данным опорных НГП (СВАН-К), по данным опорных АГП (СВАН-А) — отражает эти изменения и может применяться в подобных целях.

Оценка результирующей временной частоты значений уровня воды на АГП, полученных методом СВАН, в зависимости от количества задействованных миссий

Для оценки полученной частоты измерений в зависимости от количества миссий, чьи данные используются, были выделены временные интервалы, для которых доступны данные одновременно от одной, двух и трёх миссий соответственно. Средняя частота данных за такой временной интервал определена как отношение количества восстановленных значений к общему количеству дней в соответствующий временной период.

Реализованный метод СВАН позволяет существенно участить измерения с 1–3 раз в месяц:

1) до ежедневных (в период наличия данных наземных наблюдений);

2) 7–15 раз в месяц (для периода отсутствия наземных наблюдений) в зависимости от наличия данных используемых миссий (в *табл. 3* приведена статистика количества измерений в месяц для 90 АГП реки Амур, полученных на этапе СВАН-А, в зависимости от наличия данных активных спутниковых миссий).

Таблица 3. Количество измерений уровня воды в месяц для разных периодов времени

Период времени*	Действующие спутники	Количество синтезированных уровней в месяц	
		Среднее	Максимальное
01.04.2016–21.11.2018	Sentinel-3A	7	12
21.11.2018–17.12.2020	Sentinel-3A/-3B	13	21
17.12.2020 – наст. время	Sentinel-3A/-3B/-6A	15	26

* Даты соответствуют старту проведения измерений соответствующим спутником.

В работе (Cerbelaud et al., 2025) на основе анализа характерного временного масштаба гидрологических явлений устанавливаются требования к периодичности мониторинга рек: для реки Амур измерения уровня воды должны проводиться не реже одного раза в 4,5–6 дней. Однако для анализа паводковых ситуаций может требоваться более высокая частота наблюдений. Отметим, что предложенный метод позволяет достичь практически ежедневной частоты восстановленных данных, а также демонстрирует повышение дискретности при привлечении дополнительных альтиметрических миссий. Следовательно, повышение числа активных миссий приведёт к большему эффекту повышения временной частоты данных.

Выводы и обсуждение

В работе предложен метод синтеза высокочастотных альтиметрических наблюдений уровней воды (метод СВАН) с использованием данных альтиметрии и ограниченного архива наземных измерений, позволяющий для периода времени доступного архива *in situ* наблюдений получить на этапе калибровки ежедневные временные ряды уровня воды на гидропостах

альтиметрии, включая расположенные на участках, не охваченных наземными наблюдениями, а также на период отсутствия архивов измерений синтезировать временные ряды уровня воды с повышенным временным разрешением относительно периода повторного спутникового наблюдения.

Эксперимент по применению метода СВАН на основе измерений спутниковой радиолокационной альтиметрии миссий Sentinel-3 и Sentinel-6 для сети АГП реки Амур показал эффективность предложенного метода. Так, оценка полученных данных сопоставлением восстановленных рядов с данными наземных наблюдений на 38 АГП, расположенных в непосредственной близости от НГП, показала, что на сети реки Амур, состоящей из 90 АГП (из которых 54 расположены на участках реки, не охваченных наземными наблюдениями), формируются ежедневные ряды наблюдений уровня воды на период наличия данных наземных измерений с R не ниже 0,84 и RMSE, не превышающей 57 см, а также ряды уровней воды с дискретностью около трёх дней на период отсутствия данных наземных измерений со средними $R = 0{,}89$ и $\mathrm{RMSE} = 0{,}65$ м. Метод позволяет регулировать соотношение погрешности и дискретности восстанавливаемого ряда уровня воды в зависимости от задач исследователя. С привлечением новых альтиметрических миссий временная частота восстанавливаемых рядов методом СВАН будет увеличиваться.

Соответственно, разработанный метод СВАН, во-первых, позволяет повысить временную частоту ряда уровня воды относительно фактических альтиметрических измерений в том числе на труднодоступных участках водоёмов, во-вторых, даёт возможность за счёт установки наземных гидропостов лишь на периоды калибровки оптимизировать затраты на обслуживание гидрологической измерительной сети.

В силу доступности для рек России альтиметрических измерений в различных системах мониторинга уровня воды, включая разработанную авторами, а также наличия общедоступного архива наблюдений уровня воды для речных сетей НГП, этот метод может быть масштабирован на большинство рек России.

Также возможно применение данного метода и для участков рек с притоками при наличии измерений на притоках. Улучшение метода может происходить благодаря повышению точности измерений альтиметрии, развитию методов их обработки, а также за счёт использования альтернативных способов оценки времени добегания для разных участков реки, в том числе учитывающих зависимость времени добегания от водности.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (тема «Мониторинг», госрегистрация № 126031818938-6) с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг», включая возможности и инструментарий информационной системы «Вега-Гидро».

Литература

1. *Борщ С. В.*, *Симонов Ю. А.*, *Христофоров А. В.*, *Юмина Н. М.* Краткосрочное прогнозирование уровней воды на реке Амур // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2017. № 44. С. 136–151.
2. *Бузмаков С. В.*, *Юхно А. В.*, *Осташов А. А.* Использование автоматизированных гидрологических комплексов для измерения уровня воды на государственной наблюдательной сети // Изв. Иркутского гос. ун-та. Сер. «Науки о Земле». 2025. Т. 52. С. 3–18. DOI: 10.26516/2073-3402.2025.52.3.
3. *Бурцев М. А.*, *Уваров И. А.*, *Лупян Е. А. и др.* «Вега-Гидро» — спутниковый сервис для задач гидрологии // Материалы 22-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2024. С. 354. DOI: 10.21046/22DZZconf-2024a.
4. *Врублевский М. В.*, *Константинова А. М.*, *Бурцев М. А.* Интерфейс для работы с данными альтиметрии для мониторинга внутренних водоёмов // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2023. С. 76. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a.

5. *Вуглинский В. С.*, *Кретo Ж. Ф.*, *Измайлова А. В. и др.* Перспективы использования спутниковой информации для определения уровня воды крупных озёр и водохранилищ (на примере водных объектов России) // Метеорология и гидрология. 2024. № 1. С. 5–16. DOI: 10.52002/0130-2906-2024-1-5-16.
6. *Данилов-Данильян В. И.*, *Гельфан А. Н.*, *Мотовилов Ю. Г.*, *Калугин А. С.* Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне реки Амур: условия формирования, оценка повторяемости, результаты моделирования // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 2. С. 111–122. DOI: 10.7868/S0321059614020059.
7. *Зуев В. В.*, *Короткова Е. М.*, *Уйманова В. А.*, *Кураков С. А.* Сравнительный анализ гидрометеорологических наблюдений Росгидромета и автономного измерительного комплекса «Майма» в бассейне р. Майма (Горный Алтай) // Водное хоз-во России. 2018. № 5. С. 65–74.
8. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А. и др.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами 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.
9. *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.
10. *Мухамеджанов И. Д.*, *Врублевский М. В.*, *Лупян Е. А.*, *Умирзаков Г. У.* Возможности калибровки космических гидропостов по данным альтиметрии на примере рек Центральной Азии // Материалы 23-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2025. С. 309. DOI: 10.21046/23DZZconf-2025a.
11. *Наумов В. А.* К расчёту времени добегания методом корреляционного анализа (на примере реки Мсты) // Вестн. науки и образования Северо-Запада России: электронный журн. 2020. Т. 6. № 4. С. 24–31.
12. Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2024 году. СПб.: ФГБУ «ГГИ», 2025. 78 с.
13. *Пиотровский А. А.*, *Зенгина Т. Ю.* Изменение водного зеркала акватории Ангарского Сора в связи с природными и антропогенными колебаниями уровня воды в Байкале // Проблемы регион. экологии. 2018. № 2. С. 102–109. DOI: 10.24411/1728-323X-2018-12102.
14. *Пономаренко Т. С.*, *Рыжаков А. Н.* Современное состояние гидрологической сети Черноморского побережья // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2023. № 1(89). С. 126–135.
15. *Altenau E. H.*, *Pavelsky T. M.*, *Durand M. T. et al.* The Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission River Database (SWORD): A global river network for satellite data products // Water Resources Research. 2021. V. 57. Iss. 7. Article e2021WR030054. DOI: 10.1029/2021WR030054.
16. *Boergens E.*, *Buhl S.*, *Dettmering D. et al.* Combination of multi-mission altimetry data along the Mekong River with spatio-temporal kriging // J. Geodesy. 2017. V. 91. P. 519–534. DOI: 10.1007/s00190-016-0980-z.
17. *Boergens E.*, *Dettmering D.*, *Seitz F.* Observing water level extremes in the Mekong River Basin: The benefit of long-repeat orbit missions in a multi-mission satellite altimetry approach // J. Hydrology. 2019. V. 570. P. 463–472. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.12.041.
18. *Cerbelaud A.*, *David C. H.*, *Pavelsky T. et al.* Satellite requirements to capture water propagation in Earth's rivers // Reviews of Geophysics. 2025. V. 63. Iss. 3. Article e2024RG000871. DOI: 10.1029/2024RG000871.
19. *Fang C.*, *Long D.*, *Huang Q. et al.* Improved water level retrieval in complex riverine environments: Sentinel-3 and Sentinel-6 altimetry over China's rivers // Water Resources Research. 2025. V. 61. Iss. 4. Article e2024WR039705. DOI: 10.1029/2024WR039705.
20. *Halicki M.*, *Schwatke C.*, *Niedzielski T.* The impact of the satellite ground track shift on the accuracy of altimetric measurements on rivers: A case study of the Sentinel-3 altimetry on the Odra/Oder River // J. Hydrology. 2022. V. 617. Pt. A. Article 128761. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128761.
21. *Hossain F.*, *Siddique-E-Akbor A. H.*, *Mazumder L. C. et al.* Proof of concept of an altimeter-based river forecasting system for transboundary flow inside Bangladesh // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2014. V. 7. Iss. 2. P. 587–601. DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2283402.
22. *Ke L.*, *Xu J.*, *Fan C. et al.* Remote sensing reconstruction of long-term water level and storage variations of a poorly-gauged river in the Tibetan Plateau // J. Hydrology: Regional Studies. 2022. V. 40. Article 101020. DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101020.
23. *Kittel C. M. M.*, *Jiang L.*, *Tøttrup C.*, *Bauer-Gottwein P.* Sentinel-3 radar altimetry for river monitoring — a catchment-scale evaluation of satellite water surface elevation from Sentinel-3A and Sentinel-3B // Hydrology and Earth System Sciences. 2021. V. 25. No. 1. P. 333–357. DOI: 10.5194/hess-25-333-2021.
24. *Moriasi D. N.*, *Arnold J. G.*, *Van Liew M. W. et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations // Trans. ASABE. 2007. V. 50. No. 3. P. 885–900. DOI: 10.13031/2013.23153.

25. *Nielsen K.*, *Zakharova E.*, *Tarpanelli A. et al.* River levels from multi mission altimetry, a statistical approach // Remote Sensing of Environment. 2022. V. 270. Article 112876. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112876.
26. *Pekel J.-F.*, *Cottam A.*, *Gorelick N.*, *Belward A. S.* High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. 2016. V. 540. No. 7633. P. 418–422. DOI: 10.1038/nature20584.
27. *Pham H. T.*, *Marshall L.*, *Johnson F.*, *Sharma A.* Deriving daily water levels from satellite altimetry and land surface temperature for sparsely gauged catchments: A case study for the Mekong River // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 212. P. 31–46. DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.034.
28. *Roux E.*, *Cauhope M.*, *Bonnet M.-P. et al.* Daily water stage estimated from satellite altimetric data for large river basin monitoring // Hydrological Sciences J. 2008. V. 53. Iss. 1. P. 81–99. DOI: 10.1623/hysj.53.1.81.
29. *Schwatke C.*, *Dettmering D.*, *Bosch W.*, *Seitz F.* DAHITI — an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry // Hydrology and Earth System Sciences. 2015. V. 19. No. 10. P. 4345–4364. DOI: 10.5194/hess-19-4345-2015.
30. *Tourian M. J.*, *Tarpanelli A.*, *Elmi O. et al.* Spatiotemporal densification of river water level time series by multimission satellite altimetry // Water Resources Research. 2016. V. 52. Iss. 2. P. 1140–1159. DOI: 10.1002/2015WR017654.
31. *Wang Q.*, *Wang H.* Estimating river water level using satellite altimetry and water surface temperature data in a regulated subtropical river // J. Hydrology: Regional Studies. 2025. V. 59. Article 102376. DOI: 10.1016/j.ejrh.2025.102376.
32. *Zakharova E.*, *Fenoglio-Marc L.*, *Nielsen K. et al.* Exploring the potential of Sentinel-3 and Sentinel-6 SAR altimetry measurements for discharge estimation: Case studies from the Rhine and Po rivers // J. Hydrology. 2026. V. 670. Article 135211. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2026.135211.

A method for spatio-temporal synthesis of high-frequency altimetric water level observations

M. V. Vrublevsky, E. A. Loupian, M. A. Burtsev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: vrublevsky@d902.iki.rssi.ru

The paper proposes a method for spatio-temporal synthesis of high-frequency altimetric water level observations (SHAWL) using altimetry data and a time-limited archive of *in situ* measurements. The method enables generation of daily water level time series at altimetry virtual stations (AVS), including those located in areas not covered by ground-based observations for periods with available *in situ* data, as well as reconstruction of water level time series with a temporal resolution exceeding the frequency of satellite revisit time for periods when *in situ* measurements are absent. Testing of the method on the Amur River demonstrates its effectiveness: a comparison of the time series obtained at 38 AVS with data from the nearest gauging stations showed an average Pearson correlation coefficient of 0.89 and a root mean square error of 0.65 m for the 2023–2025 period. The obtained estimates are comparable to other existing approaches cited in the paper. The application of this method resulted in an increase in the temporal resolution of water level series at any given AVS from 1–3 measurements per month to approximately one measurement every three days. In addition to being easily transferable to other rivers in Russia, the proposed method provides high-frequency water level data for river sections not covered by ground-based observations. This approach increases the number of areas with sufficient spatio-temporal coverage, expanding the data availability needed to forecast flood risks and serving as a mechanism for optimizing hydrological network maintenance costs.

Keywords: satellite altimetry, Sentinel-3, Sentinel-6, Vega-Hydro, water level, altimetry virtual stations, spatio-temporal resolution, Amur River, SHAWL method

Accepted: 18.08.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-136-152

References

1. Borshch S. V., Simonov Yu. A., Khristoforov A. V., Yumina N. M., Short-term forecasting of water levels on the Amur river, *Results of Testing New and Improved Technologies*, *Models and Methods of Hydrometeorological Forecasts*, 2017, V. 44, pp. 136–151 (in Russian).
2. Buzmakov S. V., Iukhno A. V., Ostashov A. A., The use of automated hydrological complexes for stage measurement on the Russian monitoring network, *The Bull. Irkutsk State University. Ser. Earth Sciences*, 2025, V. 52, pp. 3–18 (in Russian), DOI: 10.26516/2073-3402.2025.52.3.
3. Burtsev M. A., Uvarov I. A., Loupian E. A. et al., Vega-Hydro is a satellite service for hydrological tasks // *Materialy 22-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 22nd Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2024, p. 354 (in Russian), DOI: 10.21046/22DZZconf-2024a.
4. Vrublevsky M. V., Konstantinova A. M., Burtsev M. A., Interface for working with altimetry data for monitoring inland water bodies, *Materialy 21-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 21st Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2023, p. 76 (in Russian), DOI: 10.21046/20DZZconf-2023a.
5. Vuglinskii V. S., Cretaux J. F., Izmailova A. V. et al., Prospects of using satellite data for determining water levels in large lakes and reservoirs: A case study for Russian water bodies, *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2024, No. 1, pp. 5–16 (in Russian), DOI: 10.52002/0130-2906-2024-1-5-16.
6. Danilov-Danilyan V. I., Gelfan A. N., Motovilov Yu. G., Kalugin A. S., Catastrophic flood of 2013 in the Amur basin: Genesis, recurrence assessment, simulation results, *Water Resources*, 2014, V. 41, No. 2, pp. 115–125, DOI: 10.1134/S0097807814020055.
7. Zuev V. V., Korotkova E. M., Uymanova V. A., Kurakov S. A., Comparative analysis of hydrometeorological observations of Roshydromet and the autonomous measuring complex "Maima" in the Maima River basin (Gorny Altai), *Water Management of Russia*, 2018, No. 5, pp. 65–74 (in Russian).
8. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., 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, V. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
9. 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, V. 19, No. 1, pp. 87–103 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-87-103.
10. Mukhamedjanov I. D., Vrublevsky M. V., Loupian E. A., Umirzakov G. U., The potential for calibrating space hydrometric stations using altimetry data, using the example of Central Asian rivers // *Materialy 23-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 23rd Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2025, p. 309 (in Russian), DOI: 10.21046/23DZZconf-2025a.
11. Naumov V. A., On the calculation of travel time using correlation analysis (A case study of the Msta River), *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii: ehlektronnyi zhurnal*, 2020, V. 6, No. 4, pp. 24–31 (in Russian).
12. *Obzor sostoyaniya sistemy gidrologicheskikh nablyudenii*, *obrabotki dannykh i podgotovki informatsionnoi produktsii v 2024 godu* (Review of the state of the Russian national hydrological observation system, data processing and information production in 2024), Saint Petersburg: FGBU "GGI", 2025 (in Russian), 78 p.
13. Piotrovsky A. A., Zengina T. Yu., Water surface changes of Angarsky Sor due to natural and anthropogenic water level fluctuations in Lake Baikal, *Problemy regional'noi ehkologii*, 2018, No. 2, pp. 102–108 (in Russian), DOI: 10.24411/1728-323X-2018-12102.
14. Ponomarenko T. S., Ryzhakov A. N., The current state of the hydrological network of the Black Sea coast, *Puti povysheniya ehffektivnosti oroshaemogo zemledeliya*, 2023, No. 1(89), pp. 126–135 (in Russian).
15. Altenau E. H., Pavelsky T. M., Durand M. T. et al., The Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission River Database (SWORD): A global river network for satellite data products, *Water Resources Research*, 2021, V. 57, Iss. 7, Article e2021WR030054, DOI: 10.1029/2021WR030054.
16. Boergens E., Buhl S., Dettmering D. et al., Combination of multi-mission altimetry data along the Mekong River with spatio-temporal kriging, *J. Geodesy*, 2017, V. 91, pp. 519–534, DOI: 10.1007/s00190-016-0980-z.
17. Boergens E., Dettmering D., Seitz F., Observing water level extremes in the Mekong River Basin: the benefit of long-repeat orbit missions in a multi-mission satellite altimetry approach, *J. Hydrology*, 2019, V. 570, pp. 463–472, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.12.041.
18. Cerbelaud A., David C. H., Pavelsky T. et al., Satellite requirements to capture water propagation in Earth's rivers, *Reviews of Geophysics*, 2025, V. 63, Iss. 3, Article e2024RG000871, DOI: 10.1029/2024RG000871.

19. Fang C., Long D., Huang Q. et al., Improved water level retrieval in complex riverine environments: Sentinel-3 and Sentinel-6 altimetry over China's rivers, *Water Resources Research*, 2025, V. 61, Iss. 4, Article e2024WR039705, DOI: 10.1029/2024WR039705.
20. Halicki M., Schwatke C., Niedzielski T., The impact of the satellite ground track shift on the accuracy of altimetric measurements on rivers: A case study of the Sentinel-3 altimetry on the Odra/Oder River, *J. Hydrology*, 2022, V. 617, Pt. A, Article 128761, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128761.
21. Hossain F., Siddique-E-Akbor A. H., Mazumder L. C. et al., Proof of concept of an altimeter-based river forecasting system for transboundary flow inside Bangladesh, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, V. 7, Iss. 2, pp. 587–601, DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2283402.
22. Ke L., Xu J., Fan C. et al., Remote sensing reconstruction of long-term water level and storage variations of a poorly-gauged river in the Tibetan Plateau, *J. Hydrology: Regional Studies*, 2022, V. 40, Article 101020, DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101020.
23. Kittel C. M.M., Jiang L., Tøttrup C., Bauer-Gottwein P., Sentinel-3 radar altimetry for river monitoring — a catchment-scale evaluation of satellite water surface elevation from Sentinel-3A and Sentinel-3B, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, V. 25, No. 1, pp. 333–357, DOI: 10.5194/hess-25-333-2021.
24. Moriasi D. N., Arnold J. G., Van Liew M. W. et al., Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *Trans. ASABE*, 2007, V. 50, No. 3, pp. 885–900, DOI: 10.13031/2013.23153.
25. Nielsen K., Zakharova E., Tarpanelli A. et al., River levels from multi mission altimetry, a statistical approach, *Remote Sensing of Environment*, 2022, V. 270, Article 112876, DOI: 10.1016/j.rse.2021.112876.
26. Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. S., High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes, *Nature*, 2016, V. 540, No. 7633, pp. 418–422, DOI: 10.1038/nature20584.
27. Pham H. T., Marshall L., Johnson F., Sharma A., Deriving daily water levels from satellite altimetry and land surface temperature for sparsely gauged catchments: A case study for the Mekong River, *Remote Sensing of Environment*, 2018, V. 212, pp. 31–46, DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.034.
28. Roux E., Cauhope M., Bonnet M.-P. et al., Daily water stage estimated from satellite altimetric data for large river basin monitoring, *Hydrological Sciences J.*, 2008, V. 53, Iss. 1, pp. 81–99, DOI: 10.1623/hysj.53.1.81.
29. Schwatke C., Dettmering D., Bosch W., Seitz F., DAHITI — an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, V. 19, No. 10, pp. 4345–4364, DOI: 10.5194/hess-19-4345-2015.
30. Tourian M. J., Tarpanelli A., Elmi O. et al., Spatiotemporal densification of river water level time series by multimission satellite altimetry, *Water Resources Research*, 2016, V. 52, Iss. 2, pp. 1140–1159, DOI: 10.1002/2015WR017654.
31. Wang Q., Wang H., Estimating river water level using satellite altimetry and water surface temperature data in a regulated subtropical river, *J. Hydrology: Regional Studies*, 2025, V. 59, Article 102376, DOI: 10.1016/j.ejrh.2025.102376.
32. Zakharova E., Fenoglio-Marc L., Nielsen K. et al., Exploring the potential of Sentinel-3 and Sentinel-6 SAR altimetry measurements for discharge estimation: Case studies from the Rhine and Po rivers, *J. Hydrology*, 2026, V. 670, Article 135211, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2026.135211.