Научно-информационный центр
Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии
Центральной Азии

Научные записки
НИЦ МКВК

№35 2026

Л.В. Сычугова, И.И. Рузиев

Мониторинг уровня воды Западного Аральского моря и озера Судочье по данным спутниковой альтиметрии Sentinel-3



Мониторинг уровня воды Западного Аральского моря и озера Судочье по данным спутниковой альтиметрии Sentinel-3

Сычугова Л.В., Рузиев И.И.

Аннотация

Спутниковая альтиметрия является эффективным инструментом дистанционного мониторинга уровня воды в водоемах, особенно в районах с ограниченной сетью наземных гидрологических наблюдений. В работе рассматривается применение данных радиолокационного альтиметра Synthetic Aperture Radar Altimeter (SRAL) спутников Sentinel-3 для оценки уровня воды Западного Аральского моря и озера Судочье.

Для Западного Аральского моря проведена обработка альтиметрических данных по трем спутниковым трекам, проходящим в направлении движения спутника вдоль его орбитальной трассы. На первом этапе выполнялась пространственная выборка точек Sentinel-3, расположенных в пределах водной поверхности, после чего для каждой даты определялись статистические характеристики высотных значений. В качестве устойчивой оценки спутниковой высоты использовалось медианное значение. При сопоставлении учитывалось различие высотных систем: наземные данные гидрометеостанции Актумсук представлены в Балтийской системе высот (БСВ)[1], тогда как альтиметрические значения Sentinel-3 определяются относительно референц-эллипсоида WGS-84[2]. На основе сопоставления с данными гидрометеостанции Актумсук определялось вертикальное смещение между спутниковыми и наземными наблюдениями, после чего для каждого спутникового трека применялась постоянная поправка, рассчитанная как медиана индивидуальных смещений.

Для первого трека медианная поправка составила 24,91 м, средняя абсолютная ошибка после калибровки – 0,24 м, RMSE – 0,36 м. Для второго трека медианная поправка составила 27,967 м, а средняя абсолютная ошибка – 0,06 м при RMSE – 0,08 м.

---

[1] Высота точек определяется относительно уровней поверхности, совпадающей со среднем уровнем Балтийского моря в Финском заливе и проходящей через «нуль» Кронштадтского футштока. Эту систему высот называют Балтийской, а высоты точек – абсолютными.

[2] Система географических координат WGS 84 является международным стандартом для определения точного местоположения на Земле. Она используется во множестве глобальных навигационных систем, таких как GPS (Глобальная система позиционирования), ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) и других технологий. Система WGS 84 основывается на эллипсоиде, называемом эллипсоид Земли. Она использует меридиан Гринвича как нулевой меридиан и экватор как базовую линию для измерения широты и долготы.

Рассчитанная поправка была применена для оценки уровня воды в озере Судочье. Для приведения медианных значений Sentinel-3 к абсолютным отметкам использовалась вертикальная поправка 26,37 м расчетная отметка, определенная на основе результатов калибровки данных для Западного Аральского моря. Полученные для января–августа 2026 г. уровни воды составили 52,39–52,77 м БСВ.

Результаты показывают возможность применения данных Sentinel-3 для регулярного мониторинга динамики уровня воды водных объектов с использованием поправок, учитывающих вертикальное смещение спутниковых высотных данных.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, Sentinel-3, SRAL, уровень воды, Западное Аральское море, озеро Судочье, калибровка, радиолокационные измерения, дистанционное зондирование.

1. Введение

Изменение уровня воды является одним из основных показателей состояния водоемов. Колебания уровня отражают соотношение между притоком и потерями воды в водоеме, климатическими факторами, водопользованием и изменениями морфометрических характеристик водоема. Для слабо изученных водоемов получение непрерывных рядов наземных наблюдений часто затруднено. Из-за отсутствия наземных наблюдений существенное значение приобретают методы дистанционного зондирования Земли.

Спутниковая альтиметрия представляет собой метод дистанционного зондирования Земли, позволяющий определять высоту водной поверхности по данным радиолокационных измерений, выполняемых со спутника. Метод основан на определении расстояния между спутником и отражающей поверхностью воды и последующем расчете ее высотного положения относительно принятой геодезической системы отсчета. Регулярные альтиметрические измерения позволяют оценивать пространственно-временную изменчивость уровня водных объектов [1].

В работе [2] показано, что спутниковая альтиметрия является эффективным инструментом мониторинга уровня воды и позволяет получать регулярные данные о пространственно-временной изменчивости водной поверхности. Авторы рассматривают ряд крупных водных объектов, включая Аральское и Каспийское моря, озера Иссык-Куль и Чад. Повторяемость альтиметрических наблюдений в зависимости от орбитального цикла спутника составляла от 10 до 35 суток, а точность определения уровня варьировала от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров в зависимости от размера водного объекта и условий на его поверхности.

Особый интерес представляет исследование Аральского моря. На основе альтиметрических данных спутников TOPEX/Poseidon, GFO и Jason авторы показали возможность регулярного отслеживания изменения уровня Большого и Малого Арала. Для Большого Арала было установлено снижение уровня примерно с +53 м в 1960 г. до +30 м в 2004 г., при этом площадь водной поверхности сократилась с 67 000 до 16 000 км², а объем – с 1083 до около 100 км³. В период рассматриваемого исследования скорость снижения уровня Большого Арала составляла примерно 60–80 см/год.

Авторы работы [3] применили комплексный подход к исследованию динамики Аральского моря. На основе комбинированных данных спутниковой радарной и лазерной альтиметрии были оценены изменения уровня воды за период 2002–2011 гг. Полученные данные об уровне воды анализировались совместно с изменениями площади водной поверхности, определенными по спутниковым снимкам Landsat, что позволило комплексно оценить динамику показателей Аральского моря. По данным Landsat, к осени 2009 г. общая площадь водной поверхности Аральского моря сократилась на 62% по сравнению с весной 2002 г., при этом восточная часть сохранила лишь около 6% площади, зафиксированной весной 2002 г. По данным спутниковой альтиметрии, в Восточной части Аральского моря уровень воды снизился почти на 3,5 м за период 2002–2009 гг., в Западной части Аральского моря снижение составило около 4 м. Полученные результаты демонстрируют информативность совместного применения спутниковой альтиметрии и оптических данных дистанционного зондирования для количественной оценки изменений уровня воды Аральского моря.

В работе [4] разработан автоматизированный метод оценки уровня воды на основе данных Sentinel-1 SAR и цифровой модели рельефа. Метод апробирован на шести водохранилищах, расположенных в различных климатических и геоморфологических условиях в Эфиопии, Китае, Бразилии, Индии и Венесуэле, за период 2014–2018 гг. Полученные значения уровня воды хорошо воспроизводили сезонную динамику, при этом коэффициенты корреляции с эталонными данными составили 0,74–0,91, а RMSE – 1,16–5,25 м. Для трех из шести водохранилищ нормированная среднеквадратическая ошибка (pRMSE) не превышала 10% [4]. Результаты показали перспективность совместного использования данных Sentinel-1 и цифровых моделей рельефа для регулярного мониторинга уровня воды и формирования временных рядов в условиях ограниченной доступности наземных и альтиметрических наблюдений.

Результаты рассмотренных исследований подтверждают эффективность спутниковых методов для оценки и мониторинга изменений уровня воды в водоемах.

В нашем исследовании данный подход применяется для оценки уровня воды на отдельных водных объектах Южного Приаралья и Западного Аральского моря на основе данных Sentinel-3. Целью исследования является

разработка и апробация подхода к оценке уровня воды по данным спутниковой радиолокационной альтиметрии Sentinel-3 на примере водных экосистем Южного Приаралья и Западного Аральского моря.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Обработать данные Sentinel-3 по трем спутниковым трекам в пределах акватории Западного Аральского моря и определить медианные значения высоты водной поверхности;
- Определить вертикальные поправки по данным гидрометеостанции Актумсук и оценить точность полученных результатов для каждого спутникового трека;
- Определить пригодность отдельных спутниковых треков для последующего мониторинга уровня воды;
- Апробировать разработанный подход на озере Судочье и сформировать расчетный ряд абсолютных отметок уровня воды при отсутствии наземных высотных наблюдений.

2. Материалы и метод

2.1. Исходные данные

В работе использовались данные радиолокационного альтиметра SRAL спутников Sentinel-3. Исследования проводились для Западного Аральского моря и озера Судочье. Для Западного Аральского моря были обработаны данные за период с ноября 2025 г. по август 2026 г., для озера Судочье с января по август 2026 г.

Развитие современных спутниковых технологий позволило повысить пространственную детализацию данных, а также расширить возможности мониторинга поверхности суши и водных объектов. Одной из ключевых миссий такого типа является Sentinel-3, разработанная в рамках программы Copernicus Европейского космического агентства (ESA) и Европейской комиссии. Миссия включает два спутника Sentinel-3A и Sentinel-3B, оснащенных радиолокационным альтиметром SRAL. SRAL работает в Ku- и C-диапазонах и предназначен для определения высоты поверхности океанов, морского льда, рек и озер. При обработке в SAR-режиме пространственное разрешение измерений в направлении вдоль трека составляет около 300 м, что значительно повышает возможность получения данных над относительно небольшими озерами [5].

Временная характеристика альтиметрических наблюдений определяется орбитальной конфигурацией спутников. Для SRAL повторное прохождение над одной и той же трассой составляет около 27 суток для

одного спутника, а использование пары Sentinel-3A и Sentinel-3B позволяет повысить частоту наблюдений [6].

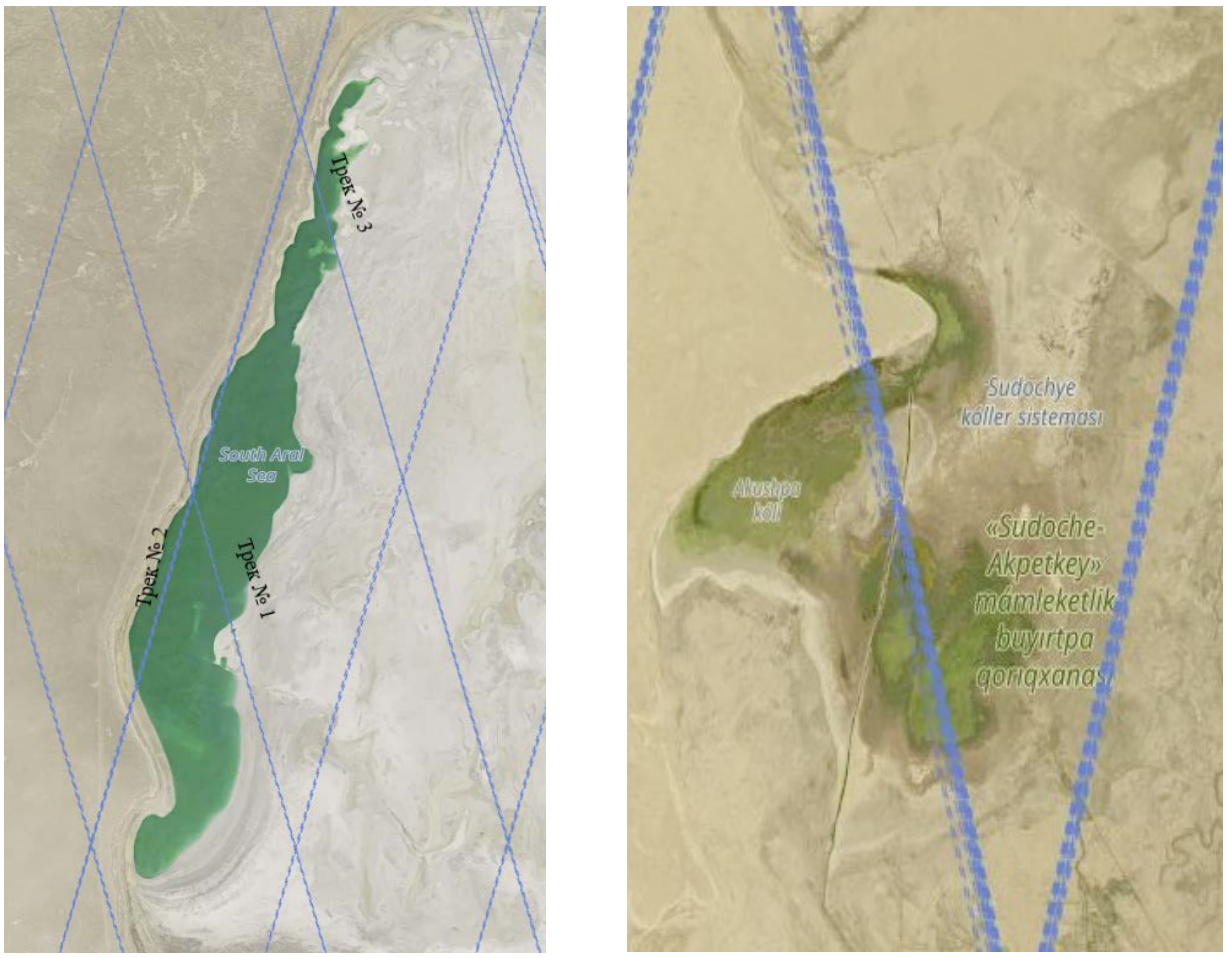
Главным преимуществом Sentinel-3 является использование режима управления отслеживания сигнала Open-Loop Tracking Command (OLTC), который специально адаптирован для наблюдений над сушей и водоемами. При обычном режиме слежения бортовой альтиметр использует предыдущие измерения для определения ожидаемого положения отраженного сигнала. Над сушей такой подход может приводить к потере сигнала из-за резких изменений рельефа и неоднородности отражающей поверхности. В режиме OLTC альтиметр заранее получает приблизительную информацию о высоте поверхности в заданной области из бортовых таблиц, основанных на цифровой модели рельефа, и соответствующим образом настраивает диапазон поиска сигнала. Это повышает вероятность устойчивого обнаружения отраженного сигнала над реками, озерами и водохранилищами [7].

Благодаря сочетанию SAR-режима, повышенного пространственного разрешения вдоль трека и режима OLTC расширяются возможности применения Sentinel-3 для мониторинга водных объектов. При этом точность определения уровня воды зависит от размеров водного объекта и выбранного алгоритма обработки.

В исследовании использовались наземные измерения уровня воды на гидрометеостанции Актумсук Западного Аральского моря за период с ноября 2025 г. по август 2026 г. Эти данные использовались для сопоставления с результатами спутниковых измерений и определения вертикальной поправки.

Обработка альтиметрических данных выполнялась в среде ArcGIS Pro. Для преобразования данных Sentinel-3 в пространственные объекты использовался инструмент Make NetCDF Feature Layer. Полученные альтиметрические точки далее сопоставлялись с границами водной поверхности исследуемого водоема.

Для Западного Аральского моря в пределах исследуемого водоема проходят три спутниковых трека Sentinel-3, по которым выполнялось сопоставление альтиметрических данных с наземными измерениями уровня воды на гидрометеостанция Актумсук. Количество альтиметрических точек вдоль первого трека составляло 253-254, второго – 202-211, третьего – 80-96 точек. Озеро Судочье пересекается одним спутниковым треком Sentinel-3, по которому количество наблюдаемых точек составляло 14-17.



Западное Аральское море *Озеро Судочье*

Рис.1. Спутниковые треки Sentinel-3, использованные для мониторинга уровня воды

2.2. Характеристика района исследования

Исследуемыми объектами являлись Западное Аральское море и озеро Судочье. Западное Аральское море представляет собой сохранившуюся часть Большого Аральского моря, современное состояние которой характеризуется значительной трансформацией водной поверхности. По данным дистанционного мониторинга НИЦ МКВК по спутниковым снимкам Landsat 8, 9 на 30 августа 2026 г. площадь водной поверхности Западной части Аральского моря составляла 184,28 тыс. га, площадь ветландов 340,27 тыс. га, а осушенной территории 36,80 тыс. га. В течение марта–августа 2026 г. площадь открытой водной поверхности сократилась с 185,49 до 184,28 тыс. га, площадь ветландов уменьшилась с 343,19 до 340,27 тыс. га, а площадь осушенной территории увеличилась с 32,67 до 36,80 тыс. га [8].

Озеро Судочье расположено в западной части дельты Амударьи и относится к водоемам Южного Приаралья. Оно является одним из крупнейших водно-болотных комплексов региона и имеет важное значение для сохранения водно-болотных экосистем. По данным дистанционного мониторинга НИЦ МКВК по спутниковым снимкам Landsat 8, 9 на 30 августа 2026 г., площадь водной поверхности озера Судочье составляла 3,25 тыс. га, площадь ветландов 7,40 тыс. га, а осушенной территории 62,05 тыс. га. В период с марта по август 2026 г. площадь открытой водной поверхности сократилась с 8,20 до 3,25 тыс. га, площадь ветландов с 23,17 до 7,40 тыс. га, при одновременном увеличении осушенной территории с 41,33 до 62,05 тыс. га [8].

Следует отметить различие в спутниковых данных, используемых для характеристики исследуемых водных объектов и определения уровня воды. Приведенные выше данные Landsat 8, 9 относятся к оптической спутниковой съемке и используются для определения пространственных характеристик водных объектов. Такие данные позволяют выявлять границы водной поверхности и оценивать ее пространственные изменения, но не обеспечивают непосредственного определения высотной отметки уровня воды. В отличие от оптической съемки, альтиметрические данные характеризуют высотное положение водной поверхности и позволяют получать значения ее уровня относительно референц-эллипсоида. Таким образом, Landsat и Sentinel-3 предоставляют различные характеристики одного и того же водного объекта: данные Landsat используются для оценки пространственных изменений водной поверхности, тогда как данные Sentinel-3 используются для оценки вертикальных изменений уровня воды.

2.3. Пространственная выборка альтиметрических точек

Период наземных и спутниковых наблюдений охватывают период с ноября 2025 г. по август 2026 г. В большинстве случаев разница между датой измерения на гидрометеостанции Актумсук и датой спутникового наблюдения составляла 1-2 дня, в отдельных случаях до 3 дней. Полное совпадение дат наблюдений отмечено в трех случаях 30.11.2025, 15.06.2026 и 31.07.2026 (Таблица 1). В исследовании использовались ближайшие по времени доступные наблюдения.

После преобразования исходных данных Sentinel-3 в пространственные объекты выполнялось пространственное выделение точек, расположенных в пределах исследуемой водной поверхности. Такой подход позволил исключить точки, находящиеся за пределами водоемов и сформировать для каждой даты набор альтиметрических наблюдений, характеризующих поверхность воды.

Для каждой даты рассчитывались следующие статистические характеристики:

1. Минимальное значение высоты
2. Максимальное значение высоты
3. Среднее значение
4. Медианное значение
5. Стандартное отклонение
6. Количество отобранных точек.

В качестве основной характеристики высоты водной поверхности использовалось медианное значение Sentinel-3. Выбор медианы был обусловлен тем, что набор измерений Sentinel-3 может содержать отдельные аномальные значения, связанные с влиянием суши, особенностями отражения радиолокационного сигнала и другими факторами. Медиана является более устойчивой характеристикой центрального значения выборки по сравнению со средним арифметическим [9].

2.4. Определение поправки для Западного Аральского моря

В настоящем исследовании под калибровкой понимается определение вертикальной поправки, необходимой для приведения высотных значений Sentinel-3 к БСВ, в которой представлены наземные наблюдения. Необходимость такой поправки обусловлена различием вертикальных систем отсчета: альтиметрические данные Sentinel-3 представлены относительно референц-эллипсоида WGS-84 [10], тогда как наземные измерения уровня воды на гидрометеостанции Актумсук представлены в БСВ.

Для каждой даты наблюдения рассчитывалась индивидуальная разность между уровнем по данным гидрометеостанции Актумсук и медианным уровнем Sentinel-3:

$$\Delta H_i = H_{\text{гидропост},i} - H_{S3,i}$$

Полученные разности характеризуют вертикальное смещение между двумя наборами данных.

Полученное для каждой даты вертикальное смещение использовалось для корректировки соответствующего медианного значения Sentinel-3. Откалиброванная отметка Sentinel-3 для каждой даты определялась путем прибавления рассчитанного вертикального смещения к медиане спутниковых измерений:

$$H_{cal} = H_{S3} + \Delta H_i$$

2.5. Оценка точности калибровки

Для оценки точности откалиброванных спутниковых значений с данными гидрометеостанции Актумсук рассчитывались систематическая ошибка, средняя абсолютная ошибка, среднеквадратичная ошибка, максимальная абсолютная ошибка (MaxAE) и стандартное отклонение ошибок [11]:

1. Bias – систематическая ошибка:

$$Bias = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(H_{\text{гидропост},i} - H_{cal,i}\right)$$

2. MAE – средняя абсолютная ошибка:

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|H_{\text{гидропост},i} - H_{cal,i}\right|$$

3. RMSE – среднеквадратичная ошибка:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(H_{\text{гидропост},i} - H_{cal,i}\right)^2}$$

3. Результаты

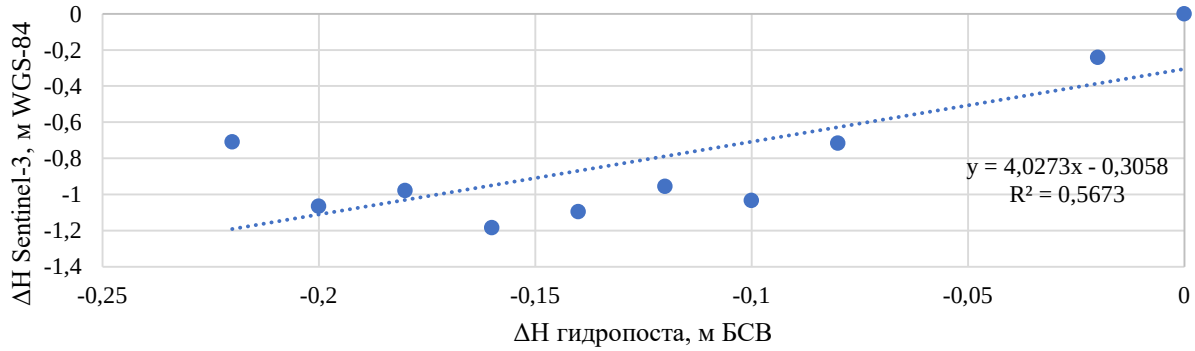
3.1. Калибровка и оценка точности данных Sentinel-3 для Западного Аральского моря

Обработка данных Sentinel-3 для Западного Аральского моря проводилась по трем спутниковым трекам. Для каждого трека определялись медианные высоты водной поверхности и соответствующие им значения уровня по данным гидрометеостанции Актумсук. Для оценки

согласованности спутниковых и наземных наблюдений также анализировались линейные зависимости между их значениями.

Для первого трека вертикальные смещения изменялись от 24,08 до 25,10 м. Среднее значение составило 24,77 м, медианное – 24,91 м. Диапазон значений составил 1,02 м, стандартное отклонение около 0,35 м.

Рис. 2. Зависимость изменений уровня воды по данным Sentinel-3 и гидропоста, 1-й пролет

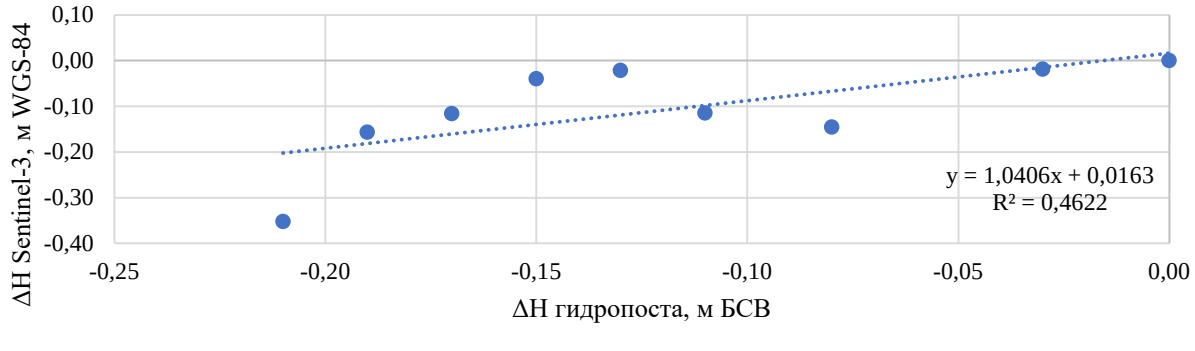


При применении медианной поправки 24,91 м средняя абсолютная ошибка составила 0,24 м, RMSE – 0,37 м, а максимальная абсолютная ошибка – 0,84 м. Стандартное отклонение ошибок составило 0,34 м.

Для первого трека наибольшие расхождения после применения постоянной медианной поправки наблюдались в начале рассматриваемого периода, тогда как для большинства последующих наблюдений различия между спутниковыми и наземными значениями были меньше.

Для второго трека вертикальные смещения изменялись от 27,87 до 28,12 м, при среднем значении 27,97 м, медиане 27,97 м и стандартном отклонении около 0,08 м.

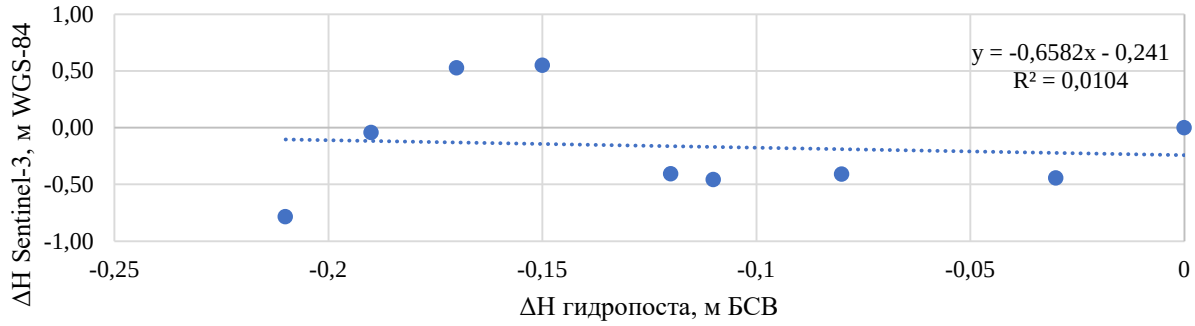
Рис. 3. Зависимость изменений уровня воды по данным Sentinel-3 и гидропоста, 2-й пролет



После применения поправки 27,97 м средняя абсолютная ошибка составила 0,06 м, RMSE – 0,08 м, максимальная абсолютная ошибка – 0,15 м. Полученные значения указывают на высокую согласованность данных второго спутникового трека с наблюдениями гидропоста.

Для третьего трека коэффициент детерминации при линейной регрессии между спутниковыми и наземными значениями составил R^2=0,0104, что свидетельствует об отсутствии выраженной линейной зависимости между рассматриваемыми рядами.

Рис. 4. Зависимость изменений уровня воды по данным Sentinel-3 и гидропоста, 3-й пролет



Средняя абсолютная ошибка составила 0,37 м, а максимальная – 0,69 м. При этом на отдельных датах величина ошибки превышала 0,65 м. Таким образом, третий трек не был использован для определения вертикальной поправки. Полученный результат показывает необходимость отдельной оценки каждого спутникового трека перед использованием его данных для количественного мониторинга уровня воды.

В таблице 1 представлены результаты сопоставления наземных измерений уровня воды с медианными значениями, полученными по данным Sentinel-3 для Западного Аральского моря. Для каждой даты приведены отметка уровня воды по гидрометеостанции Актумсук, медианное значение Sentinel-3, рассчитанная поправка между наземными и спутниковыми измерениями, а также откалиброванная отметка уровня воды. Среднее значение рассчитанной поправки по двум спутниковым трекам составило 26,37 м.

Таблица 1.

Результаты сопоставления наземных наблюдений уровня воды на гидрометеостанции Актумсук с данными Sentinel-3 для Западного Аральского моря

№	Дата гидропоста	Отметка воды по гидропосту H, м БСВ	Дата Sentinel-3	Мониторинг - Медиана, Sentinel-3 M, м WGS-84	Поправка, dH = H - M, м	Откалиброванная отметка Sentinel-3, м БСВ
1	05.11.2025	18.21	03.11.2025	-5.8681	24.08	19.04515
2	10.11.2025	18.21	11.11.2025	-9.768	27.98	18.199
3	**30.11.2025**	**18.19**	**30.11.2025**	**-6.1036**	**24.29**	**18.80965**
4	10.12.2025	18.18	08.12.2025	-9.787	27.97	18.18
5	20.02.2026	18.13	19.02.2026	-6.583	24.71	18.33025
6	25.02.2026	18.13	27.02.2026	-9.9135	28.04	18.2068
7	20.03.2026	18.11	18.03.2026	-6.90065	25.01	18.20115
8	25.03.2026	18.1	26.03.2026	-9.8829	27.98	18.0841
9	15.04.2026	18.09	14.04.2026	-6.82325	24.91	18.09
10	20.04.2026	18.08	22.04.2026	-9.78945	27.87	18.17755
11	10.05.2026	18.07	11.05.2026	-6.962	25.03	17.95125
12	20.05.2026	18.06	19.05.2026	-9.80785	27.87	18.15915
13	05.06.2026	18.05	07.06.2026	-7.0518	25.10	17.86145
14	**15.06.2026**	**18.04**	**15.06.2026**	**-9.8846**	**27.92**	**18.0824**
15	05.07.2026	18.03	04.07.2026	-6.84605	24.88	18.0672
16	10.07.2026	18.02	12.07.2026	-9.92515	27.95	18.04185
17	**31.07.2026**	**18.01**	**31.07.2026**	**-6.93275**	**24.94**	**17.9805**
18	10.08.2026	18	08.08.2026	-10.1203	28.12	17.8467
Среднее		**18.10**		**-8.27**	**26.37**	

3.2. Апробация метода оценки уровня воды по данным Sentinel-3 на озере Судочье

Разработанный подход для Западного Аральского моря был апробирован на озере Судочье для оценки возможности применения этого метода к другому водному объекту.

В пределах водной поверхности для каждой даты были отобраны альтиметрические точки Sentinel-3. Для каждой даты определялись минимальное и максимальное значения, среднее, медианное значение и стандартное отклонение.

В отличие от Западного Аральского моря, для озера Судочье отсутствовали наземные данные гидропоста с высотными отметками уровня воды, которые могли бы непосредственно использоваться для определения

вертикального смещения спутниковых данных. Поэтому величина 26,37 м, полученная как среднее значение поправок, определенных по двум трекам для Западного Аральского моря, была использована для формирования расчетного ряда абсолютных отметок уровня воды в озере Судочье.

Для каждой даты расчетный уровень воды определялся по формуле:

$$H = H_{S3,median} + 26.37$$

В таблице 2 представлены результаты расчета абсолютных отметок уровня воды по данным Sentinel-3 для озера Судочье. За период с января по август 2026 г. медианные значения спутниковых высот изменялись от 26,02 до 26,40 м.

Таблица 2.

Расчетные абсолютные отметки уровня воды озера Судочье по данным Sentinel-3

№	Даты Sentinel-3	Мониторинг – Медиана, Sentinel-3, м WGS-84	Откалиброванная отметка Sentinel-3, м БСВ
1	09.01.2026	26,0774	52,4474
2	05.02.2026	26,093	52,463
3	04.03.2026	26,07165	52,44165
4	31.03.2026	26,20775	52,57775
5	27.04.2026	26,399	52,769
6	24.05.2026	26,3507	52,7207
7	20.06.2026	26,21005	52,58005
8	17.07.2026	26,08435	52,45435
9	13.08.2026	26,0176	52,3876

Стандартное отклонение отдельных наборов точек находилось в диапазоне 0,02-0,14 м, что характеризует степень разброса альтиметрических значений в пределах водной поверхности для отдельных дат.

Таким образом, максимальное расчетное значение уровня воды за рассматриваемый период составило 52,77 м БСВ (27 апреля 2026 г.). Минимальное значение уровня воды наблюдалось 13 августа 2026 г. и составило 52,39 м БСВ. Общий диапазон изменения составил около 0,38 м.

4. Анализ полученных результатов

Полученные результаты подтверждают возможность применения Sentinel-3 для оценки динамики уровня воды Западного Аральского моря и озера Судочье.

Для первого трека медианная вертикальная поправка составила 24,91 м, при диапазоне изменения вертикального смещения 1,02 м. При этом после применения постоянной поправки наблюдались более высокие значения ошибок. Для второго трека диапазон изменений значений был меньше 0,25 м, а стандартное отклонение составило 0,08 м. Соответственно, и ошибки после калибровки были ниже.

Такая разница показывает, что применение Sentinel-3 для мониторинга уровня воды не следует рассматривать как полностью однородное для всех спутниковых треков. Конкретный трек может характеризоваться различной геометрией пересечения водной поверхности, различной близостью к береговой линии и разными условиями радиолокационного отражения.

Использование медианного значения в качестве характеристики уровня позволяет уменьшить влияние отдельных аномальных значений. Особенно это важно для водоемов со сложной конфигурацией береговой линии, где часть альтиметрических измерений может находиться вблизи перехода от воды к суше.

Для Западного Аральского моря наличие наземных наблюдений позволило непосредственно определить вертикальное смещение и оценить качество калибровки. В данном случае поправка была определена на основе сопоставления спутниковых и наземных данных.

Для озера Судочье ситуация отличается. Отсутствие наземных данных с высотными отметками уровня не позволяет выполнить независимую калибровку так же, как для Западного Аральского моря. Поэтому значение 26,37 м использовалось как расчетная вертикальная поправка, позволяющая перевести медианные спутниковые значения в ряд абсолютных отметок.

Для дополнительной оценки достоверности расчетных абсолютных отметок уровня воды озера Судочье, полученных по данным спутниковой альтиметрии Sentinel-3, выполнено сопоставление с независимыми

опубликованными данными. Полученный в данном исследовании диапазон уровня воды за период наблюдений составил 52,39–52,77 м БСВ. В справочном источнике [12] указана проектная отметка озера Судочье 53,0 м БСВ. Полученный по данным Sentinel-3 диапазон находится ниже данной отметки на 0,23–0,61 м, что соответствует близкому порядку абсолютных значений.

Более детальное сопоставление возможно с исследованием в работе [13], в котором уровень озера Судочье за 2008–2021 гг. определялся по данным спутниковой альтиметрии G-REALM и сопоставлялся с наземными наблюдениями. По данным альтиметрии средний уровень составил 52,97 м БСВ, максимальный – 53,35 м БСВ, минимальный – 52,22 м БСВ. Для наземных наблюдений соответствующие значения составили 51,64, 52,31 и 50,49 м БСВ.

Расчетный диапазон, полученный в данном исследовании по Sentinel-3 (52,39–52,77 м БСВ), находится в пределах диапазона ранее полученных спутниковых значений G-REALM (52,22–53,35 м БСВ). По сравнению с максимальной отметкой наземных наблюдений из работы [13] (52,31 м) полученные нами значения выше на 0,08–0,46 м. При этом необходимо учитывать, что эти данные относятся к другому периоду наблюдений 2008-2021. Авторы исследования G-REALM также отмечали расхождение спутниковых и наземных рядов и выполняли их корректировку.

Следует также учитывать, что в данном исследовании для озера Судочье отсутствовали наземные наблюдения с высотными отметками, поэтому поправка 26,37 м была использована как расчетная вертикальная поправка, перенесенная из калибровки Sentinel-3 по Западному Аральскому морю. В связи с этим полученный ряд 52,39–52,77 м БСВ следует рассматривать как расчетный ряд абсолютных отметок. В дальнейшем планируется исследовать причины формирования такого значительного смещения между отметками Sentinel-3 и наземными измерениями, а также оценить влияние особенностей обработки альтиметрических данных и характеристик спутникового трека. Для дополнительной проверки полученной поправки и повышения достоверности абсолютных отметок планируется дополнительно использовать данные других альтиметрических спутников.

В целом сопоставление с опубликованными справочными и спутниковыми данными показывает, что полученные по Sentinel-3 значения находятся в сопоставимом диапазоне абсолютных отметок уровня озера Судочье. Для повышения точности абсолютной привязки в дальнейшем необходимы более продолжительные спутниковые ряды и их сопоставление с наземными наблюдениями.

5. Заключение

В работе разработан и апробирован подход к обработке данных спутниковой альтиметрии Sentinel-3 для мониторинга уровня воды водоемов на примере Западного Аральского моря и озера Судочье.

Для Западного Аральского моря определены вертикальные поправки 24,91 и 27,97 м для двух спутниковых треков. Средняя абсолютная ошибка составила соответственно 0,24 и 0,06 м. Третий трек не рекомендован для формирования ряда уровня без дополнительной обработки из-за более высокой ошибки (MAE 0,37 м) и отсутствия выраженной линейной зависимости с наземными наблюдениями.

Полученные результаты показывают, что качество альтиметрических данных может существенно различаться для разных спутниковых треков. Поэтому перед формированием длительного временного ряда необходимо проводить отдельную оценку каждого используемого трека.

Аналогичный метод был применен для озера Судочье. Полученный расчетный ряд уровня воды озера Судочье за январь–август 2026 г. составил 52,39-52,77 м БСВ. Максимальный уровень был получен 27 апреля 2026 г., минимальный – 13 августа 2026 г. В целом наблюдается повышение уровня в весенний период с последующим снижением в летние месяцы.

Научная новизна исследования заключается в получении и сопоставлении современных альтиметрических наблюдений Sentinel-3 для Западного Аральского моря с наземными измерениями гидрометеостанции Актумсук с раздельной оценкой трех спутниковых треков. В отличие от исследований, основанных преимущественно на готовых многолетних рядах спутниковой альтиметрии, в настоящей работе выполнена непосредственная обработка альтиметрических точек Sentinel-3 в пределах водной поверхности исследуемого объекта и установлена существенная неоднородность результатов между отдельными треками. Для двух пригодных треков определены индивидуальные вертикальные поправки и количественно оценена точность их применения, что позволило выделить трек с более устойчивыми результатами.

Дополнительным результатом является применение полученной по Западному Аральскому морю вертикальной поправки для формирования расчетного ряда абсолютных отметок уровня воды озера Судочье по альтиметрическим данным Sentinel-3. При отсутствии наземных наблюдений полученный ряд следует рассматривать как расчетный, сформированный на основе вертикальной поправки, определенной по ближайшему объекту с наземными наблюдениями.

Полученные результаты могут быть использованы НИЦ МКВК для организации регулярного мониторинга уровня воды Западного Аральского моря и озера Судочье и последующего накопления сопоставимых временных

рядов. Регулярное получение данных об уровне воды позволяет фиксировать изменения состояния водных объектов и сопоставлять их с изменениями водной поверхности. Накопление непрерывных временных рядов создает основу для анализа долгосрочных изменений уровня воды и повышения информативности мониторинга водных объектов Южного Приаралья.

Для Западного Аральского моря применение откалиброванных данных Sentinel-3 позволяет получать сопоставимые значения уровня воды по спутниковым наблюдениям, а для озера Судочье разработанный подход может использоваться для формирования расчетного ряда в условиях отсутствия постоянных наземных высотных наблюдений. Это расширяет возможности регулярного наблюдения за водными объектами, для которых проведение наземных измерений ограничено.

Список литературы

1. С.А. Лебедев, Спутниковая альтиметрия в науках о Земле, Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 33–49

2. J.-F. Crétaux, C. Birkett, Lake studies from satellite radar altimetry, C. R. Geoscience 338. 2006. 1098-1112

3. Singh, A., F. Seitz, C. Schwatke, Inter-annual water storage changes in the Aral Sea from multimission satellite altimetry, optical remote sensing, and GRACE satellite gravimetry, Remote Sensing of Environment, 123. 2012. 187-195. DOI: 10.1016/j.rse.2012.01.001

4. Edward Park, Eder Merino, Quinn W. Lewis, Eric O. Lindsey, and Xiankun Yang, A Pathway to the Automated Global Assessment of Water Level in Reservoirs with Synthetic Aperture Radar (SAR) Remote Sens, 12. 2020. 1353. doi:10.3390/rs12081353

5. The European Space Agency // Instruments // [Электронный ресурс]. Режим доступа https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-3/Instruments?utm_source

6. The European Space Agency // Facts and Figures // [Электронный ресурс]. Режим доступа https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-3/Facts_and_figures?utm_source

7. Altimeter Open Loop Tracking Command for Hydrology // Principles of altimetry over inland waters // [Электронный ресурс]. Режим доступа https://www.altimetry-hydro.eu/learnmore

8. CAWater-Info // База знаний // Аральское море // Мониторинг Аральского моря и Приаралья [Электронный ресурс]. Режим доступа https://www.cawater-info.net/aral/data/pdf/south_prearalie_monitoring_august_2026_ru.pdf

9. Openstax // Statistics // 2.5 Measures of the Center of the Data // [Электронный ресурс]. Режим доступа https://openstax.org/books/statistics/pages/2-5-measures-of-the-center-of-the-data?utm_source

10. Sentinel-3 SRAL/MWR Land User Handbook, Issue 1.2, 08/01/2024

11. Sexton, JO, M. Feng, S. Channan, X-P. Song, D-H. Kim, P. Noojipady, D. Song, C. Huanga, A. Annand, K. Collins, E. F. Vermote, R. Wolfe, J. Masek, J. R. G. Townshend, Earth Science Data Records of Global Forest Cover and Change, User Guide, Global Land Cover Facility, 2016. 38

12. Южное Приаралье – новые перспективы, Проект «Наука для мира», под редакцией проф. В.А. Духовного и инж. Ю. де Шуттера. Ташкент, 2003

13. Ф. Я. Артыкова, С. Б. Калабаев, Перспективы использования спутниковых данных для определения уровня воды в крупных озёрах, Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 4. С. 251–259