

Мониторинг динамики береговой линии Каспийского моря по спутниковым данным высокого разрешения

Татьяна Дедова¹, Лариса Балакай¹, Нурия Баширова¹, Берик Искаков¹, Айбек Мерекеев^{1*}, Гаухар Кайранбаева²

¹Институт ионосферы, Алматы, Казахстан; dedova@ionos.kz, balakay@ionois.kz, bashyrova@ionos.kz, berikiskakov@ionos.kz, aibek.merekeyev@ionos.kz

²Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; gaukhar.kairanbayeva@kaznu.edu.kz

*Корреспонденция: aibek.merekeyev@ionos.kz

Цитирование: Дедова, Т., Балакай, Л., Баширова, Н., Искаков, Б., Мерекеев, А., Кайранбаева, Г. (2026). Мониторинг динамики береговой линии Каспийского моря по спутниковым данным высокого разрешения. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География, 155(2), 119-135. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-155-2-119-135>

Академический редактор:
Н.Е. Рамазанова

Поступила: 20.04.2026

Исправлена: 22.05.2026

Принята: 7.06.2026

Опубликована: 30.06.2026



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Аннотация: В статье представлены результаты комплексного мониторинга динамики береговой линии северо-восточной части Каспийского моря за период с 2017 по 2024 год. Исследование базируется на анализе спутниковых снимков высокого пространственного разрешения (PlanetScope) и данных многомиссионной альтиметрии (DANITI). Применение автоматизированного алгоритма обработки космической съемки, включающего расчет спектральных индексов NDVI и NDWI для выделения границы «суша-вода» и последующую векторизацию береговой линии, позволило с высокой точностью зафиксировать масштабную регрессию моря, выраженную в сокращении площади водного зеркала исследуемой территории на 5 416 км² и падении его уровня на 1.2 м. Особое внимание уделено выявленной корреляции между гидрологическими показателями и морфометрическими изменениями побережья. Установлено, что средний коэффициент чувствительности площади к изменению уровня составляет 45.5 км²/см, при этом в 2024 году зафиксировано ускорение темпов осушения мелководных участков. Результаты работы подтверждают высокую эффективность совместного использования спутниковой альтиметрии и данных ДЗЗ высокого разрешения для получения достоверных количественных характеристик состояния акваторий в условиях интенсивных климатических изменений. Полученные данные могут быть использованы при планировании хозяйственной деятельности и разработке мер по адаптации прибрежных регионов к продолжающемуся падению уровня моря.

Ключевые слова: Каспийское море; береговая линия; снимки высокого разрешения PlanetScope; спутниковая альтиметрия; изменение уровня моря.

1. Введение

Каспийское море, являясь крупнейшим замкнутым водоемом планеты, представляет собой уникальный природный объект для исследования динамики береговой линии, обусловленной

комплексом гидрологических и климатических факторов, включая сток рек Волги, Урала и испарение (Akbari et al., 2020; Duan et al., 2025, Kostianoy et al., 2025). Главными составляющими приходной части водного баланса северной части моря выступает речной сток, где около 80% всего притока обеспечивает р. Волга, а вклад р. Урал составляет порядка 5% (De Mora et al., 2004). Регулирование русел данных рек водохранилищами приводит к долгосрочному перераспределению и снижению объемов паводкового стока. Однако основными причинами сокращения площади водного зеркала Каспийского моря выступают современные климатические изменения. Снижение атмосферных осадков наряду с ростом температуры приземного слоя воздуха и поверхностных вод обуславливает увеличение испарения с морской поверхности, что вкупе с изменением подземного стока приводит к нарушению равновесия внутриводоемного баланса (Samant & Prange, 2023). В последние десятилетия здесь фиксируется устойчивая тенденция к снижению уровня, что приводит к заметной перестройке береговой зоны (Chen et al., 2023). Из-за снижения уровня моря изменяются прибрежные экосистемы, включая дельтовые ландшафты и мелководные нерестовые зоны осетровых видов рыбы, сокращаются рыбные ресурсы и объемы рыболовства, а также возрастают риски для судоходства (Court et al., 2025). Наиболее отчетливо данные процессы проявляются в северо-восточной части акватории, где из-за крайне пологого рельефа дна и обширных мелководий даже незначительные изменения уровня приводят к смещению береговой линии на расстояния, достигающие нескольких километров (Akhmetov & Malakhov, 2026).

В подобных условиях возрастает потребность в методах мониторинга, способных обеспечивать как высокую точность, так и оперативность. Этим условиям отвечают методы дистанционного зондирования Земли, позволяющие получать регулярные и сопоставимые во времени оценки положения береговой линии. Для проведения космического мониторинга береговой линии в научных исследованиях активно используются растительный и водные спектральные индексы (Chowdhury & Yang, 2025; Xu, 2006), которые зарекомендовали себя как эффективные инструменты для выделения границы «суша-вода» и анализа ее изменений. Их применение подтверждено на различных типах водных объектов – от речных дельт до морских побережий (Christofi et al., 2025; Vos et al., 2023). В исследованиях, ориентированных на условия сложной прибрежной морфологии и мелководия Северного Каспия, показано, что среди водных индексов наибольшую эффективность демонстрирует модифицированный индекс MNDWI, обеспечивающий более надежное выделение водной поверхности по сравнению с классическими индексами за счет подавления сигнала от суши и техногенных объектов (Duan et al., 2025). В исследовании (Meirambek et al., 2024) проведена проверка адекватности методик дешифрирования береговой линии с использованием различных водных индексов (NDWI, NDMI, MNDWI, WRI, NDVI), которая показала наибольшую эффективность индекса MNDWI для выделения водной поверхности и анализа изменений прибрежных территорий Каспия. В работе, посвященной северо-восточной части Каспийского моря, методы обработки спутниковых снимков позволяют не только фиксировать текущее положение уреза воды, но и моделировать зоны потенциального затопления и осушения, что критически важно для оценки экологических рисков в этом мелководном регионе (Kamza et al., 2023).

Несмотря на широкое распространение данных дистанционного зондирования Земли, снимки со средним пространственным разрешением, такие как Landsat и Sentinel-2, не всегда позволяют корректно анализировать сложную конфигурацию берегов. В таких случаях применяются дополнительные подходы, направленные на достижение субпиксельной точности (Palomar-Vázquez et al., 2023). Это особенно актуально для участков с изрезанной линией побережья и наличием мелких островов или зон мелководья.

Существенный вклад в развитие методов мониторинга береговой линии связан с использованием данных высокого пространственного разрешения. В частности, спутниковая группировка PlanetScope обеспечивает регулярную съемку с разрешением порядка 3–5 м, что

позволяет значительно улучшить точность и детальность выделения границы «суша-вода». Такие данные все чаще применяются для изучения береговых процессов, включая оценку эрозии, аккумуляции и динамики мелководных зон, например, исследования Holzner et al., (2025); Tan et al. (2026).

В рамках настоящего исследования описываются результаты высокодетального мониторинга береговой линии Каспийского моря с использованием данных Planet Labs. Использование снимков данной группировки позволяет получить более детализированное представление береговой линии северо-восточной части Каспийского моря. Для повышения достоверности интерпретации полученных результатов дополнительно производится сопоставление с данными спутниковой альтиметрии (база DANITI), что дает возможность связать геометрические характеристики береговой линии с абсолютными значениями уровня моря.

Цель исследования заключается в количественной оценке изменений береговой линии северо-восточной части Каспийского моря за период 2017–2024 гг, как наиболее динамично изменяющейся зоны. В рамках работы решаются задачи формирования многолетнего архива спутниковых изображений, их тематической обработки с использованием индексов NDVI и NDWI, последующей векторизации береговой линии и анализа ее пространственно-временной динамики, а также валидация полученных результатов с данными уровня моря.

Научная новизна исследования состоит в объединении данных высокодетализированной спутниковой съемки и спутниковой альтиметрии для анализа динамики береговой линии в условиях мелководной акватории. Практическая значимость исследования связана с возможностью использования полученных результатов для экологического мониторинга, оценки последствий снижения уровня Каспийского моря и разработки обоснованных решений в области управления прибрежными территориями.

2. Материалы и методы

2.1. Сбор изображений высокого пространственного разрешения исследуемой территории

В рамках исследования для мониторинга состояния побережья северо-восточной части Каспийского моря были использованы данные оптических спутников Planet Scope американской компания Planet Labs, специализирующейся на разработке и эксплуатации группировок малых спутников дистанционного зондирования Земли (Planet Labs, 2026). Для прибрежной акватории Каспийского моря применялись данные с пространственным разрешением изображений 3–5 м, при этом спектральный состав данных варьировался от 4 (2017–2021 гг.) до 8 (с 2022 г.) каналов в зависимости от года съемки, что обеспечивало возможность решения как стандартных задач дешифрирования, так и применения дополнительных спектральных индексов.

Выборка данных осуществлялась на основе строгих критериев качества. Основными параметрами фильтрации служили уровень облачности (не более 10–20 %), угол отклонения от надира, высота Солнца над горизонтом, что позволило минимизировать геометрические и атмосферные искажения. Для исследования отбирались продукты уровня обработки Surface Reflectance (Level 3B), прошедшие процедуру радиометрической калибровки, геометрической ортотрансформации и атмосферной коррекции. Предварительный визуальный контроль и анализ метаданных (Рисунок 1) позволили исключить снимки с дефектами изображения, обеспечив в последующем высокую достоверность векторизации береговой линии.

Ретроспективный анализ состояния береговой зоны Каспийского моря охватывал временной интервал с 2017 по 2024 год. Выбор данного временного интервала обусловлен доступностью спутниковых данных высокого пространственного разрешения с обеспечением стабильного покрытия исследуемой территории. Периодичность орбитальной съемки позволила сформировать репрезентативную выборку данных для весеннего, летнего и осеннего сезонов. Суммарный объем обработанной видеoinформации превысил 1,5 ТБ, что

объясняется значительным пространственным разрешением снимков, обширностью исследуемой акватории и длительностью мониторингового периода.

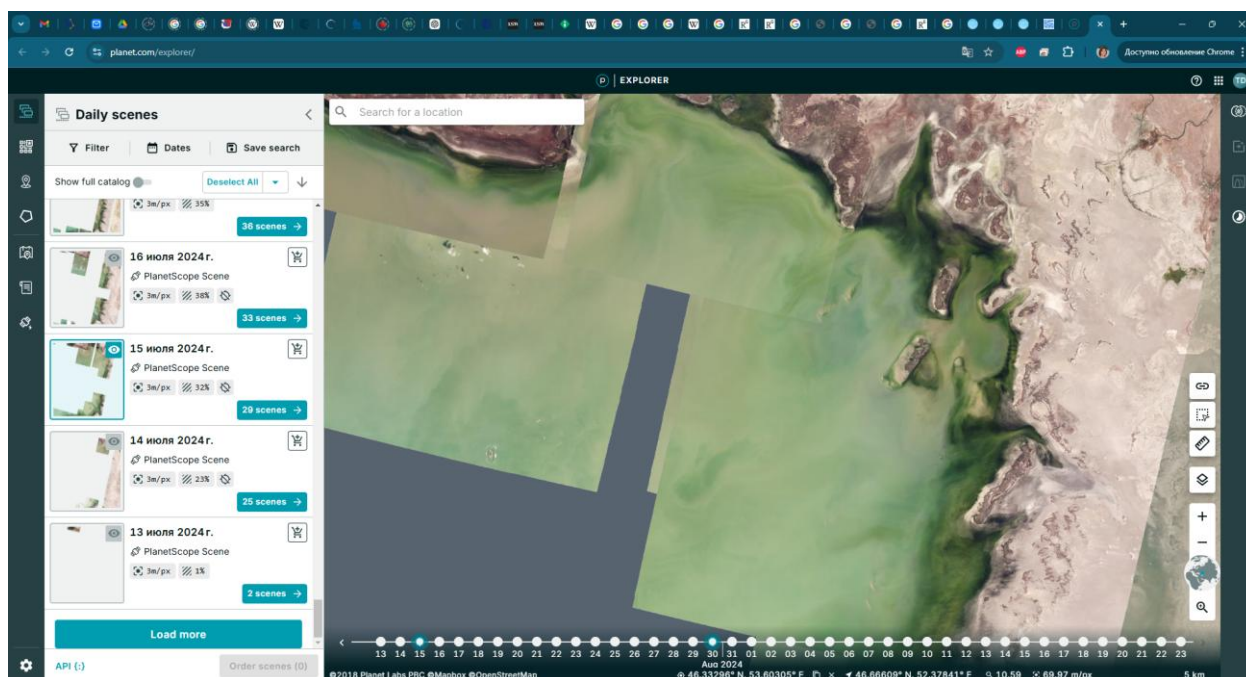


Рисунок 1. Интерфейс выбора сцен при формировании заказа

2.2. Тематическая обработка данных оптической съемки

Целью обработки оптических изображений высокого разрешения по данным орбитальной группировки Planet Scope для северо-восточной части Каспийского моря было получение береговой линии моря в векторном формате и построение ее динамики.

Метод построения береговой линии основывался на совместном использовании и анализе вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (NDVI Explained, 2026) и нормализованного разностного водного индекса NDWI (Normalized Difference Water Index) (NDWI, 2026) для выделения границы «суша-вода». Такой комбинированный подход позволяет одновременно исключить влияние растительности на прибрежной зоне и надежно определить границы водной поверхности.

Расчет индекса NDVI проводился по стандартной формуле:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1)$$

где NIR – отражательная способность в ближнем инфракрасном диапазоне, RED – отражательная способность в красном спектральном диапазоне. Для обработки данных использовалось программное обеспечение SNAP. В частности:

- для данных Planet за 2017–2021 гг.: $NDVI = (Band\ 4 - Band\ 3) / (Band\ 4 + Band\ 3)$,
- для данных Planet за 2022–2024 гг.: $NDVI = (Band\ 8 - Band\ 6) / (Band\ 8 + Band\ 6)$.

Для выделения морской поверхности применялся пороговый диапазон значений NDVI от -0,2 до 0, что позволяло эффективно исключать участки суши и зоны растительного покрова.

Параллельно рассчитывался нормализованный разностный водный индекс NDWI, основанный на различии в отражении излучения в ближнем инфракрасном (NIR) и зеленом (Green) диапазонах. Он позволяет выявлять даже незначительные изменения содержания воды в водоемах и прибрежной зоне. NDWI вычислялся по формуле:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR), \quad (2)$$

где Green – отражательная способность в зеленом спектральном диапазоне, NIR – отражательная способность в ближнем инфракрасном диапазоне, при этом:

- для данных Planet 2017–2021 гг.: $NDWI = (Band\ 2 - Band\ 4) / (Band\ 2 + Band\ 4)$,
- для данных Planet 2022–2024 гг.: $NDWI = (Band\ 3 - Band\ 8) / (Band\ 3 + Band\ 8)$.

В отличие от NDVI, где применялись отрицательные пороговые значения, для NDWI использовались положительные значения (более 0,2), надежно характеризующие поверхность воды.

Этапы обработки снимков для получения береговой линии схематически представлены на рисунке 2. На первом этапе использовались исходные оптические изображения высокого пространственного разрешения. Затем рассчитывались индексы NDVI и NDWI, которые визуализировались в виде растровых карт, отражающих распределение растительности и водных поверхностей. Полученные растровые слои конвертировались в линейные объекты в соответствии с пороговыми значениями индексов. После этого проводилась фильтрация линий по значениям, наиболее четко отражающим границу «суша-вода». Такой подход обеспечивает более высокую точность выделения береговой линии, особенно в мелководной северо-восточной части Каспийского моря, подверженной сезонным колебаниям уровня воды и сгонно-нагонным явлениям.

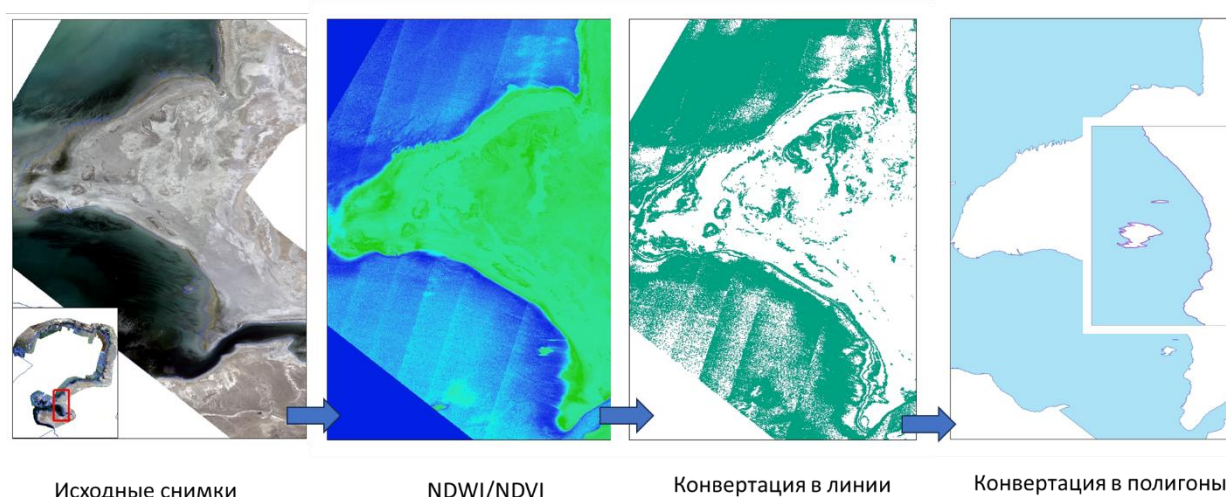


Рисунок 2. Этапы обработки снимков для получения береговой линии

Далее отфильтрованные линии подвергались дополнительной ручной обработке в среде ArcGIS. На данном этапе выполнялось несколько последовательных операций. В первую очередь проводилась оптимизация количества вершин, так как первичная линия, полученная из растровых данных, содержала избыточное количество вершин, что усложняло дальнейший анализ. Для ее упрощения применялся инструмент Simplify Line. Дополнительно также использовался инструмент Smooth Line для сглаживания контуров и устранения «ступенчатости», возникающей при векторизации по пиксельной сетке.

Следующим этапом было устранение топологических ошибок через инструмент Topology, когда проверялись и исправлялись ошибки типа «самопересечения», «разрывы» и «дублирующиеся линии». Лишние артефакты, такие как короткие несвязанные линии, удалялись с использованием выборки по длине объектов.

Далее на основе корреktированных линейных объектов выполнялось построение полигонов с помощью инструмента Feature to Polygon. Кроме полигона морской поверхности, дополнительно формировался отдельный слой прибрежных островов для обеспечения

целостного представления береговой зоны. Далее проводилась корректировка морской поверхности с учетом островов. Другими словами, чтобы морской полигон имел правильную геометрию (с «дырками» вместо островов), полигоны островов «вырезались» из полигона «моря» с использованием операция Delite или Clip. В итоге создавалось корректное топологическое представление акватории, где острова являются пустотами внутри основного полигона. Такой подход обеспечил получение высокоточной и единообразной береговой линии северо-восточной части Каспийского моря для всего исследуемого периода. На заключительном этапе осуществлялась проверка корректности геометрии и топологии полигонального слоя и устранение возможных дефектов.

2.3. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря

Для мониторинга и количественной оценки динамики уровня Каспийского моря в настоящем исследовании применялись методы многомиссионной спутниковой альтиметрии. Основным источником информации послужила база данных Database for Hydrological Time Series of Inland Waters (DAHITI), разработанная Немецким геодезическим исследовательским институтом (DGFI-TUM) (Schwatke et al., 2015), которая обеспечивает получение временных рядов уровня воды для внутренних водоемов по всему миру, включая Каспийское море (Welcome to DAHITI, 2026).

Исследование базируется на непрерывном массиве данных, охватывающем период с 1992 по 2025 гг. Формирование временных рядов обеспечивалось за счет использования данных ряда последовательных миссий, начиная с первой океанографической платформы TOPEX/Poseidon (1992–2002). Преимуществом наблюдений и стабильность параметров точности в последующие десятилетия поддерживались спутниковой серией Jason (миссии Jason-1, Jason-2 и Jason-3), функционирующей на идентичных орбитах. Современный этап наблюдений дополнен данными спутника Sentinel-6 Michael Freilich, оснащенного системой альтиметра и радиометра для достижения высокого пространственного и временного разрешения.

Методология обработки данных в системе DAHITI включает тщательную многомиссионную гармонизацию, направленную на создание однородного продукта. Процесс обработки подразумевает унификацию вертикальной привязки всех измерений и внесение необходимых геофизических коррекций, включая учет задержки сигнала в тропосфере и ионосфере. В качестве целевой высотной системы используются нормальные высоты, получаемые путем преобразования эллипсоидальных высот спутниковой альтиметрии с использованием модели квази-геоида EIGEN6c3stat, основанной на геоиде EGM2008 и дополненной данными миссии GOCE. Для обеспечения сопоставимости результатов различных миссий производится устранение межспутниковых смещений, а для подавления шума и фильтрации аномальных выбросов применяются специализированные алгоритмы, в том числе фильтр Калмана. Применение описанного комплекса процедур позволило сформировать непрерывный и достоверный временной ряд с точностью до нескольких сантиметров, что создало необходимую базу для последующего сопоставления гидрологических параметров с данными дистанционного зондирования береговой линии.

3. Результаты

3.1. Динамика береговой линии северо-восточной части Каспийского моря

Векторизация контуров береговой линии северо-восточной части Каспийского моря выполнялась по материалам летней космической съемки с преимущественным охватом периода июль-август. Временной выбор летнего сезона обусловлен тем, что в этот период уровень моря находится вблизи годового максимума и влияние сезонных колебаний выражено наиболее четко. Рисунок 3 демонстрирует полученные векторные карты северо-восточной части Каспийского моря, на которых четко прослеживается тенденция уменьшения водной поверхности.

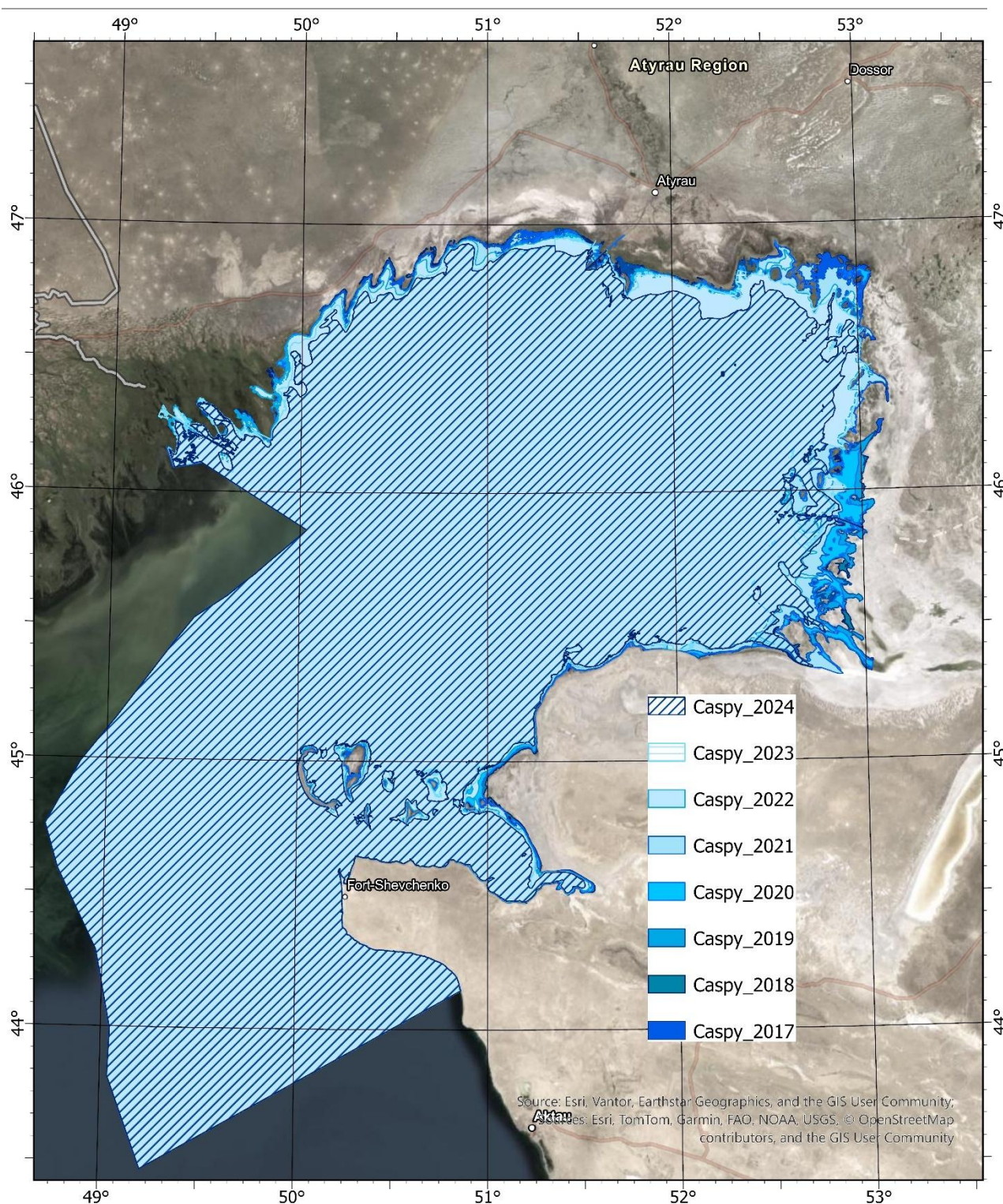


Рисунок 3. Динамика береговой линии северо-восточной части Каспийского моря

Суммарная протяженность векторизованной береговой линии составляет около 3700 км. Рисунок 4 иллюстрирует изменения береговой линии Каспийского моря в районе дельты реки Урал в период с 2017 по 2024 гг. Представленные изображения наглядно демонстрируют ежегодный отход береговой линии, связанный с понижением уровня моря. В прибрежной зоне фиксируется сокращение площади водной поверхности и трансформация контуров береговой линии. Отчетливо прослеживается процесс формирования новых островов. Сравнение крайних временных отметок показывает существенные изменения: если в 2017 г. береговая

линия проходила значительно ближе к устью реки, и акватория занимала обширные прибрежные площади, то к 2024 г. наблюдается ее смещение в сторону моря, при этом в некоторых местах до 8 км. На месте бывшей акватории образовались участки новой суши, что изменило морфологию дельты. Выявленные изменения указывают на высокую динамичность прибрежных процессов в районе дельты Урала, где сочетание колебаний уровня моря и локальных гидроморфологических условий приводит к значительной перестройке береговой зоны.

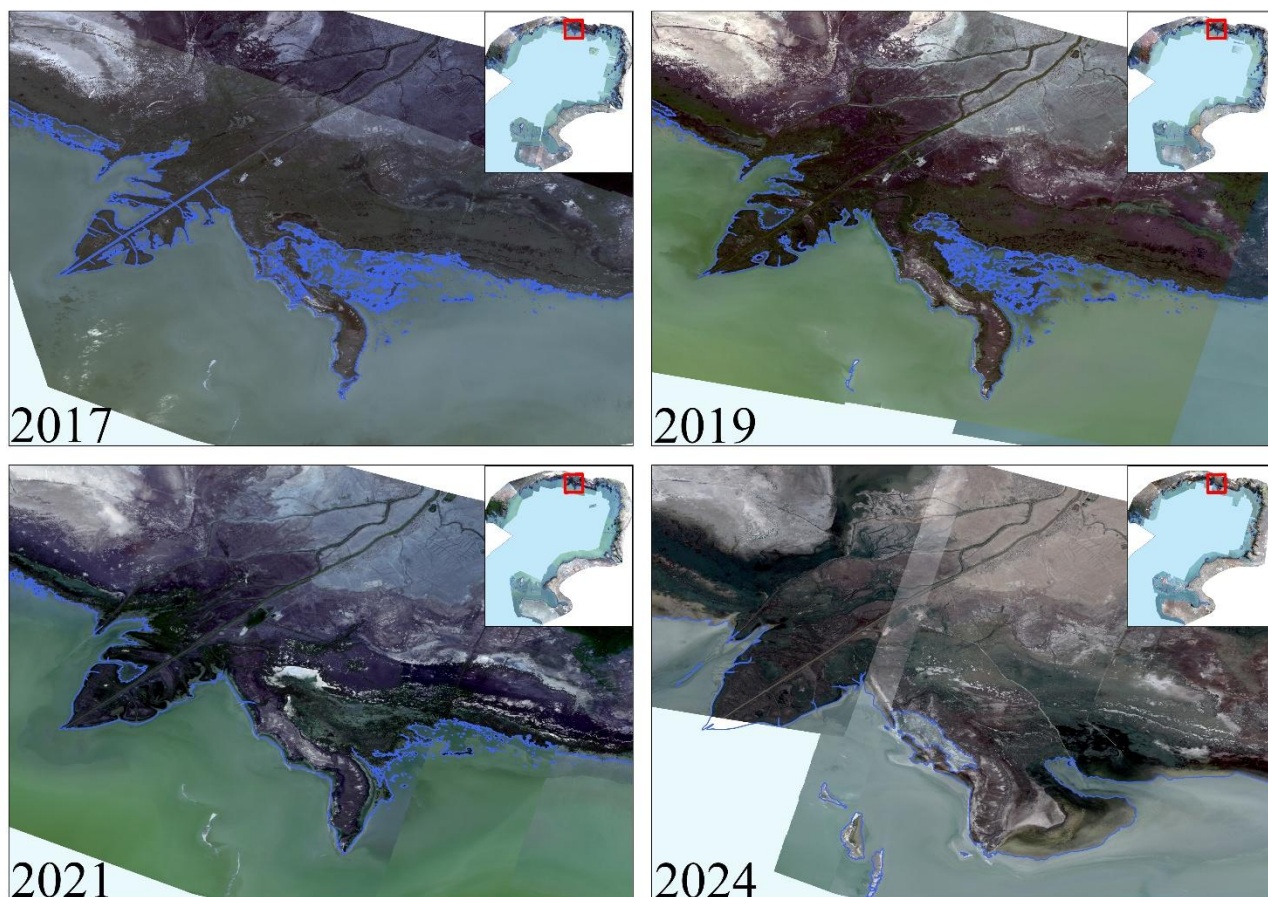


Рисунок 4. Оцифрованная береговая линия Каспийского моря в районе дельты р. Урал

Схожая ситуация фиксируется и в районе Тюленьих островов (см. Рисунок 5). Анализ многолетних спутниковых данных показывает, что год от года здесь происходит увеличение площади суши за счет осушения прилегающих мелководий и формирования новых участков островной территории. Особенно наглядно этот процесс проявляется в динамике общей площади архипелага: если в 2017 г. она составляла около 201 км², то к 2024 г. возросла более чем втрое, достигнув 668 км². Рост площади объясняется не только расширением контуров существующих островов, но и появлением новых участков суши, которые постепенно сливаются с основной островной группой. Таким образом, архипелаг Тюленьих островов претерпевает локальную трансформацию, связанную с падением уровня Каспия.



Рисунок 5. Оцифрованная береговая линия Каспийского моря в районе дельты р. Урал

3.2. Анализ данных спутниковой альтиметрии Каспийского моря

В ходе проведенного анализа был получен непрерывный временной ряд среднего уровня Каспийского моря, характеризующийся высокой точностью (в пределах нескольких сантиметров) и временным шагом в 10 дней, соответствующим орбитальным циклам аппаратов Jason и Sentinel-6. Общая динамика изменения уровня Каспийского моря за период с 1992 по 2025 год наглядно отражена на графике, совмещающем фактические измерения и полиномиальную линию тренда (см. Рисунок 6).

Использование спутниковой альтиметрии позволило детально отследить долгосрочные тренды и краткосрочные колебания уровня моря, обусловленные гидрометеорологическими процессами, вне зависимости от сложности доступа к отдельным участкам акватории. На момент начала инструментальных наблюдений в декабре 1992 года средний уровень моря находился на отметке -26,56 м. К началу 2025 года зафиксировано его снижение до -28,83 м, что свидетельствует о суммарном падении уровня на 2,26 м за этот период при средней скорости около 7 см в год. Процесс снижения носил неравномерный характер: после фазы относительной стабильности в первой половине 1990-х годов последовал период умеренного падения, сменившийся в последние 15 лет фазой ускоренного понижения.

Сезонный цикл колебаний уровня моря демонстрирует устойчивую повторяемость с достижением минимумов в зимний период и максимумов в летние месяцы. Эта закономерность отражает гидрологический баланс: летний пик формируется за счет весеннего половодья и максимального речного стока, в то время как осенне-зимнее сокращение притока ведет к достижению минимальных отметок. Статистический анализ повторяемости экстремумов показал, что минимальный уровень в 75 % случаев приходится на декабрь и январь. Большинство максимумов (29 из 31 года наблюдений) зафиксировано в июне и июле.

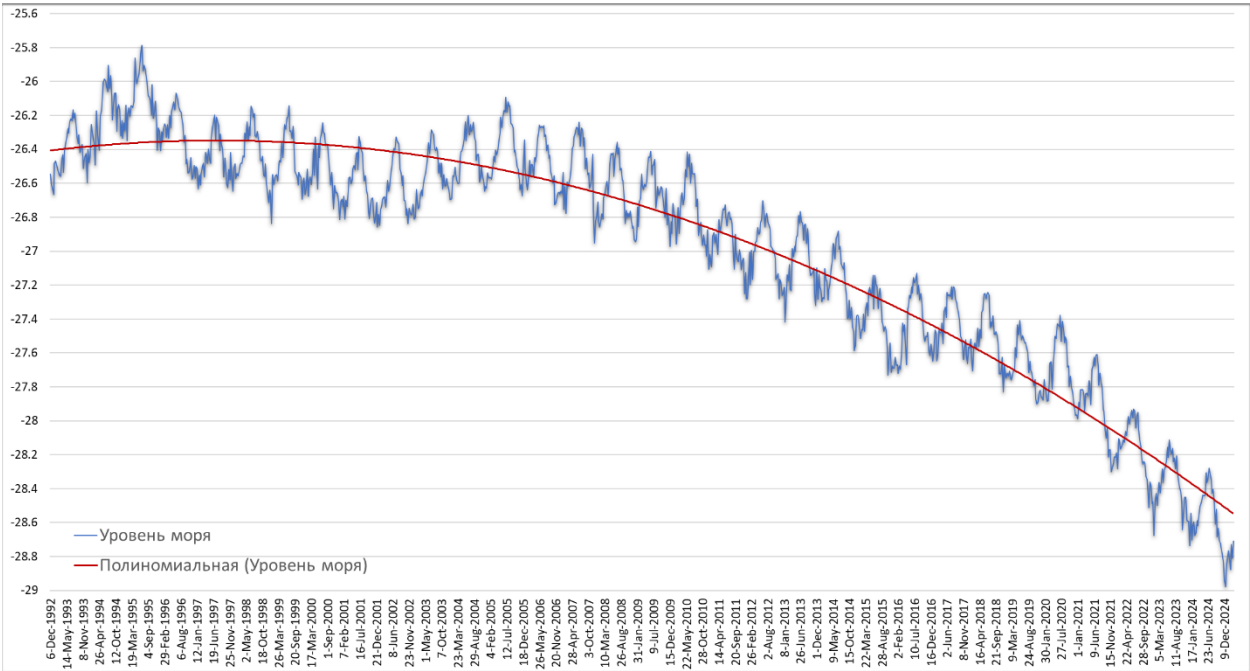


Рисунок 6. Средний уровень Каспийского моря с 1992 по 2025 год по данным спутниковой альтиметрии

3.3. Сопоставление с данными спутниковой альтиметрии

Количественная оценка данных дистанционного зондирования земли и спутниковой альтиметрии позволил выявить прямую корреляцию между падением уровня моря и сокращением площади его водного зеркала в северо-восточной части. Проведенный анализ за период с 2017 по 2024 год подтверждает устойчивую деградацию акватории, в ходе которой абсолютная отметка уровня снизилась с -7,28 м до -28,48 м (см. Таблица 1). Суммарное падение составило 1,2 м всего за семь лет наблюдений, при этом наиболее критическое снижение зафиксировано в интервале между 2023 и 2024 годами, когда уровень опустился на рекордные 32 см.

Таблица 1. Динамика морфометрических показателей северо-восточной части Каспийского моря и данных спутниковой альтиметрии за 2017–2024 гг.

Год	Площадь морской поверхности, км ²	Δ площади, по сравнению с последующим годом, км ²	Ближайшая дата альтиметрических данных	Уровень моря, м, нормальные высоты ДАНТИ	Δ уровня моря на моменты фиксации береговой линии, м
2024	62 040,42		22-Aug-2024	-28,48	
2023	63 538,26	1 497,84	12-Jul-2023	-28,16	0,32
2022	64 465,40	927,14	11-Jul-2022	-27,94	0,22
2021	65 948,87	1 483,47	28-Jul-2021	-27,79	0,15
2020	66 792,02	843,15	25-Aug-2020	-27,54	0,25
2019	66 992,94	200,92	15-Aug-2019	-27,60	-0,06

2018	67 145,69	152,75	23-Aug-2018	-27,38	0,22
2017	67 456,36	310,67	21-Aug-2017	-27,28	0,10

Динамика площади водной поверхности демонстрирует соразмерный масштаб потерь акватории, которая сократилась с 67 456,36 км² до 62 040,42 км². Общая площадь осушенного дна в северо-восточном Каспии за рассматриваемый период составила около 5 416 км². Максимальная интенсивность отступления воды наблюдалась в 2024 году, когда в полном соответствии с аномальным падением уровня моря площадь зеркала уменьшилась сразу на 1 497,84 км² за один год.

Особое внимание в структуре данных заслуживает период 2019–2020 годов, который выступает в качестве значимой гидрологической аномалии. В это время по данным альтиметрии был зафиксирован кратковременный подъем уровня на 6 см, однако площадь водного зеркала вопреки общему тренду сократилась еще на 200,92 км².

Визуальное сопоставление полученных береговых линий и уровня моря также подтверждает не всегда линейный отход береговых линии вглубь акватории. В ряде случаев, например, в линии 2020 и 2019 гг.: фиксируется как прямая, так и противоположная реакция контура суши на изменение абсолютных отметок уровня воды (Рисунок 7). Данное расхождение служит доказательством того, что фактическое положение береговой линии в мелководном северо-восточном Каспии определяется не только глобальными изменениями уровня, но и локальными факторами, такими как ветровые нагонные явления и процессы перераспределения донных осадков.

Количественный анализ всей совокупности данных показал, что средний коэффициент чувствительности площади моря к изменению его уровня составил около 45,5 км² на 1 см понижения, однако в 2024 году этот показатель возрос до 47,9 км²/см, что указывает на выход моря на предельно пологие участки батиметрии, где даже незначительные колебания уровня приводят к масштабному осушению побережья.

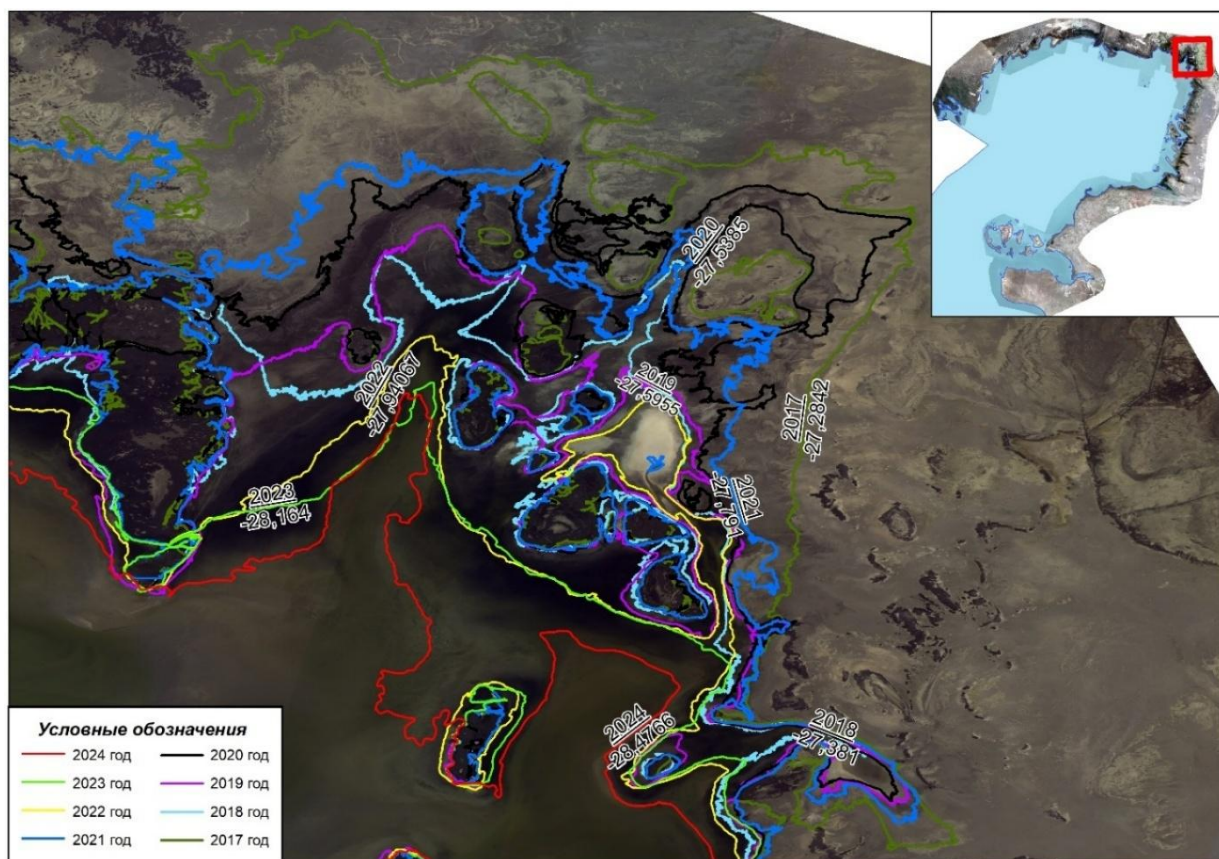


Рисунок 7. Сопоставление береговых линий по снимкам Planet и уровня Каспийского моря по спутниковой альтиметрии

4. Обсуждение

График зависимости уровня Каспийского моря от его площади, представленный на рисунке 8, также подтверждает наличие прямой корреляции, при которой сокращение площади водного зеркала сопровождается закономерным снижением абсолютных отметок уровня. Основная часть данных за период с 2017 по 2024 год выстраивается в четкую линию, отражающую глобальный процесс регрессии моря. Состояние акватории на август 2024 года отражено крайней левой точкой графика, соответствующей минимальному зафиксированному уровню -28,48 м при площади 62 040,42 км². Переход от значений 2023 года к показателям 2024 года характеризуется наиболее крутым наклоном кривой, что визуализирует резкое ускорение темпов падения уровня моря на 32 см всего за один год.

В правой верхней части графика зафиксирована характерная «петля» или излом в районе отметок -27,54 м и -27,6 м. Данный участок иллюстрирует гидрологическую аномалию 2019–2020 годов, когда при кратковременном подъеме уровня на 6 см площадь водного зеркала вопреки общей тенденции продолжила сокращаться, снизившись с 66 992,94 км² до 66 792,02 км². Наличие этого зигзага на графике служит математическим доказательством того, что в условиях экстремального мелководья связь между уровнем и площадью может искажаться под влиянием локальных геоморфологических процессов или ветрового режима. Общий наклон представленной кривой демонстрирует исключительную чувствительность северо-восточной части Каспия, где даже незначительные колебания уровня приводят к масштабному осушению территорий, исчисляемому сотнями квадратных километров.

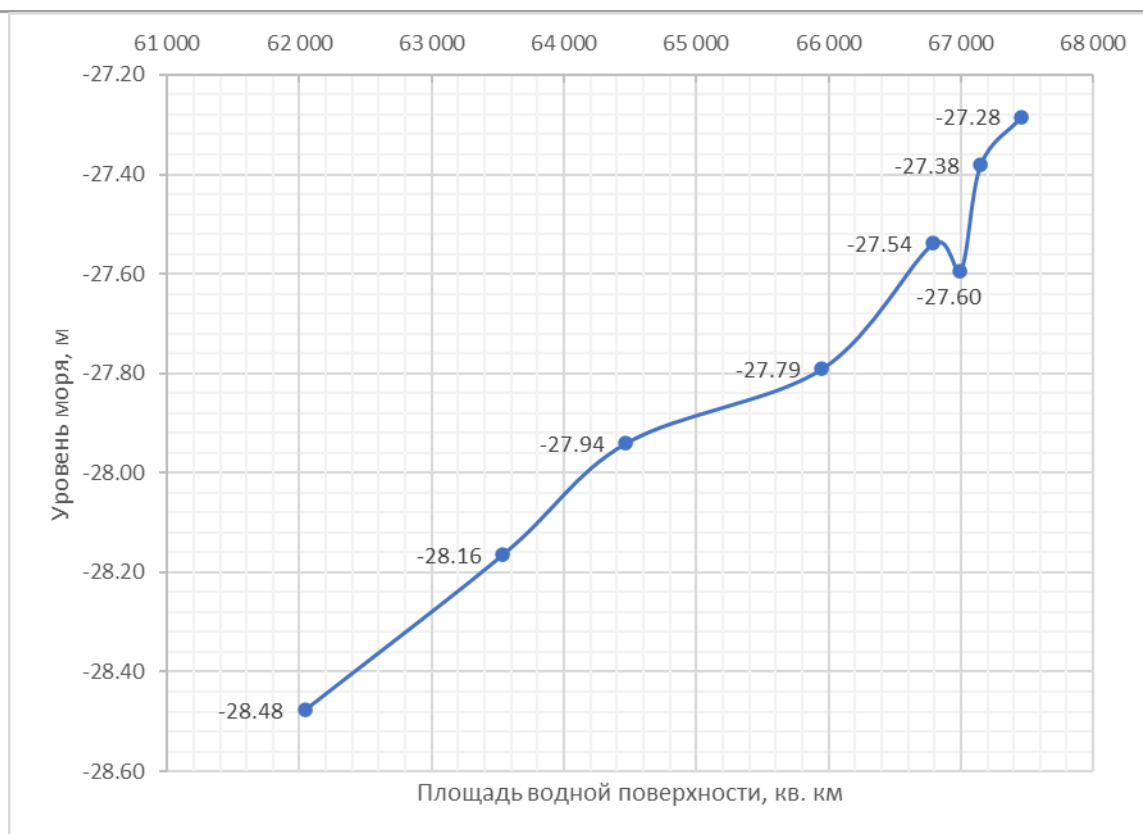


Рисунок 8. График зависимости площади северо-восточной части водного зеркала от уровня Каспийского моря в период с 2017 по 2024 год

Полученные результаты согласуются с современными представлениями о продолжающейся климатически обусловленной регрессии Каспийского моря. На фоне еще большей аридизации региона, включающей снижение атмосферных осадков, повышение температуры воздуха, увеличение испарения с морской поверхности, происходит нарушение водного баланса Каспия и дальнейшее снижение его уровня. В сочетании с уменьшением речного стока это способствует ускоренному осушению мелководных прибрежных зон, чувствительных к даже незначительным колебаниям уровня воды.

Использование данных высокого пространственного разрешения позволило выявить детальные морфологические изменения береговой зоны, включая формирование новых островов, трансформацию дельтовых участков и перераспределение мелководных зон, которые не всегда корректно фиксируются по данным среднего разрешения. Это подчеркивает значимость применения спутниковой съемки высокого пространственного разрешения для мониторинга подобных динамичных природных систем.

Отмеченные расхождения между изменениями уровня моря и положением береговой линии в отдельные периоды свидетельствуют о существенном влиянии локальных факторов, таких как ветровые нагоны, перераспределение донных отложений и сезонная гидродинамика. Это указывает на необходимость комплексного подхода, объединяющего данные дистанционного зондирования, альтиметрии и наземных наблюдений.

5. Заключение

В работе выполнена оценка изменений береговой линии северо-восточной части Каспийского моря за период 2017–2024 гг. на основе данных спутниковой съемки высокого пространственного разрешения и спутниковой альтиметрии. Применение детализированных оптических данных позволило зафиксировать трансформации береговой зоны, включая формирование новых участков суши и изменение морфологии дельтовых областей.

Полученные результаты свидетельствуют о выраженной тенденции снижения уровня моря, сопровождающейся сокращением площади водной поверхности и смещением береговой линии на расстояния до нескольких километров. За рассматриваемый период уровень моря снизился на 1,2 м, что сопровождалось уменьшением площади акватории более чем на 5400 км². Установлена высокая чувствительность площади водной поверхности к изменениям уровня моря, составляющая в среднем около 45,5 км² на 1 см понижения в пределах исследуемой акватории, что обусловлено мелководным характером региона. Показано, что зависимость между уровнем моря и положением береговой линии является нелинейной и пространственно неоднородной и определяется влиянием локальных гидрометеорологических и морфодинамических факторов.

Полученные результаты могут быть использованы для задач экологического мониторинга, оценки последствий снижения уровня Каспийского моря и разработки мер адаптации при управлении прибрежными территориями.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация - Т.Д., Л.Б.; методология - Т.Д.; программное обеспечение - А.М.; валидация - Л.Б., Н.Б., Г.К.; формальный анализ - Г.К.; исследование - Т.Д.; ресурсы - Н.Б.; курирование данных - А.М.; написание - подготовка оригинального черновика - А.М.; написание - рецензирование и редактирование - Т.Д., Л.Б.; визуализация - Н.Б.; руководство - Б.И.; администрирование проекта - Б.И.; получение финансирования - Б.И. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах

Дедова, Татьяна – заведующая лабораторией, ТОО «Институт ионосферы», СТ «Ионосфера», 117, Алматы, Казахстан, 050020; dedova@ionos.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5310-6931>

Балакай, Лариса – ведущий научный сотрудник, ТОО «Институт ионосферы», СТ «Ионосфера», 117, Алматы, Казахстан, 050020; balakay@ionos.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6660-4796>

Баширова, Нурия – старший научный сотрудник, ТОО «Институт ионосферы», СТ «Ионосфера», 117, Алматы, Казахстан, 050020; bashyrova@ionos.kz, <https://orcid.org/0009-0001-9235-1048>

Искаков, Берик –заместитель директора по НИР, ТОО «Институт ионосферы», СТ «Ионосфера», 117, Алматы, Казахстан, 050020; berikiskakov@ionos.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8968-9531>

Мерекеев, Айбек – старший научный сотрудник, ТОО «Институт ионосферы», СТ «Ионосфера», 117, Алматы, Казахстан, 050020; aibek.merekeyev@ionos.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9227-4695>

Кайранбаева, Гаухар – старший преподаватель, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, проспект Аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; gaukhar.kairanbayeva@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0250-3184>

9. Финансирование: Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН BR24992964 «Разработка интегрированных энергосберегающих технологий для развития экологической устойчивости и эффективности морских операций в казахстанском секторе Каспийского моря»)

10. Благодарности: нет.

11. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Akbari, M., Baubekova, A., Roozbahani, A., Gafurov, A., Shiklomanov, A., Rasouli, K., Ivkina, N., Kløve, B., & Haghighi, A. T. (2020). Vulnerability of the Caspian Sea shoreline to changes in hydrology and climate. *Environmental Research Letters*, 15(11). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abaad8>
2. Akhmetov, S., & Malakhov, D. (2026). Analysis of shoreline changes in the Kazakhstan sector of the Caspian Sea based on remote sensing data in the context of their impact on coastal ecosystems (Analiz izmeneniya beregovoy linii kazakhstanskogo sektora Kaspiyskogo morya na osnove dannyykh distantsionnykh sredstv izmereniy v kontekste ikh vliyaniya na ekosistemu pribrezhnoy zony in Russian). *Journal of Ecology and Sustainability*, 154(1), 7–26. <https://doi.org/10.32523/8gwpt>
3. Chen, J., Cazenave, A., Wang, S. Y., & Li, J. (2023). Caspian Sea level change observed by satellite altimetry. *Remote Sensing*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/rs15030703>
4. Chowdhury, S. J. K., & Yang, C. S. (2025). A study on the coastline extraction and coastal change analysis using sentinel-2 imagery in Funafuti, Tuvalu. *Remote Sensing*, 17(16). <https://doi.org/10.3390/rs17162794>
5. Christofi, D., Mettas, C., Evagorou, E., Stylianou, N., Eliades, M., Theocharidis, C., Chatzipavlis, A., Hasiotis, T., & Hadjimitsis, D. (2025). A review of open remote sensing data with GIS, AI, and UAV support for shoreline detection and coastal erosion monitoring. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 15, Number 9). <https://doi.org/10.3390/app15094771>
6. Court, R., Lattuada, M., Shumeyko, N., Baimukanov, M., Eybatov, T., Kaidarova, A., Mamedov, E. V., Rustamov, E., Tasmagambetova, A., Prange, M., Wilke, T., Hassall, C., & Goodman, S. J. (2025). Rapid decline of the Caspian Sea level threatens ecosystem integrity, biodiversity protection, and human infrastructure. *Communications Earth and Environment*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02212-5>
7. De Mora, S., Sheikholeslami, M. R., Wyse, E., Azemard, S., & Cassi, R. (2004). An assessment of metal contamination in coastal sediments of the Caspian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 48(1–2). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(03\)00285-6](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00285-6)
8. Duan, Z., Wang, G., Hu, J., Yu, T., Chen, S., Zhang, Y., Wang, Y., Liu, H., Zhao, X., & Chen, H. (2025). Spatiotemporal dynamics of northern Caspian shorelines (1985–2023) and implications for coastal management: Lessons from the Aral Sea. *PLOS ONE*, 20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0325546>
9. Holzner, J., Strunz, G., Martinis, S., & Plank, S. (2025). Analyzing coastal dynamics by means of multi-sensor satellite imagery at the East Frisian Island of Langeoog, Germany. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91306-3>
10. Ivkina, N., Terekhov, A., & Naurozbayeva, Z. (2015). Caspian Sea level fluctuations and assessment of contemporary shoreline changes using landsat satellite data for the period 2005–2015 (Kolebaniya urovnya Kaspiyskogo morya i diagnostika sovremennykh izmeneniy polozheniya beregovoy linii po sputnikovym dannym Landsat perioda 2005–2015 godov in Russian). *Hydrometeorology and Ecology*, 2, 89–99. <https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/259>
11. Kamza, A. T., Kuznetsova, I. A., & Levin, E. L. (2023). Prediction of the flooding area of the northeastern Caspian Sea from satellite images. *Geodesy and Geodynamics*, 14(2). <https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.08.003>
12. Meirambek, G., Rakhimbaeva, D. Zh., Rysbekov, K. B., & Erzhanqyzy, A. (2024). Monitoring of Caspian Sea shoreline changes using water index methods based on geospatial data (Monitoring izmeneniya beregovoy linii Kaspiyskogo morya metodom vodnogo indeksirovaniya na osnove geoprostvennykh dannyykh in Russian). *Gornyy Zhurnal Kazakhstana*, 11, 23–31. https://minmag.kz/wp-content/uploads/2024/12/2411_23-31.pdf

13. NDVI Explained. (2026). <https://eos.com/blog/normalized-difference-vegetation-index-or-ndvi/>
14. NDWI. (2026). <https://eos.com/ru/make-an-analysis/ndwi/>
15. Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L. A., & Palomar-Vázquez, J. (2012). Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision. *Remote Sensing of Environment*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.024>
16. Palomar-Vázquez, J., Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., & Cabezas-Rabadán, C. (2023). Shoreline analysis and extraction tool (SAET): a new tool for the automatic extraction of satellite-derived shorelines with subpixel accuracy. *Remote Sensing*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/rs15123198>
17. Planet Labs. (2026). <https://www.planet.com/>
18. Samant, R., & Prange, M. (2023). Climate-driven 21st-century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections. *Communications Earth and Environment*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01017-8>
19. Safarov, E., Safarov, S., & Bayramov, E. (2024). Changes in the hydrological regime of the Volga River and their influence on Caspian Sea level fluctuations. *Water (Switzerland)*, 16(12). <https://doi.org/10.3390/w16121744>
20. Schwatke, C., Dettmering, D., Bosch, W., & Seitz, F. (2015). DAHITI - An innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10). <https://doi.org/10.5194/hess-19-4345-2015>
21. Tan, B., Cooper, H., Bartley, M. L. F., Johnson, C., Fagherazzi, S., & Fichot, C. G. (2026). Monitoring coastal shoreline change using PlanetScope imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 334. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2026.109783>
22. Vos, K., Splinter, K. D., Palomar-Vázquez, J., Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Cabezas-Rabadán, C., Kras, E. C., Luijendijk, A. P., Calkoen, F., Almeida, L. P., Pais, D., Klein, A. H. F., Mao, Y., Harris, D., Castelle, B., Buscombe, D., & Vitousek, S. (2023). Benchmarking satellite-derived shoreline mapping algorithms. *Communications Earth and Environment*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01001-2>
23. Vyrychalkina, T. Yu., Diansky, N., & Fomin, V. V. (2020). The Influence of Long-Term Changes in Wind Regime over the Caspian Region on the Evolution of Caspian Sea Level during 1948–2017 (Vliyaniye na evolyutsiyu urovnya Kaspiyskogo morya mnogoletnikh izmeneniy rezhima vetra nad ego regionom v 1948–2017 gg.). *Water Resources*, 47(2), 230–240. <https://doi.org/10.31857/s0321059620020194>
24. Welcome to DAHITI. (2026). <https://dahiti.dgfi.tum.de/en/>
25. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14). <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

Жоғары дәлдікті спутниктік деректер негізінде Каспий теңізінің жағалау сызығы динамикасының мониторингі

Татьяна Дедова, Лариса Балакай, Нурия Баширова, Берик Искаков, Айбек Мерекеев, Гаухар Кайранбаева

Аңдатпа: Бұл мақалада 2017 жылдан 2024 жылға дейін Каспий теңізінің солтүстік-шығысындағы жағалау сызығының динамикасын кешенді бақылау нәтижелері ұсынылған. Зерттеу жоғары ажыратымдылықтағы спутниктік суреттерді (PlanetScope) және көп миссиялы альтиметриялық деректерді (DAHITI) талдауға негізделген. Құрлық-су шекарасын және жағалау сызығының векторизациясын анықтау үшін NDVI және NDWI спектрлік индекстерін есептеуді қоса алғанда, автоматтандырылған спутниктік суреттерді өңдеу алгоритмін

пайдалану зерттеу аймағының су бетінің ауданының 5 416 км²-ге азаюы және оның деңгейінің 1,19 м-ге төмендеуі ретінде көрсетілген ірі көлемді теңіз регрессиясын дәл тіркеуге мүмкіндік берді. Гидрологиялық көрсеткіштер мен жағалаудағы морфометриялық өзгерістер арасындағы анықталған корреляцияға ерекше назар аударылады. Деңгейдің өзгеруіне орташа аудан сезімталдық коэффициенті 45,5 км²/см² құрады, ал таяз аумақтардың кебу жылдамдығының үдеуі 2024 жылы тіркелді. Бұл зерттеудің нәтижелері қарқынды климаттың өзгеруі жағдайында су жағдайларының сенімді сандық сипаттамаларын алу үшін спутниктік альтиметрия мен жоғары ажыратымдылықтағы қашықтықтан зондтау деректерін біріктірудің жоғары тиімділігін растайды. Алынған сандық сипаттамаларды экономикалық қызметті жоспарлауда және жағалау аймақтарын теңіз деңгейінің төмендеуінің жалғасуына бейімдеу шараларын әзірлеуде пайдалануға болады.

Түйін сөздер: Каспий теңізі; жағалау сызығы; PlanetScope жоғары ажыратымдылықтағы суреттері; спутниктік альтиметрия; теңіз деңгейінің өзгеруі.

Monitoring the dynamics of the Caspian Sea coastline using high-resolution satellite data

Tatyana Dedova, Larissa Balakay, Nuriya Bashirova, Berik Iskakov, Aibek Merekeyev, Gaukhar Kairanbayeva

Abstract: This article presents the results of comprehensive monitoring of coastline dynamics in the northeastern Caspian Sea from 2017 to 2024. The study is based on the analysis of high-resolution satellite imagery (PlanetScope) and multimission altimetry data (DAHITI). The use of an automated satellite imagery processing algorithm, including the calculation of NDVI and NDWI spectral indices to identify the land-water boundary and coastline vectorization, made it possible to accurately record a large-scale sea regression, expressed as a reduction in the water surface area of the study area by 5 416 km² and a drop in its level by 1,19 m. Particular attention is paid to the identified correlation between hydrological indicators and morphometric changes in the coast. The average area sensitivity coefficient to level changes was found to be 45,5 km²/cm, with an acceleration in the rate of drying of shallow areas recorded in 2024. The results of this study confirm the high efficiency of combining satellite altimetry and high-resolution remote sensing data to obtain reliable quantitative characteristics of water conditions under conditions of intense climate change. The resulting quantitative characteristics can be used in planning economic activities and developing measures to adapt coastal regions to the ongoing sea level decline.

Keywords: Caspian Sea; coastline; high-resolution PlanetScope imagery; satellite altimetry; sea level change.