МРНТИ 06.81.23

Цитирование: Будет добавлено редакцией в процессе публикации. Beisembayev, W., Maybolsynov, H., Ivanov, Y. (2025). The title of the paper. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series, 150(1), 1-5. https://doi.org/10.3390/xxxxx

Академический редактор: Имя Фамилия

Поступила: date
Исправлена: date
Принята: date
Опубликована: date

Copyright: © 2025 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/).

Секция: Химия/География/Экология

статья

Анализ изменения береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря на основе данных дистанционных средств измерений

Серик Ахметов к.г.н.

[1] НАО «Казахский научно-исследовательский институт Каспийского моря», Актау, Казахстан; serik.akhmetovkz@gmail.com
* Корреспонденция: serik.akhmetovkz@gmail.com

Аннотация:

Ключевые слова:
Береговая линия, Каспийское море, Казахстанский сектор, дистанционное зондирование, оптические спутниковые данные, радиолокационные данные, MODIS, Landsat, Sentinel, высокодетальные снимки, мониторинг прибрежных зон, геопространственный анализ, динамика береговой зоны.

1. Введение

В последние десятилетия береговая линия казахстанского сектора Каспийского моря претерпевает существенные пространственно-временные изменения под воздействием как природных, так и антропогенных факторов. Колебания уровня моря, изменение стока рек, интенсивное развитие прибрежной инфраструктуры и локальные процессы формируют сложную динамику, требующую системного изучения. В данной работе проводится комплексный анализ трансформации береговой зоны на основе данных дистанционных средств измерений, включая многовременные спутниковые изображения и результаты геопространственной обработки. Использование методов автоматизированного картографирования и сравнительной интерпретации позволило выявить ключевые тенденции смещения береговой линии, определить участки с наиболее выраженными изменениями, а также оценить влияние природно-климатических и техногенных факторов. Представленные результаты формируют основу для дальнейшего мониторинга состояния прибрежной зоны и могут служить научно-практической базой для разработки стратегий рационального управления ресурсами и предотвращения рисков, связанных с деградацией береговых экосистем.

2. Материалы и методы

Для анализа динамики береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря были использованы разнородные данные дистанционного зондирования, включающие как оптические, так и радиолокационные спутниковые наблюдения. В качестве основы для долгосрочного мониторинга применялись спутниковые изображения MODIS, характеризующиеся пространственным разрешением порядка 1 км и обеспечивающие стабильные многолетние временные ряды. Эти данные позволили выявить крупномасштабные

тенденции изменения береговой зоны и оценить особенности сезонной и межгодовой вариабельности.

Дополнительно в исследовании были задействованы оптические данные серии Landsat, которые обеспечивают баланс между пространственной детализацией и длительностью архивных наблюдений. Эти данные использованы для анализа ретроспективных изменений и построения сопоставимых картографических рядов. Для повышения точности определения береговой линии в условиях повышенной мутности воды, динамических атмосферных помех и в зонах с плотной облачностью применялись радиолокационные данные Sentinel. Благодаря радиолокационным сенсорам обеспечена возможность получения информации независимо от освещённости и погодных условий.

3. Результаты

Береговая линия казахстанского сектора Каспийского моря за последние десятилетия характеризуется выраженной нестабильностью. Колебания уровня моря, изменение гидрологического режима питающих рек, усиление климатической аридизации и развитие хозяйственной деятельности в прибрежной зоне формируют комплекс факторов, влияющих на динамику морского побережья. Для объективной оценки этих процессов необходимы регулярные и пространственно охватывающие данные, которые могут быть получены посредством дистанционных средств измерений.

С начала 2000-х годов в казахстанском секторе Каспия наблюдается устойчивое сокращение площади водного зеркала. Этот процесс проявляется как в постепенном смещении береговой линии в сторону моря, так и в формировании обширных мелководных территорий, ранее находившихся под постоянным влиянием водной среды. Наиболее значительные изменения приходятся на период после 2015 года, когда темпы падения уровня моря усилились, что привело к ускоренной деградации прибрежных экосистем и заметному изменению структуры берегового рельефа (рисунок 1).

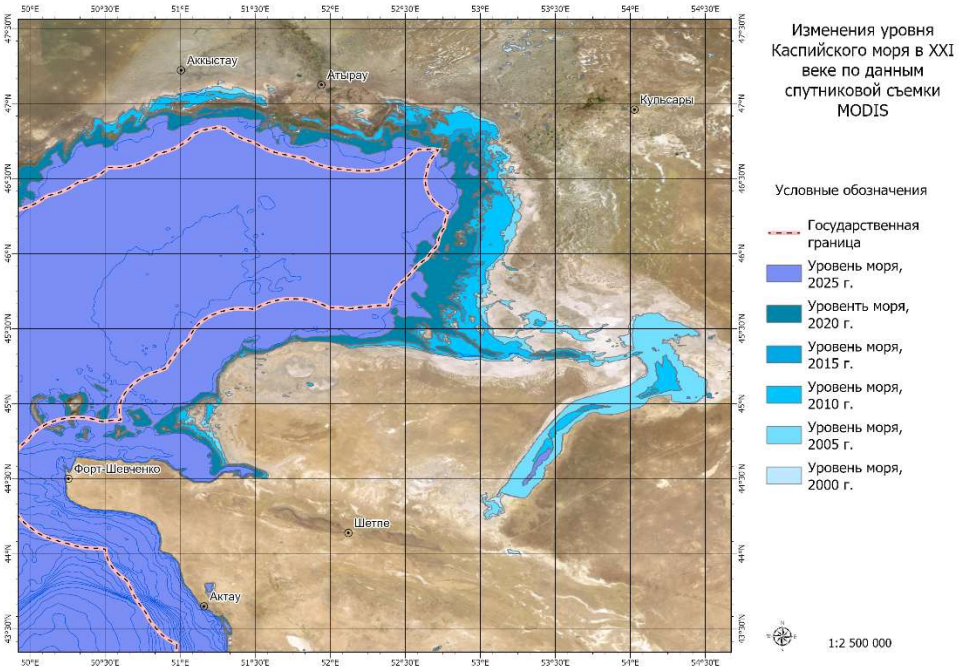

Рисунок 1. Мониторинг уровня моря по всей акватории казахстанского сектора (по данным MODIS)

Анализ данных, представленных на рисунке 1, свидетельствует о повсеместном увеличении площади осушенных территорий в казахстанском секторе Каспийского моря в

период с 2000 по 2025 годы. Выраженная тенденция сокращения акватории прослеживается на протяжении всего рассматриваемого временного отрезка, однако наибольшие темпы обмеления фиксируются начиная с середины 2010-х годов. Особенно заметное ускорение регрессии береговой линии наблюдается в интервале с 2015 по 2025 годы, что указывает на усиление факторов, способствующих снижению уровня моря и трансформации прибрежных зон. Эти изменения отражаются в значительном расширении площадей вновь образованных сушевых участков и усилении контрастности береговой морфологии.

1. Период 2000–2005 гг. — начальная фаза ускорения осушки (1 449 кв км)

Начало XXI века характеризуется умеренными, но уже заметными процессами снижения уровня моря. Масштаб осушки в этом периоде может рассматриваться как ранний индикатор проявления изменений, связанных с перестройкой гидрологического режима Каспия. Вероятно, именно в этот период формируются предпосылки последующего ускорения деградации прибрежных зон.

2. Период 2005–2010 гг. — резкий скачок осушки (4 110 кв км)

Почти трёхкратное увеличение площади осушенных территорий по сравнению с предыдущим периодом свидетельствует о значительном изменении водного баланса. Такое увеличение указывает на:

- усиление испарительных процессов,
- уменьшение поступления воды в северную и восточную части моря,
- ускорение регрессии береговой линии.

Этот этап можно назвать первой крупной волной деградации казахстанского сектора.

3. Период 2010–2015 гг. — стабилизированное, но высокое значение осушки (4 321 кв км)

Темпы осушки остаются сопоставимо высокими с предыдущим периодом, что говорит о закреплении тенденции постоянного снижения уровня воды. Практически одинаковые значения отражают стабильную отрицательную фазу водного режима Каспия, когда море не успевает компенсировать потери за счёт притока.

4. Период 2015–2021 гг. — временное замедление осушки (2 010 кв км)

Уменьшение площади осущённых территорий почти в два раза относительно предыдущего периода может указывать на кратковременную стабилизацию или изменение климатических условий, частичное восстановление уровней, либо снижение темпов регрессии в северо-восточном секторе. Однако уменьшение темпа не означает прекращения процесса — осушка продолжается, но относительно замедленным темпом.

5. Период 2021–2025 гг. — новая волна ускорения (4 494 кв км)

Возвращение к высокому уровню осушки указывает на возобновление негативной динамики. Это значение является наибольшим среди всех анализируемых периодов, что говорит о достижении критического этапа деградации казахстанского сектора.

Суммарная потеря водной поверхности с 2000 года по 2025 годы составляет 16 384 кв км, что аналогично исчезновению огромной прибрежной акватории, сопоставимой по масштабу с крупным внутренним морем.

Данные 2021–2025 гг. демонстрируют усиление регрессии и выход процесса на новый максимум. Это указывает на тенденцию к дальнейшему снижению уровня моря в отсутствие стабилизирующих факторов.

Сравнение данных спутниковых платформ позволяет оценить пространственную неоднородность процессов осушения. В северной части казахстанского сектора зафиксировано наиболее интенсивное сокращение акватории, что связано с особенностями гидрологического баланса и морфологии дельтовых участков. Вместе с тем центральные и южные районы также демонстрируют выраженную регрессию, особенно в зонах с низкими отметками рельефа, где снижение уровня моря приводит к формированию протяжённых прибрежных отмелей.

Для более детального анализа ниже рассмотрим отдельные участки осушенных территорий казахстанского сектора Каспийского моря. Для регионального мониторинга береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря применяются спутниковые данные высокого пространственного разрешения (10–60 м), что позволяет получать детализированную информацию о трансформации прибрежной зоны и отслеживать локальные морфодинамические процессы. На представленных рисунках 2-6 показана динамика водной поверхности на территориях районы Пешной, Прорва, Мертвый Култук, Новинский заказник и резерват «Акжайык». Водная поверхность определена на основе данных Landsat (1994 год) и Sentinel-2 (2025 год), что позволяет провести сравнительный анализ изменений за более чем 30 лет.

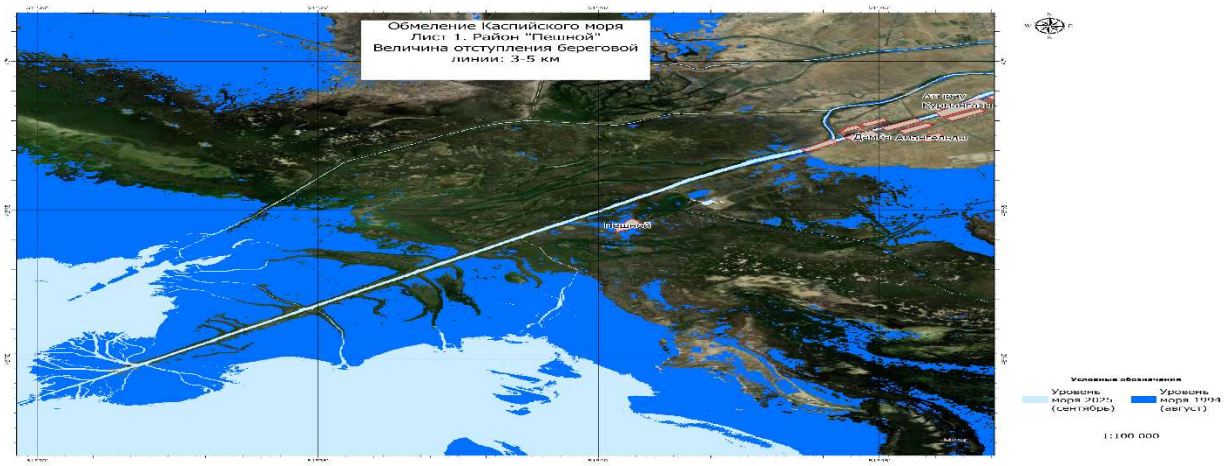

Рисунок 2. Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения (район Пешной)

За период 1994–2025 гг. в районе Пешной фиксируется умеренное, но устойчивое отступление береговой линии на 3–5 км. Это свидетельствует о постоянном снижении уровня воды и деградации прибрежных экосистем.

Ключевые особенности изменений:

- Скорость отступления относительно умеренная по сравнению с другими районами западного побережья.
- Осушение проявляется преимущественно в виде расширения мелководных зон и образования широких полос пустынных земель.
- Вероятны изменения структуры грунтов, усиление солонцеватости и снижение биопродуктивности.

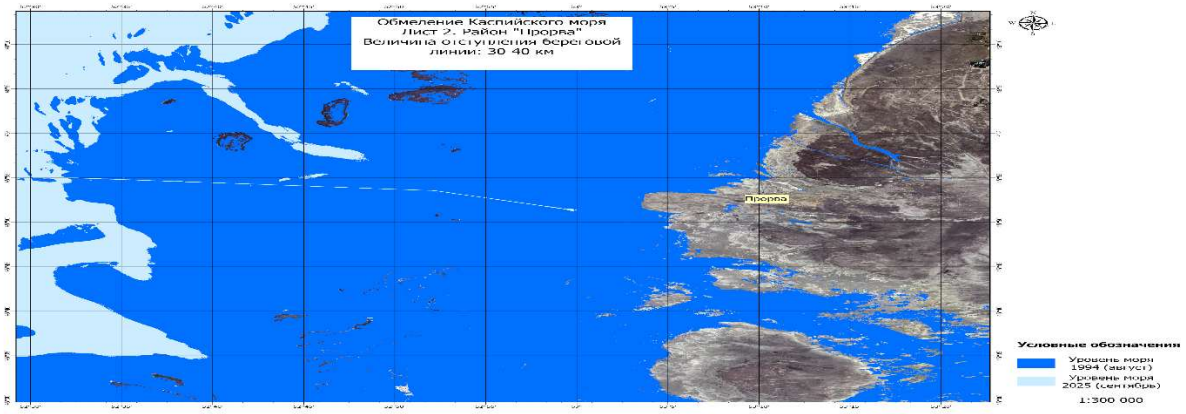

Рисунок 3. Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения (район Прорва)

Район Прорвы демонстрирует одно из самых критических значений осушения — 30–40 км, что указывает на масштабнейшее сокращение акватории восточной части Каспийского моря.

Ключевые особенности изменений:

- Водоотступление носит катастрофический характер.
- На месте бывшего дна появляются огромные сухие территории, подверженные ветровой эрозии.
- Увеличивается площадь солончаков и пустынных ландшафтов.
- Вероятно выпадение или исчезновение ряда водно-болотных биотопов.

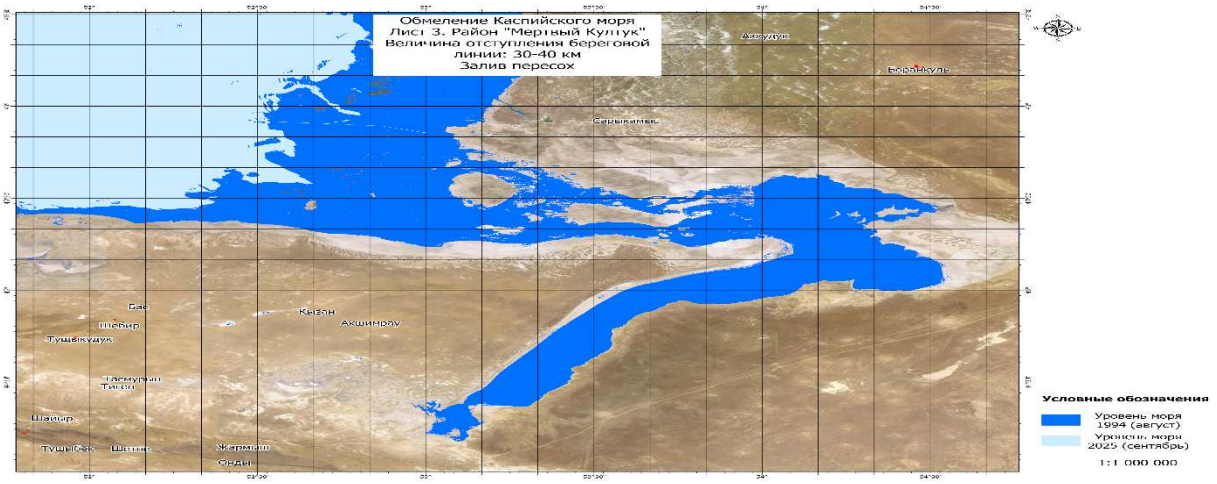

Рисунок 4. Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения (район Мертвый Култук)

Равнозначные Прорве величины отступления в районе Мёртвый Култук — 30–40 км — подтверждают долговременное и резкое обмеление этой части региона.

Ключевые особенности изменений:

- Фактически произошло отступление моря на десятки километров, оставив обширные пустынные пространства.
- Вновь открывшиеся территории отличаются высокой солевой нагрузкой.
- Вероятны значительные изменения микроклимата: учащение пылевых бурь, повышение температуры.
- Среда обитания для большинства водных видов исчезла или значительно трансформировалась.

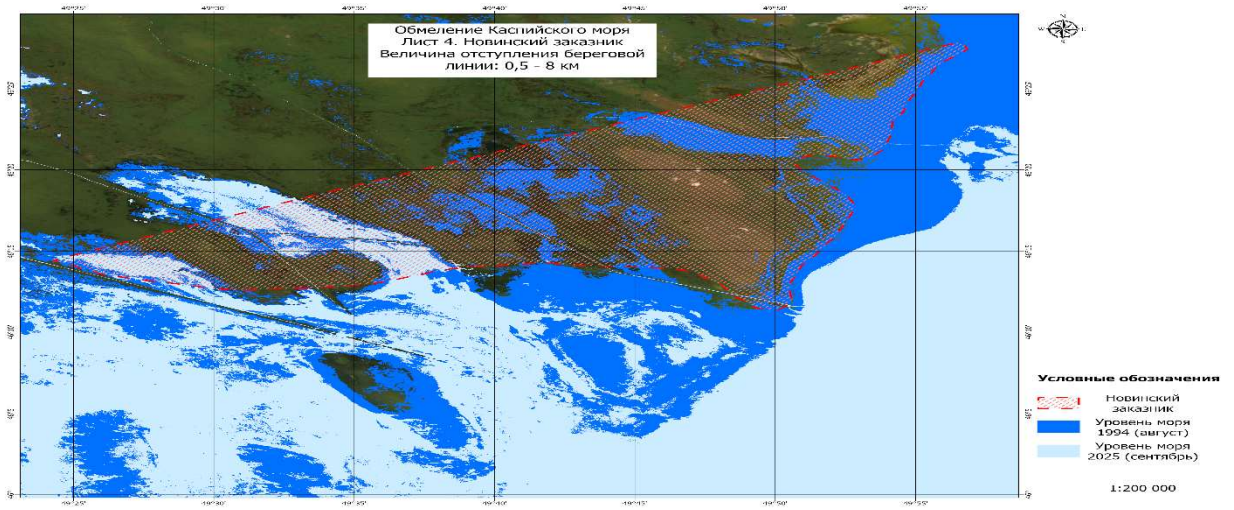

Рисунок 5. Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения (район Новинский заказник)

Осушение в районе Новинского заказника варьируется от минимального (0,5 км) до существенного (8 км), что указывает на неоднородность процессов.

Ключевые особенности изменений:

- На некоторых участках берег отступил незначительно, сохранив часть прибрежных биотопов.
- На других — потери воды достигают нескольких километров, что влияет на местообитания птиц и водно-болотных организмов.

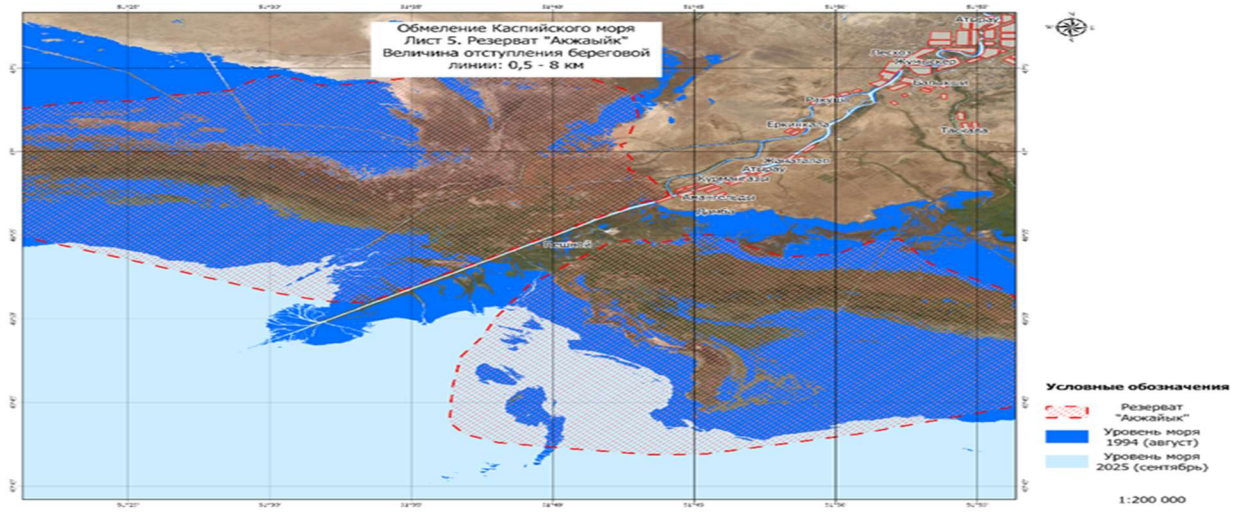

Рисунок 6. Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения (район резерват «Акжайык»)

Заповедная территория «Акжайык», обладая высокой природоохранной ценностью, также подверглась осушению в пределах 0,5–8 км, что представляет угрозу для экосистем дельты Урала.

Ключевые особенности изменений:

- Осушение в большей степени затронуло периферийные участки водно-болотных угодий.
- Сокращение водных зеркал снижает численность водоплавающих птиц.

- Увеличивается опасность появления солончаков внутри бывших плавневых территорий.

Основной механизм изменений — отступ моря, приводящий к формированию новых осушенных территорий, увеличению площадей мелководья и существенной трансформации прибрежного рельефа. Наибольшие изменения наблюдаются в низменных участках и дельтовых зонах, где интенсивность осушения максимальна.

4. Обсуждение

Результаты анализа пространственно-временной динамики подтверждают, что в казахстанском секторе Каспийского моря в 2000–2025 гг. происходит устойчивое и последовательное расширение зон осушения. Эта тенденция выражена по всей акватории, однако её интенсивность возрастает во второй половине исследуемого периода, начиная примерно с середины 2010-х годов. Отмеченное ускорение свидетельствует о переходе системы в более активную фазу трансформации, когда даже небольшие изменения гидрологических условий вызывают значительные сдвиги в положении береговой линии.

Особое внимание привлекает тот факт, что процессы регрессии моря развиваются неравномерно в пространстве. Наиболее глубокие изменения характерны для северной части казахстанского побережья, где сочетание мелководья, открытой конфигурации береговой зоны и зависимости от речного питания делает регион уязвимым к понижению уровня моря. Здесь смещение границы суши происходит быстрее, чем в других сегментах моря, что приводит к стремительному формированию новых участков суши и перестройке прибрежных геосистем.

Центральные и южные районы также демонстрируют явное отступление акватории, однако его профиль более вариативен. В участках с низкими абсолютными отметками рельефа наблюдается существенное увеличение площади осушения, поскольку даже умеренное падение уровня воды вызывает обширное оголение дна. В более повышенных или структурно устойчивых зонах изменения протекают медленнее, но общая тенденция регрессии остаётся неизменной. Такое сочетание факторов указывает на то, что современные процессы обусловлены не только крупномасштабными климатическими влияниями, но и внутренней неоднородностью геоморфологической структуры побережья.

Последствия происходящих изменений выходят за рамки простой перестройки береговой линии. Образующиеся сушевые пространства характеризуются иным режимом увлажнения и высокой соленостью поверхностных отложений, что ведёт к формированию новых типов ландшафтов — от засолённых равнин до молодых пустынных участков. Изменение режима увлажнения и перераспределение водно-болотных угодий оказывают прямое воздействие на структуру биоценозов, уменьшая площади пригодных местообитаний для водоплавающих птиц, рыб и других представителей прибрежных комплексов.

С учётом выявленных тенденций становится очевидным, что трансформация казахстанского сектора Каспия носит системный характер и, вероятно, будет продолжаться при сохранении современных климатических условий. В этой связи актуализируется необходимость регулярного мониторинга динамики уровня моря, анализа гидрологического баланса и оценки экологических последствий сокращения акватории. Дальнейшие исследования должны быть направлены на уточнение механизмов, управляющих регрессией моря, а также на разработку подходов к адаптации природных и социально-экономических систем к стремительно меняющимся условиям.

В дополнение к работам по дистанционному зондированию Земли, выполненным на участках района Пешной, Прорва, Мёртвый Култук, Новинский заказник и резерват «Акжайык», были проведены полевые исследования, а именно были сделаны снимки с дронов направленные на уточнение состояния береговых процессов. Полевые работы осуществлялись

в ноябре 2025 года и охватывали три маршрута, расположенные вдоль побережья. Работы выполнялись с применением дрон-квадрокоптера Dji Mavic 4 pro и GPS-навигатора Garmin etrex 10.

Первый маршрут проходил вдоль прибрежной зоны Среднего Каспия — на участке между водозаборным каналом №1 и водосбросным каналом №2 Мангистауского энергетического комбината (МАЭК). Протяжённость обследованной территории составила около 5 км, участок расположен к югу от города Актау (рисунок 7).

Рисунок 7. Снимок береговой зоны участка между водозаборным каналом №1 и водосбросным каналом №2 Мангистауского энергетического комбината (МАЭК).

В рамках второго маршрута исследования проводились на южном побережье залива Мангистау, в районе участка Сарытас на полуострове Тюб-Караган. Базовая станция располагалась в 140 км от города Актау (рисунок 8).

Рисунок 8. Снимок береговой зоны участка южного побережье залива Мангистау, в районе участка Сарытас на полуострове Тюб-Караган.

Третий маршрут также охватывал территорию Северного Каспийского моря, но уже на восточном побережье полуострова Тюб-Караган — в районе залива Кошак (рисунок 9).

Рисунок 9. Снимок береговой зоны участка восточного побережье полуострова Тюб-Караган — в районе залива Кошак.

Таким образом, совокупность данных дистанционного зондирования и полевых наблюдений, выполненных на ключевых участках побережья, позволила получить комплексное представление о текущем состоянии береговой линии Северного Каспия.

5. Заключение

Результаты анализа позволяют утверждать, что в течение рассматриваемого периода произошло устойчивое и значительное сокращение площади акватории казахстанского сектора Каспийского моря. Независимо от локальных особенностей, все исследованные участки демонстрируют прогрессирующее увеличение осушенных территорий, что свидетельствует о долговременной тенденции деградации прибрежных зон. Особо примечательной является выявленная интенсификация процессов в последние годы, что указывает на усиление факторов, определяющих общее снижение уровня моря.

Сформированные за 25 лет сушевые пространства становятся важным элементом современной структуры побережья и требуют включения в дальнейшие оценки состояния региона. Трансформация береговой зоны ведёт к изменениям природных условий, затрагивает функционирование экосистем и создаёт новые вызовы для природопользования. Учитывая масштабы произошедших преобразований, дальнейшее исследование направлений развития осушённых территорий и их влияния на окружающую среду является актуальной задачей.

Полученные результаты подчёркивают важность систематического мониторинга береговой линии с использованием дистанционных средств измерений. Полученные результаты являются основой для последующих исследований и разработки подходов к адаптации природных и хозяйственных систем к продолжающемуся обмелению.

Использование высокодетальных спутниковых данных позволяет не только визуализировать масштабы изменений, но и количественно оценивать скорость регрессии воды, что является ключевым для планирования мер по охране прибрежных экосистем и управлению водными ресурсами.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Для исследовательских статей с несколькими авторами необходимо предоставить короткий параграф, указывающий их вклад. Должны быть использованы следующие

утверждения: «Концептуализация, X.X. и Y.Y.; методология, X.X.; программное обеспечение, X.X.; валидация, X.X., Y.Y. и Z.Z.; формальный анализ, X.X.; исследование, X.X.; ресурсы, X.X.; курирование данных, X.X.; написание — подготовка оригинального черновика, X.X.; написание — рецензирование и редактирование, X.X.; визуализация, X.X.; руководство, X.X.; администрирование проекта, X.X; получение финансирования, Y.Y. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи». Авторство должно быть ограничено теми, кто внес существенный вклад в представленную работу.

8. Информация об авторе

Ахметов Серик Кабуалиевич – Председатель правления, НАО «Казахский научно-исследовательский институт Каспийского моря», Актау, Казахстан; serik.akhmetovkz@gmail.com

9. Финансирование: Пожалуйста, добавьте: «Нет внешнего финансирования» или «Это исследование финансировалось ФОНДом (Название), номер гранта XXX».

10. Благодарности: Вы можете выразить признательность за любую поддержку, не включенную в разделы вклада или финансирования автора в этом разделе. Это может включать административную и техническую помощь.

11. Конфликты интересов: Авторы должны заявить о любых конфликтах интересов или заявить: «Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов». Это включает личные обстоятельства или интересы, которые могут ненадлежащим образом повлиять на результаты исследования. Это должно быть раскрыто, если спонсоры были вовлечены в разработку исследования, сбор данных, анализ, написание рукописи или решения о публикации. Если они не были вовлечены, заявите: «Финансисты не играли никакой роли в разработке исследования, сборе данных, анализе, написании рукописи или решениях о публикации».

12. Список литературы

1. Ивкина Н. В., Терехов А. Н., Наурозбаева Ж. А. Колебания уровня Каспийского моря и диагностика современных изменений положения береговой линии по спутниковым данным LANDSAT периода 2005–2015 годов // Гидрометеорология и экология. — 2015. — № 2. — С. 89–99.
https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/105
2. Ивкина Н. В. Колебания уровня и их влияние на нефтяное загрязнение казахстанского сектора Каспийского моря // Гидрометеорология и экология. — 2023. — № 2. — С. 62–72.
https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/105
3. Базарбай Л., Елтай А., Жагпарова N., Шишкина G. Влияние реки Жайык на уровень Каспийского моря // Гидрометеорология и экология. — 2024. — № 4. — С. 7–14.
https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-115-4-7-14
4. Сергеева А. А., Кошим Ә., Сапаров Қ. Природно-рекреационная оценка Каспийского моря и его побережья // Гидрометеорология и экология. — 2023. — № 2. — С. 174–186.
https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/94
5. Исентаев К. Б., Каменев Е. А., Скоцеляс И. И. Воздействие повышения уровня воды Каспийского моря на окружающую среду // Гидрометеорология и экология. — 2023 (переиздание исследования 2000 г.).
https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/1849
6. Мамаева N. (2023). Визуализация изменений береговой линии Каспиийского моря. Гидрометеорология и экология, (3), 63–67.
https://doi.org/10.54668/2789-6323-2021-102-3-63-67

7. Chen J., Cazenave A., Wang S.-Y., Li J. Caspian Sea Level Change Observed by Satellite Altimetry // Remote Sensing. — 2023. — Vol. 15, № 3. — Article 703.
(PDF) Caspian Sea Level Change Observed by Satellite Altimetry
8. Dyakonov G. S., Ibrayev R. A. Long-term evolution of Caspian Sea thermohaline properties reconstructed in an eddy-resolving ocean general circulation model // Ocean Science. — 2019. — Vol. 15. — P. 527–541. OS - Long-term evolution of Caspian Sea thermohaline properties reconstructed in an eddy-resolving ocean general circulation model
9. Decadal changes in meteorological extremes and environmental consequences in the Caspian Sea Region // Discover Atmosphere. — 2025. Decadal changes in meteorological extremes and environmental consequences in the Caspian Sea Region | Discover Atmosphere
10. Naderi Beni A., Lahijani H., Mousavi Harami R., et al. Caspian Sea-level changes during the last millennium: historical and geological evidence from the south Caspian Sea // Climate of the Past. — 2013. — Vol. 9, № 4. — P. 1645–1665. CP - Caspian sea-level changes during the last millennium: historical and geological evidence from the south Caspian Sea
11. Shabanova N., Lahijani H., Pourkerman M. Caspian sea level changes at the end of Little Ice Age and its impacts on the avulsion of the Gorgan River // Méditerranée. — 2014. — P. 145–155. Caspian Sea-level changes at the end of Little Ice Age and its impacts on the avulsion of the Gorgan River : a multidisciplinary case study from the southeastern flank of the Caspian Sea
12. Karbassi A., Daryaei M. Caspian Sea level change impacts regional seismicity // Journal of Great Lakes Research. — 2012. — Vol. 38, Issue 4. — P. 667–672.
Caspian sea level change impacts regional seismicity - ScienceDirect
13. Hofmann A., Arpe K., Leroy S. Caspian Sea evaporating as temperatures rise: evidence from climate reanalysis // AGU / Earth's Future. — 2017.
Caspian Sea evaporating as temperatures rise, study finds
14. Saeidzadeh A., Ghorbani M., Kazemi S. Spatiotemporal dynamics of northern Caspian shorelines (1985–2023) and implications for coastal management // Coastal Studies Journal. — 2025.Moradi H., Tavakoli V., Rahmati O. Tracking sea-level impacts on Ramsar sites and potential restoration of Gorgan Bay // Wetlands Ecology. — 2023.
Spatiotemporal dynamics of northern Caspian shorelines (1985–2023) and implications for coastal management: Lessons from the Aral Sea | PLOS One

Мақаланың аты

Аты Тегі, Аты Тегі және Аты Тегі

Аңдатпа: Зерттеу мақалаларына арналған аңдатпа 300 сөзден аспайтын абзац ішінде зерттеуді қысқаша мазмұндауы керек. Авторларға арнайы тақырыптарды пайдаланбай құрылымдық форматты қабылдау ұсынылады. Аңдатпа мақаланың мазмұнын объективті түрде көрсетуі керек және негізгі мәтінде талқыланбаған немесе қолдалмаған нәтижелерді қамтымауы керек. Сонымен қатар, ол негізгі қорытындыларды асыра айтудан аулақ болу керек.

Түйін сөздер: түйін сөз 1; түйін сөз 2; түйін сөз 3 (мақалаға тән, бірақ пәндік пәнде жеткілікті түрде кең таралған 3-10 түйін сөзді тізімдеңіз)

Следующая информация должна быть предоставлена на английском языке.

Title

Firstname Lastname, Firstname Lastname and Firstname Lastname

Abstract: An abstract for research articles should concisely summarise the study within a paragraph of no more than 300 words. Authors are encouraged to adopt a structured format without using specific headings. The abstract must objectively reflect the article's content and should not include results not discussed or supported in the main text. Additionally, it should avoid overstating the main conclusions.

Keywords: keyword 1; keyword 2; keyword 3 (List three to ten pertinent keywords specific to the article yet reasonably common within the subject discipline)