

Анализ изменения береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря на основе данных дистанционных средств измерений в контексте их влияния на экосистему прибрежной зоны

Серик Ахметов^{1*}, Дмитрий Малахов²

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

²РГП на ПХВ «Институт зоологии» КН МНВО РК Алматы, Казахстан; dmitry.malakhov@zool.kz

*Корреспонденция: serik.akhmetovkz@gmail.com

Аннотация. За последние десятилетия береговая линия казахстанского сектора Каспийского моря все более заметно претерпевает изменения вследствие колебаний уровня моря. Основными воздействующими факторами являются природные и антропогенные факторы. Все эти изменения оказывают существенное влияние на прибрежную экосистему западного региона республики. Колебания уровня моря, изменения режима и объема стока приточных рек, а также хозяйственная деятельность человека служат причинами деградации территорий водно-болотных угодий и сокращения площади водного зеркала моря. Все эти факторы оказывают влияние на трансформацию структуры прибрежного рельефа.

Для исследования изменения береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря были использованы данные дистанционного зондирования Земли MODIS, Landsat и Sentinel-2. Дополнительно для более развернутого пространственного анализа были организованы полевые наблюдения на ключевых участках с применением дронов.

Комплексное использование двух методов дало возможность выявить пространственно-временные тенденции изменения экосистемы. По полученным результатам можно сделать вывод о том, что в период с 2000 по 2025 год общая площадь водного зеркала моря сократилась до 16 834 км². Наиболее значительные изменения прибрежной территории наблюдаются в северной части казахстанского сектора Каспийского моря.

По данным наблюдений установлено, что на участках Пешной, Прорва, Мёртвый Култук, Новинского заказника и резервата «Акжайык» формируются мелководные зоны, солончаки и пустынные ландшафты. Такое преобразование территории приводит к сокращению природных местообитаний для различных видов организмов и существенной деградации экосистемы.

Результаты анализа и оценки подчеркивают системный характер трансформации экосистем казахстанского сектора Каспийского моря и всей прибрежной территории. Таким образом подчеркивается актуальность необходимости регулярного мониторинга, оценки гидрологического баланса и разработки стратегий сохранения и восстановления прибрежных биотопов.

Цитирование: Ахметов, С., Малахов, Д. (2026). Анализ изменения береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря на основе данных дистанционных средств измерений в контексте их влияния на экосистему прибрежной зоны. *Journal of Ecology and Sustainability*, 154(1), 7-26 https://doi.org/10.32523/8gwpt_a33

Академический редактор:
А. Зандыбай

Поступила: 17.12.2025
Исправлена: 25.02.2026
Принята: 18.03.2026
Опубликована: 31.03.2026



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/>)

Ключевые слова: дистанционное зондирование; MODIS; Landsat; Sentinel-2; мониторинг прибрежных зон; экосистема.

1. Введение

При изучении динамики Каспийского моря особое значение имеет возможность анализа долгосрочных изменений. Долгосрочная динамика режимов находится под влиянием как естественных климатических факторов, так и усиливающейся с годами антропогенной нагрузки. Использование архивных спутниковых данных дает возможность определить устойчивые тенденции в изменениях динамики разных параметров за несколько десятилетий наблюдений. К такого рода параметрам относятся: уровень воды, температурные характеристики, распределение ледового покрова и изменения прибрежной территории.

Сопоставительный анализ современных условий с предыдущими этапами изменения морской среды является ценной научной основой; такие мониторинговые данные необходимы для оценки масштабов происходящих трансформаций (Lebedev et al., 2008; Yeltay, 2022; Ivkina et al., 2015; Yeltay et al., 2023).

Многие ученые (Badulin et al., 2025; Ashtab et al., 2024; Court et al., 2025; Mamaeva, 2023; Kostianou et al., 2022) в своих исследованиях показывают, что комплексный анализ с использованием спутниковых данных дает возможность существенно повысить качество анализа. Во многих работах совместно с данными дистанционного зондирования используются результаты модельного расчета и стационарные наблюдения, что способствует развитию научных представлений о функционировании Каспийского моря как сложной природной системы.

Во многих исследованиях (Kostianou et al., 2018; Sagatdinova et al., 2023; Dyakonov et al., 2019; Brekke et al., 2005; Sagatdinova et al., 2024; Ghorbani et al., 2023) подчеркивается, что дистанционное зондирование является эффективным инструментом для описания и визуализации текущего состояния морской среды. Также дистанционное зондирование является инструментом решения ряда прикладных задач. К таким видам задач относятся: обеспечение безопасности морской деятельности, прогнозирование опасных природных явлений и экологический контроль.

Использование спутниковых данных дает возможность оперативно выявлять аномально критические изменения характеристик водной среды. Современные методы и инструменты повышают тем самым эффективность управленческих решений в прикаспийском регионе (Ivanov et al., 2016; Nezhlin et al., 2012).

Также существуют отдельные направления исследований, входящих в состав спутниковых наблюдений (Chen et al., 2024; Cavalli, 2024), связанные с анализом и оценкой взаимодействия гидрологических, физических и биологических процессов. К такому виду процессов относятся: изменения температурного режима, циркуляция водных масс и содержание взвешенных веществ. Эти процессы оказывают прямое влияние на продуктивность экосистемы и на пространственное распределение биоты. Данные дистанционного зондирования в таких исследованиях являются важным источником информации для комплексного междисциплинарного исследования. Междисциплинарные исследования объединяют в себе сразу несколько важных методов, таких как физическая океанография, экология и геоинформационные системы (Shiklomanov et al., 2019).

Исходя из вышеизложенного, применение дистанционного зондирования Земли для исследования Каспийского моря - это не только современное решение, но и важная составляющая для анализа и оценки целостного представления о процессах, происходящих как на акватории, так и на прибрежной части.

По мнению многих ученых (Ivkina, 2023; Sergeeva et al., 2023; Shabanova et al., 2014; Karbassi et al., 2012; Hofmann et al., 2017; Saeidzadeh et al., 2025) в последние десятилетия в

береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря все более заметно проявляются пространственно-временные изменения под влиянием как природных, так и антропогенных факторов. Колебания уровня воды, изменения стока и режима рек, интенсивное развитие прибрежной инфраструктуры и локальные климатические процессы формируют сложную динамику гидрологических и природных процессов. Все это требует детального и системного изучения. В данном исследовании проведен системный и комплексный анализ трансформации береговой зоны казахстанского сектора Каспийского моря. В основу исследования легли данные дистанционного зондирования, мультिवременные архивные спутниковые изображения, результаты геопространственной обработки данных. Дополнительно были использованы данные, полученные благодаря дронам в полевых условиях.

Использование различных методов анализа позволило получить более детальные и развернутые данные для анализа. Обработка данных методами автоматизированного картографирования позволила установить ключевые тенденции смещения береговой линии, а также определить участки с наиболее выраженными изменениями. Полученные вследствие обработки и анализа результаты формируют основу для последующего мониторинга состояния прибрежной зоны и акватории казахстанского сектора Каспийского моря. Данная работа может послужить основой научно-практической базы для разработки стратегий рационального управления ресурсами и предотвращения возможных рисков. Такие риски напрямую связаны с деградацией береговых экосистем вследствие трансформации береговой линии за счет колебания уровня моря.

Научная новизна исследования заключается в выполнении комплексной количественной оценки динамики береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря с детальным делением на пятилетние периоды. В отличие от ранних опубликованных исследований, в работе представлена интегральная оценка суммарной потери площади водного зеркала, проведено пространственное сопоставление участков с различной интенсивностью осушения в сочетании с материалами полевых наблюдений. В работе также показана неоднородность трансформации побережья, включая особо охраняемые природные территории. Полученные результаты уточняют современные масштабы и темпы регрессии моря в пределах казахстанского сектора Каспийского моря.

2. Материалы и методы

Объектом исследования является береговая линия казахстанского сектора Каспийского моря. Казахстанский сектор Каспийского моря отличается преобладанием мелководных акваторий и высокой чувствительностью к колебаниям уровня моря. Береговая зона отличается разнообразной морфологией, например, в северной части преобладают низменные дельтовые участки с мелководными заливами, в центральной части равнинные побережья с песчаными полосами, на юге встречаются скалистые и полузасушливые участки. Прибрежные территории подвергаются антропогенному влиянию: хозяйственная деятельность, водозабор, развитие инфраструктуры вблизи городов и промышленные объекты. Особое внимание уделено следующим участкам: Пешной, Прорва, Мертвый Култук, Новинский заказник и резерват «Акжайык». Данные участки характеризуются различной морфологией рельефа, гидрологическими условиями и степенью антропогенной нагрузки.

В данном исследовании для анализа динамики береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря использованы данные дистанционного зондирования, которые включают некоммерческие оптико-электронные спутниковые данные различного пространственного разрешения. Анализ выполнен на основе многолетних спутниковых наблюдений за период 1994-2025 гг. Полевые исследования проводились в ноябре-декабре 2025 года в прибрежной зоне с применением беспилотных летательных аппаратов (дронов) и GPS-навигатора для уточнения состояния береговой линии. Также такие наблюдения дают возможность фиксации мелководных и осушенных территорий и оценки локальных изменений.

В качестве основы для долгосрочного мониторинга были использованы спутниковые изображения MODIS, характеризующиеся пространственным разрешением порядка 1 км. Данные обеспечивают стабильные многолетние временные ряды наблюдений с 2000 по 2025 годы.

Динамика уровня моря была оценена следующими типами спутниковых данных: Landsat 5 TM и Landsat 7 ETM+. Спутниковые изображения Landsat 5 TM и Landsat 7 ETM+ обеспечивают данные за период с 1994 года по 2000 год. Использование этих спутниковых данных позволило выявить крупномасштабные тенденции изменений береговой зоны. Также были оценены особенности сезонной и межгодовой variability динамики береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря. В связи с необходимостью уточнения площадей зеркала моря на ключевых участках были использованы данные высокого разрешения Sentinel-2.

Выявление водной поверхности выполнено с применением спектрального индекса MNDWI - Modified Normalized Difference Water Index (Xu, 2006). Индекс рассчитывается по формуле:

$$\text{MNDWI} = (\text{Green} - \text{SWIR1}) / (\text{Green} + \text{SWIR1}) \quad (1)$$

где, Green и SWIR1 - соответствующие каналы спутникового изображения. Индекс имеет значения от -1 до 1, водной поверхности соответствуют положительные значения индекса. Индекс применим для всех некоммерческих оптико-электронных сенсоров.

Для обработки большого количества мультимедийных спутниковых данных был разработан «kawa-script» для сервиса Google Earth Engine, обеспечивающий выбор безоблачных спутниковых данных в нужный период, расчет MNDWI и экспорт растровых и векторных данных на локальный ПК. Обработка полученных данных и подготовка картографических материалов проведены в ArcGIP PRO 3.5.

Для выполнения объективной и корректной оценки данных процессов необходимы систематические наблюдения мониторинга с широким пространственным охватом. Использование данных спутниковых изображений MODIS, Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ и Sentinel-2 дает возможность оценки всех интересующих процессов.

Комплексное использование спутниковых данных и полевых наблюдений позволило получить точные пространственно-временные показатели трансформации береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря.

3. Результаты

В связи с колебаниями уровня моря береговая линия казахстанского сектора Каспийского моря за последние десятилетия показывает нестабильный и регрессирующий характер. Динамика морского побережья находится под значительным влиянием таких факторов, как колебания уровня моря, изменения гидрологического режима и объема питающих море рек, изменения климатических процессов как регионального, так и локального масштаба и интенсивное развитие прибрежной инфраструктуры.

Казахстанский сектор Каспийского моря с начала текущего столетия показывает устойчивое и заметное сокращение площади водного зеркала. Сокращение водного зеркала приводит к таким последствиям, как постепенное смещение береговой линии в сторону моря и формирование в исследуемых зонах обширных мелководных территорий. По данным исследования установлено, что наиболее выраженные изменения начались после 2005 года. Именно в данный период темпы понижения уровня Каспийского моря возросли, что послужило причиной для более ускоренной деградации прибрежных экосистем и заметного изменения структуры берегового рельефа по всей прибрежной территории моря (рисунок 1).

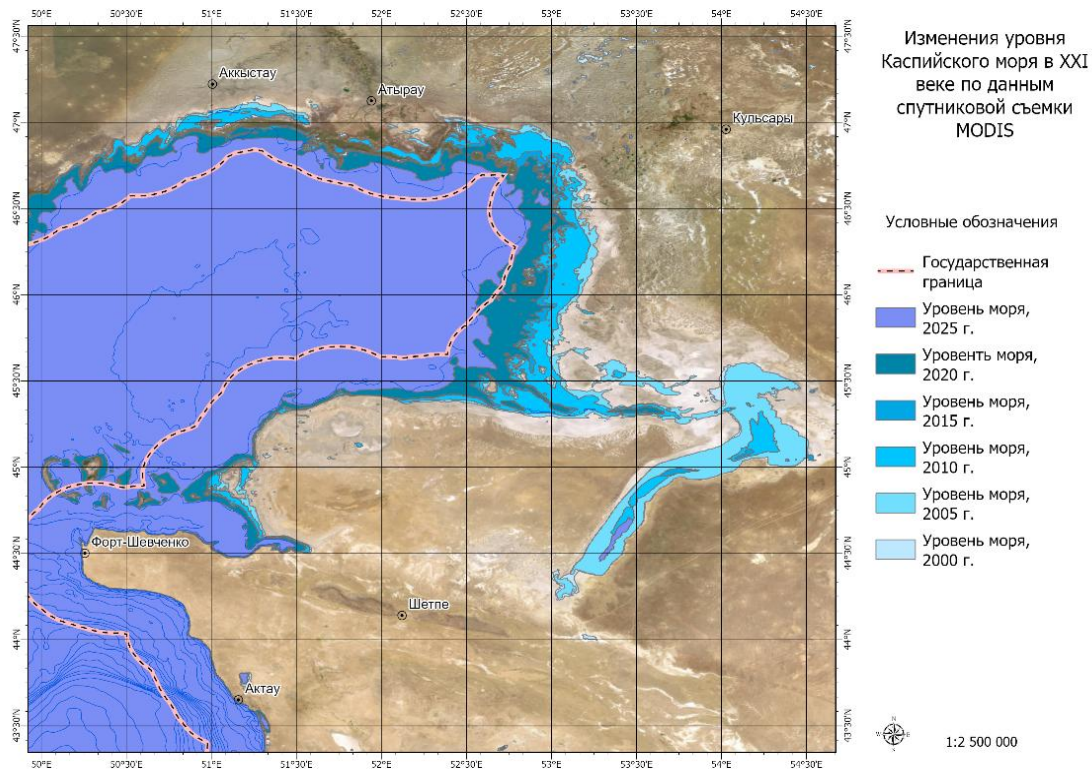


Рисунок 1. Мониторинг уровня моря по всей акватории казахстанского сектора (по данным MODIS)

По данным, представленным на рисунке 1, можно отметить повсеместное увеличение площади осушенных территорий в казахстанском секторе Каспийского моря с 2000 по 2025 годы. Данная тенденция прослеживается на протяжении всего периода исследования. Однако с середины 2010-х годов темпы обмеления увеличились. Вследствие возрастающего влияния факторов, способствующих снижению уровня моря с 2015 по 2025 год, наиболее отчетливо проявляется отступление моря и увеличение обмелевших участков. Данные процессы способствуют трансформации прибрежных зон казахстанского сектора Каспийского моря, расширяя площади вновь образованных сушиевых участков и усиливая контрастность береговой морфологии региона.

Воздействующим механизмом процесса осушения территории, увеличения площадей мелководья и существенной трансформации прибрежного рельефа является отступление моря.

Трансформации прибрежных зон казахстанского сектора Каспийского моря были разделены по пятилетним периодам:

1. Первый период - с 2000 по 2005 годы. Данный период можно условно назвать начальной фазой ускорения осушки, в данный период общая площадь обмелевших территорий составила 1449 км². По данным исследования в начале XXI века отступление береговой линии было достаточно умеренным, однако уже заметным. Масштаб осушки в данный период можно характеризовать как ранний индикатор проявления изменений береговой линии. Весь этот процесс связан с перестройкой гидрологического режима Каспийского моря, а именно со снижением уровня моря. Предположительно именно в данный период были сформированы предпосылки последующего ускорения деградации прибрежных зон и регрессии береговой линии.

2. Второй период - с 2005 по 2010 годы. Данный период характеризуется резким скачком осушенных территорий. Общая площадь осушенных территорий составляет 4110 км². Этап уже является первой крупной волной деградации прибрежной территории казахстанского

сектора Каспийского моря. Во втором периоде почти в три раза возросла площадь осушенных территорий по сравнению с первым периодом. Данный процесс указывает на значительное изменение водного баланса в отрицательную сторону, вследствие чего произошло сокращение общей акватории моря и увеличение площадей, обмелевших территории. Увеличение площадей обмелевших территорий в таком объеме указывает на интенсификацию следующих процессов:

- усиление испарения на всей акватории моря;
- уменьшение объемов подпитывающих вод в северную и восточную часть моря;
- ускорение в три раза регрессии береговой линии.

3. Третий период - с 2010 по 2015 годы. В этот период ситуация сравнительно стабилизировалась по сравнению со вторым периодом. Однако в данный период все еще сохраняются высокие значения осушки. Общая площадь осушенных территорий в третьем периоде составляет 4321 км². В третьем периоде общая площадь осушенных территорий практически идентична второму периоду, что указывает на то, что в данный период тенденция постоянного снижения уровня моря была закреплена. Исходя из всех изложенных фактов, можно сделать вывод о том, что практически одинаковые значения площадей, осушенных территории по двум периодам, указывают на стабильную отрицательную фазу моря. В водном балансе моря преобладает отрицательная часть, и приходная часть уже не может компенсировать потери.

4. Четвертый период - с 2015 по 2020 годы. Этот период характеризуется временным замедлением процессов осушения земель. В данный период общая площадь осушенных территорий составила 2010 км². В четвертом периоде площадь осушенных территорий уменьшилась почти в два раза по сравнению с предыдущим периодом. Данное замедление процесса осушения указывает на кратковременную стабилизацию ситуации. Возможно, в этот период происходили климатические изменения, которые положительно сказались на режим моря, в частности на северо-восточную часть, снижая темпы отступления моря. Однако необходимо отметить, что уменьшение темпов регрессии не означает полного прекращения процесса, осушение прибрежной зоны продолжается, однако темпы в данный период замедлились.

5. Пятый период - с 2021 по 2025 годы. Данный период можно назвать новой волной ускорения отступления моря, в этот период общая площадь осушенных территорий составила 4494 км². В этот период возобновляется динамика ускоренного отступления моря вследствие чего наблюдается возвращение к высоким темпам обмеления территорий. Именно в пятом периоде наблюдается самое высокое значение площади осушения территорий среди всех пяти анализируемых периодов. На данный момент, это значение является самой критической осушки для всех этапов казахстанского сектора Каспийского моря.

В ходе анализа было установлено, что с 2000 по 2025 годы общая суммарная потеря водной поверхности казахстанского сектора Каспийского моря составила 16384 км². Это означает, что исчезла значительная прибрежная акватория моря, сопоставимая по площади и масштабу с крупным внутренним водоемом.

По данным результатов, полученных в ходе обработки спутниковых данных, можно сделать вывод о том, что процесс осушения происходит в пространстве неоднородно. В северной части казахстанского сектора Каспийского моря наблюдается наиболее интенсивное сокращение акватории моря, данный процесс может быть связан с особенностями гидрологического баланса и морфологией дельтовых участков. Тем не менее, необходимо отметить, что в центральной и южной части моря также наблюдается выраженная регрессия. Особенно этот процесс регрессии наблюдается в зонах с низкими отметками рельефа, где снижение уровня моря является причиной формирования образования протяженных прибрежных отмелей.

В ходе исследования были рассмотрены отдельные участки обмелевших территорий казахстанского сектора Каспийского моря с целью более детального анализа территории. Для

мониторинга и анализа пространственно-временной изменчивости береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря были использованы спутниковые данные высокого пространственного разрешения (от 10 до 60 м). Использование таких высокодетальных спутниковых данных дает возможность получить более детальную информацию о трансформации прибрежной зоны и отслеживать локальные морфодинамические процессы, происходящие в регионе. Были выбраны следующие ключевые участки осушенных территорий: районы Пешной, Прорва, Мёртвый Култук, Новинский заказник и резерват «Акжайык». Для сравнительного анализа по всем участкам были выбран периоды 1994 и 2025 годов (рисунки 2-6). Водная поверхность, то есть акватория моря была определена на основе спутниковых данных Landsat (1994 год) и Sentinel-2 (2025 год). Использование этих методов и инструментов путем наложения данных дает возможность провести сравнительный анализ изменений прибрежной территории за период более чем 30 лет и визуально оценить динамику изменения береговой линии.

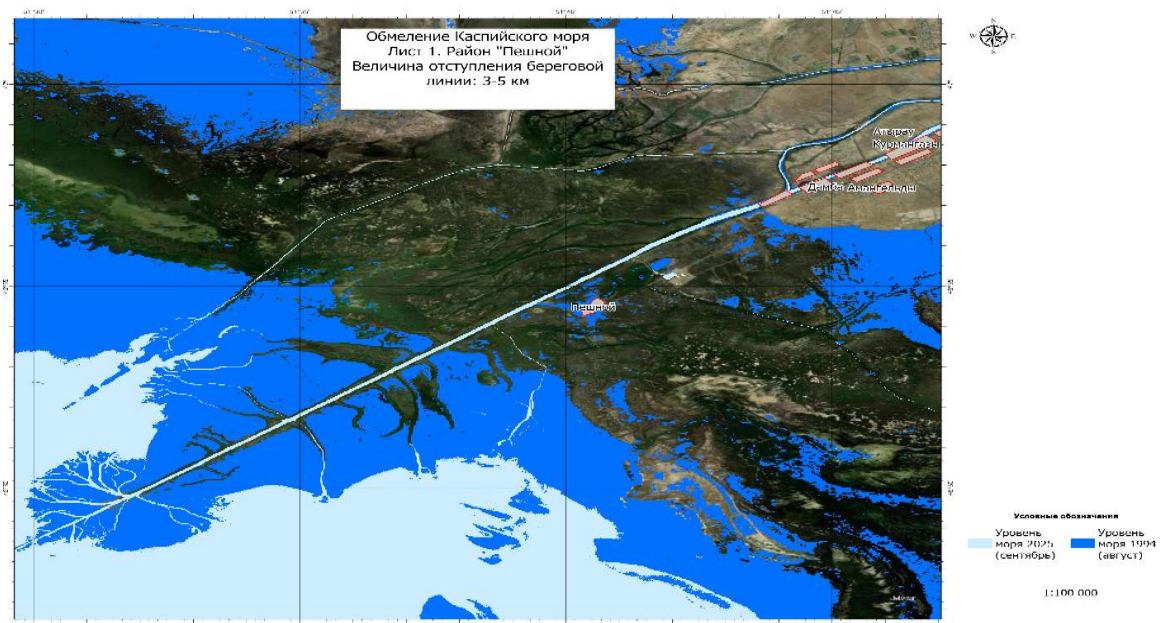


Рисунок 2. Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе Пешной (на основе спутниковых данных Landsat (1994 год) и Sentinel-2 (2025 год))

Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе Пешной за 1994 и 2025 годы показывает умеренное, но устойчивое отступление береговой линии. Величина отступления варьируется от 3 до 5 км. Данный процесс показывает стабильное снижение уровня воды и значительную деградацию экосистем исследуемой территории.

В ходе анализа выявлены ключевые особенности изменений прибрежной зоны в районе Пешной:

1. Скорость отступления моря в районе Пешной относительно умеренна по сравнению с другими исследуемыми районами;
2. Осушенные территории характеризуются расширением мелководных зон и образованием широких полос пустынных ландшафтов;
3. Возможно, в районе Пешной изменилась структура грунта, а также снизилась биопродуктивность региона.

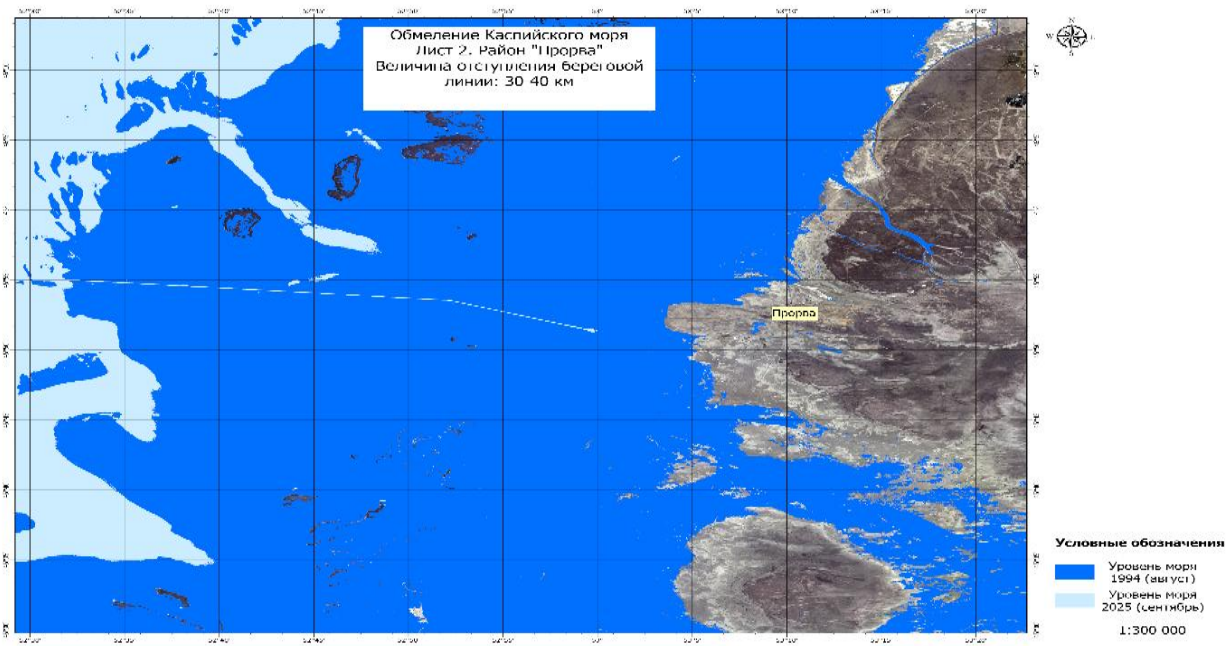


Рисунок 3. Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе Прорва (на основе спутниковых данных Landsat (1994 год) и Sentinel-2 (2025 год))

Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе Прорва демонстрирует одно из самых критических значений отступления моря и, следовательно, самые высокие значения площади сдвига береговой линии. Величина отступления береговой линии в районе Прорва составляет от 30 до 40 км, что является самым масштабным сокращением акватории восточной части Каспийского моря.

Были выявлены ключевые особенности изменений прибрежной зоны в районе Прорва:

1. Отступление моря в данном районе носит катастрофический характер;
2. Осушенные территории сильно подвержены ветровой эрозии;
3. Площади солончаков и пустынных ландшафтов в районе Прорва растут в геометрической прогрессии;
4. В случае, если данная тенденция сохранится в районе Прорва, то высока вероятность выпадения или исчезновения ряда биотопов.

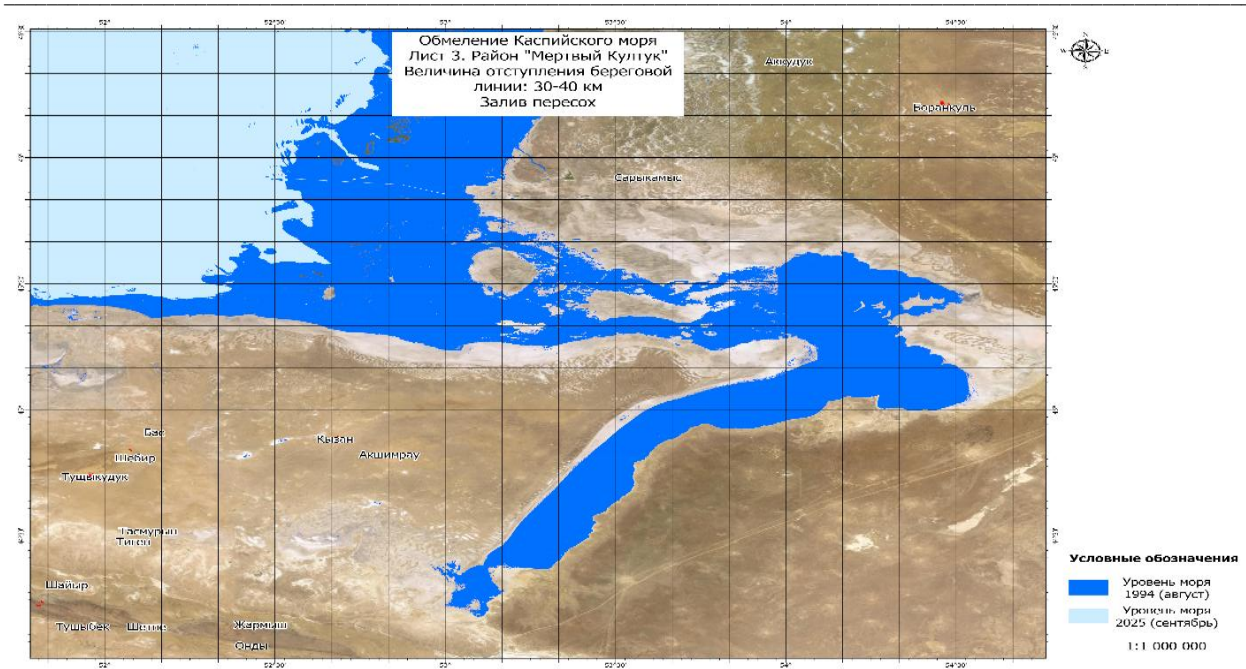


Рисунок 4. Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе Мёртвый Култук (на основе спутниковых данных Landsat (1994 год) и Sentinel-2 (2025 год))

Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе Мёртвый Култук показал, что данный район находится в той же критической степени обмеления, что и район Прорва. В районе Мёртвого Култука наблюдается долгосрочное обширное обмеление. Величина отступления береговой линии в данном районе варьируется от 30 до 40 км.

Были выявлены ключевые особенности изменений прибрежной зоны в районе Мёртвый Култук:

1. Визуально можно увидеть, что фактически произошло отступление моря на десятки километров, оставив после отступления обширные пустынные пространства;
2. Осушенные после схода воды территории отличаются высокой соленостью;
3. Вероятно, что в данной местности произошли изменения микроклимата, такие как учащение пыльных бурь и повышение температуры воздуха;
4. Возможно, что вследствие изменения местности среда обитания для большинства водных обитателей исчезла или сильно трансформировалась.

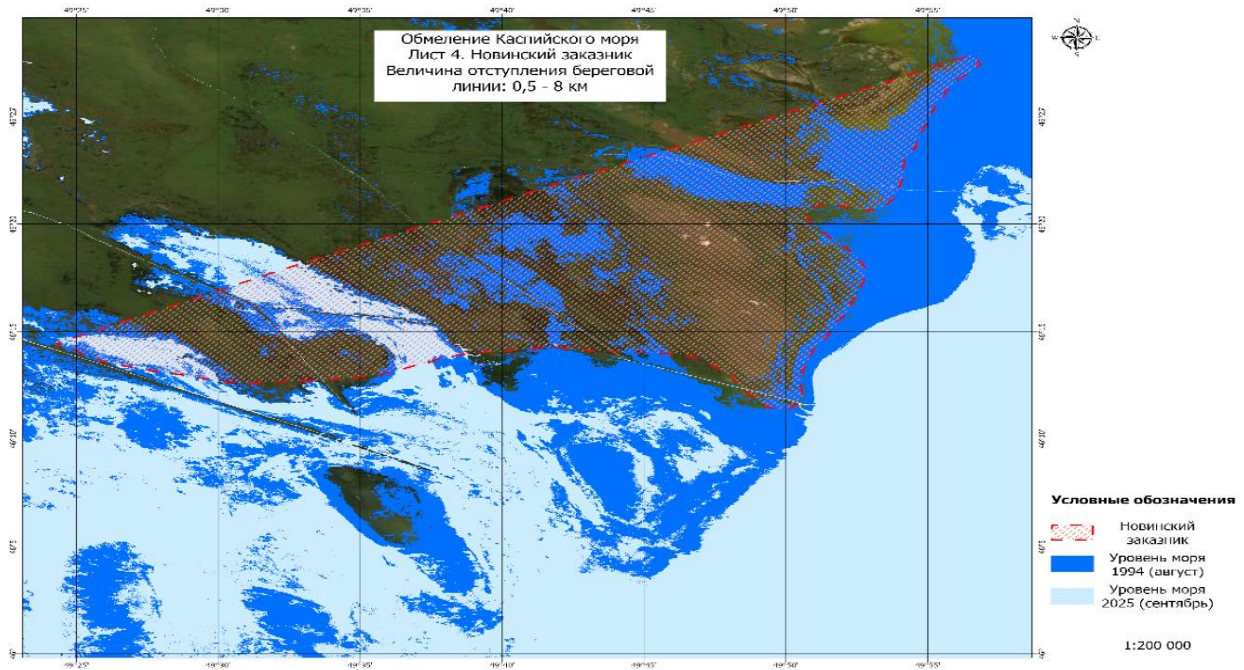


Рисунок 5. Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе Новинского заказника (на основе спутниковых данных Landsat (1994 год) и Sentinel-2 (2025 год))

Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе Новинского заказника показывает, что процесс осушения территории в данной местности происходит неоднородно. Величина отступления берега на отдельных участках составляет 0,5 км, тогда как в других участках может достигать 8 км.

Ниже приведены выявленные ключевые особенности изменений прибрежной зоны в районе Новинского заказника:

1. По данным мониторинга и анализа в определенных участках отступление берега носит незначительный характер, тем самым дает возможность сохранения прибрежных биотопов;
2. Вместе с тем в других соседних участках процесс осушения территории носит более выраженный характер. Вследствие таких изменений прибрежной территории оказывается прямое влияние на места обитания птиц и водно-болотных организмов.

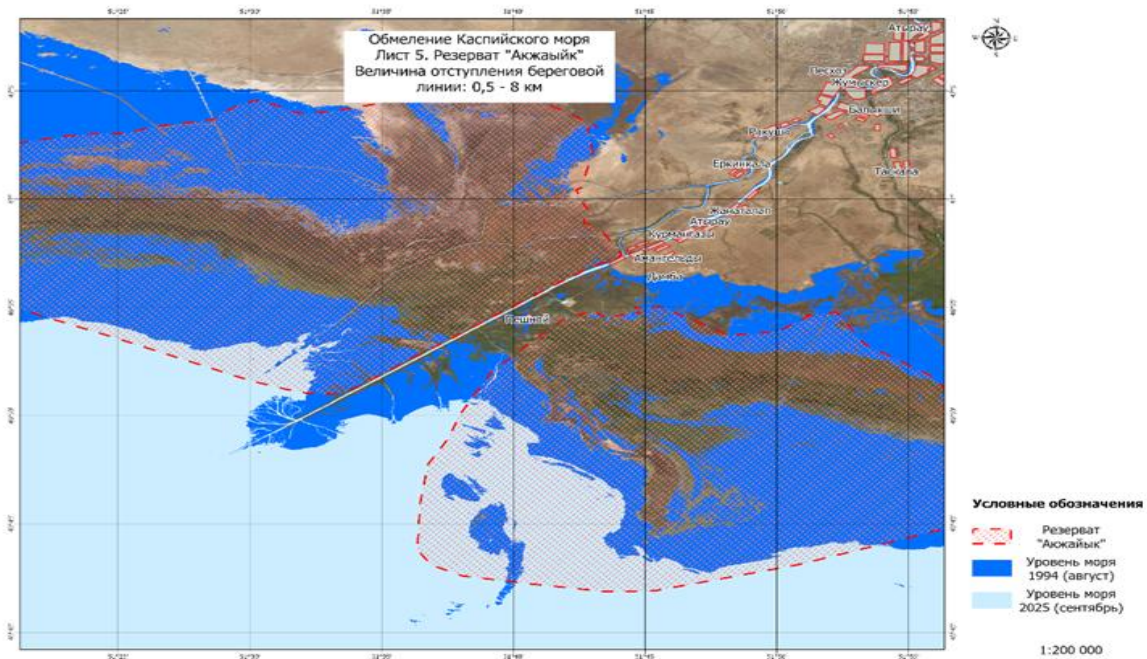


Рисунок 6. Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе резервата «Акжайык» (на основе спутниковых данных Landsat (1994 год) и Sentinel-2 (2025 год))

Заповедная территория «Акжайык» является природоохранной территорией, обладающей высокой биологической и природной ценностью. Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения показывает, что в районе резервата «Акжайык» также наблюдается процесс обмеления моря и регрессирующая трансформация прибрежной территории. Вследствие отступа моря на данной территории наблюдается образование новых прибрежных участков. Величина отступления береговой линии на отдельных участках составляет 0,5 км, тогда как на соседних участках достигает 8 км. Данная тенденция осушения представляет прямую угрозу для экосистемы дельты реки Жайык и является тревожным индикатором для существования многих обитателей резервата.

Ниже приведены выявленные ключевые особенности изменений прибрежной зоны в районе резервата «Акжайык»:

1. В результате трансформации прибрежной зоны и сокращения водного зеркала моря в будущем будет оказано негативное воздействие на водоплавающих птиц и других обитателей резервата;
2. Прогрессирование процесса обмеления моря пропорционально увеличивает появление солончаков на бывших плавневых территориях;
3. Низменные участки и дельтовые зоны характеризуются наиболее значимыми изменениями прибрежной территории, так как на этих участках интенсивность осушения максимальна.

В дополнение к работам по дистанционному зондированию Земли, выполненным на ключевых участках - районы Пешной, Прорва, Мёртвый Култук, Новинский заказник и резерват «Акжайык» были организованы полевые исследования для пространственной оценки. Для исследования были использованы дрон-квадрокоптер Dji Mavic 4 pro и GPS-навигатор Garmin etrex 10. Полевые исследования проводились с ноября по декабрь 2025 года. Маршрут охватывал три пункта наблюдений, расположенных вдоль побережья. Были сделаны снимки с дронов, направленные на уточнение состояния береговых процессов.

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



Рисунок 7. Снимок береговой зоны участка между водозаборным каналом №1 и водосбросным каналом №2 Мангистауского энергетического комбината (МАЭК) (снимки с дрон-квадрокоптера DJI Mavic 4 Pro)

В рамках второго маршрута исследования проводились на южном побережье залива Мангистау, в районе участка Сарытас на полуострове Тюб-Караган. Базовая станция расположена 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 (снимки с дрон-квадрокоптера DJI Mavic 4 Pro)

Третий маршрут исследования 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 (снимки с дрон-квадрокоптера DJI Mavic 4 Pro)

По данным проведённых полевых исследований можно визуально заметить, что действительно чётко видны трансформации побережья казахстанского сектора Каспийского моря. Процесс отступления моря прослеживается повсеместно на всех исследуемых участках. Величина отступления береговой линии варьируется от нескольких километров до нескольких десятков километров.

Таким образом, совокупность обработанных данных дистанционного зондирования и полевых наблюдений, выполненных на ключевых участках побережья позволила получить комплексное представление о текущем состоянии береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря.

Эти процессы, происходящие на всех исследуемых участках, свидетельствуют о том, что отступление моря и изменения береговой линии приводят к уменьшению площади пригодных местообитаний для представителей прибрежных комплексов, таких как водоплавающие птицы, рыбы и другие животные и растения.

4. Обсуждение

Результаты анализа пространственно-временной динамики береговой линии подтверждают, что в казахстанском секторе Каспийского моря в период с 2000 по 2025 годы наблюдается устойчивое и последовательное расширение территории зон осушения и трансформации прибрежной зоны. С начала XXI века эта тенденция имеет устойчивый характер, однако наиболее интенсивные изменения начинаются во второй половине исследуемого периода. Именно в период с 2005 по 2010 годы данная тенденция имеет ярко выраженный и регрессирующий характер. Изменения площадей акватории моря, ускорение процессов обмеления и изменения береговой линии указывают на то, что началась активная фаза трансформации побережья. В данный период происходящие в море незначимые ранее гидрологические процессы сейчас становятся причиной значительных изменений в положении береговой линии.

По мнению ряда ученых (Ivkina et al., 2015; Yeltay, 2022), длительное снижение уровня Каспийского моря связано с изменением водного баланса под влиянием климатических факторов и антропогенной деятельности. Повышение температуры воздуха усиливает испарение с поверхности водоёма, что приводит к потере значительных объёмов воды, которые не компенсируются притоком речного стока. Также необходимо отметить, что уменьшение объёмов поступления пресной воды из крупных притоков моря, таких как реки Жайык и Волга, усугубляет дефицит водного баланса и способствует процессу регрессии побережья. То есть, сочетание усиленного испарения и сокращения поверхностного притока

в конечном итоге приводит к долгосрочному понижению уровня моря в казахстанском секторе Каспийского моря.

Необходимо отдельно отметить тот факт, что происходящие процессы отступления моря имеют неравномерное пространственное распределение. Наиболее выраженные изменения происходят в северной части казахстанского побережья и именно в этом участке смещение границы береговой линии происходит быстрее, чем в других районах. Наиболее уязвимым к понижениям уровня моря делает этот регион сочетание мелководья, открытой конфигурации береговой зоны и зависимость уровня моря от речного питания рекой Жайык. Процесс стремительного обмеления приводит к образованию новых участков суши, которые приводят к перестройке прибрежных экосистем северной части казахстанского сектора Каспийского моря.

Ситуация в центральной и южной части казахстанского сектора Каспийского моря является схожей с северной частью. Однако данные изменения на данный момент не имеют столь выраженного влияния на прибрежную экосистему. По данным мониторинга выявлено, что в центральной и южной части моря в низменных участках с малой абсолютной высотой рельефа наблюдается существенное увеличение площади осушения, так как в таких участках даже небольшое снижение уровня воды в море вызывает обширное оголение дна. Тогда как в возвышенных и структурно устойчивых участках центральной и южной части казахстанского сектора Каспийского моря данные изменения протекают медленнее. В таких участках наблюдается сохранение общей тенденции регрессии для всей территории побережья. Исходя из этого необходимо подчеркнуть, что современные процессы обмеления обусловлены не только крупномасштабными климатическими и гидрологическими процессами, но также и внутренней неоднородностью геоморфологической структуры рельефа всего побережья моря.

Сравнительный анализ изменения побережья моря за 1994 и 2025 годы свидетельствует о неравномерном характере процесса осушения в северо-восточной части Каспийского моря. Данный процесс можно объяснить совокупностью как региональных, так и локальных факторов.

Сравнительный анализ изменения побережья за 1994 и 2025 годы выявил, что наиболее масштабные изменения процесса отступления моря наблюдаются в районе Мёртвого Култука, где общая площадь осушенных территорий составляет 12 529 км². Процесс обмеления и отступления моря в данном случае выходит за рамки краткосрочных колебаний, что говорит о том, что в данном районе происходит долговременная тенденция снижения уровня моря, что приводит к формированию новых обширных сушиевых территорий. Все эти факторы и процессы приводят к существенной перестройке природных условий. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что в районе Мёртвого Култука происходит глубокая трансформация побережья, сопровождающаяся изменением солевого режима и структуры донных отложений.

В районе Прорвы также зафиксированы высокие значения площади осушения, данное значение равно 3 872 км². Изменение береговой зоны в данном участке отличается от района Мёртвого Култука в первую очередь тем, что осушенные участки распределены более фрагментарно. Это указывает на влияние изменяющейся гидродинамики и на перераспределение объёма воды.

Особо охраняемые территории также подвержены процессу обмеления моря. На особо охраняемых природных территориях таких как резерват «Акжайык» и Новинский заказник площадь осушенных земель относительно меньше по сравнению с предыдущими участками, площадь осушенных территорий в резервате составляет 563 км², в Новинском заказнике 554 км². Вследствие осушения территории площади водно-болотных угодий в данных районах значительно сокращается, что влечет последствия как изменение функционирования экосистемы, условия обитания флоры и фауны.

Наименьшие значения площади осушения (13,8 км²) выявлены в районе Сарытас. Причиной устойчивости данного участка является сочетание морфологических особенностей

рельефа и локальных гидрологических условий, которые снижают воздействие колебаний уровня моря.

Исходя из полученных данных и результатов анализа в целом выявленные изменения свидетельствуют об устойчивой тенденции увеличения площадей осушенных территорий на территории казахстанского сектора Каспийского моря. Данные процессы требуют дальнейшего детального изучения с привлечением гидрологических и климатических данных. Полученные результаты исследования свидетельствуют о целесообразности использования современных методов, таких как дистанционное зондирование Земли, как одного из важных инструментов анализа долгосрочной пространственно-временной динамики Каспийского моря.

Устойчивое сокращение акватории казахстанского сектора Каспийского моря и увеличение осушенных территорий подтверждается данными предыдущих исследований. В северной части моря отмечены наиболее значительные изменения береговой линии, что совпадает с результатами визуализации трансформации побережья. Снижение уровня моря и его влияние на экосистему отражено в спутниковых наблюдениях (Chen et al., 2023; Chen et al., 2024). Фрагментарное распределение осушенных участков в районах Прорвы согласуется с результатами исследований других ученых (Saeidzadeh et al., 2025; Ivkina et al., 2015).

С учётом выявленных тенденций становится очевидным, что трансформация казахстанского сектора Каспийского моря носит системный характер и возможно, эти процессы будут продолжаться, если сохранятся современные климатические условия. В этой связи становится все более актуальной необходимость регулярного мониторинга динамики уровня моря, анализа гидрологического баланса и оценки экологических последствий при условии дальнейшего сокращения акватории моря. Нужно отметить, что будущие исследования Каспийского моря должны быть направлены на уточнение механизмов, оказывающих влияние на отступление моря. Также особую важность сейчас и в будущем имеют разработки подходов к адаптации природных и социально-экономических систем к стремительно меняющимся условиям.

В ранних исследованиях уже было сказано о сокращении водного зеркала моря и формирование мелководных зон, солончаков и пустынных участков ведет к деградации естественных местообитаний водоплавающих птиц, рыб и водно-болотных организмов. Так, популяция каспийских тюленей (*Pusa caspica*) за столетие сократилась примерно на 90 %, что связано с деградацией среды обитания, загрязнением и утратой прибрежных участков (Morozov et al., 2009). Снижение численности верхних хищников, таких как тюлени, приводит к нарушению пищевых сетей и дисбалансу популяций рыб. Дополнительно падение уровня Каспийского моря уменьшает пригодные для размножения тюленей участки на значительные площади, что усиливает угрозу их сохранению (Court et al., 2025). Деградация прибрежных лагун и зарослей тростника также снижает доступные места нереста для рыб и влияет на миграционные маршруты птиц, а также другие биотические компоненты.

На участках Прорва и Мертвый Култук наблюдается потеря значительной части биотопов, что ведет к снижению биоразнообразия и уменьшению численности отдельных видов. В северной части казахстанского сектора, где осушение наблюдается наиболее интенсивное, деградация экосистемы сопровождается изменением солевого режима почв и воды.

В северной части казахстанского сектора также замечены перестройка структуры донных отложений. В центральной и южной части побережья процессы деградации проявляются медленнее, однако даже здесь наблюдается оголения дна и формирования новых сушистых участков. Данные процессы негативно отражаются на условиях обитания местной флоры и фауны. Особо охраняемые территории Новинский заказник и резерват «Акжайык» также испытывают влияние осушения. На данных территориях наблюдается сокращение водно-болотных угодий, трансформация прибрежных биотопов и рост солончаков. Все это в комплексе может оказывать долгосрочное воздействие на водоплавающих птиц, рептилий и мелких водных организмов. Дополнительно нужно отметить, что сокращение площади

мелководий и нерестовых зон оказывает негативное влияние на популяцию осетровых рыб Каспийского моря, численность которых в последние десятилетия существенно сократилась (Murvatova et al., 2025). Среди промысловых видов, таких как килька, фиксируется сокращение популяций под влиянием антропогенных стрессоров, включая изменение уровня моря и загрязнение (Vodini et al., 2024).

Таким образом, пространственно-временные изменения береговой линии приводят к системной трансформации экосистемы казахстанского сектора Каспийского моря. К таким можно отнести: нарушение гидрологического и солевого баланса, снижение биоразнообразия и изменение природных процессов.

5. Заключение

Результаты исследования и выполненный анализ свидетельствуют о том, что с начала XXI века происходит устойчивое и значительное сокращение площади акватории казахстанского сектора Каспийского моря. Независимо от локальных и региональных особенностей, все исследованные участки и районы показывают прогрессирующее увеличение осушенных территорий. Процессы изменения прибрежных зон и осушения территорий ведут к деградации прибрежных зон и исчезновению местообитаний для представителей множества видов обитателей прибрежных экосистем. Особое внимание необходимо уделить тому, что выявленная интенсификация процессов за последние десятилетия свидетельствует о том, что усиление значимых факторов напрямую влияет на общее снижение уровня моря. Сравнительный анализ данных дистанционного зондирования Земли дал возможность определить долгосрочные изменения осушенных территорий казахстанского сектора Каспийского моря в период с 1994 по 2025 годы. По данным мониторинга было выявлено, что наиболее масштабные трансформации береговой линии произошли в районах Мёртвый Култук и Прорва. На территориях природоохранных комплексов резервата «Акжайык» и Новинский заказник площади осушенных территорий идентичны в пределах 500 км². Наиболее стабильная ситуация наблюдается в районе Сарытас, где наблюдается минимальная площадь осушения.

В казахстанском секторе Каспийского моря эти тенденции отражают общие трансграничные процессы: сокращение численности ключевых видов, утрата прибрежных экосистем и рост экологического давления.

Результаты исследования подтверждают эффективность методов дистанционного зондирования Земли для мониторинга пространственной и временной динамики прибрежных экосистем Каспийского моря. Использование в исследовании высокодетальных спутниковых данных позволило не только визуализировать масштаб изменений, но и количественно оценить скорость регрессии моря. Полученные данные исследования в будущем могут стать основой для оценки экологического состояния территории, прогнозирования изменений и планирования природоохранных мероприятий в прикаспийском регионе.

Изменения береговой зоны влекут за собой трансформацию природных условий. Вследствие этого изменения затрагивают функционирование экосистем и тем самым создаёт новые вызовы для природопользования. Сформированные за последние 25 лет осушенные территории и новые береговые границы становятся важным элементом современной структуры побережья, и безусловно, требуют внимания при дальнейших оценках состояния региона. Масштабы произошедших преобразований в прибрежной зоне за последние десятилетия в будущем определяют траекторию будущих исследований, указывая на актуальность и значимость задачи развития изучения осушённых территорий и их влияния на окружающую среду.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация – С.А., Д.М.; методология – С.А.; программное обеспечение – С.А., Д.М.; валидация – С.А., Д.М.; формальный анализ – С.А.; исследование – С.А., Д.М.; ресурсы – С.А., Д.М.; курирование данных – С.А.; написание – подготовка оригинального черновика – С.А., Д.М.; написание – рецензирование и редактирование – С.А., Д.М.; визуализация – С.А.; руководство – С.А.; администрирование проекта – С.А.; получение финансирования – С.А. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторе

Ахметов, Серик - председатель правления, НАО «Казахский научно-исследовательский институт Каспийского моря», 4А микрорайон, 19, Актау, Казахстан, 130000; serik.akhmetovkz@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-0867-7429>

Малахов, Дмитрий - заведующий научно-исследовательским центром ГИС и ДЗЗ, РГП на ПХВ «Институт зоологии» КН МНВО РК, пр. Аль-Фараби, 93, Алматы, Казахстан, 0500003; dmitry.malakhov@zool.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7844-6569>

9. Финансирование: это исследование финансировалось НАО «Казахский научно-исследовательский институт Каспийского моря».

10. Благодарности: авторы выражают благодарность Елбасиевой Б.Б. за техническую помощь.

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

12. Список литературы

1. Ashtab, D., Golamalifard, M., Jokar, P., Kostianoy, A. G., & Semenov, A. V. (2024). Spatial planning of marine protected areas in the Southern Caspian Sea: comparison of multi-criteria evaluation and simulated annealing algorithm. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 123. <https://doi.org/10.3390/jmse12010123>
2. Badulin, S. I., Kostianoy, A. G., Lebedev, S. A., & Popov, A. P. (2025). The Caspian Sea as a full-scale experimental facility supported by altimetry measurements of wind-driven waves. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 110, 101554. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2025.101554>
3. Bodini, A., Pereira, D., & Scotti, M. (2024). The decline of kilkas, sturgeons and seals in the Caspian Sea: The potential of qualitative loop analysis for the cumulative assessment of multiple drivers of stress. *Marine Pollution Bulletin*, 200, 116091. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116091>
4. Brekke, C., & Solberg, A. H. S. (2005). Oil spill detection by satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 95(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.015>
5. Cavalli, R. M. (2024). Remote data for mapping and monitoring coastal phenomena and parameters: a systematic review. *Remote Sensing*, 16(3), 446. <https://doi.org/10.3390/rs16030446>
6. Chen, J., Cazenave, A., Wang, S.-Y., & Li, J. (2023). Caspian Sea level change observed by satellite altimetry. *Remote Sensing*, 15(3), 703. <https://doi.org/10.3390/rs15030703>
7. Chen, J., Li, J., & Cazenave, A. (2024). Multi-decadal changes in Caspian Sea level from satellite altimetry and hydrological models. *Journal of Marine Systems*, 251, 104650. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2024.104650>
8. Court, R., Lattuada, M., Shumeyko, N., Baimukanov, M., Eybatov, T., Kaidarova, A., & Goodman, S. J. (2025). The rapid decline of the Caspian Sea level threatens ecosystem integrity, biodiversity protection, and human infrastructure. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 261. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02212-5>

9. Dyakonov, G. S., & Ibrayev, R. A. (2019). Long-term evolution of Caspian Sea thermohaline properties reconstructed in an eddy-resolving ocean general circulation model. *Ocean Science*, 15, 527-541. <https://doi.org/10.5194/os-15-527-2019>
10. Ghorbani Afzal, F., Hasanlou, M., & Rajabi-Kiasari, S. (2023). Monitoring and estimating coastal upwelling using Sentinel-3 satellite imagery (case study: the Caspian Sea). *Continental Shelf Research*, 261, 105010. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2023.105010>
11. Hofmann, A., Arpe, K., & Leroy, S. (2017). Caspian Sea evaporating as temperatures rise: evidence from climate reanalysis. *Earth's Future*, 5(12), 1260-1274. <https://doi.org/10.1002/2017EF000677>
12. Ivanov, V. A., Kostianoy, A. G., & Lebedev, S. A. (2016). Satellite monitoring of hydrological processes in enclosed and semi-enclosed seas. *Oceanology*, 56(6), 843-852. <https://doi.org/10.1134/S0001437016060105>
13. Ivkina, N. V., Terekhov, A. N., & Naurozbayeva, Zh. A. (2015). Fluctuations of the Caspian Sea level and diagnostics of modern shoreline changes based on Landsat satellite data for 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 (Hydrometeorology i ekologiya)*, 2, 89-99. <https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/259>
14. Ivkina, N. V. (2023). Level fluctuations and their impact on oil pollution in the Kazakh sector of the Caspian Sea (Kolebaniya urovnya i ikh vliyanie na neftyanoye zagryaznenie kazakhstanskogo sektora Kaspiyskogo morya in Russian). *Hydrometeorology and Ecology (Hydrometeorology i ekologiya)*, 2, 62-72. <https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/259>
15. Karbassi, A., & Daryaei, M. (2012). Caspian Sea level change impacts regional seismicity. *Journal of Great Lakes Research*, 38(4), 667-672. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2012.08.005>
16. Kostianoy, A. G., & Lavrova, O. Y. (2018). Satellite monitoring of oil pollution in the Caspian Sea. *Remote Sensing*, 10(11), 1815. <https://doi.org/10.3390/rs10111815>
17. Kostianoy, A. G., Popov, A. P., & Lebedev, S. A. (2022). Remote sensing of Caspian Sea coastal and hydrological processes: recent advances and challenges. *Remote Sensing*, 14(15), 3672. <https://doi.org/10.3390/rs14153672>
18. Lebedev, S. A., & Kostianoy, A. G. (2008). Satellite altimetry of the Caspian Sea level variability. *Marine Geodesy*, 31(4), 285-296. <https://doi.org/10.1080/01490410802466814>
19. Mamaeva, N. (2023). Visualization of Caspian Sea shoreline changes (Vizualizatsiya izmeneniy beregovoy linii Kaspiyskogo morya in Russian). *Hydrometeorology and Ecology (Hydrometeorology i ekologiya)*, 3, 63-67. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2021-102-3-63-67>
20. Morozov, B. N., & Abdurakhmanov, G. M. (2009). Assessment and enhancement of Caspian biodiversity conservation potential for national and transboundary environmental challenges (Otsenka i narashchivanie potentsiala sokhraneniya biologicheskogo raznoobraziya Kaspiya dlya resheniya natsionalnykh i transgranichnykh ekologicheskikh problem in Russian). *South of Russia: Ecology (Yug Rossii: Ekologiya)*, 4. <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-i-naraschivanie-potentsiala-sohraneniya-biologicheskogo-raznoobraziya-kaspiya-dlya-resheniya-natsionalnyh-i-transgranichnyh>
21. Murvatova, K., & Humbatov, M. (2025). Sturgeons in the Caspian Sea and their conservation measures. *Journal of ENDEMISM: Biodiversity & Environment*, 3(2), 15-19.
22. Nezlin, N. P., Kostianoy, A. G., & Grigoriev, A. V. (2012). Satellite monitoring of ecological conditions in the Caspian Sea. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(10), 6101-6114. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2402-4>
23. Saeidzadeh, A., Ghorbani, M., & Kazemi, S. (2025). Spatiotemporal dynamics of Northern Caspian shorelines (1985-2023) and implications for coastal management. *Coastal Studies Journal*, 1-12. <https://doi.org/10.54668/csj.2025.01>

24. Sagatdinova, G., & Nursseitov, D. (2023). Identification of oil spill patterns in the Caspian Sea using SAR Sentinel-1 imagery and Google Earth Engine. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 420. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11315-8>
25. Sagatdinova, G., & Nursseitov, D. (2024). Processing Sentinel-1 radar data for identifying oil spills in the Caspian Sea using GEE (Obrabotka radiolokatsionnykh dannykh sputnika Sentinel-1 dlya identifikatsii neftyanykh razlivov v akvatorii Kaspiyskogo morya v srede GEE in Russian). *Hydrometeorology and Ecology (Hydrometeorology i ekologiya)*, 1, 100-109. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-112-1-100-109>
26. Sergeeva, A. A., Koshim, Ä., & Saparov, Q. (2023). Natural and recreational assessment of the Caspian Sea and its coast (Prirodno-rekreatsionnaya otsenka Kaspiyskogo morya i ego poberezhya in Russian). *Hydrometeorology and Ecology (Hydrometeorology i ekologiya)*, 2, 174-186. <https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/945>
27. Shabanova, N., Lahijani, H., & Pourkerman, M. (2014). Caspian Sea level changes at the end of Little Ice Age and its impacts on the avulsion of the Gorgan River. *Méditerranée*, 145-155. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.4555>
28. Shiklomanov, I. A., Zavialov, P. O., & Arpe, K. (2019). Climate variability and water balance of the Caspian Sea. *Journal of Marine Systems*, 194, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.02.001>
29. Xu, H., 2006. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033.
30. Yeltay, A. (2022). Possibility of using reanalysis data to assess Caspian Sea water temperature (O vozmozhnosti primeneniya dannykh reanaliza dlya otsenki temperatury vody Kaspiyskogo morya in Russian). *Hydrometeorology and Ecology (Hydrometeorology i ekologiya)*, 4, 45-51. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2022-107-4-45-51>
31. Yeltay, A., Bazarbay, L., Shishkina, G. (2023). Overview of remote sensing data on wave processes in the Kazakh part of the Caspian Sea. *Hydrometeorology and Ecology (Hydrometeorology i ekologiya)*, 3, 52-59. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2023-110-3-52-59>

Каспий теңізінің Қазақстан секторының жағалау сызығының өзгеруін жерді қашықтықтан зондтау деректеріне негізделген талдау және бұл өзгерістердің жағалық аймақ экожүйесіне әсері

Серик Ахметов, Дмитрий Малахов

Аңдатпа. Соңғы онжылдықтарда Қазақстан секторындағы Каспий теңізінің жағалау сызығы теңіз деңгейінің ауытқуларына байланысты барған сайын айтарлықтай өзгерістерге ұшырап отыр. Негізгі әсер ететін факторлар табиғи және антропогендік болып табылады. Барлық осы өзгерістер республиканың батыс аймағының жағалау экожүйесіне елеулі әсер етеді. Теңіз деңгейінің ауытқулары, өзендер ағысының режимі мен көлемінің өзгеруі, сондай-ақ адамның шаруашылық әсері сулы-батпақты жерлердің деградациясына, теңіз су бетінің көлемінің қысқаруына себеп болады. Барлық осы факторлар жағалау рельефінің құрылымын трансформациялауға әсер етеді. Қазақстан секторындағы Каспий теңізінің жағалау сызығының өзгеруін зерттеу үшін MODIS, Landsat және Sentinel-2 қашықтықтан зондтау деректері қолданылды. Қосымша кеңістіктік талдауды жан-жақты жүргізу үшін негізгі учаскелерде дрондарды пайдалану арқылы далалық бақылаулар ұйымдастырылды. Екі зерттеу әдісін кешенді пайдалану экожүйенің кеңістік-уақыттық өзгеру тенденцияларын анықтауға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер бойынша 2000 жылдан 2025 жылға дейін

теңіздің жалпы су алаңы 16 834 шаршы км-ге дейін қысқарған деп тұжырым жасауға болады. Қалалық аймақтың өзгерістері Қазақстан секторындағы Каспий теңізінің солтүстік бөлігінде ең қатты байқалады. Бақылау деректері бойынша Пешная, Прорва, Мёртвый Култук, Новинский қорықшасы және «Ақжайық» резерватының учаскелерінде таяз сулы аймақтар, тұзды жазықтар және шөлдік ландшафттар қалыптасатыны айқындалды. Мұндай аумақтардың өзгеруі әртүрлі организмдер түрлерінің табиғи мекендеу орындарының қысқаруына және экожүйенің елеулі деградациясына алып келеді. Талдау және бағалау нәтижелері қазақстандық Каспий теңізінің секторы мен барлық жағалау аймағының экожүйелерінің өзгерісінің жүйелі сипатта екендігін көрсетеді. Осылайша жағалық биотоптарды сақтау және қалпына келтіру стратегияларын жасау, гидрологиялық балансты бағалау және тұрақты бақылаудың қажеттілігінің өзектілігі атап көрсетіледі.

Түйін сөздер: қашықтықтан зондтау; MODIS; Landsat; Sentinel-2; жағалаулық аймақтарды бақылау; экожүйе.

Analysis of shoreline changes in the Kazakh Sector of the Caspian Sea based on remote sensing data in the context of their impact on the coastal zone ecosystem.

Serik Akhmetov, Dmitry Malakhov

Abstract. In recent decades, the coastline of the Kazakh sector of the Caspian Sea has undergone significant changes caused by fluctuations in sea level under the influence of natural and anthropogenic factors. These processes have had a considerable impact on the coastal ecosystems of western Kazakhstan, leading to wetland degradation, reduction of the sea surface area, and transformations of the coastal relief. To analyze changes in the shoreline of the Kazakh sector of the Caspian Sea, remote sensing data from MODIS, Landsat, and Sentinel-2 were used. In addition, field observations were carried out in key areas using drones to obtain detailed spatial information. The combined use of satellite data and field observations made it possible to identify spatial and temporal trends in ecosystem transformation. The results show that between 2000 and 2025, the total sea surface area decreased to 16,834 km², with the most significant coastal changes observed in the northern part of the Kazakh sector of the Caspian Sea. According to the observations, shallow water zones, salt marshes, and desert landscapes are forming in areas such as Peshnoy, Prorva, Mertvyvy Kultuk, the Novinsky Nature Reserve, and the “Akzhayik” State Nature Reserve. These transformations lead to a reduction of natural habitats for many species and noticeable ecosystem degradation. The results highlight the systemic nature of ecosystem transformations in the Kazakh sector of the Caspian Sea and emphasize the importance of regular monitoring, assessment of the hydrological balance, and development of measures for conservation and restoration of coastal ecosystems.

Keywords: remote sensing; MODIS; Landsat; Sentinel-2; coastal zone monitoring; ecosystem.