

УДК 551.46(262.81):574

МРНТИ 87.19.15

DOI 10.56525/YJNK1653

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ НА ПРИБРЕЖНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Нурбаева Ф.К.¹, Джумашева К.А.¹, Нағманов Д.Г.¹, Бауыржанкызы М.²

¹Yessenov University, Актау, Казахстан

² ТОО «Аль-Фараби Оперейтинг», Казахстан, г. Актау

e-mail: farida.nurbayeva@yu.edu.kz; kamshat.jumasheva@yu.edu.kz;

diasnagmanov@mail.ru, Madina.bauyrzhankyzy@gmail.com

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ влияния изменения уровня Каспийского моря на состояние прибрежных экосистем в период 1980–2025 гг. Исследование основано на обобщении данных многолетних гидрометеорологических наблюдений, материалов спутникового зондирования и результатов региональных экологических исследований. Выявлены устойчивые долговременные тренды колебаний уровня моря, изменения гидрологического баланса и пространственная динамика биоразнообразия в казахстанском, российском и туркменском секторах побережья. Установлено, что средняя скорость снижения уровня Каспийского моря составляет около 6,4 см в год, что приводит к деградации прибрежных и болотных экосистем, сокращению численности водоплавающих птиц, трансформации береговой линии и утрате ключевых нерестилищ промысловых видов рыб. Выполнено прогнозирование возможных изменений уровня моря и экосистем до 2050 года с использованием климатических сценариев СМIP6. На основе полученных результатов предложены приоритетные меры адаптации, экологического управления и формирования системы долгосрочного мониторинга. Результаты исследования могут быть использованы при разработке региональных стратегий охраны природы и рационального природопользования в условиях усиливающихся климатических изменений региона. Полученные результаты подчеркивают необходимость усиления межгосударственного сотрудничества прикаспийских стран для эффективного реагирования на экологические вызовы и минимизации негативных последствий снижения уровня моря. [1].

Ключевые слова: Каспийское море, уровень моря, прибрежные экосистемы, гидрологический баланс, климатические изменения, деградация среды, биоразнообразие, адаптация.

Введение

Изменение уровня Каспийского моря — острая экологическая проблема Евразии. Каспий как крупнейший замкнутый водоём оказывает значительное влияние на климат, биоразнообразие и экономику прикаспийских регионов. С начала 1980-х годов начался очередной цикл снижения уровня моря; по данным Института океанологии РАН и Казгидромета, за 1980–2025 гг. уровень снизился более чем на 2 м. Основные причины — рост испарения вследствие повышения температур, сокращение речного стока (Волга) и антропогенное регулирование водного режима. Цель исследования — оценить влияние этих изменений на прибрежные экосистемы, выявить пространственно-временные закономерности и предложить направления адаптации [2].

Задачи исследования: проанализировать динамику уровня Каспийского моря за 1980–2025 гг.; определить взаимосвязь между климатическими факторами (температура, осадки, испарение) и уровнем моря; оценить влияние снижения уровня на биоразнообразие и продуктивность прибрежных экосистем; сформулировать рекомендации по адаптации и управлению прибрежными зонами [8].

Исследования по уровню Каспийского моря ведутся с XIX в.; интенсивность возросла после снижения 1980-х. Основной вклад в динамику вносит соотношение речного стока и испарения; около 80% поступлений обеспечивает Волга (Ivanov et al., 2021). Рост среднегодовых температур в регионе (+1.5–2 °C) увеличил испарение на 10–15% (Nasyrova & Bekтурганов, 2023). Антропогенные факторы (плотины, водохранилища, регулирование стока, добыча углеводородов) усиливают естественные колебания (Aliyev, 2020; Kasperskaya et al., 2022). Прогнозы по СМIP6 предполагают дальнейшее снижение уровня при текущих тенденциях (Kostianou et al., 2021).

Материалы и методы исследования. Источник данных: гидрометеорологические ряды Казгидромета, Института океанологии РАН, спутниковые данные (Landsat, Sentinel, NASA Earth Observations). Период анализа: 1980–2025 гг. Объекты: казахстанский сектор (Мангистауская обл., район Курайты и мыс Песчаный), дельта Волги, туркменский сектор (район Туркменбаши). Методы: временные ряды со сглаживанием (скользящее среднее), расчёт водного баланса, корреляционный анализ температуры и уровня, биогеографический анализ растительности и орнитофауны, моделирование по сценариям СМIP6 [9,10].

Гидрологический анализ — сглаживание (пример):

$$H_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (L_i - L_i - 1)$$

Баланс водной массы (используемая формула):

$$\Delta V = Qr - E + P - Qa$$

где Qr — суммарный речной сток, E — испарение, P — осадки, Qa — антропогенное изъятие.

Прогностическая модель (регрессия):

$$H_f = aT + bP + cE + d$$

где T — изменение температуры, P — изменение осадков, E — изменение испарения; коэффициенты эмпирически оценены по данным наблюдений.

Результаты исследования. Динамика изменения уровня моря. Анализ 1980–2025 гг. демонстрирует устойчивую тенденцию снижения уровня; средняя скорость — 6,4 см/год (согласуется с Ivanov et al., 2021 и данными Казгидромета). После кратковременного повышения в 1990-е гг. наблюдается стабильное падение уровня [6].

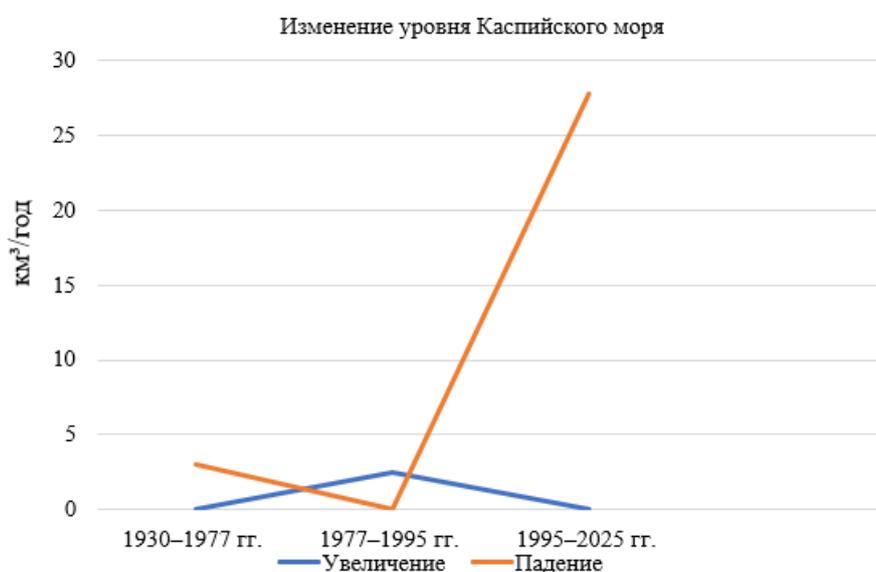


Рисунок 1 - Динамика уровня Каспийского моря в 1980–2025 гг.

Корреляция с климатическими факторами. Средний коэффициент корреляции между температурой и уровнем $r = -0.78$ что указывает на сильную отрицательную связь: рост температуры сопровождается снижением уровня за счёт увеличения испарения.

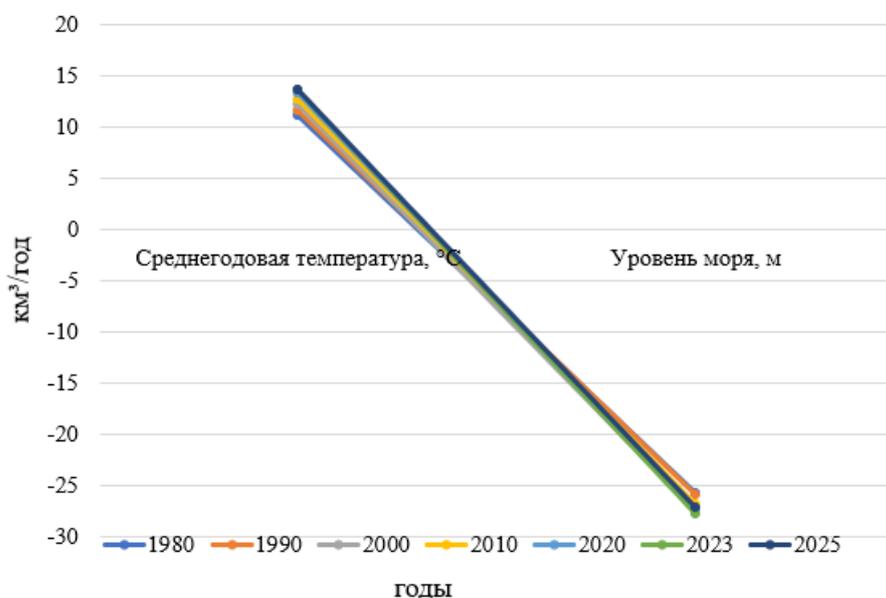


Рисунок 2 - Корреляция среднегодовой температуры и уровня моря (1980–2025).

Изменение гидрологического баланса. Расчёт по формуле (2) показал: за последние 10 лет испарение увеличилось на ~12%, речной сток сократился на ~8%, средний отрицательный баланс около $-25 \text{ км}^3/\text{год}$ [3,7].

Таблица 1. Баланс водной массы Каспийского моря (в $\text{км}^3/\text{год}$)

Период (годы)	Речной сток (Qr) ($\text{км}^3/\text{год}$)	Осадки (P) ($\text{км}^3/\text{год}$)	Испарение (E) ($\text{км}^3/\text{год}$)	Изъятие воды (Qa) ($\text{км}^3/\text{год}$)	Баланс (ΔV) ($\text{км}^3/\text{год}$)
1980–1990	292	78	320	2,5	+47,5
1991–2000	280	75	335	3,2	+17
2001–2010	270	72	355	3,8	-16,8
2011–2020	260	70	362	4,1	-16,1
2021–2025	255	68	368	4,5	-49,5

Из таблицы видно переход баланса в отрицательную фазу с начала XXI в., что указывает на истощение водных ресурсов.

Воздействие на прибрежные экосистемы.

Анализ спутниковых данных и полевых наблюдений выявил следующие изменения:

- Редукция болотных и солончаковых экосистем. Площадь прибрежных болот в районе Курайты сократилась с 230 км^2 (1990) до 90 км^2 (2024).
- Трансформация флоры: ареалы галофитов сократились на ~40%.
- Фауна: снижение численности уток и куликов на 30–35% (орнитологические учёты 2023). Нарушены нерестовые миграции осетровых и сельдевых видов вследствие обмеления нерестовых акваторий.
- Социально-экономические последствия: потеря рыбопромысловых угодий (районы Форт-Шевченко, Баутино), осолонение почв и деградация пастбищ, снижение рекреационной привлекательности.

По оценке, каждые 10 см снижения уровня приводят к деградации порядка 250 км^2 прибрежных экосистем (болота, солончаки, дельтовые протоки) [8].

Пространственное моделирование и прогноз до 2050 г. Моделирование по сценариям СМIP6 показывает вероятное снижение уровня к 2050 г.:

Таблица 2. Прогноз изменения уровня Каспийского моря до 2050 года

Сценарий СМIP6	ΔТемпература (°C)	ΔОсадки (мм/год)	ΔИспарение (мм/год)	Прогноз снижения уровня (м)
SSP1-2.6	+1.3	+2.5	+4.8	-1.2
SSP2-4.5	+2.1	+1.0	+8.5	-2.4
SSP5-8.5	+3.8	-3.0	+14.3	-3.2

Даже при умеренном сценарии (SSP2-4.5) ожидается дальнейшее снижение, что повлечёт масштабную перестройку прибрежных ландшафтов.

Экологические и управленческие рекомендации. На основе результатов предлагаются следующие направления: Создание экологически устойчивых буферных зон в районах активного отступления побережья; Восстановление и консервация болот и солончаков как природных фильтров и регуляторов микроклимата; Внедрение постоянной системы экологического мониторинга уровня моря и состояния прибрежных экосистем (комбинация спутниковых наблюдений и наземных пунктов); Координация водопользования в бассейне Волги и Урала (минимизация антропогенного изъятия, регулирование стока с учётом экологических потребностей дельты); Международное сотрудничество прикаспийских стран для разработки совместных адаптационных стратегий [4,5].

Ограничения исследования и направления будущих работ.

Ограничения: неоднородность рядов наблюдений по разным секторам, неопределённости в прогнозах климатических сценариев. Будущие исследования: уточнение влияния климатических факторов в рамках СМIP7, разработка оптимальных моделей управления водными ресурсами бассейна, комплексные геоэкологические съёмки прибрежных зон [6].

Заключение. Проведённый анализ подтверждает, что снижение уровня Каспийского моря в 1980–2025 гг. обусловлено сочетанием климатических и антропогенных факторов, прежде всего ростом средней температуры воздуха, усилением испарения с водной поверхности и сокращением речного стока. Выявленные изменения приводят к деградации прибрежных болотных экосистем, уменьшению численности водоплавающих птиц и промысловых рыб, осолонению почв, трансформации береговой линии и утрате ценных рыбопромысловых угодий. Для смягчения негативных последствий необходимы комплексные меры, включающие восстановление нарушенных экосистем, развитие системы долгосрочного мониторинга, адаптацию хозяйственной деятельности и координацию управления водными ресурсами между прикаспийскими государствами в условиях продолжающихся климатических изменений. Особое значение имеет учет региональных социально-экономических рисков и внедрение научно обоснованных сценариев устойчивого развития прибрежных территорий в долгосрочной перспективе для региона Каспия [9,10].

Авторы выражают благодарность ТОО «ECOTERA» за предоставление аналитических данных, а также Казгидромету и Институту океанологии РАН за доступ к архивам гидрометеорологических наблюдений.

Исследование выполнено в рамках инициативного научного проекта без внешнего финансирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aliyev, M. (2020). Hydrological and ecological consequences of the Caspian Sea level changes. Baku: Institute of Geography.

2. Ivanov, A., Petrova, T., & Lebedev, M. (2021). Recent trends of Caspian Sea level fluctuations and climate variability. *Oceanology*, 61(4), 623–637. <https://doi.org/10.1134/S0001437021040050>
3. Ismailov, R. (2023). Transformation of deltaic ecosystems under Caspian Sea regression. *Journal of Environmental Studies*, 18(3), 214–228.
4. Kasperskaya, N., & Mukhametov, A. (2022). Anthropogenic influence on Caspian coastal zones. *Environmental Monitoring Journal*, 45(2), 71–86.
5. Kazhydromet. (2024). *Hydrometeorological Bulletin of the Caspian Sea*. Astana.
6. Kostianoy, A. G., et al. (2021). Future projections of Caspian Sea level based on CMIP6 scenarios. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(7), 4201–4215.
7. Nasyrova, L., & Bekturganov, K. (2023). Climate change impact on Caspian Sea hydrology. *Geography and Environment*, 7(2), 133–145.
8. Nikolaeva, E. (2022). Ecological effects of Caspian Sea level fall on wetland ecosystems. *Russian Journal of Ecology*, 53(6), 482–491.
9. Производственный экологический мониторинг на участке «Каламкас-море, Хазар и Ауэзов» годовой заключительный отчет.
10. Проведение производственного экологического мониторинга по климатическим сезонам 2025 гг. на участке «Аль-Фараби».

REFERENCES

1. Aliyev, M. (2020). Hydrological and ecological consequences of the Caspian Sea level changes. Baku: Institute of Geography.
2. Ivanov, A., Petrova, T., & Lebedev, M. (2021). Recent trends of Caspian Sea level fluctuations and climate variability. *Oceanology*, 61(4), 623–637. <https://doi.org/10.1134/S0001437021040050>
3. Ismailov, R. (2023). Transformation of deltaic ecosystems under Caspian Sea regression. *Journal of Environmental Studies*, 18(3), 214–228.
4. Kasperskaya, N., & Mukhametov, A. (2022). Anthropogenic influence on Caspian coastal zones. *Environmental Monitoring Journal*, 45(2), 71–86.
5. Kazhydromet. (2024). *Hydrometeorological Bulletin of the Caspian Sea*. Astana.
6. Kostianoy, A. G., et al. (2021). Future projections of Caspian Sea level based on CMIP6 scenarios. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(7), 4201–4215.
7. Nasyrova, L., & Bekturganov, K. (2023). Climate change impact on Caspian Sea hydrology. *Geography and Environment*, 7(2), 133–145.
8. Nikolaeva, E. (2022). Ecological effects of Caspian Sea level fall on wetland ecosystems. *Russian Journal of Ecology*, 53(6), 482–491.
9. Производственный экологический мониторинг на участке «Каламкас-море, Хазар и Ауэзов» годовой заключительный отчет.
10. Проведение производственного экологического мониторинга по климатическим сезонам 2025 гг. на участке «Аль-Фараби».

КАСПИЙ ТЕҢІЗІ ДЕҢГЕЙІНІҢ ӨЗГЕРУІНІҢ ЖАҒАЛАУЛЫҚ ЭКОЖҮЙЕЛЕРГЕ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Нурбаева Ф.К.¹, Джумашева К.А.¹, Нағманов Д.Г.¹, Бауыржанкызы М.²

¹Yessenov University, Ақтау қ., Қазақстан

² ЖШС «Аль-Фараби Оперейтинг», Қазақстан, Ақтау қ.

e-mail: farida.nurbayeva@yu.edu.kz; kamshat.jumasheva@yu.edu.kz;

diasnagmanov@mail.ru, Madina.bauyrzhankyzy@gmail.com

Андатпа. Мақалада 1980–2025 жылдар аралығында Каспий теңізі деңгейінің өзгеруінің жағалаулық экожүйелердің жағдайына әсеріне кешенді талдау жасалған. Зерттеу көпжылдық гидрометеорологиялық бақылаулар деректерін, спутниктік зондтау материалдарын және өңірлік экологиялық зерттеулердің нәтижелерін жинақтауға негізделген. Теңіз деңгейінің ауытқуының тұрақты ұзақмерзімді үрдістері, гидрологиялық тепе-теңдіктің өзгеруі және биоалуантүрліліктің кеңістіктік динамикасы Қазақстан, Ресей және Түрікменстан жағалау секторларында анықталды. Каспий теңізі деңгейінің орташа төмендеу жылдамдығы шамамен жылына 6,4 см екені анықталып, бұл жағалаулық және батпақты экожүйелердің деградациясына, су құстарына тән популяциялардың қысқаруына, жағалау сызығының трансформациясына және балықтардың негізгі уылдырық шашу алаңдарының жойылуына әкелетіні көрсетілді. CMIP6 климаттық сценарийлерін пайдалана отырып, 2050 жылға дейін теңіз деңгейі мен экожүйелердегі ықтимал өзгерістерге болжам жасалды. Алынған нәтижелер негізінде бейімделу шараларының, экологиялық басқарудың және ұзақмерзімді мониторинг жүйесін қалыптастырудың басым бағыттары ұсынылды. Зерттеу нәтижелері өңірдегі климаттық өзгерістердің күшеюі жағдайында табиғатты қорғау мен табиғи ресурстарды ұтымды пайдалану бойынша аймақтық стратегияларды әзірлеуде қолданылуы мүмкін. Алынған нәтижелер экологиялық сын-қатерлерге тиімді ден қою және теңіз деңгейінің төмендеуінің теріс салдарын барынша азайту үшін Каспий маңы елдерінің мемлекетаралық ынтымақтастығын күшейту қажеттігін көрсетеді. [1].

Түйін сөздер: Каспий теңізі, теңіз деңгейі, жағалаулық экожүйелер, гидрологиялық баланс, климаттың өзгеруі, ортаның деградациясы, биоалуантүрлілік, бейімделу.

STUDY OF THE IMPACT OF CHANGES IN THE CASPIAN SEA LEVEL ON COASTAL ECOSYSTEMS

Nurbayeva F.K.¹, Jumasheva K.A.¹, Nagmanov D.G.¹, Bauyrzhankyzy M.²

¹ Yessenov University, Aktau, Kazakhstan

² LLP “Al-Farabi Operating”, Aktau, Kazakhstan

e-mail:farida.nurbayeva@yu.edu.kz; kamshat.jumasheva@yu.edu.kz;

diasnagmanov@mail.ru, Madina.bauyrzhankyzy@gmail.com

Annotation. The article presents a comprehensive analysis of the impact of changes in the Caspian Sea level on the condition of coastal ecosystems during the period 1980–2025. The study is based on the synthesis of long-term hydrometeorological observations, satellite remote sensing data, and the results of regional environmental studies. Persistent long-term trends in sea level fluctuations, changes in the hydrological balance, and the spatial dynamics of biodiversity have been identified in the coastal sectors of Kazakhstan, Russia, and Turkmenistan. It has been established that the average rate of decline in the Caspian Sea level is approximately 6.4 cm per year, leading to the degradation of coastal and wetland ecosystems, a reduction in waterfowl populations, shoreline transformation, and the loss of key spawning grounds for commercially important fish species. Projections of potential changes in sea level and ecosystem conditions up to 2050 were carried out using CMIP6 climate scenarios. Based on the results obtained, priority measures for adaptation, environmental management, and the development of a long-term monitoring system are proposed. The findings may be used in the development of regional strategies for nature conservation and sustainable natural resource management under conditions of intensifying climate change in the region. The results obtained emphasize the need to strengthen interstate cooperation between the Caspian littoral countries in order to effectively respond to environmental challenges and minimize the negative effects of sea level decline. [1].

Keywords: Caspian Sea, sea level, coastal ecosystems, hydrological balance, climate change, environmental degradation, biodiversity, adaptation.