

Межгодовые изменения уровней в системе Каспийское море – залив Кара-Богаз-Гол и гидрометеорологических параметров Каспийского региона в первой четверти XXI века

А. И. Гинзбург¹, А. Г. Костяной^{1,2,3}, Н. А. Шеремет¹

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mails: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, sheremet@ocean.ru

² *Московский университет имени С. Ю. Витте, Москва, 115432, Россия*

³ *Майкопский государственный технологический университет*
Майкоп, 385000, Россия

Рассматриваются сезонные и межгодовые изменения уровней Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол (КБГ), связанных проливом (сентябрь 1992 – май 2025 г., с использованием спутниковых альтиметрических данных), а также ряда гидрометеорологических параметров (температуры воздуха и поверхности воды, атмосферных осадков, скорости ветра, стока Волги) в 2000–2024 гг. Тренды уровня Каспия в разные периоды составили: –8,90 см/год в 1995–2024 гг., –8,16 см/год в 2005–2019 гг. и –22,7 см/год в 2020–2024 гг. Аналогичное изменение характера тренда уровня имело место в заливе КБГ: –12,3 см/год, –12,2 см/год и –37,3 см/год соответственно в 1996–2024 гг., 2005–2019 гг. и 2020–2024 гг. Таким образом, последние пять лет (2020–2024) оказались годами с наибольшим за 30-летний период (1995–2024) темпом снижения уровня и моря, и (особенно) залива. К концу 2024 г. уровни Каспия и залива КБГ снизились до отметок –29,34 и –31,1 м в Балтийской системе высот (БС) соответственно (оба значения даны с учётом завышения данных альтиметров относительно инструментально измеренных примерно на 0,5 м). При этом уровень Каспийского моря превысил минимум 1977 г. (–29,0 м БС). Обсуждаются возможные причины такого ускоренного снижения уровня в море и заливе КБГ. Методом водного баланса получены оценки испарения с зеркала обоих водоёмов в 2023 г., для которого известен сток каспийских вод в залив (8,77 км³). Для Каспия эта оценка составила примерно 442 км³ (125 см слоя воды), для залива — 19,5 км³ (114 см слоя воды). При этом соотношение величины испарения к приходной части водного баланса в море оказалось равным примерно 1,16, в заливе КБГ — 1,54.

Ключевые слова: уровень Каспийского моря, уровень залива Кара-Богаз-Гол, температура воздуха, температура поверхности моря, атмосферные осадки, речной сток, межгодовая изменчивость, водный баланс Каспия – залива, испарение

Одобрена к печати: 05.11.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-312-325

Введение

Каспийское море и мелководный (несколько метров) залив/лагуна Кара-Богаз-Гол (КБГ), разделённые двумя песчаными косами протяжённостью в меридиональном направлении примерно 90 км с узким (120–800 м) проливом КБГ между ними, образуют уникальную природную систему. Солоноватые воды Каспия (12–13 ‰) из-за разницы уровней моря и залива поступают в гипергалинный (до 300 ‰) залив КБГ, где полностью испаряются с образованием в донных солевых отложениях ценного сырья для промышленности и сельского хозяйства (Kosarev, Kostianoy, 2005; Kosarev et al., 2009).

«Жизнь» КБГ, замкнутого водоёма, окружённого со всех сторон песками пустынь Туркменистана, полностью зависит от поступления в него каспийской воды; с прекращением её поступления в результате антропогенного вмешательства (сооружения дамбы в проливе, 1980–1992 гг. (Kosarev, Kostianoy, 2005; Kosarev et al., 2009)) или естественного фактора (понижения уровня моря ниже отметки –30,5 м (Лавров, 2002)) залив полностью пересыхает. С другой стороны, сток каспийской воды в залив КБГ способствует понижению уровня моря,

и в работе (Малинин, 2022) высказано предположение, что именно этот сток стал главным фактором, определившим падение уровня Каспийского моря с 1996 г.

Альтиметрические измерения со спутников дают возможность оперативного слежения за межгодовыми изменениями уровней Каспийского моря и залива КБГ. Эти изменения уровня Каспия в разные временные периоды, с 1992 до 2024 г. включительно, рассматривались в ряде работ (например, (Гинзбург, Костяной, 2018; Гинзбург и др., 2021; Костяной и др., 2014, 2025; Лаврова и др., 2011; Лебедев, Костяной, 2005, 2016; Chen et al., 2017; Kosarev et al., 2009; Kostianoy, Pešić, 2024; Kostianoy et al., 2019; Lahijani et al., 2023)). Меньшее количество публикаций посвящено межгодовой изменчивости уровня залива КБГ (Гинзбург, Костяной, 2018; Гинзбург и др., 2022; Лебедев, Костяной, 2005; Kosarev, Kostianoy, 2005; Kosarev et al., 2009; Kostianoy et al., 2019). И лишь в немногих работах рассматриваются квазисинхронные изменения уровней Каспия и КБГ: по измерениям *in situ* в 1992–2000 гг. (Лавров, 2002) и альтиметрическим данным в периоды 1993–2007 гг. (Kosarev et al., 2009), 1993–2015 гг. (Kostianoy et al., 2019) и 1992–2018 гг. (Гинзбург, Костяной, 2018).

Цель настоящего исследования — совместный анализ сезонной и межгодовой изменчивости уровней Каспийского моря и залива КБГ в 1992–2024 гг. на основе альтиметрических спутниковых данных, а также изменений в 2000–2024 гг. ряда гидрометеорологических параметров (температуры воздуха и поверхности моря, атмосферных осадков, скорости ветра, стока реки Волги) из известных баз данных для выявления возможных причин изменения характера понижения уровней моря и залива в первую четверть XXI в.

Данные

Временные серии среднемесячных значений уровня Каспийского моря (с 27 сентября 1992 по 8 мая 2025 г.) и залива КБГ (с 17 октября 1992 по 8 мая 2025 г.) получены из онлайн-баз данных HydroWEB LEGOS (*англ.* Laboratory of Space Geophysical and Oceanographic Studies), Франция (<https://hydroweb.theia-land.fr/> и https://hydroweb.theia-land.fr/hydroweb/view/L_kara_bogaz_gol?lang=fr# соответственно), основанных на альтиметрических измерениях спутников TOPEX/Poseidon (*англ.* Topography Experiment), Jason-1, -2, -3. Сведения о стоке Волги с 1990 по 2023 г. взяты с сайта Координационного комитета по гидрометеорологии Каспийского моря (КАСПКОМ) (<http://www.caspcom.com/>), для 2024 г. — с сайта <https://meteojournal.ru/v-2024-godu-uroven-kaspijskogo-morya-upal-na-12-38-santimetrov-nizhe-rekordnogo-nizkogo-urovnya-za-period-nablyudenij/>. С сайта КАСПКОМ получено также значение стока каспийских вод в залив КБГ в 2023 г. Временные серии среднемесячной приводной температуры воздуха T_a (на высоте 2 м над уровнем моря) и атмосферных осадков (в мм/мес) в период с 1 января 2000 по 31 декабря 2024 г., осреднённых в пределах 36–48° с.ш. и 46–55° в.д., а также отдельно атмосферных осадков для залива КБГ в пределах 40,55–42,15° с.ш. и 52,75–54,65° в.д. взяты соответственно из онлайн-системы данных NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) Giovanni (*англ.* Geospatial Interactive Online Visualization and Analysis Infrastructure), реанализа MERRA-2 (*англ.* Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version 2), а также из Model M21MNXASM v.5.12.4 и GPM IMERG Final Precipitation L3 (Huffman et al., 2023).

Среднемесячные значения температуры поверхности моря T_w (с 31 декабря 2002 по 31 декабря 2024 г.), осреднённые в пределах водной поверхности Каспийского моря вместе с заливом КБГ (36,02–48° с.ш., 46,02–55° в.д.), получены из веб-приложения NASA Giovanni, использующего ночные измерения радиометра MODIS (*англ.* Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) спутника Aqua с разрешением 4 км (версия R2019.0). Среднемесячная скорость ветра над тем же районом (с 1 января 2000 по 31 декабря 2024 г.) — данные реанализа MERRA-2 (M2TMNXFLX, версия v.5.12.4).

Межгодовая изменчивость и тренды гидрометеорологических параметров

Температура воздуха

Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячных значений T_a с января 2000 по декабрь 2024 г. показана на *рис. 1*. Линейный тренд T_a за этот 25-летний период оказался равным $+0,012$ °C/год, что, очевидно, значительно ниже трендов за периоды 1979–2011 гг. ($+0,067$ °C/год), 2003–2017 гг. ($+0,04$ °C/год) и 1980–2021 гг. ($+0,03$ °C/год) в работах (Костяной и др., 2014), (Гинзбург, Костяной, 2018) и (Гинзбург и др., 2021) соответственно. Меньшее значение линейного тренда в период 2000–2024 гг. подтверждает вывод о замедлении (или отсутствии) роста T_a Каспийского региона со второй декады 2000-х гг. (Гинзбург и др., 2021). В пользу данного вывода свидетельствуют результаты полиномиальной аппроксимации среднегодовых значений T_a в период 1948–2020 гг. с тремя временными интервалами разнонаправленных тенденций изменения T_a продолжительностью около 15–25 лет: T_a уменьшалась в 1948–1965 гг., увеличивалась в 1972–1998 гг. и снова уменьшалась с 2006 по 2020 г. (Kazmin, Shiganova, 2024). В последние пять лет (2020–2024) максимальные летние значения T_a в среднем слегка уменьшаются (см. *рис. 1*).

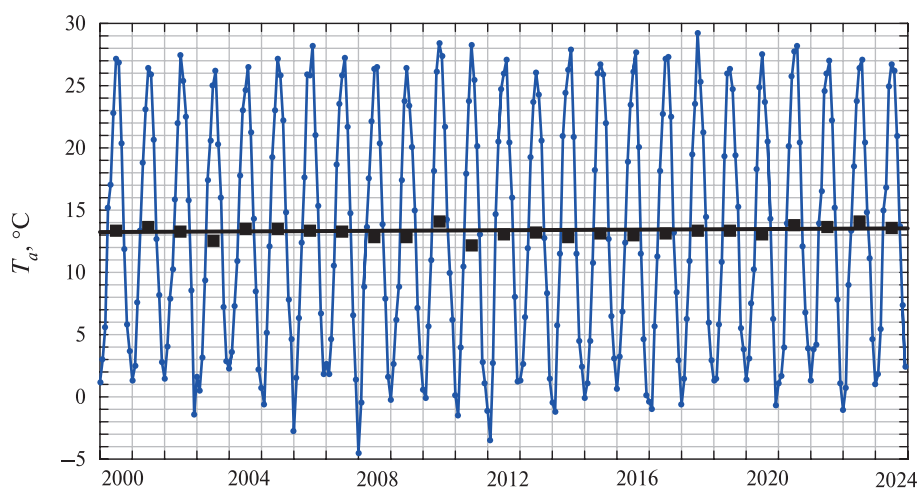


Рис. 1. Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячных значений приводной температуры воздуха (T_a , °C) в Каспийском регионе ($36\text{--}48^\circ$ с. ш., $46\text{--}55^\circ$ в. д.) в 2000–2024 гг. Чёрные квадраты — среднегодовые значения T_a , прямая линия — их линейный тренд

Отметим, что в 2019–2024 гг. максимумы летних среднемесячных значений T_a в среднем ниже наблюдавшихся в 2010–2018 гг. Заметна также продолжающаяся тенденция уменьшения суровых зим (Гинзбург и др., 2021): в течение первых 13 лет (2000–2012) рассматриваемого периода наблюдались одна очень суровая зима (2011/2012), две суровых (2002/2003, 2007/2008) и пять мягких (1999/2000, 2000/2001, 2001/2002, 2003/2004, 2006/2007), тогда как в следующие 12 лет (2013–2024) не было ни одной очень суровой или суровой, а мягкими были три зимы (2015/2016, 2019/2020 и 2021/2022). Именно за счёт более тёплых зим после 2011/2012 г. наблюдается слабый положительный тренд T_a .

Температура поверхности моря

Линейный тренд среднегодовых значений T_w в 22-летний период 2003–2024 гг. (*рис. 2*, см. с. 315) оказался равным $+0,030$ °C/год, т.е. примерно таким же, как и в 1980–2021 гг. ($+0,035$ °C/год) (Гинзбург и др., 2021), но меньшим, чем в 1982–2009 гг. ($+0,06$ и $+0,05$ °C/год в Среднем и Южном Каспии соответственно (Костяной и др., 2014)).

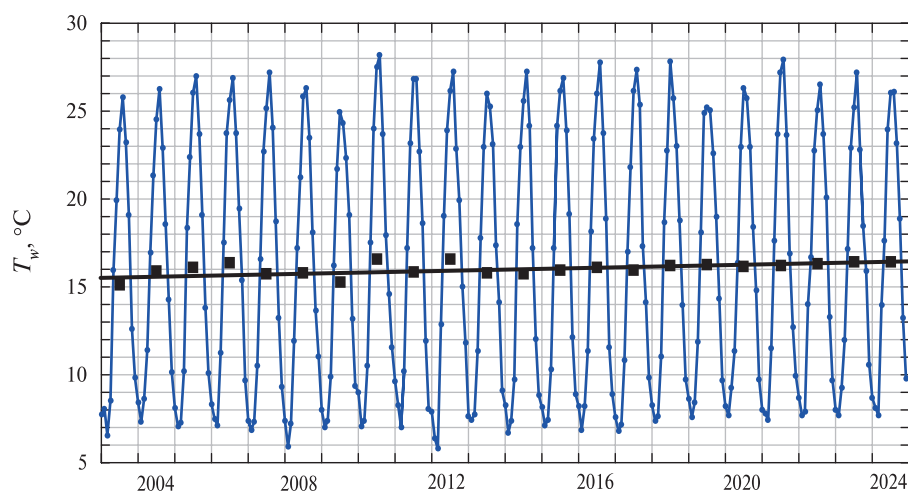


Рис. 2. Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячных значений температуры поверхности Каспийского моря (вместе с заливом КБГ) (T_w , °C) в 2003–2024 гг. Чёрные квадраты — среднегодовые значения T_w , прямая линия — их линейный тренд

Как и у временной серии T_a (см. рис. 1), максимумы летних среднемесячных значений T_w в 2020–2024 гг. (см. рис. 2) в среднем ниже, чем в 2010–2018 гг. В эти же последние пять лет рассматриваемого периода 2003–2024 гг. увеличилась минимальная зимняя температура воды. Так что небольшое увеличение среднегодовой температуры воды в Каспии в последние годы произошло за счёт потепления зим.

Атмосферные осадки

Тренд среднегодовых значений среднемесячного количества атмосферных осадков (чёрные квадраты на рис. 3) с января 2000 по декабрь 2024 г. оказался равным $-0,02 \text{ мм} \cdot \text{мес}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ (см. рис. 3). Этот тренд в 2 раза больше (по абсолютной величине) известной оценки для периода 1979–2010 гг. ($-0,01 \text{ мм} \cdot \text{мес}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) (Костяной и др., 2014), но на порядок меньше определённого для интервала 2003–2017 гг. ($-0,21 \text{ мм} \cdot \text{мес}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) (Гинзбург, Костяной, 2018).

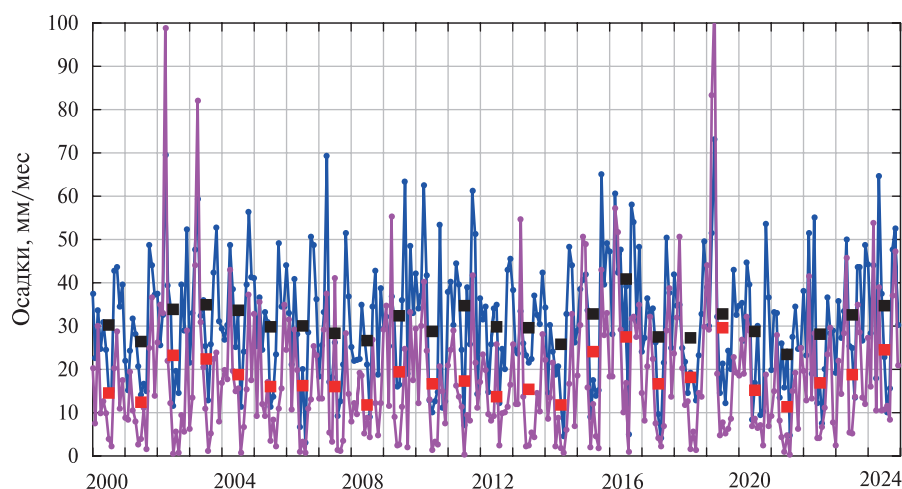


Рис. 3. Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячных значений атмосферных осадков (в мм/мес) с января 2000 по декабрь 2024 г. над Каспийским регионом в целом (голубая линия, чёрные квадраты — среднегодовые значения) и заливом КБГ (линия пурпурного цвета, красные квадраты — среднегодовые значения)

Заметно (см. *рис. 3*), что среднегодовые значения среднемесячного количества осадков имеют квазипериодический характер с чередующимися периодами увеличения и спада в несколько лет. Максимальное среднегодовое количество осадков в рассматриваемый период наблюдалось в 2016 г. (40,8 мм/мес или примерно 49 см/год), минимальное — в 2021 г. (23,5 мм/мес или около 28,2 см/год) с последующим ростом к 2024 г. приблизительно на 13,4 см, тогда как за весь 25-летний период — уменьшение на 7,3 мм.

Характер межгодовой изменчивости осадков над заливом КБГ, окружённым со всех сторон песками пустынь Туркменистана, в основном тот же, что и над морем, но с меньшими среднегодовыми значениями. Максимальное среднегодовое количество осадков наблюдалось в 2019 г. (29,67 мм/мес или примерно 35,6 см/год), минимальное — в 2021 г. (11,35 мм/мес или приблизительно 13,6 см/год) с последующим ростом к 2024 г. до 24,45 мм/мес (29,3 см/год).

Скорость ветра

Тренд среднегодовых значений скорости ветра в 25-летний период 2000–2024 гг. — $+0,006 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$, с диапазонами изменчивости среднемесячных значений от 5,2 до 7,9 м/с и среднегодовых — от 5,9 до 6,3 м/с (*рис. 4*). В частности, среднегодовые значения скорости ветра в последние четыре года изменялись от максимального 6,32 м/с в 2023 г. до минимального 6,14 м/с в 2024 г. Ход среднемесячных значений скорости ветра в годовом цикле на *рис. 4* подтверждает вывод работы (Выручалкина и др., 2020) об ослаблении ветра в тёплый период и его усилении в холодный, причём, по данным этой работы, именно в осенние, зимние и весенние месяцы преобладают ветры восточного направления.

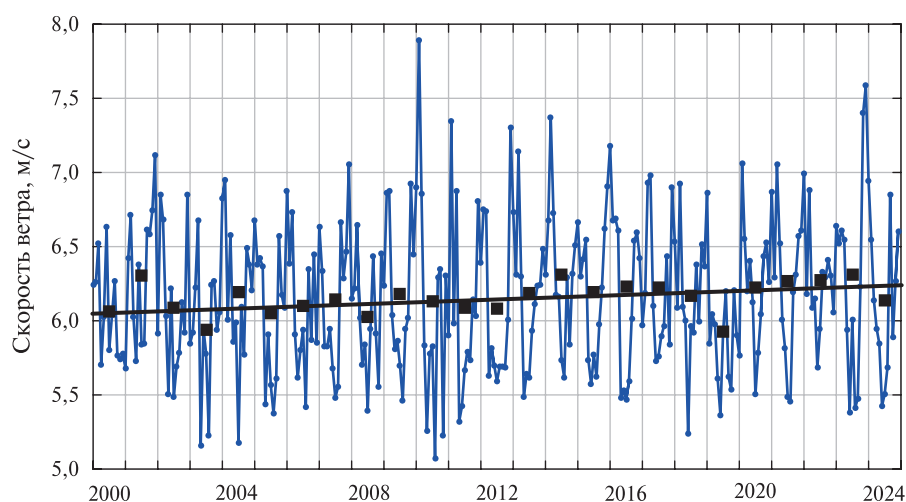


Рис. 4. Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячных значений скорости ветра (в м/с) над Каспийским регионом с января 2000 по декабрь 2024 г. Чёрные квадраты — среднегодовые значения, прямая линия — их линейный тренд

Сток рек

Сток рек — основная часть приходной составляющей водного баланса Каспийского моря. В море впадает около 130 рек (Водный..., 2016). В современный период глобального потепления из-за обмеления мелких рек доля стока Волги в общем речном стоке увеличивается и в настоящее время составляет в среднем около 86 % (Кондратьев, 2025; Саиров и др., 2024). Поэтому межгодовые изменения стока Волги, наряду с испарением с поверхности моря, в значительной степени определяют межгодовую изменчивость уровня Каспия.

Межгодовые изменения стока Волги с 1990 по 2024 г. показаны на *рис. 5*. После максимума стока в 1994 г. ($333,22 \text{ км}^3$) и минимума в 1996 г. ($176,07 \text{ км}^3$) волжский сток изменялся в пределах $101,71 \text{ км}^3$ с относительно небольшими вариациями в 1997–2005 гг. и резкими перепадами с 2006 по 2020 г. Довольно низкие и близкие по величине значения стока Волги после максимума 2020 г. ($279,97 \text{ км}^3$) наблюдались четыре года подряд — 208,35; 211,61; 207,06 и $210,5 \text{ км}^3$ в 2021, 2022, 2023 и 2024 гг. соответственно.

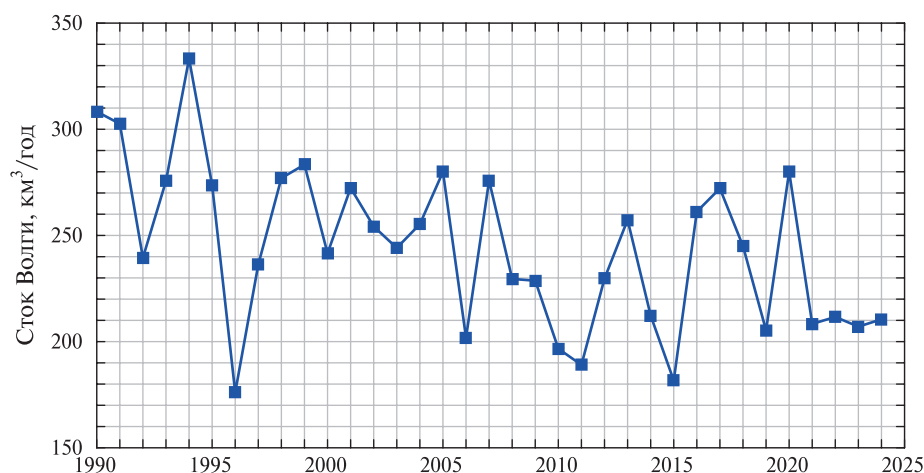


Рис. 5. Межгодовая изменчивость стока Волги (в $\text{км}^3/\text{год}$): в 1990–2023 гг. — по данным КАСПКОМ (<http://www.caspc.com/>), в 2024 г. — с сайта <https://meteojournal.ru/v-2024-godu-uroven-kaspijskogo-morya-upal-na-12-38-santimetrov-nizhe-rekordnogo-nizkogo-urovnya-za-period-nablyudenij/>

Уровни Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол

Квазисинхронные изменения уровней моря и залива по данным спутниковых альтиметров с 27 сентября (17 октября для залива КБГ) 1992 по 8 мая 2025 г. показаны на *рис. 6*.

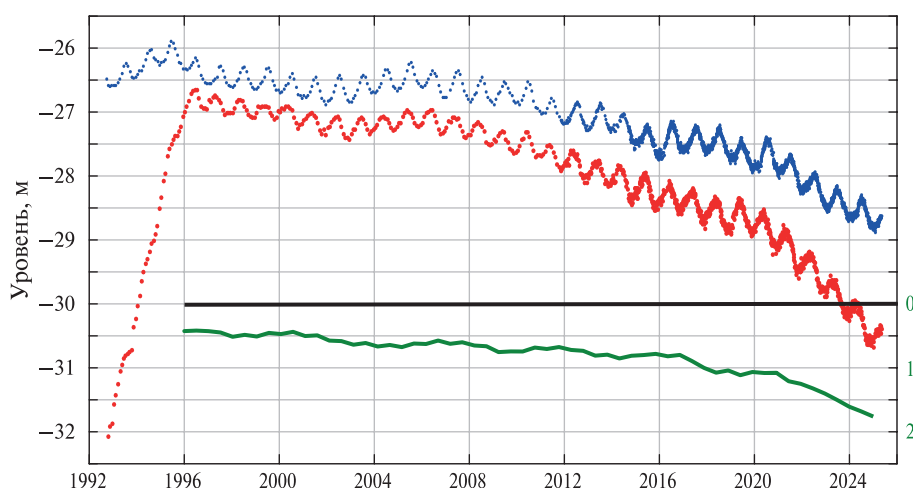


Рис. 6. Межгодовая изменчивость уровней Каспийского моря (голубая линия) и залива КБГ (красная линия) (HydroWEB, LEGOS) с 27 сентября 1992 по 8 мая 2025 г. (в м, шкала слева, без поправки в 0,5 м). Зелёная линия — средняя разница между уровнем моря и залива КБГ (в м, шкала справа) с января 1996 по май 2025 г.

Как следует из *рис. 6*, с сентября 1992 до лета 1995 г. происходил подъём уровня Каспия, затем его спад до зимы 2001/2002 г. и снова подъём до лета 2005 г., а далее уровень продолжал

снижаться до весны 2025 г., за исключением короткого периода относительной стабилизации с 2016 г. до лета 2018 г. Общее падение уровня моря в Балтийской системе высот (БС) с $-26,32$ м БС в конце 1995 г. до $-28,84$ м БС в конце 2024 г. составило 2,52 м, из которых примерно 35 % (85 см) пришлось на последние пять лет (2020–2024). Заметим, что значения уровня моря в базе HydroWEB LEGOS завышены относительно инструментальных измерений и тех, где использовано программное обеспечение Геофизического центра РАН (Гинзбург и др., 2021; Костяной и др., 2014; Лаврова и др., 2011; Лебедев, Костяной, 2016; Lahijani et al., 2023), приблизительно на 40–50 см. Примерно такая же разница уровней альтиметрических данных базы HydroWEB LEGOS с результатами инструментальных измерений уровня в заливе КБГ Д.А. Лавровым (Лавров, 2000) отмечена в работах (Kosarev, Kostianou, 2005; Kosarev et al., 2009). Поэтому в дальнейшем изложении мы будем добавлять к альтиметрическим данным на *рис. 6* разницу -50 см. С учётом этого, к концу 2024 г. реальный уровень моря снизился примерно до $-29,34$ м БС, т. е. превысил минимум 1977 г. ($-29,0$ м БС).

Разница в уровнях альтиметрических и инструментальных данных не сказывается на рассчитанных перепадах уровня и его трендах за определённый период. Средняя скорость снижения уровня Каспия в 1995–2024 гг. составила 8,90 см/год. При этом в периоды 2005–2019 и 2020–2024 гг. уровень снижался со средней скоростью 8,16 и 22,7 см/год соответственно.

Рисунок 6 демонстрирует сходство и отличие временного хода уровней Каспийского моря и залива КБГ. С июня 1992 г., когда была разрушена дамба, отделявшая залив от моря, до лета 1996 г. залив наполнялся каспийской водой со средней скоростью примерно 1,5 м/год. С лета 1996 г., когда он полностью наполнился водой, характер межгодовой изменчивости уровня залива КБГ в основном тот же, что и в Каспии, но с более резким снижением уровня залива по сравнению с морем. Уменьшение уровня залива КБГ происходило со средней скоростью 12,30 см/год в 1996–2024 гг., 12,2 см/год в 2005–2019 гг. и 37,3 см/год в 2020–2024 гг. При этом общее снижение уровня залива с конца 1996 г. ($-26,96$ м) до конца 2024 г. ($-30,6$ м) составило 3,64 м, из которых примерно 42 % (1,53 м) пришлось на последние пять лет (2020–2024). С учётом коррекции в $-0,5$ м уровень залива КБГ к концу 2024 г. опустился до отметки около $-31,1$ м БС.

Заметим, что сезонные циклы уровней в море и в заливе несколько отличаются (см. *рис. 6*): максимум уровня в Каспии приходится в основном на июль, минимум — на зимние месяцы (в основном на декабрь), тогда как в заливе уровень максимален в апреле – мае (летом, при высоком испарении, несмотря на максимальный приток каспийских вод, он понижается (Лавров, 2000, 2002)), минимален — в октябре – декабре. То есть сезонный цикл уровня в заливе опережает по времени таковой в море. Максимальная разница уровней море – залив наблюдается в основном в августе – сентябре, причём она со временем увеличивается: с 1996 до 2001 г. эта разница была в пределах 0,5–0,6 м, к 2005 г. увеличилась приблизительно до 0,8 м, к 2020 г. — до 1,4 м, а в 2024 г. достигла примерно 1,9 м. Минимальная разница уровней — чаще в марте, от 0,3–0,4 м в 1996–2000 гг. до примерно 1,4 м в 2024 г. Временной ход средней разницы уровней море – залив показана на *рис. 6* (зелёная линия). Внутригодовой размах уровня моря (от максимального до минимального в конце года) до 2012 г. больше, чем в заливе (примерно 30–40 и 25–33 см соответственно), в интервале 2012–2020 гг. они примерно одинаковы, а далее их соотношение меняется и в 2024 г. размах уровня в море равен примерно 57 см, в заливе — 66 см. Можно заметить также, что при понижении уровня и в море, и в заливе разница подъёма и падения уровня в пределах сезонного цикла отрицательна, что наиболее заметно в период интенсивного снижения уровней в обоих водоёмах в 2020–2024 гг., особенно в заливе. Это, по-видимому, связано, с одной стороны, с минимумом притока речных/морских вод, с другой — с максимальным испарением в осенний период года (август – ноябрь), вследствие большей разности температуры между более тёплой водой и более холодным воздухом, а также усилением ветра в этот период (Выручалкина и др., 2020).

Существенные изменения уровня моря в сезонном цикле (десятки сантиметров) создают неопределённость при сравнении альтиметрических измерений уровня с опубликованными результатами инструментальных измерений на разных прибрежных гидро-

логических станциях, когда в публикациях указывается только год таких измерений. Например, в соответствии с *рис. 6*, уровень моря в 2020 г. изменялся от $-27,4$ м БС в максимуме (летом) до $-28,0$ м БС в конце года, тогда как различия в известных значениях уровня в 2020 г., по данным измерений *in situ* в разных прибрежных пунктах Каспия, достигают 1 м: $-28,45$ м БС по данным поста Кара-Богаз-Гол (Алейников и др., 2024); $-28,23$ м БС по данным КАСПКОМ (Кондратьев, 2025, таблица); $-28,0$ м БС по измерениям в Баку (Lahijani et al., 2023); $-28,07$ м БС по измерениям в Махачкале (Островская и др., 2023; Safarov et al., 2024); $-27,4$ м БС по измерениям на острове Искусственный (Островская и др., 2023). В работе (Lahijani et al., 2023) справедливо отмечается, что из-за естественного отличия измеренных в разных пунктах уровней, а также из-за отсутствия интеркалибровки уровней постов с середины 1980-х гг. следует сравнивать не их абсолютные значения, а приращения за определённый период. Очевидно, однако, что при подобных сравнениях следует учитывать сезонный ход уровня моря.

Как уже отмечалось ранее (Гинзбург, Костяной, 2018; Safarov et al., 2024), после 1997 г. чёткой корреляции межгодовых изменений уровня Каспия и стока Волги не наблюдается. Однако сравнение *рис. 6* и данных по стоку Волги (см. *рис. 5*) показывает, что в отдельные годы уровень моря откликается на резкий рост/уменьшение стока Волги. Так, в период с 2005 по 2020 г. на *рис. 6* можно выделить три года с отличающимися значениями уровня моря от общего среднего хода его снижения, связанные, вероятно, со стоком Волги: понижение уровня в 2011 г. (малый сток в связи с засухой в европейской части России, включая бассейн реки Волги, в конце июня – августе 2010 г. (Arpe et al., 2012)), в 2015 и 2019 гг. (уменьшение стока Волги) и, напротив, подъём уровня в 2020 г. при высоком стоке Волги; высокий сток Волги в 2016–2017 гг. стал, вероятно, причиной некоторой стабилизации уровня моря с 2016 до лета 2018 г. Однако при росте стока Волги (в среднем) с 2011 по 2020 г. уровень моря понижался, и особенно интенсивное его снижение было при практически постоянном малом стоке Волги в 2021–2024 гг.

Обсуждение и выводы

Выполненный совместный анализ межгодовых изменений уровней Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол, связанных проливом, показал, что в последние пять лет (2020–2024) уровни в этих водоёмах снижались со значительно большей скоростью (22,7 и 37,3 см/год соответственно), чем в предшествующий период 2005–2019 гг. (8,16 и 12,2 см/год). (Столь же интенсивное снижение уровня Каспия (со скоростью 28,5 см/год), согласно нашей оценке по Figure 2 в работе (Safarov et al., 2024), наблюдалось в 1933–1940 гг.)

Очевидно, что изменения темпов снижения уровней моря и залива в последние годы связаны с изменениями в составляющих их водных балансов (Костяной и др., 2025). Динамика объёма вод моря ΔV_s за конкретный год этого периода определяется по снижению уровня моря на *рис. 6* и его площади S_s для соответствующего уровня. Главную компоненту приходной части водного баланса моря — стока рек R_s , впадающих в Каспий, определим по стоку Волги (см. *рис. 5*) с учётом 86%-й доли волжского стока в общем стоке рек. Вторую компоненту приходной части водного баланса — объём атмосферных осадков P_s — оценим по данным на *рис. 3* с учётом S_s . Расходная часть водного баланса моря включает две компоненты — испарение E_s с поверхности моря и сток морской воды в залив КБГ $V_{\text{КБГ}}$, который зависит от разности уровней моря и залива и пропускной способности пролива КБГ (Лавров, 2002). Для 2023 г. величина $V_{\text{КБГ}}$ известна и равна $8,77 \text{ км}^3$ (данные КАСПКОМ, рассчитанные по инструментальным измерениям расхода морской воды в пункте Кара-Богаз-Гол, <http://www.casrcot.com/>), что примерно вдвое меньше, чем в 2000 г. ($17,06 \text{ км}^3$ (Лавров, 2002)). Поэтому оценим приблизительное испарение E_s с поверхности Каспийского моря методом водного баланса для 2023 г.

Понижение уровня Каспия в 2023 г. составило примерно 0,2 м (см. *рис. 6*). Соответственно для площади моря $S_s \approx 355 \text{ тыс. км}^2$ при уровне $-29,2$ м БС (с учётом завышения альти-

метрических данных $-28,7$ м на *рис. 6* на $0,5$ м), определённой по данным работы (Водный..., 2016, таблица 6.12), уменьшение объёма морских вод Каспия ΔV_s оказалось равным приблизительно 71 км^3 . При известном стоке Волги ($207,06 \text{ км}^3$, см. *рис. 5*) сток рек в море R_s можно оценить как $240,8 \text{ км}^3$. Объём выпавших на поверхность моря осадков P_s в 2023 г. при $39,2$ см/год (см. *рис. 3*) и известной величине S_s равен примерно $139,2 \text{ км}^3$, сток морских вод в залив $V_{\text{КБГ}}$ известен — $8,77 \text{ км}^3$. Тогда объём испарившейся с поверхности моря воды в 2023 г. E_s составил около $442,2 \text{ км}^3$. В пересчёте на слой воды компоненты водного баланса Каспия оказались равными: $\Delta V_{sl} \approx -20$ см; $R_{sl} \approx +67,8$ см; $P_{sl} \approx +39,2$ см; $V_{\text{КБГ}l} \approx -2,5$ см; $E_{sl} \approx -124,6$ см.

Очевидным фактором, способствовавшим более интенсивному снижению уровня моря в период 2021–2024 гг., стало резкое снижение стока Волги с мало меняющимися величинами стока (после максимума $279,07 \text{ км}^3$ в 2020 г.) четыре года подряд (см. *рис. 5*): $208,35$; $211,61$; $207,06$ и $210,5 \text{ км}^3$ в 2021, 2022, 2023 и 2024 гг. соответственно, хотя эти значения были выше минимумов стока в 2006, 2010, 2011 и 2015 гг. Но главным фактором, определившим большую скорость снижения уровня моря в 2020–2024 гг., стало увеличение испарения. Полученная для 2023 г. оценка испарения, равная примерно $124,6$ см, выше средней для периода 1996–2015 гг. ($116,55$ см) и практически равна максимальной (125 см) для засушливого 2010 г. в работе (Chen et al., 2017) (модельный расчёт).

Анализ характера изменения в рассматриваемый период температуры воздуха (см. *рис. 1*), атмосферных осадков (см. *рис. 3*) и скорости ветра (см. *рис. 4*) в Каспийском регионе, а также температуры воды в Каспии (см. *рис. 2*), определяющих величину испарения, не обнаруживает резкого изменения этих параметров в 2020–2024 гг. Можно предположить, в соответствии с работой (Панин и др., 2006) о значительном влиянии глубины водоёма на испарение и теплообмен с атмосферой, что высокая величина испарения в Каспии в последние годы могла быть связана с уменьшением глубины мелководной части моря (в основном в Северном Каспии).

Заметим, что сток морской воды в залив ($2,5$ см слоя воды в море) в 2023 г. составил $12,5 \%$ снижения уровня моря, что не согласуется с выводом в работе (Малинин, 2022) об определяющей роли этого стока в непрерывном снижении уровня Каспия после 1996 г.

Как и для Каспийского моря, оценим примерную величину испарения с поверхности залива КБГ $E_{\text{КБГ}}$ для 2023 г. методом водного баланса. Изменение объёма $\Delta V_{\text{КБГ}}$ и площади зеркала залива в конкретный год можно получить или из онлайн-базы данных HydroWEB LEGOS, как это делалось в работах (Гинзбург и др., 2022; Lahijani et al., 2023), или по графикам зависимости этих параметров от уровня в заливе в исследовании (Выручалкина, 2020), рассчитанным с использованием цифровой модели рельефа дна (см. публикацию (Гинзбург и др., 2022)). Изменение уровня залива в 2023 г. составило примерно $-0,4$ м. При среднем уровне $-30,5$ м (см. *рис. 6*, с учётом добавки $-0,5$ м) площадь зеркала залива, по зависимостям в работе (Выручалкина, 2020), равна примерно $17\,100 \text{ км}^2$ и, следовательно, $\Delta V_{\text{КБГ}} \approx -6,84 \text{ км}^3$. Приходная часть водного баланса включает сток каспийских вод $R_{\text{КБГ}}$ ($+8,77 \text{ км}^3$) и осадки ($22,6$ см, см. *рис. 3*), равные при известной площади зеркала залива примерно $+3,9 \text{ км}^3$. Тогда $E_{\text{КБГ}} \approx -19,5 \text{ км}^3$ или в пересчёте на слой воды в заливе: $\Delta V_{\text{КБГ}l} \approx -40$ см; $R_{\text{КБГ}l} \approx +51,3$ см; $P_{\text{КБГ}l} \approx +22,6$ см; $E_{\text{КБГ}l} \approx -113,9$ см. Расходная часть водного баланса залива (испарение) оказалась, таким образом, в $1,54$ раза больше, чем приходная (поступление каспийских вод и осадки). Для Каспийского моря аналогичное соотношение испарения к сумме речного стока и атмосферных осадков равно $1,16$.

Очевидно, что заливу в последние годы не хватает каспийской воды, что связано, с одной стороны, с уменьшением пропускной способности пролива КБГ. Согласно оценке в работе (Лавров, 2002), вследствие особенностей строения дна пролива при падении уровня моря ниже $-28,0 \dots -28,5$ м ($-27,5 \dots -28,0$ м на *рис. 6* с учётом коррекции в $-0,5$ м) пролив не будет способен пропускать количество воды, требуемое для равновесия с морем, и площадь зеркала залива начнёт сокращаться непропорционально колебаниям уровня моря. С другой стороны, как показано в работе (Выручалкина, 2023), с использованием модели тепло-массообмена системы водоём – атмосфера (Панин и др., 2006) и учётом морфометрических характе-

ристик залива (Выручалкина, 2020), при снижении его уровня до отметки $-29,0...-29,5$ м БС ($-28,5...-29$ м БС на *рис. 6*) происходит интенсификация испарения за счёт увеличения площадей мелководий.

С учётом морфометрических параметров пролива оголение его дна и, соответственно, отчленение залива от моря произойдёт при уровне моря $-30,5$ м БС (Лавров, 2002) (в соответствии с работой (Выручалкина, 2020) — при -30 м БС, публикациями (Водный..., 2016; Малинин, 2022) — при $-30,6$ м БС). В этом случае сток каспийских вод в залив прекратится полностью. Простая оценка показывает, что при уровне моря в конце 2024 г., равном $-29,34$ м БС (с учётом коррекции в $-0,5$ м), и сохранении тренда его снижения в 2020–2024 гг. $22,7$ см/год (см. *рис. 6*) достижение отметки $-30,5$ м БС могло бы произойти уже примерно через пять лет. В действительности, с учётом увеличивающегося испарения с поверхности и моря, и залива (из-за обмеления мелководных районов Каспия и КБГ), это могло бы случиться и раньше. С другой стороны, неизвестно, каким в ближайшие годы будет сток Волги. К тому же при сокращении площади зеркала моря/залива может включиться механизм обратной связи (морфометрический фактор) — уменьшение испарения и соответственно темпов снижения уровней этих водоёмов (Костяной и др., 2025; Малинин, 2022).

В соответствии с разными долгосрочными прогнозами (см. работы (Водный..., 2016; Костяной и др., 2025; Lahijani et al., 2023)), в XXI в. можно было ожидать как снижения уровня Каспия, так и его повышения или стабилизации. Можно констатировать, что, по крайней мере до 20-х гг. XXI в., ни один из известных прогнозов поведения уровня моря не оправдался. Результаты моделирования уровня Каспия в работе (Nandini-Weiss et al., 2020) предсказывают его понижение с 2020 г. до конца столетия на 9 или 18 м для сценариев антропогенного выброса углекислого газа в атмосферу RCP4.5 и RCP8.5 IPCC (*англ.* International Panel on Climate Change) соответственно, что привело бы к сокращению поверхности Каспия на 23 или 34 % соответственно (Prange et al., 2020). Но моделирование уровня на столь длительные временные интервалы не учитывает такие факторы, как возможные изменения на более коротких временных масштабах стока рек, температуры воздуха/воды, смены направления ветра, изменение стока каспийских вод в залив КБГ или его отделение от моря, изменение интенсивности испарения на мелководье (с возможным включением морфометрического фактора) или в зависимости от степени разреженности ледяного покрова в Северном Каспии (Костяной и др., 2025) и, наконец, возможной смены глобального/локального потепления на похолодание. Как поведут себя уровни Каспийского моря и связанного с ним залива Кара-Богаз-Гол в последующие годы, покажут дальнейшие наблюдения, в первую очередь — мониторинг уровней этих водоёмов и составляющих их водных балансов на основе доступной оперативной спутниковой информации.

Исследование климатической изменчивости Каспийского моря выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-44-20006 «Пространственное планирование и спутниковый мониторинг морских охраняемых природных акваторий Каспийского моря» (2024–2026), <https://rscf.ru/project/24-44-20006/>. Исследование межгодовой изменчивости уровня Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол выполнено в рамках темы госбюджета FMWE-2024-0016 «Разномасштабные гидрофизические процессы в Мировом океане и его пограничных слоях: их исследование методами оперативной океанографии, судовых наблюдений, дистанционного зондирования, теоретического, численного и лабораторного моделирования».

Литература

1. Алейников А., Богданович А., Липка О. Изменение береговой линии Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол с учетом климатических изменений // Береговая зона морей России в XXI веке: Тез. докл. 30-й Всероссийской конф. М.: Географ. фак. МГУ, 2024. С. 69–71.
2. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / под ред. Е. С. Нестерова. М.: Триада лтд, 2016. 378 с.

3. *Выручалкина Т. Ю.* Создание цифровой модели рельефа залива Кара-Богаз-Гол // Тр. Карельского науч. центра РАН. 2020. № 4. С. 139–144. DOI: 10.17076/lim1199.
4. *Выручалкина Т. Ю.* Исследование особенностей интенсификации испарения с залива Кара-Богаз-Гол // Новые методы и подходы в геоинформационном моделировании, анализе данных, разработке карт и атласов: Материалы Международ. конф. «ИнтерКарто. ИнтерГИС». 2023. Т. 29. С. 607–615. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-607-615.
5. *Выручалкина Т. Ю., Дианский Н. А., Фомин В. В.* Влияние на эволюцию уровня Каспийского моря многолетних изменений режима ветра над его регионом в 1948–2017 гг. // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С. 230–240. DOI: 10.31857/S0321059620020194.
6. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г.* Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-е – 2017 гг.) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 195–207. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-195-207.
7. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А.* Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980–2020) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 277–291. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.
8. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А.* О динамике вод в заливе Кара-Богаз-Гол (спутниковая информация) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 265–279. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-265-279.
9. *Кондратьев В.* Влияние стока Волги на уровень Каспийского моря в 2011–2022 годах // Каспийский вестн. 11 августа 2025 г. <https://casp-geo.ru/vliyanie-stoka-volgi-na-uroven-kaspijskogo-morya-v-2011-2022-godah/>.
10. *Костяной А. Г., Гинзбург А. И., Лебедев С. А., Шеремет Н. А.* Южные моря России // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) / под ред. В. М. Катцова, С. М. Семенова. М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 2014. С. 644–683.
11. *Костяной А. Г., Малинин В. Н., Фролов А. В.* Основные причины изменения уровня Каспийского моря // Фундам. и приклад. климатология. 2025. Т. 11. № 3. С. 338–373. DOI: 10.21513/2410-8758-2025-3-338-373.
12. *Лавров Д. А.* Гидрологический режим залива Кара-Богаз-Гол в условиях свободного доступа воды // Экологические проблемы Каспия: сб. докл. Международ. семинара по эколог. проблемам Прикаспийского района / под ред. М. Г. Хубларяна. М.: Российская акад. наук; Нац. акад. США, 2000. С. 17–21.
13. *Лавров Д. А.* Характеристика водного режима залива Карабогазгол после возобновления свободного притока морской воды в 1992 году // Гидрометеорология и экология. 2002. № 3. С. 62–69.
14. *Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 470 с.
15. *Лебедев С. А., Костяной А. Г.* Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Море, 2005. 366 с.
16. *Лебедев С. А., Костяной А. Г.* Изменения уровня и динамики вод по данным спутниковой альтиметрии // Система Каспийского моря / отв. ред. А. П. Лисицын. М.: Науч. мир, 2016. С. 13–41.
17. *Малинин В. Н.* Грозит ли Каспию судьба Арала? // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 746–760. DOI: 10.33933/2713-3001-2022-69-746-760.
18. *Островская Е. В., Гаврилова Е. В., Гонтовая И. В. и др.* Гидрометеорологические показатели состояния российского сектора Каспийского моря в условиях меняющегося климата // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 6. С. 914–929. DOI: 10.31857/S2587556623060109.
19. *Панин Г. Н., Насонов А. Е., Фокен Т.* Испарение и теплообмен водоема с атмосферой при наличии мелководий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 3. С. 1–17.
20. *Саилов С. Б., Елтай А. Ф., Ракишев Д. Б., Курманғалиева А. Қ.* Динамика изменения уровня Каспийского моря в его казахстанской части // География и водные ресурсы. 2024. № 4. С. 24–33 (на казахском). <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-4-24-33.36>.
21. *Arpe K., Leroy S. A. G., Lahijani H., Khan V.* Impact of the European Russia drought in 2010 on the Caspian Sea level // Hydrology and Earth System Sciences. 2012. V. 16. P. 19–27. DOI: 10.5194/hess-16-19-2012.
22. *Chen J. L., Pekker T., Wilson C. R. et al.* Long-term Caspian Sea level change // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44. P. 6993–7001. DOI: 10.1002/2017GL073958.
23. *Huffman G. J., Stocker E. F., Bolvin D. T. et al.* GPM IMERG Final Precipitation L3 1 month 0.1 degree × 0.1 degree V07. Greenbelt, MD: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2023. DOI: 10.5067/GPM/IMERG/3B-MONTH/07.

24. *Kazmin A. S., Shiganova T. A.* Ctenophore invasions in the Ponto-Caspian Seas: role of abiotic factors variability // *Biological Invasions*. 2024. V. 26. P. 1381–1397. <https://doi.org/10.1007/s10530-024-03252-2>.
25. *Kosarev A. N., Kostianoy A. G.* Kara-Bogaz-Gol Bay // *The Caspian Sea Environment* / eds. A. Kostianoy, A. Kosarev. *The Handbook of Environmental Chemistry*. V. 5. Pt. P. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. P. 211–221. DOI: 10.1007/698_5_011.
26. *Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Zonn I. S.* Kara-Bogaz-Gol Bay: Physical and chemical evolution // *Aquatic Geochemistry*. 2009. V. 15. P. 223–236. DOI: 10.1007/s10498-008-9054-z.
27. *Kostianoy A. G., Pešić V.* Advances in environmental monitoring of the Caspian Sea // *Ecologica Montenegrina*. 2024. V. 76. P. 201–210. <https://doi.org/10.37828/em.2024.76.12>.
28. *Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Yu. et al.* Comprehensive satellite monitoring of Caspian Sea conditions // *Remote Sensing of the Asian Sea* / eds. V. Barale, M. Gade. Cham: Springer, 2019. P. 505–521. DOI: 10.1007/978-3-319-94067-0_28.
29. *Lahijani H., Leroy S. A. G., Arpe K., Crétaux J.-F.* Caspian Sea level changes during instrumental period, its impact and forecast: A review // *Earth-Science Review*. 2023. V. 241. Article 104428. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104428>.
30. *Nandini-Weiss S. D., Prange M., Arpe K. et al.* Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area // *Intern. J. Climatology*. 2020. V. 40. P. 2717–2731. <https://doi.org/10.1002/joc.6362>.
31. *Prange M., Wilke T., Wesselingh F. P.* The other side of sea level change // *Communications Earth and Environment*. 2020. V. 1. Article 69. 4 p. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>.
32. *Safarov E., Safarov S., Bayramov E.* Changes in the hydrological regime of the Volga River and their influence on Caspian Sea level fluctuations // *Water*. 2024. V. 16. Article 1744. <https://doi.org/10.3390/w16121744>.

Interannual changes in water levels in the Caspian Sea – Kara-Bogaz-Gol Bay system and hydrometeorological parameters of the Caspian region in the first quarter of the 21st century

A. I. Ginzburg¹, A. G. Kostianoy^{1,2,3}, N. A. Sheremet¹

¹ *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mails: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, sheremet@ocean.ru

² *Moscow Witte University, Moscow 115432, Russia*

³ *Maykop State Technological University, Maykop 385000, Russia*

The paper considers seasonal and interannual changes in the levels of the Caspian Sea and Kara-Bogaz-Gol Bay (KBG) connected by a strait (September 1992 – May 2025, using satellite altimetry data), as well as a number of hydrometeorological parameters (air and water surface temperatures, precipitation, wind speed, and Volga runoff) in 2000–2024. The Caspian Sea level trends in different periods were: –8.90 cm/year in 1995–2024, –8.16 cm/year in 2005–2019 and –22.7 cm/year in 2020–2024. A similar change in the nature of the level trend took place in the KBG: –12.3 cm/year, –12.2 cm/year and –37.3 cm/year, respectively, in 1996–2024, 2005–2019 and 2020–2024. Thus, the last 5 years (2020–2024) turned out to be the years with the highest rate of decline in both the sea level and (especially) the bay level over the 30-year period (1995–2024). By the end of 2024, the levels of the Caspian Sea and the KBG decreased to marks of –29.34 and –31.1 m in the Baltic Height System (BS), respectively (both values are given taking into account an overestimation of altimeter data relative to instrumental measurements by approximately 0.5 m). Meanwhile, the Caspian Sea level exceeded the 1977 minimum (–29.0 m BS). Possible causes of this accelerated water level decline in the sea and the KBG are discussed. Using the water balance method, evaporation estimates were obtained from the surface areas of both reservoirs in 2023, for which the Caspian Sea's runoff into the KBG was known (8.77 km³). For the Caspian Sea, this estimate was approximately 442 km³ (125 cm of water layer), and for the KBG, 19.5 km³ (114 cm of water depth). The ratio of evaporation to the incoming portion of the water balance was approximately 1.16 in the Caspian Sea and 1.54 in the KBG.

Keywords: Caspian Sea level, Kara-Bogaz-Gol Bay level, air temperature, sea surface temperature, atmospheric precipitation, river runoff, interannual variability, Caspian Sea – KBG water balance, evaporation

Accepted: 05.11.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-312-325

References

1. Aleynikov A., Bogdanovich A., Lipka O., Changes in the coastline of the Caspian Sea and the Kara-Bogaz-Gol Gulf taking into account climate change, *Beregovaya zona morei Rossii v XXI veke: Tezisy dokladov 30-i Vserossiiskoi konferentsii* (Coastal Zone of the Seas of Russia in the 21st Century: Abstracts of 30th All-Russia Conf.), Moscow: Geograficheskii fakul'tet MGU, 2024, pp. 69–71 (in Russian).
2. *Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovanie i prognoz* (Water balance and fluctuations in the level of the Caspian Sea. Modeling and forecasting), E.S. Nesterov (ed.), Moscow: Triada Ltd, 2016, 378 p. (in Russian).
3. Vyruchalkina T. Yu., Development of a digital elevation model of Kara-Bogaz-Gol Bay, *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2020, No. 4, pp. 139–144 (in Russian), DOI: 10.17076/lim1199.
4. Vyruchalkina T. Yu., Investigation of the features of the intensification of evaporation from the Kara-Bogaz-Gol Bay, *Novye metody i podkhody v geoinformatsionnom modelirovanii, analize dannykh, razrabotke kart i atlasov: Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii "InterKarto. InterGIS"* (New methods and approaches in geoinformation modeling, data analysis, creation of maps and atlases: Proc. Intern. Conf. "InterCarto. InterGIS"), 2023, V. 29, pp. 607–615 (in Russian), DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-607-615.
5. Vyruchalkina T. Yu., Dianskiy N.A., Fomin V.V., Effect of long-term variations in wind regime over Caspian Sea region on the evolution of its level in 1948–2017, *Water Resources*, 2020, V. 47, No. 2, pp. 348–357, DOI: 10.1134/S0097807820020190.
6. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Tendencies of changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea in the modern period (1990s–2017), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 7, pp. 195–207 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-195-207.
7. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Serykh I. V., Lebedev S. A., Climatic changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980–2020), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 5, pp. 277–291 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.
8. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., On the dynamics of waters in Kara-Bogaz-Gol (satellite information), *Cosmic Research*, 2022, V. 60, Suppl. 1, pp. S27–S37, DOI: 10.1134/S0010952522700046.
9. Kondrat'yev V., Vliyaniye stoka Volgi na uroven' Kaspiyskogo morya v 2011–2022 godakh (The influence of the Volga runoff on the level of the Caspian Sea in 2011–2022), *Kaspiiskii vestnik*, Aug. 11, 2025 (in Russian), <https://casp-geo.ru/vliyanie-stoka-volgi-na-uroven-kaspiyskogo-morya-v-2011-2022-godah/>.
10. Kostyanoy A. G., Ginzburg A. I., Lebedev S. A., Sheremet N. A., The Southern seas of Russia, In: *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchei sredy* (Rosgidromet) (Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and Its Impacts in the Russian Federation. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet)), V. M. Kattsov, S. M. Semenov (eds.), M.: FGBU "IGKE Rosgidrometa i RAN", 2014, pp. 644–683 (in Russian).
11. Kostianoy A. G., Malinin V. N., Frolov A. V., Main causes for changes in the Caspian Sea level, *Fundamental and Applied Climatology*, 2025, V. 11, No. 3, pp. 338–373 (in Russian), DOI: 10.21513/2410-8758-2025-3-338-373.
12. Lavrov D. A., Hydrological regime of Kara-Bogaz-Gol Bay in conditions of free seawater supply, In: *Ehko-logicheskie problemy Kaspiya: sbornik dokladov Mezhdunarodnogo seminara po ehkologicheskim problemam Prikaspiiskogo raiona* (Ecological problems of the Caspian Sea: Proc. Intern. scientific seminar on ecological problems of the Caspian Sea region), M. G. Khublaryan (ed.), Moscow: Rossiiskaya akademiya nauk; Natsional'naya akademiya SShA, 2000, pp. 17–21 (in Russian).
13. Lavrov D. A., Characteristics of the water regime of the Karabogazgol Bay after the resumption of free inflow of sea water in 1992, *Hydrometeorology and Ecology*, 2002, No. 3, pp. 62–69 (in Russian).
14. Lavrova O. Yu., Kostyanoy A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Integrated satellite monitoring of Russian seas), Moscow: IKI RAS, 2011, 470 p. (in Russian).
15. Lebedev S. A., Kostyanoy A. G., *Sputnikovaya al'timetriya Kaspiiskogo morya* (Satellite altimetry of the Caspian Sea), Moscow: More, 2005, 366 p. (in Russian).

16. Lebedev S. A., Kostianoy A. G., Changes in the level and water dynamics from satellite altimetry data, In: *Sistema Kaspiiskogo morya* (The Caspian Sea system), A. P. Lisitsin (ed.), Moscow: Nauchnyi mir, 2016, pp. 13–41 (in Russian).
17. Malinin V. N., Is the Caspian Sea threatened by the fate of the Aral Sea?, *Hydrometeorology and Ecology*, 2022, No. 69, pp. 746–760 (in Russian), DOI: 10.33933/2713-3001-2022-69-746-760.
18. Ostrovskaya E. V., Gavrilova E. V., Gontovaya I. V. et al., Hydrometeorological parameters of the marine environment in the Russian sector of the Caspian Sea under changing climate, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2023, V. 87, No. 6, pp. 914–929 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556623060109.
19. Panin G. N., Nasonov A. E., Foken T., Evaporation and heat exchange of a reservoir with the atmosphere in the presence of shallow waters, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2006, V. 42, No. 3, pp. 1–17 (in Russian).
20. Sairov S. B., Yeltay A. G., Rakishev D. B., Kurmangaliyeva A. K., Dynamics of water level changes in the Kazakh part of the Caspian Sea, *Geography and water resources*, 2024, No. 4, pp. 24–33 (in Kazakh), <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-4-24-33.36>.
21. Arpe K., Leroy S. A. G., Lahijani H., Khan V., Impact of the European Russia drought in 2010 on the Caspian Sea level, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, V. 16, pp. 19–27, DOI: 10.5194/hess-16-19-2012.
22. Chen J. L., Pekker T., Wilson C. R. et al., Long-term Caspian Sea level change, *Geophysical Research Letters*, 2017, V. 44, pp. 6993–7001, DOI: 10.1002/2017GL073958.
23. Huffman G. J., Stocker E. F., Bolvin D. T. et al., *GPM IMERG Final Precipitation L3 1 month 0.1 degree × 0.1 degree V07*, Greenbelt, MD: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2023, DOI: 10.5067/GPM/IMERG/3B-MONTH/07.
24. Kazmin A. S., Shiganova T. A., Ctenophore invasions in the Ponto-Caspian Seas: role of abiotic factors variability, *Biological Invasions*, 2024, V. 26, pp. 1381–1397, <https://doi.org/10.1007/s10530-024-03252-2>.
25. Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Kara-Bogaz-Gol Bay, In: *The Caspian Sea Environment*, A. Kostianoy, A. Kosarev (eds.), The Handbook of Environmental Chemistry, V. 5, Pt. P, Berlin, Heidelberg: Springer, 2005, pp. 211–221, DOI: 10.1007/698_5_011.
26. Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Zonn I. S., Kara-Bogaz-Gol Bay: Physical and chemical evolution, *Aquatic Geochemistry*, 2009, V. 15, pp. 223–236, DOI: 10.1007/s10498-008-9054-z.
27. Kostianoy A. G., Pešić V., Advances in environmental monitoring of the Caspian Sea, *Ecologica Montenegrina*, 2024, V. 76, pp. 201–210, <https://doi.org/10.37828/em.2024.76.12>.
28. Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Yu. et al., Comprehensive satellite monitoring of Caspian Sea conditions, In: *Remote Sensing of the Asian Sea*, V. Barale, M. Gade (eds.), Cham: Springer, 2019, pp. 505–521, DOI: 10.1007/978-3-319-94067-0_28.
29. Lahijani H., Leroy S. A. G., Arpe K., Crétaux J.-F., Caspian Sea level changes during instrumental period, its impact and forecast: A review, *Earth Science Review*, 2023, V. 241, Article 104428, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104428>.
30. Nandini-Weiss S. D., Prange M., Arpe K. et al., Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area, *Intern. J. Climatology*, 2020, V. 40, pp. 2717–2731, <https://doi.org/10.1002/joc.6362>.
31. Prange M., Wilke T., Wesselingh F. P., The other side of sea level change, *Communications Earth and Environment*, 2020, V. 1, Article 69, 4 p., <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>.
32. Safarov E., Safarov S., Bayramov E., Changes in the hydrological regime of the Volga River and their influence on Caspian Sea level fluctuations, *Water*, 2024, V. 16, Article 1744, <https://doi.org/10.3390/w16121744>.