

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-1-102-122>

УДК 551.515:551.461

## **Связь уровня и составляющих водного баланса Каспийского моря с индексами крупномасштабной атмосферной циркуляции (1950–2023 гг.)**

***Е.В. Островская, А.В. Павлова***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
eostrovskaya@mail.ru, anna.pavlova-16@yandex.ru*

На основе данных наблюдений за стоком Волги, уровнем Каспийского моря и температурой воздуха, а также данных реанализа ERA5 (атмосферные осадки и испарение), исследованы причины колебаний уровня моря в отдельные характерные периоды его подъема (1978–1995 гг.) и снижения (1950–1977 и 1996–2023 гг.). Установлено, что среднегодовые значения стока Волги и уровня моря статистически значительно различаются между всеми тремя выделенными периодами. Количество осадков достоверно увеличивалось только в фазу подъема уровня (1978–1995 гг.), тогда как рост температуры воздуха и испарения стал статистически значимым лишь в современный период снижения уровня (1996–2023 гг.). Межгодовые изменения уровня Каспийского моря демонстрируют устойчивую и усиливающуюся во времени корреляционную связь с колебаниями стока Волги: коэффициент корреляции возрастает от  $r = 0,39$  в период 1950–1977 гг. до  $r = 0,76$  в 1996–2023 гг. Однако современная тенденция к снижению уровня соответствует не столько изменениям стока, сколько положительным трендам температуры воздуха и испарения. Структура связей гидрологических показателей с циркуляцией атмосферы изменчива во времени. Если в середине XX века преобладало влияние глобальных циркуляционных механизмов (Североатлантического и Арктического колебаний — NAO и AO), то в современный период доминирующую роль стали играть региональные процессы, описываемые индексом EA/WR (паттерн Восточная Атлантика/Западная Россия). Этот сдвиг связан с увеличением частоты блокирующих антициклонических ситуаций и ослаблением западного переноса влаги в регион, что в конечном итоге отразилось на водном балансе Каспийского моря.

*Ключевые слова:* Каспийское море, изменения уровня, сток Волги, испарение, осадки, индексы циркуляции атмосферы

## **Relationship of the Caspian Sea level and water balance components with large-scale atmospheric circulation indices (1950–2023)**

***E.V. Ostrovskaya, A.V. Pavlova***

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,  
Moscow, Russia  
eostrovskaya@mail.ru, anna.pavlova-16@yandex.ru*

Based on observation data of the Volga runoff, the Caspian Sea level, and air temperature, as well as ERA5 reanalysis data (precipitation and evaporation), causes for the Caspian Sea level fluctuations during specific characteristic periods of its rise (1978–1995) and decline (1950–1977 and 1996–2023) are studied. It was found that the long-term average values of the Volga runoff and sea level differ statistically significantly among all three identified periods. Precipitation increased significantly only during the sea level rise phase (1978–1995), whereas an increase in air temperature and evaporation became statistically significant only in the modern period of the sea level decline (1996–2023). Interannual changes in the Caspian Sea level demonstrate a stable and increasing correlation with variations in the Volga runoff over time: the correlation coefficient increases from  $r = 0.39$  in 1950–1977 to  $r = 0.76$  in 1996–2023. However, the modern tendency towards a sea level decline corresponds rather to the positive trends in air temperature and evaporation than to the changes in the Volga runoff. The structure of the relationships between hydrological conditions and atmospheric circulation is variable over time. While the influence of global circulation mechanisms (the North Atlantic (NAO) and Arctic oscillations (AO)) prevailed in the mid-20th century, regional processes described by the EA/WR index (the East Atlantic/West Russia pattern) have begun to play a dominant role in few past decades. This shift is associated with an increased frequency of blocking anticyclonic conditions and a weakening of westerly moisture transport into the region, which ultimately affected the water balance of the Caspian Sea.

*Keywords:* Caspian Sea, sea level variations, Volga runoff, evaporation, precipitation, atmospheric circulation indices

## Введение

Уровень Каспийского моря часто менялся в течение его многовековой истории [19, 20, 38]. В связи с тем, что море отделено от Мирового океана, его уровень оказывается весьма чувствительным к изменению климатических условий в бассейне моря [10, 18]. За последние 2000–2500 лет диапазон изменения уровня не превышал 9–10 м [19]. За период инструментальных наблюдений за уровнем Каспийского моря размах его колебаний достиг 4 м: от -25,3 м в 80-х годах XIX-го столетия до -29,0 м в 1977 г. [8]. С начала проведения инструментальных наблюдений в 1837 г. и до начала XX века уровень Каспийского моря колебался в среднем около отметки -25,8 м. С конца XIX века в ходе уровня наблюдалась тенденция понижения, продлившаяся до 1977 г., когда уровень моря находился на самой низкой отметке не только за период инструментальных наблюдений, но и за последние 500 лет (-29,0 м), амплитуда колебаний уровня за этот период составила 7 м. В 2024 г. уровень преодолел отметку -29,0 м БС и продолжает снижаться. Г.И. Рычагов [19] считал, что в климатических условиях, свойственных современной субатлантической эпохе голоцена, колебание уровня Каспия в интервале от -30 до -25 м БС является его нормальным состоянием.

Как понижение, так и повышение уровня Каспийского моря существенно влияют на морскую экосистему и экономику прибрежных территорий. Но если экосистема в течение тысячелетий адаптировалась к нестабильности уровня, то хозяйственной деятельности его колебания наносят значительный ущерб. Так, в результате падения уровня в 30–70-х гг.

XX столетия осушилась территория площадью более 48 тыс. км<sup>2</sup> [19]. При подъеме уровня в 1978–1995 гг. (на 2,4 м по сравнению с уровнем 1977 г.) произошло затопление и подтопление населенных пунктов, промышленных объектов, разрушение гидротехнических и портовых сооружений [27, 35]. Быстрое снижение уровня, начавшееся в 2007 г. и к 2024 г. достигшее минимума 1977 г. (-29,0 м БС), уже существенным образом сказывается на прибрежной инфраструктуре, отмечается осушение более 22 тыс. км<sup>3</sup> прибрежных территорий, особенно в северо-восточной части моря [16], ухудшается доступ к объектам, расположенным на мелководьях [38]. Уровень моря в настоящее время приближается к критическим отметкам, ниже которых будет затруднено функционирование портов [36, 40]. Снижение уровня приводит к снижению проточности водотоков дельты Волги [26] и аридизации прилегающей территории [12]. Выдвижение морского края дельты в море, осушение отложений речного бара способно изменить сеть водотоков дельты, что приведет к перераспределению водных ресурсов и, как следствие, ухудшению условий для сельского хозяйства и водообеспечения населения [13, 23]. К 2024 г. изменения в Каспийском регионе достигли такого критического уровня, что был разработан специальный доклад UNEP [44] о необходимости комплексных исследований для понимания причин современного состояния моря и адаптации к нему.

В этих условиях долгосрочный прогноз хода уровня моря является жизненно необходимым для нормального функционирования экономики и жизнеобеспечения живущих на его берегах людей. Однако проблема долгосрочного прогнозирования уровня все еще далека от разрешения, несмотря на разнообразие используемых подходов [9, 17, 24, 29, 30, 31, 42 и др.]. Поэтому поиск новых предикторов необходим, как и анализ актуальности ранее установленных связей между уровнем моря, основными составляющими его водного баланса и влияющими на них климатическими факторами.

Целью данной работы является оценка характеристик уровня и составляющих водного баланса Каспийского моря в характерные периоды подъема и снижения уровня с 1950 по 2023 г., а также их связей с показателями глобальной циркуляции атмосферы.

### Материалы и методы

В работе использованы данные наблюдений Росгидромета за стоком Волги (Q) в вершине дельты (с. Верхнелебяжье), уровнем Каспийского моря (L) и температурой воздуха (T) (г/п Махачкала) за период 1950–2023 гг. Отток в Кара-Богаз-Гол в данной статье не рассматривается, этому важному вопросу планируется уделить особое внимание в последующем исследовании. Осадки (P) и испарение (E) были получены по данным реанализа ERA5 [32]. В работе [22] показано, что расчетные данные ERA5 хорошо согласуются с данными наблюдений за количеством осадков на гидрологических постах Каспийского региона в период 1975–2024 гг.

Недавние исследования, включая работу [37], при проведении сравнения данных реанализа ERA5 с наблюдениями на более чем 5600 станций по всему миру подтвердили их надежность для климатического и гидрологического мониторинга во внетропических регионах и хорошее воспроизведение пространственных закономерностей, несмотря на небольшое завышение величин осадков. Относительно испарения с поверхности Каспийского моря такого сравнительного анализа в литературе не было обнаружено, однако предыдущие модификации реанализа ERAi, например, показывали его заниженные величины [31].

За период 1950–2023 гг. были рассчитаны индексы циркуляции атмосферы: АО – Арктическая осцилляция (Arctic Oscillation), SCAND – Скандинавское колебание, NAO – Северо-Атлантическое колебание (North Atlantic Oscillation), EA/WR – Восточная Атлантика/Западная Россия (East Atlantic/West Russia). Индекс АО характеризует распределение давления между Арктикой и средними широтами и определяется как главная компонента аномалий геопотенциальной высоты на уровне 1000 гПа севернее 20° с. ш. Положительная фаза АО связана с пониженным давлением в Арктике и усилением западного переноса, тогда как отрицательная сопровождается блокирующими антициклонами и вторжениями холодного воздуха на юг. Индекс NAO отражает разность давления между Азорским максимумом и Исландским минимумом, определяя интенсивность западного переноса над Северной Атлантикой: при положительной фазе преобладают мягкие и влажные зимы в Европе, при отрицательной – холодные. Скандинавское колебание характеризует развитие блокирующих антициклонов над Скандинавией и определяется по аномалиям геопотенциальной высоты на уровне 500 гПа. Его положительная фаза сопровождается устойчивым антициклоном и похолоданием в Восточной Европе и России. Индекс EA/WR описывает волновую структуру циркуляции между восточной Атлантикой и западной частью России и также определяется по полям геопотенциальной высоты 500 гПа. Положительная фаза EA/WR соответствует гребню над Европой и впадине над Россией, отрицательная – противоположной конфигурации с циклонической активностью в Европе и блокировкой над западной Россией [2, 6, 14, 21, 39].

Для оценки связей колебаний уровня Каспийского моря (УКМ) и индексов циркуляции атмосферы использовался статистический, в том числе корреляционный анализ [7] в программной среде STATISTICA 10.0. В первом приближении принимается, что исследуемые процессы являются стационарными по среднему и дисперсии. Для расчетов использовались ряды межгодовых приращений уровня (dL). Предварительно из анализируемых рядов основных показателей и индексов вычитались линейные тренды. Это позволило сосредоточиться на межгодовой изменчивости, минимизируя влияние долгосрочных трендов. Для различия первичных рядов и рядов с удаленными трендами последние обозначались знаком «\*» (например T\*, P\* и т. д.).

Для анализа также использовались ряды разностно-интегральных кривых (РИК), построенные для уровня, элементов водного баланса и индексов циркуляции атмосферы. Разностно-интегральная кривая характеризует нарастание суммы отклонений ежегодных значений переменной от среднего:

$$f(t) = \sum_{i=1}^t (x_i - x_{cp}), \quad (1)$$

где  $t$  – время (годы).

Разностно-интегральная кривая позволяет выявить многолетние изменения в данных: в период повышенных значений переменной наблюдается рост ординат, а период со значениями ряда ниже средней величины характеризуется спадом кривой. Далее в тексте РИК показателя обозначается соответствующей буквой с подстрочным РИК, например  $Q_{РИК}$ ,  $L_{РИК}$  и т. п.

Поскольку длина рядов показателей невелика, использовались методы непараметрической статистики, в частности, рассчитывались корреляции Спирмена. Значимость рассчитанных статистических параметров оценивалась по  $t$ -критерию Стьюдента при  $p = 0,05$ , значимость коэффициентов корреляции – методом Монте-Карло.

## Результаты и дискуссия

### 1. Изменения уровня и составляющих водного баланса Каспийского моря в период 1950–2023 гг.

Для анализа изменений уровня и составляющих водного баланса Каспийского моря использовались их среднемноголетние величины в характерные периоды с 1950 по 2023 г. (табл. 1), выделенные в соответствии с фазами подъема и снижения уровня моря [9]. К 2024 г. уровень Каспийского моря практически достиг критических отметок конца 1970-х гг. (-29,0 м БС). Хотя современное падение уровня, начавшееся в 1996 г., часто сравнивают с наблюдавшимся ранее в 1950–1970-х гг., оно проходит в несколько иных климатических условиях. В табл. 1 показано, что, в отличие от прошлого столетия, для современного периода снижения уровня моря в среднем характерны сток Волги около многолетней нормы (238 км<sup>3</sup>), более высокие температуры воздуха и, соответственно, повышенные величины испарения с водного зеркала моря, а также большее количество осадков. Заметим, что разница средних температур между этими двумя периодами составила +0,92 °С, соответствуя тенденции к потеплению регионального климата, представленной в [2]. Оценка статистической значимости различий средних величин по  $t$ -критерию Стьюдента показала, что эти различия значимы для стока, как и для уровня моря, во все три выделенные периоды, приведенные в табл. 1. На существование однородных периодов в ряду притока к Каспию указывалось в [8]. В то же время количество осадков статистически значимо растет только в период подъема уровня в 1978–1995 гг. Различие в средних величинах температуры,

а также испарения, становится значимым только для последнего периода снижения уровня (1996–2023 гг.). В этот период при повышении средней температуры на 0,8 °С средняя величина испарения увеличилась на 82 мм по сравнению с предыдущим периодом. По данным М.Ю. Бардина с соавторами [3], вплоть до 1990-х гг. на территории Северного полушария отсутствовала заметная тенденция к потеплению, и только позднее такой тренд стал статистически значимым.

Таким образом, период повышения уровня моря в 1978–1995 гг. был связан с повышенным стоком Волги и количеством осадков, что отмечается многими исследователями [9, 29, 31, 33, 44], тогда как температура воздуха и испарение оставались в среднем на уровне предшествующего периода регрессии моря. 18-летний период подъема уровня в 1978–1995 гг. признан наиболее продолжительным за весь 180-летний период инструментальных наблюдений, интенсивность подъема уровня в среднем составила 13 см/год, в отдельные годы достигая более 30 см/год [9]. Высокая скорость подъема уровня также объясняется прекращением стока воды в залив Кара-Богаз-Гол, перекрытый дамбой в 1980 г. В 1984 г. сток в залив был частично восстановлен в регулируемом объеме 1,5–2,0 км<sup>3</sup>/год, а в 1992 г. дамбу ликвидировали [9].

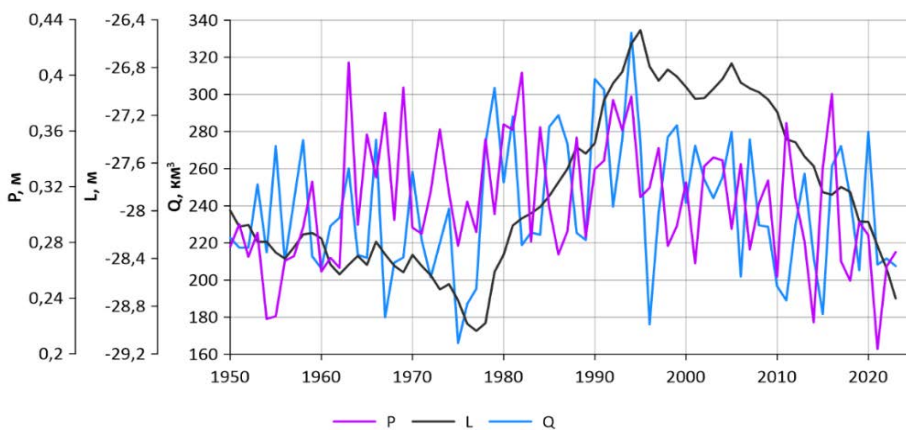
**Таблица 1.** Изменение уровня моря и элементов водного баланса Каспийского моря в характерные периоды с 1950 по 2023 г.

**Table 1.** Variations of the Caspian Sea level and its water balance components in specific periods from 1950 to 2023

Период	L, м БС (Махачкала)	Q, км <sup>3</sup>	P, мм	E, мм	T, °С
1950–1977	$-28,42 \pm 0,23$ -29,04...-28,00	$223,5 \pm 27,8$ 166...276	$300 \pm 45$ 225...409	$931 \pm 88$ 742...1054	$12,00 \pm 0,76$ 10,59...13,92
1978–1995	$-27,67 \pm 0,67$ -28,94...-26,49	$267,3 \pm 34,9$ 219...333	$336 \pm 40$ 271...402	$955 \pm 53$ 856...1058	$12,11 \pm 0,93$ 9,75...13,51
1996–2023	$-27,56 \pm 0,57$ -28,74...-26,77	$236,2 \pm 32,9$ 176...283	$299 \pm 42$ 203...386	$1037 \pm 40$ 958...1138	$12,92 \pm 0,67$ 11,43...14,20
1950–2023	$-27,85 \pm 0,67$ -29,01...-26,49	$238,6 \pm 35,5$ 166...333	$308 \pm 45$ 203...409	$977 \pm 80$ 742...1138	$12,37 \pm 0,87$ 9,75...14,20

*Примечание.* Числитель – среднее  $\pm$  среднеквадратическое отклонение, знаменатель – диапазон величин.

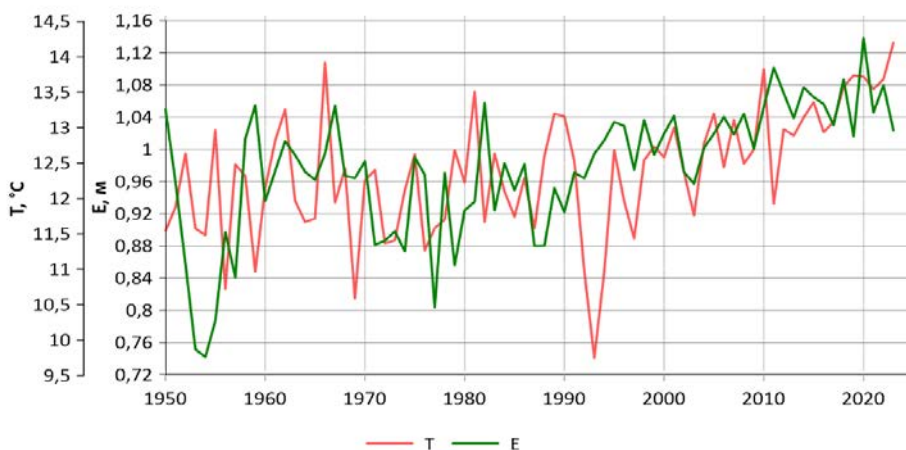
Снижение уровня моря в 1950–1977 гг. происходило не так быстро, средняя скорость снижения составляла 3,7 см/год, но в отдельные годы была выше 19 см/год. В предшествующий период 1929–1941 гг. уровень снижался более высокими темпами, средняя скорость достигала 16,3 см/год [9]. Средняя интенсивность снижения уровня Каспийского моря в 1970-е гг. составляла 8 см/год, чему, по мнению исследователей [9], способствовал низкий сток Волги, вызванный климатическими и антропогенными причинами, в то время как испарение было ниже нормы, а количество осадков превышало многолетнюю норму, будучи в это время наибольшим за весь предшествующий период XX века (рис. 1).



**Рис. 1.** Среднегодовой уровень Каспийского моря, годовой сток Волги и количество осадков за период 1950–2023 гг.

**Fig. 1.** Average annual values of the Caspian Sea level, annual the Volga River runoff and precipitation in 1950–2023.

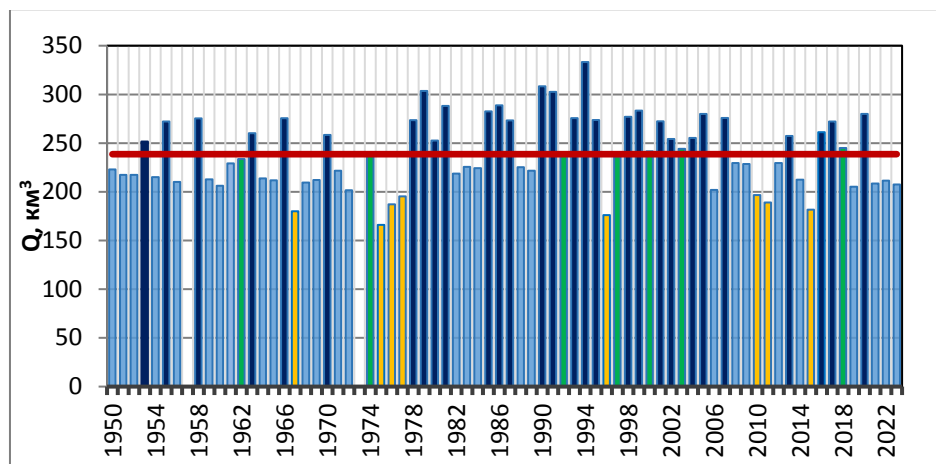
В современных условиях снижение уровня Каспийского моря происходит со средней интенсивностью 8 см/год. Наиболее быстрое снижение уровня наблюдается с 2021 г., скорость снижения достигла 20–25 см/год (рис. 1). В 2021–2023 гг. сток Волги был значительно ниже нормы, составляя около 210 км<sup>3</sup>. Наблюдалась повышенная среднегодовая температура воздуха, причем 2023 год стал самым теплым за весь период наблюдений (рис. 2). По данным г/п Махачкала, среднегодовая температура достигла +14,2 °С, количество осадков и испарение были выше среднееголетних величин за период 1950–2023 гг. (рис. 1, 2).



**Рис. 2.** Среднегодовые величины температуры воздуха и испарения в период 1950–2023 гг.

**Fig. 2.** Average annual values of the air temperature and evaporation in 1950–2023.

В структуре многолетнего ряда Волжского стока в 1950–1977 гг. преобладали маловодные годы (71 %), из которых 14 % – экстремально-маловодные ( $Q < 200 \text{ км}^3$ ), включая 1975 г. с минимальным за весь период наблюдений стоком ( $166 \text{ км}^3$ ) (рис. 3). В 1996–2023 гг. многоводные и средневодные годы составляли 54 %, маловодных лет было значительно меньше, хотя экстремально-маловодные составляли все те же 14 %. Это подтверждает предположение о том, что в связи с потеплением климата влияние испарения на изменение уровня Каспийского моря растет, в то время как роль речного стока снижается [17]. Авторы связывают это с увеличением эпизодов блокирования западного переноса в условиях антициклонической активности, к которым приводит глобальное потепление.



**Рис. 3.** Годовой сток Волги в период 1950–2023 гг. Голубым цветом отмечены маловодные годы, желтым – экстремально маловодные ( $Q < 200 \text{ км}^3$ ), синим – многоводные, зеленым – средневодные, красная линия – среднее за период ( $Q = 238 \text{ км}^3$ ).

**Fig. 3.** Annual Volga River runoff in 1950–2023. Light blue column – low water years, yellow column – extremely low water years ( $Q < 200 \text{ км}^3$ ), dark blue column – high water years, green column – medium water years, red line – multiyear average ( $Q = 238 \text{ км}^3$ ).

## 2. Связь колебаний уровня и составляющих водного баланса Каспийского моря с циркуляцией атмосферы

Влияние колебаний циркуляции атмосферы на уровень Каспийского моря изучалось многими исследователями [1, 20, 23, 31, 41]. В частности, были установлены зависимости уровня от колебаний циркуляции атмосферы, определяющих перенос воздушных масс над Каспийским регионом [10, 33]. В [19] исследуется влияние атмосферной циркуляции, характеризуемой индексом NAO, на водосборный бассейн Каспийского моря. NAO определяет западный перенос и движение циклонов через Северную Атлантику, формируя климат Европейской территории России (ЕТР) в холодное полугодие. Показано, что ослабление влияния NAO выражается

в уменьшении интенсивности поступления воздушных масс и влаги из Северной Атлантики в Евразию, что приводит к установлению засушливого климата в бассейне Волги, снижению количества осадков и речного стока и, соответственно, к снижению уровня моря. С NAO тесно связан АО, влияющий на атмосферные потоки в средних широтах Северного полушария с севера на юг в течение зимнего периода [30]. В [6] подчеркивается, что индексы NAO, АО и другие могут объяснить от 40 до более 80 % изменчивости температуры приповерхностного воздуха во внетропических широтах Северного полушария, наблюдаемой во второй половине XX в. В [30, 46] показано, что АО и NAO не имеют выраженной цикличности, а их долгопериодная изменчивость сходна со случайным процессом.

В [20] указывалось на важность зимних процессов в атмосфере для оценки тенденции хода уровня Каспийского моря и было показано, что снижение уровня приходится на период ослабления влияния NAO на водосборный бассейн моря, когда корреляция между зимними температурами и зимними значениями индекса была минимальна. Повышение уровня наблюдается при усилении влияния NAO, выражающееся в максимальной корреляции между зимними температурами и зимними значениями индекса. В то же время в [16, 17] указывается на наиболее проявленное влияние NAO в летние месяцы. Однако значимого тренда осадков в летние месяцы не отмечается, увеличивается только испарение, обусловленное повышением температуры воздуха.

Подробный анализ влияния низкочастотной изменчивости циркуляции атмосферы на многолетние изменения УКМ приведен в [16]. На основе данных за 1950–2000 гг. было показано, что наибольшее влияние на уровень оказывают колебания циркуляции атмосферы, расположенные в Атлантико-Европейском регионе: EA/WR, EA-Jet и EA, основные узлы которых расположены в восточной части Северной Атлантики, а часть – над Каспийским морем. Однако с момента публикации этой работы прошло четверть века, произошла смена фазы подъема уровня на его спад, и многими авторами, особенно зарубежными, прогнозируется тренд на дальнейшее его падение [13], в том числе катастрофическое [35, 36, 38, 41, 42, 44]. Поэтому важно оценить, остаются ли актуальными ранее установленные связи между УКМ, основными составляющими его водного баланса и влияющими на них климатическими факторами.

В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции ряда приращений УКМ и составляющих его водного баланса с соответствующими индексами циркуляции атмосферы, рассчитанные для периода 1950–2023 гг. ( $p = 0,05$ ,  $n = 74$ ). В основном значимые коэффициенты корреляции были небольшие (по модулю от 0,32 до 0,54). Наибольшие коэффициенты характеризовали отрицательные связи температуры воздуха с индексами EA/WR и SCAND ( $r = -0,54$  и  $-0,44$  соответственно). С температурой воздуха были связаны количество осадков и испарение над морем ( $r = -0,41$  и  $0,38$  соответственно). Сток Волги имел отрицательную корреляционную связь с индексом SCAND ( $r = -0,34$ ) и сильную положительную с уровнем моря

( $r = 0,70$ ). Осадки имели положительную связь с EA/WR ( $r = 0,33$ ). Между индексами АО и NAO отмечалась сильная корреляционная связь ( $r = 0,72$ ), в то время как связь между индексами АО и SCAND была более слабой и отрицательной ( $r = -0,32$ ). Таким образом, в период 1950–2023 гг. около 50 % ( $R^2 = 0,49$ ) межгодовой изменчивости УКМ определялось изменениями волжского стока. Колебания температуры воздуха относительно долгосрочного тренда находились под совместным влиянием региональных центров циркуляции SCAND и EA/WR, характеризующих развитие блокирующих ситуаций в Европе. Колебания SCAND и EA/WR, кроме того, оказывали влияние на аномалии волжского стока и осадков соответственно, т. е. на приходную часть водного баланса.

**Таблица 2.** Корреляционная матрица за период 1950–2023 гг. ( $n = 74$ ,  $p = 0,05$ )

**Table 2.** Correlation matrix for 1950–2023 ( $n = 74$ ,  $p = 0.05$ )

	dL*	Q*	T*	P*	E*	AO*	SCAND*	NAO*	EA/WR*
dL*	1,00	<b>0,70</b>	-0,10	0,27	-0,28	-0,15	-0,10	0,06	0,09
Q*		1,00	0,15	0,09	-0,09	-0,02	<b>-0,34</b>	0,10	0,01
T*			1,00	<b>-0,41</b>	<b>0,38</b>	0,03	<b>-0,44</b>	-0,14	<b>-0,54</b>
P*				1,00	-0,01	0,11	0,00	0,21	<b>0,33</b>
E*					1,00	0,26	-0,18	0,09	-0,24
AO*						1,00	<b>-0,32</b>	<b>0,72</b>	0,11
SCAND*							1,00	-0,07	0,24
NAO*								1,00	0,18
EA/WR*									1,00

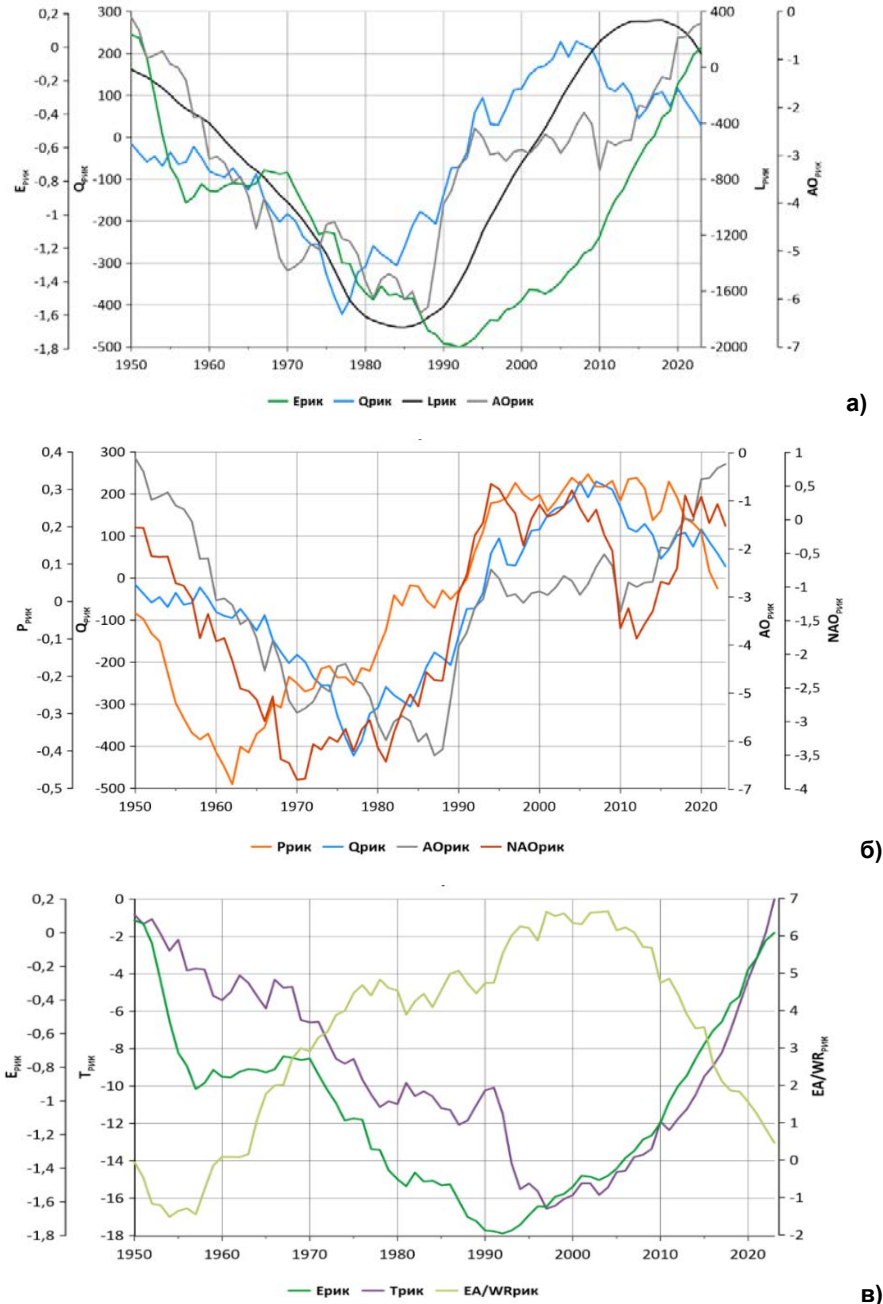
*Примечание.* Здесь и далее жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, значимые при  $p = 0,05$ , подчеркиванием выделены коэффициенты  $\geq 0,7$ .

В [5] утверждается, что наблюдающийся в последние десятилетия засушливый климат на юге ЕТР обусловлен нисходящим трендом индекса EA/WR и соответствующим повышением температуры поверхности океана в Северной Атлантике. В [27] показано, что повторяемость сильных засух в Поволжье и на северо-западе Казахстана с начала прошлого столетия была наибольшей (до 19 засух/100 лет) в годы экстремально теплой поверхности Северной Атлантики, а наименьшей (4 засухи/100 лет) – в годы экстремально холодной. Сильные летние засухи на юге Восточно-Европейской равнины отмечались в период потепления Северной Атлантики, ослабления региональной зональной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе и увеличения повторяемости числа дней с атмосферным блокированием на востоке Восточно-Европейской равнины. В [27] отмечается, что эти условия наблюдались в основном при повышенной повторяемости отрицательных фаз NAO и EA/WR, при этом повторяемость блокирований была в три раза выше в годы отрицательной фазы колебания EA/WR

по сравнению с его положительной фазой. В летние месяцы, по данным [5], наблюдается увеличение количества длительных волн тепла над югом ЕТР, при этом величины индекса  $EA/WR$  становятся отрицательными, что отражает положительные аномалии температуры поверхности океана в Северной Атлантике и приводит к возрастающей блокирующей антициклонической активности в этом регионе. С 1901 по 2020 год М.Ю. Бардин с соавторами [5] насчитали 11 крупных (экстремальных) волн тепла длительностью более 21 суток с максимальным распространением в нескольких широтных зонах ЕТР, из которых шесть наблюдались после 2000 года. Предполагается, что в существовании экстремальных длительных волн тепла особую роль играют специфические структуры блокирования по типу обрушения волны Россби, образующиеся в атмосфере и поддерживающие области антициклонической квазистационарной циркуляции над ЕТР [5].

На рис. 4 приведен годовой ход УКМ и РИК других показателей в 1950–2023 гг. На рис. 4а показано, что примерно до середины 2000-х гг. тенденции хода уровня моря и РИК стока Волги были сходными, однако в последующие годы между ними наблюдается существенное отличие, так как интенсивность падения уровня существенно увеличилась. Некоторые исследователи отсчитывают современный период падения УКМ именно с 2005 г., объясняя это продолжавшейся после 1996 г. повышенной водностью Волги [44]. Аналогичным образом после 2005 г. усилилась и тенденция к росту температуры и испарения (рис. 4в). Обращает на себя внимание резкий рост  $AO_{РИК}$  после 2010 г. До 2010 г.  $AO_{РИК}$  имел сходную с РИК волжского стока тенденцию, исчезнувшую после 2010 г. Из рис. 4б следует, что РИК индексов  $AO$  и  $NAO$  показывают хорошую сходимость с трендами УКМ и РИК составляющих приходной части водного баланса Каспийского моря (сток, осадки). С середины 2010-х гг. наблюдается тенденция к росту  $AO_{РИК}$  и  $NAO_{РИК}$  и, наоборот, снижению приходной части водного баланса и УКМ. С середины 2000 г. стали совпадать тренды УКМ и РИК индексов региональной циркуляции SCAND и  $EA/WR$  (рис. 4в). Заметнее становятся связи между испарением и температурой, которая с середины 2010-х гг. показывает устойчивый непрерывный тренд к повышению с высокой интенсивностью.

Корреляционные матрицы были также рассчитаны для трех периодов подъема и спада уровня (табл. 3–5). В период снижения уровня в 1950–1977 гг. коэффициент корреляции между уровнем моря и стоком Волги был минимальным:  $r = 0,38$  (табл. 3). На межгодовые колебания УКМ влияли аномалии Арктического колебания ( $r = -0,46$ ). Между аномалиями стока и температуры воздуха отмечалась положительная значимая связь ( $r = 0,45$ ), с температурой также коррелировал индекс  $NAO$  ( $r = -0,50$ ). Изменения количества осадков находились под влиянием  $EA/WR$  ( $r = 0,40$ ). Испарение и осадки также коррелировали между собой ( $r = 0,38$ ), кроме того, отмечалась сильная положительная корреляция между индексами  $AO$  и  $NAO$  ( $r = 0,73$ ).



**Рис. 4.** РИК годовых величин в 1950–2023 гг.: испарения, стока Волги, уровня моря, АО (а); суммы осадков, стока Волги, АО, NAO (б); испарения, температуры воздуха, EA/WR (в).

**Fig. 4.** Difference integral curves of the annual values in 1950–2023: evaporation, the Volga River runoff, the Caspian Sea level, AO (a); precipitation, the Volga River runoff, AO, NAO (б); evaporation, air temperature, EA/WR (в).

**Таблица 3.** Корреляционная матрица за период 1950–1977 гг. ( $n = 28$ ,  $p = 0,05$ )  
**Table 3.** Correlation matrix for 1950–1977 ( $n = 28$ ,  $p = 0.05$ )

	dL*	Q*	T*	P*	E*	AO*	SCAND*	NAO*	EA/WR*
dL*	1,00	<b>0,39</b>	0,15	0,10	0,02	<b>-0,46</b>	0,21	-0,36	0,04
Q*		1,00	<b>0,45</b>	-0,11	0,00	-0,31	-0,22	-0,35	-0,18
T*			1,00	-0,35	0,09	-0,28	-0,33	<b>-0,50</b>	-0,07
P*				1,00	<b>0,38</b>	-0,01	0,11	0,21	<b>0,40</b>
E*					1,00	-0,03	0,06	-0,02	0,34
AO*						1,00	-0,19	<b>0,73</b>	0,02
SCAND*							1,00	0,25	0,17
NAO*								1,00	-0,03
EA/WR*									1,00

При повышении уровня Каспийского моря в 1978–1995 гг. его межгодовые изменения находились под влиянием волжского стока, связь с которым в этот период усилилась ( $r = 0,59$ ) (табл. 4). Температура воздуха в эти годы коррелировала с индексами EA/WR и SCAND ( $r = -0,63$  и  $-0,58$  соответственно). Корреляционная связь между индексами AO и NAO существенно усилилась ( $r = 0,92$ ).

**Таблица 4.** Корреляционная матрица за период 1978–1995 гг. ( $n = 18$ ,  $p = 0,05$ )  
**Table 4.** Correlation matrix for 1978–1995 ( $n = 18$ ,  $p = 0.05$ )

	dL*	Q*	T*	P*	E*	AO*	SCAND*	NAO*	EA/WR*
dL*	1,00	<b>0,59</b>	0,03	0,19	-0,22	-0,21	-0,02	-0,37	-0,18
Q*		1,00	-0,08	0,14	0,08	-0,04	0,06	0,02	-0,18
T*			1,00	-0,46	-0,40	-0,03	<b>-0,58</b>	-0,06	<b>-0,63</b>
P*				1,00	0,42	0,13	0,34	-0,02	0,02
E*					1,00	0,34	0,29	0,28	0,32
AO*						1,00	-0,04	<b>0,92</b>	0,32
SCAND*							1,00	0,05	0,30
NAO*								1,00	0,38
EA/WR*									1,00

В современный период связь между годовыми приращениями уровня моря и волжским стоком укрепилась ( $r = 0,76$ , табл. 5), хотя общая тенденция к снижению уровня больше соответствует ходу температуры воздуха и испарения (рис. 4), которые коррелировали между собой с коэффициентом  $r = 0,42$ . С температурой воздуха коррелировали количество осадков и индекс EA/WR ( $r = -0,69$  и  $-0,51$  соответственно), между которыми также была значимая положительная связь ( $r = 0,49$ ). Кроме того, значимая

отрицательная связь была обнаружена между индексом EA/WR и испарением ( $r = -0,42$ ), что подтверждает вывод, сделанный в [10, 24, 43, 45] о влиянии на интенсивность испарения с поверхности моря не только повышения температуры воздуха в регионе, но и регионального переноса воздушных масс, характеризуемого ветровой активностью. В [4] отмечается, что изменения зонального ветра в широтной зоне 45–65° с. ш. тесно связаны с NAO, тогда как южнее (35–45° с.ш.) природа таких изменений пока неясна. Теснота связи между NAO и АО в современный период снизилась до минимальной за 1950–2023 гг. ( $r = 0,65$ ). Следует заметить, что значимой корреляции этих индексов ни с уровнем моря, ни с составляющими его водного баланса не было обнаружено, как и в предыдущий период (табл. 4 и 5). В [23] указывается, что при снижении активности в Северной Атлантике на климат Прикаспия усиливается влияние Тихого океана, как одного из самых значительных поставщиков тепла и влаги в атмосферу, и обычно это сопровождается снижением УКМ.

**Таблица 5.** Корреляционная матрица за период 1996–2023 гг. ( $n = 28$ ,  $p = 0,05$ )  
**Table 5.** Correlation matrix for 1996–2023 ( $n = 28$ ,  $p = 0.05$ )

	dL*	Q*	Ta*	P*	E*	AO*	SCAND*	NAO*	EA/WR*
dL*	1,00	<b>0,76</b>	-0,16	0,08	-0,19	-0,04	-0,17	0,03	-0,12
Q*		1,00	-0,03	-0,10	-0,22	0,07	-0,34	0,20	-0,09
Ta*			1,00	<b>-0,69</b>	<b>0,42</b>	-0,01	-0,25	-0,02	<b>-0,51</b>
P*				1,00	-0,35	0,06	0,00	0,12	<b>0,49</b>
E*					1,00	0,24	-0,06	0,17	<b>-0,42</b>
AO*						1,00	-0,21	<b>0,65</b>	0,27
SCAND*							1,00	-0,04	0,10
NAO*								1,00	0,28
EA/WR*									1,00

В табл. 6 показано, какие процессы в атмосфере влияли на уровень и элементы водного баланса Каспийского моря в разные периоды. Следует отметить, что эти процессы для двух временных отрезков, характеризующихся снижением уровня моря, различны, за исключением положительной связи индекса EA/WR с осадками. В период 1950–1977 гг. характерны отрицательные корреляции температуры воздуха с индексом глобальной циркуляции NAO и межгодовых приращений уровня с индексом АО, а также положительная корреляция осадков с индексом циркуляции регионального масштаба EA/WR. В период подъема уровня в 1978–1995 гг. температура воздуха находилась под влиянием региональной циркуляции атмосферы, характеризуемой индексами EA/WR и SCAND. В настоящее время для температуры воздуха и испарения характерны отрицательные корреляции с EA/WR, а для осадков – положительная. При этом следует

отметить ослабление связей между самими индексами. Например, в 1950–1977 гг. коэффициент корреляции между NAO и АО составлял  $r = 0,73$ , а в 1978–1995 гг. достигал максимума  $r = 0,92$ , в то время как в современный период он снизился до  $r = 0,65$ .

**Таблица 6.** Наличие корреляции между показателями в разные периоды  
**Table 6.** Correlation between parameters in specific periods

Индекс	dL*	Q*	T*	P*	E*
<b>1950–1977 гг.</b>					
NAO*	-	-		-	-
АО*		-	-	-	-
SCAND*	-	-	-	-	-
EA/WR*	-	-	-		-
<b>1978–1995 гг.</b>					
NAO*	-	-	-	-	-
АО*	-	-	-	-	-
SCAND*	-	-		-	-
EA/WR*	-	-		-	-
<b>1996–2023 гг.</b>					
NAO*	-	-	-	-	-
АО*	-	-	-	-	-
SCAND*	-	-	-	-	-
EA/WR*	-	-			

*Примечание.* Красным цветом отмечена положительная корреляция, синим – отрицательная.

Индекс EA/WR описывает волновые процессы регионального масштаба. Поскольку коэффициенты корреляции некоторых элементов водного баланса Каспийского моря с ним максимальны, следовательно, процессы атмосферной циркуляции регионального масштаба имеют на них в настоящее время большее влияние, чем глобальные процессы. Возможно, усиление блокирующих ситуаций, отмеченное в [4, 5, 17], приводит к большей регионализации климата Прикаспия. К тому же повышенное в современный период испарение зависит не только от роста температуры, но и от особенностей переноса воздушных масс в регионе, характеризующихся направлением и интенсивностью ветра, что отмечалось также в [10, 16]. Отсутствие значимых связей с индексами глобальной циркуляции, возможно, объясняется рассмотрением в данной работе только годовой изменчивости исследуемых показателей, в то время как влияние характеристик циркуляции носит в основном сезонный характер. Например, в [4] указывается, что влиянием NAO, SCAND и EA/WR определялась повторяемость циклонов на ЕТР в зимний сезон, в то время как в летний сезон, когда испарение становится максимальным, вклад NAO был не значим. В [17] показано, что в летний период возросло связанное с отрицательными фазами колебания EA/WR и NAO число случаев блокирования западного переноса на ЕТР.

## Заключение

На основе анализа годовых данных за 1950–2023 гг. исследованы изменения уровня Каспийского моря (УКМ), основных составляющих его водного баланса и их связей с индексами глобальной и региональной атмосферной циркуляции (АО, NAO, SCAND, EA/WR). Установлена статистически значимая разница среднемноголетних величин стока Волги, а также уровня Каспийского моря, для всех трех выделенных характерных периодов, соответствующих фазам спада и подъема уровня Каспийского моря. В отличие от них, количество осадков статистически значимо увеличивалось только в период подъема уровня в 1978–1995 гг., а значимые различия средних величин температуры воздуха и испарения наблюдаются исключительно в последний период снижения уровня (1996–2023 гг.).

На протяжении всего исследуемого периода (1950–2023 гг.) отмечается устойчивая корреляционная связь между стоком Волги и межгодовыми приращениями УКМ ( $r = 0,70$ ). При этом наблюдается усиление связи во времени: от  $r = 0,39$  в 1950–1977 гг. до  $r = 0,76$  в 1996–2023 гг. В то же время общая тенденция УКМ к снижению соответствует динамике РИК температуры воздуха и испарения. Повышение интенсивности испарения в последние десятилетия обусловлено совместным влиянием повышения температуры воздуха и региональной атмосферной циркуляции, блокирующей западный перенос влаги в регион. Следовательно, усиление воздействия в последние годы климатических факторов, формирующих жаркие и засушливые условия (включая маловодность рек бассейна), привело к повышению чувствительности межгодовых колебаний УКМ к вариациям речного стока.

Структура связей уровня Каспийского моря и основных составляющих его водного баланса с показателями циркуляции атмосферы не остается постоянной. Она изменяется во времени, что определяется особенностями глобальных и региональных атмосферных процессов. При этом в роли значимых предикторов в различные периоды выступают разные центры действия атмосферы. В современный период наибольшее влияние оказывают региональные процессы, описываемые индексом EA/WR, тогда как связи с глобальными индексами (NAO, AO) ослабевают или становятся незначимыми. Однако важно отметить, что в данной работе анализировалась годовая изменчивость УКМ и элементов водного баланса, в то время как влияние циркуляционных процессов имеет выраженную сезонную составляющую.

## Список литературы

1. Абузаров З.К. Сверхдолгосрочные прогнозы уровня Каспийского моря на 6, 12 и 18 лет // Труды Гидрометцентра России. 2015. № 354. С. 79-95.
2. Бардин М.Ю., Платова Т.В. Долгопериодные вариации показателей экстремальности температурного режима на территории России и их связь с изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции и глобальным потеплением // Метеорология и гидрология. 2019. № 12. С. 5-19.
3. Бардин М.Ю., Ранькова Э.Я., Платова Т.В. и др. Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 29-45.

4. Бардин М.Ю., Платова Т.В., Самохина О.Ф. Долгопериодные изменения повторяемости циклонов в умеренных широтах Северного полушария // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2021. Т. 7, № 2. С. 57-80.
5. Бардин М. Ю., Платова Т.В., Попов И.О. Изменения статистики экстремумов температурного режима в зернопроизводящих регионах юга Европейской России и Западной Сибири // *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*. 2023. Т. 34, № 3-4. С. 17-44.
6. Богучава Д.Д., Семенов В.А. Роль естественных колебаний и факторов внешнего воздействия на климат в потеплении середины XX века в Северном полушарии // *Лед и снег*. 2022. Т. 62, № 3. С. 455-474.
7. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Вып. 1. М.: Мир, 1974. 406 с.
8. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филиппова И.А. Речной сток и вероятностный прогноз уровня Каспийского моря // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 10. С. 17-26.
9. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. М: Триада Лтд, 2016. 374 с.
10. Выручалкина Т.Ю., Дианский Н.А., Фомин В.В. Влияние на эволюцию Каспийского моря многолетних изменений режима ветра над его регионом в 1948-2017 гг. // *Водные ресурсы*. 2020. Т. 47, № 2. С. 230-240.
11. 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.
12. Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Степаненко В.М. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России // *Известия РАН. Серия географическая*. 2022. Т. 86, № 3. С. 435-446.
13. Ермаков В.Б. Многолетние изменения уровня Каспийского моря и современные варианты их прогнозирования // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2023. Т. 87, № 6. С. 930-940.
14. Куст Г.С., Шкляева Д.С., Лобковский В.А., Андреева О.В. Использование методологии нейтрального баланса деградации земель для оценки территории Прикаспийского региона // *Аридные экосистемы*. 2024. Т. 30, № 2 (99). С. 24-35.
15. Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Исупова М.В. Гидролого-морфологические процессы в устьях рек Каспийского региона как возможные аналоги ожидаемых изменений устьев других рек России и мира // *Водные ресурсы*. 2014. Т. 41, № 5. С. 471-487.
16. Нестеров Е.С. Низкочастотная изменчивость циркуляции атмосферы и уровень Каспийского моря во второй половине XX века // *Метеорология и гидрология*. 2001. № 11. С. 27-36.
17. Нестеров Е.С., Павлова А.В. Влияние колебаний циркуляции атмосферы на уровень Каспийского моря // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2024. № 1 (391). С. 56-70.
18. Островская Е.В., Гаврилова Е.В., Гонтовая И.В. и др. Гидрометеорологические показатели состояния российского сектора Каспийского моря в условиях меняющегося климата // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2023. Т. 87, № 6. С. 914-929.
19. Панин Г.Н., Дианский Н.А. О связи колебаний уровня Каспийского моря и климата Северной Атлантики // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 3. С. 304.
20. Панин Г.Н., Выручалкина Т.Ю., Соломонова И.В. Климатические изменения в Арктике, северной Атлантике, районе Каспия и их взаимосвязь // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. Т. 1. С. 183-210.
21. Рычагов Г.И. Колебания уровня Каспийского моря: причины, последствия, прогноз // *Вестник Московского ун-та. Серия 5. География*. 2011. № 2. С. 4-12.
22. Свиточ А.А. Большой Каспий: строение и история развития. М.: Изд-во МГУ, 2014. 272 с.

23. Серых И.В., Костяной А.Г. О влиянии Атлантического и Тихого океанов на изменение климатических параметров Каспийского моря // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 5. С. 96-107.
24. Холопцев А.В., Наурузбаева Ж.К. Связи межгодовых вариаций среднемесячных уровней Каспия, сумм атмосферных осадков в его бассейне и их изменения при современном потеплении климата // *География и водные ресурсы*. 2024. № 3. С. 21-36.
25. Устья рек Каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления. М.: ГЕОС, 2013. 703 с.
26. Фролов А.В. Сценарные прогнозы колебаний уровня Каспия с учетом климатических и техногенных воздействий на водный баланс моря // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47, № 5. С. 130-148.
27. Черенкова Е.А., Бардин М.Ю., Платова Т.В., Семенов В.А. Влияние долгопериодной изменчивости температуры поверхности океана в Северной Атлантике и изменений атмосферной циркуляции на повторяемость сильных атмосферных засух летом на юге Восточно-Европейской равнины // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 12. С. 5-19.
28. Чувашов А.В., Малов Д.Н., Степанова Н.Ю., Голуб В.Б. Оценка динамики растительных сообществ в восточной части дельты р. Волги (1980-2023 гг.) // *Аридные экосистемы*. 2024. Т. 30, № 1 (98). С. 67-74.
29. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Причины повышения уровня Каспийского моря // *Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна*. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. С. 254-266.
30. Ambaum M.H., Hoskins B.J., Stephenson D.B. Arctic oscillation or North Atlantic oscillation? // *Journal of Climate*. 2001. Vol. 14 (16). P. 3495-3507.
31. Arpe K., Bengtsson L., Golitsyn G.S., Mokhov I.I., Semenov V.A., Sporyshev P.V. Connection between Caspian Sea level variability and ENSO // *Geophysical Research Letters*. 2000. Vol. 27 (17). P. 2693-2696.
32. Arpe K., Leroy, S.A.G., Wetterhall F. et al. Prediction of the Caspian Sea level using ECMWF seasonal forecasts and reanalysis // *Theoretical and Applied Climatology*. 2014. Vol. 117. P. 41-60.
33. Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., Safarov E.S. Long-term Caspian Sea level change // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44. P. 6993-7001.
34. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2023. <https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>
35. Huang L., Lee S.-S., Timmermann A. Caspian Sea and Black Sea response to greenhouse warming in a high-resolution global climate model // *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48. P. e2020GL090270.
36. Koriche S.A., Singarayer J.S., Cloke H.L. The fate of the Caspian Sea under projected climate change and water extraction during the 21st century // *Environmental Research Letters*. 2021. Vol. 16 (9). P. 094024.
37. Kroonenberg S.B., Rusakov G.V., Svitoch A.A. The wandering of the Volga delta: a response to rapid Caspian sea level change // *Sedimentary Geology*. 1997. Vol. 107. P. 189-209.
38. Lahidjani H.A.K., Ghaffari P., Leroy S.A.G. et al. A note on the silent decline of the Caspian environment // *Marine Pollution Bulletin*. 2024. Vol. 205. P. 1165551.
39. Lavers D. A., Simmons A., Vamborg F., Rodwell M. J. An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2022. Vol. 148 (748). P. 3124-3137. <https://doi.org/10.1002/qj.4351>
40. Leroy S.A.G., Gracheva R., Medvedev A. Natural hazards and disasters around the Caspian Sea // *Natural Hazards*. 2022. Vol. 114. P. 2435-2478.
41. Nandini-Weiss S.D., Prange M., Arpe K., Merkel U., Schulz M. Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area // *International Journal of Climatology*. 2020. Vol. 40 (5). P. 2717-2731. <https://doi.org/10.1002/joc.6362>.
42. Prange M., Wilke T., Wesselingh F.P. The other side of sea level change // *Communications Earth & Environment*. 2020. Vol. 1 (69). <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>.

43. Safarov E., Bayramov E., Safarov S., Neafie J. Hedjazi A. Impact of changes in the wind regime on the Caspian Sea level fluctuation and its relationship with SOI and NAO // Scientific reports. 2025. Vol. 15. 36380.
44. 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. Vol. 16 (12). P. 1744.
45. Samant R., Prange M. Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections. Communications Earth and Environment. 2023. Vol. 4 (1). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01017-8>.
46. Semenov V.A., Latif M., Jungclaus J.H., Park W. Is the observed NAO variability during the instrumental record unusual? // Geophys. Research Letters. 2008. Vol. 35. P. L11701.
47. UNEP (United Nations Environment Programme) Caspian Sea Fluctuations and Climate Change: Coordinated research is needed to understand how climate change is impacting Caspian Sea levels. Working paper. 2024. Available at: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/46560> (Accessed: 3 June 2025).

### References

1. Abousiarov Z.K., Nesterov E.S. Joint analysis of wind speed, wave height and the North Atlantic Oscillation index in synoptic range. *Trudy Gidrometcentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 354, pp. 79-95 [in Russ.].
2. Bardin M.Y., Platova T.V. Long-period Variations in Extreme Temperature Statistics in Russia as Linked to the Changes in Large-scale Atmospheric Circulation and Global Warming. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, no. 12, pp. 791-801. DOI: 10.3103/S106837391912001X
3. M. Yu. Bardin, E. Ya. Ran'kova, T. V. Platova, O. F. Samokhina, I. A. Korneva. Modern Surface Climate Change as Inferred from Routine Climate Monitoring Data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, no. 5, pp. 317-329. DOI: 10.3103/S1068373920050027
4. Bardin M.Ju., Platova T.V., Samokhina O.F. Dolgoperiodnye izmeneniya povtorjaemosti ciklonov v umerennykh shiroтах Severnogo polushariya. *Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija [Fundamental and applied climatology]*, 2021, vol. 7 (2), pp. 57-80 [in Russ.].
5. Bardin M.Ju., Platova T.V., Popov I.O. Changes in statistics of temperature extremes in crop-yielding regions of southern European Russia and Western Siberia. *Ekologicheskij monitoring i modelirovanie jekosistem [Ecological monitoring and ecosystem modelling]*, 2023, vol. 34, no. 3-4, pp. 17-44 [in Russ.].
6. Boguchava D.D., Semenov V.A. The role of natural fluctuations and factors of external forcing in the early 20<sup>th</sup> century warming in northern hemisphere. *Led i sneg [Ice and snow]*, 2022, vol. 62, no. 3, pp. 455-474 [in Russ.].
7. Box G. E. P., Jenkins G.M. Time Series Analysis. San Francisco, Cambridge, London, Amsterdam, Holden-Day, 1970, 575 p.
8. Bolgov M.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D., Filippova I.A. River runoff and probabilistic forecast of the Caspian Sea level. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 10, pp. 639-645. DOI: 10.3103/S1068373918100023
9. Vodnyj balans i kolebanija urovnja Kaspijskogo morja. Modelirovanie i prognoz. Moscow, Triada Ltd publ., 2016, 374 p. [in Russ.].
10. Vyruchalkina T.Y., Dianskii 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, vol. 47, no. 2, pp. 348-357. DOI: 10.1134/S0097807820020190
11. Ginzburg A.I., Kostjanov A.G., Seryh I.V., Lebedev S.A. Climatic changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980–2020). *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2021, vol. 18, no. 5, pp. 277-291 [in Russ.].
12. Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Куреева М.Б., Степаненко В.М. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России. *Izvestiya Rossijskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2022, vol. 86, no. 3, pp. 435-446 [in Russ.].
13. Ermakov V.B. Long-Term Changes in the Level of the Caspian Sea and Modern Options for Their Forecasting. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. [Bulletin of the Russian Academy*

*of Sciences. Geography*], 2023, vol. 87, no. 6, pp. 930-940 [in Russ.]. DOI: 10.31857/S2587556623060067

14. Kust G.S., Shklyajeva D.S., Lobkovskij V.A., Andreeva O.V. Ispol'zovanie metodologii nejtral'nogo balansa degradacii zemel' dlja ocenki territorii Prikaspijskogo regiona. *Aridnye ekosistemy [Arid ecosystems]*, 2024, vol. 30, no. 2(99), pp. 24-35 [in Russ.].

15. Mikhailov V.N., Mikhailova M.V., Isupova M.V. Hydrological and morphological processes at river mouths of the Caspian sea region as possible analogs of expected changes of mouths of other rivers in Russia and the world. *Water Resources*. 2014, vol. 41, no. 5, pp. 489-504. DOI: 10.1134/S0097807814050054

16. Nesterov E.S. Low-Frequency Atmospheric Circulation Variability and Caspian Sea Level in the Second Half of the 20th Century. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2001, no. 11, pp. 27-36 [in Russ.].

17. Nesterov E.S., Pavlova A.V. Influence of atmospheric circulation fluctuations on the Caspian Sea level. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, no. 1(391), pp. 56-70 [in Russ.].

18. Ostrovskaya E.V., Gavrilova E.V., Gontovaya I.V., Tatarnikov V.O., Ocheretnyi M.A. Hydrometeorological Parameters of the Marine Environment in the Russian Sector of the Caspian Sea under Changing Climate. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography]*, 2023, vol. 87, no. 6, pp. 914-929 [in Russ.]. DOI: 10.31857/S2587556623060109.

19. Panin G.N., Diansky N.A. On the correlation between oscillations of the Caspian sea level and the North Atlantic climate. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2014, vol. 50, no. 3, pp. 266-277. DOI: 10.1134/S000143381402008X

20. Panin G.N., Vyruchalkina T.Yu., Solomonova I.V. Climatic changes in the Arctic, North Atlantic, the Caspian Sea region, and their relationships. *Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija [Fundamental and applied climatology]*, 2015, vol. 1, pp. 183-210 [in Russ.].

21. Rychagov G.I. Fluctuations of the Caspian sea level: Causes, effects, forecast. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography]*, 2011, no. 2, pp. 4-12 [in Russ.].

22. Svitoch A.A. Bol'shoj Kaspij: stroenie i istorija razvitiya. Moscow, Moscow university publ., 2014, 272 p. [in Russ.].

23. Seryh I.V., Kostjanov A.G. The Links of Climate Change in the Caspian Sea to the Atlantic and Pacific Oceans. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2020, no. 5, pp. 96-107 [in Russ.].

24. Holopcev A.V., Naurozbaeva Zh.K. Correlations of interannual variations in average monthly levels of the Caspian sea, as well as the total precipitation in its basin, and their changes under modern climate warming. *Geografija i vodnye resursy [Geography and water resources]*, 2024, no. 3, pp. 21-36 [in Russ.].

25. Ust'ja rek Kaspijskogo regiona: istorija formirovaniya, sovremennye gidrologo-morfologicheskie processy i opasnye gidrologicheskie javleniya. Moscow, GEOS publ., 2013, 703 p. [in Russ.].

26. Frolov A.V. Scenario forecasts of the Caspian sea fluctuations in the level under climatic and man-made impacts on the sea water balance. *Okeanologicheskie issledovaniya [Oceanological research]*, 2019, vol. 47, no. 5, pp. 130-148 [in Russ.].

27. Cherenkova E.A., Bardin M.Ju., Platova T.V., Semenov V.A. Influence of North Atlantic SST Variability and Changes in Atmospheric Circulation on the Frequency of Summer Droughts in the East European Plain. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, no. 12, pp. 819-829. DOI: 10.3103/S1068373920120018

28. Chuvashov A.V., Malov D.N., Stepanova N.Ju., Golub V.B. Ocenka dinamiki rastitel'nyh soobshhestv v vostochnoj chasti del'ty r. Volgi (1980-2023 gg.). *Aridnye jekosistemy [Arid ecosystems]*, 2024, vol. 30, no. 1(98), pp. 67-74 [in Russ.].

29. Shiklomanov I.A., Georgievskij V.Ju., Shalygin A.L. Prichiny povysheniya urovnja Kaspijskogo morja. *Gidrometeorologicheskie aspekty problemy Kaspijskogo morja i ego bassejna*. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 2003, pp. 254-266 [in Russ.].

30. Ambaum M.H., Hoskins B.J., Stephenson D.B. Arctic oscillation or North Atlantic oscillation? *Journal of Climate*, 2001, vol. 14(16), pp. 3495-3507.

31. Arpe K., Bengtsson L., Golitsyn G.S., Mokhov I.I., Semenov V.A., Sporyshev P.V. Connection between Caspian Sea level variability and ENSO. *Geophysical Research Letters*, 2000, vol. 27(17), pp. 2693-2696.
32. Arpe K., Leroy, S.A.G., Wetterhall F. et al. Prediction of the Caspian Sea level using ECMWF seasonal forecasts and reanalysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, vol. 117, pp. 41-60.
33. Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., Safarov E.S. Long-term Caspian Sea level change. *Geophysical Research Letters*, 2017, vol. 44, pp. 6993-7001.
34. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Res. Met. Soc.*, 2020, vol. 146(730), pp. 1-51.
35. Huang L., Lee S.-S., Timmermann A. Caspian Sea and Black Sea response to greenhouse warming in a high-resolution global climate model. *Geophysical Research Letters*, 2021, vol. 48, e2020GL090270. DOI: 10.1029/2020GL090270
36. Koriche S.A., Singarayyer J.S., Cloke H.L. The fate of the Caspian Sea under projected climate change and water extraction during the 21st century. *Environmental Research Letters*, 2021, vol. 16(9). DOI: 10.1088/1748-9326/ac1af5
37. Kroonenberg S.B., Rusakov G.V., Svitoch A.A. The wandering of the Volga delta: a response to rapid Caspian Sea level change. *Sedimentary Geology*, 1997, vol. 107, pp. 189-209.
38. Lahidjani H.A.K., Ghaffari P., Leroy S.A.G. et al. A note on the silent decline of the Caspian environment. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, vol. 205, 1165551. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116551
39. Lavers D. A., Simmons A., Vamborg F., Rodwell M. J. An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2022. Vol. 148(748). P. 3124-3137. DOI: 10.1002/qj.4351
40. Leroy S.A.G., Gracheva R., Medvedev A. Natural hazards and disasters around the Caspian Sea. *Natural Hazards*, 2022, vol. 114, pp. 2435-2478. DOI: 10.1007/s11069-022-05522-5
41. Nandini-Weiss S.D., Prange M., Arpe K., Merkel U., Schulz M. Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area. *International Journal of Climatology*, 2020, vol. 40(5). DOI: 10.1002/joc.6362
42. Prange M., Wilke T., Wesselingh F.P. The other side of sea level change. *Communications Earth & Environment*, 2020, vol. 1(69). DOI: 10.1038/s43247-020-00075-6.
43. Safarov E., Bayramov E., Safarov S., Neafie J. Hedjazi A. Impact of changes in the wind regime on the Caspian Sea level fluctuation and its relationship with SOI and NAO. *Scientific reports*, 2025, vol. 15, pp. 36380.
44. 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, vol. 16(12), pp. 1744. DOI: 10.3390/w16121744.
45. Samant R., Prange M. Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections. *Communications Earth and Environment*, 2023, vol. 4(1). DOI: 10.1038/s43247-023-01017-8.
46. Semenov V.A., Latif M., Jungclaus J.H., Park W. Is the observed NAO variability during the instrumental record unusual? *Geophys. Research Letters*, 2008, no. 35. L11701.
47. UNEP (United Nations Environment Programme). Caspian Sea Fluctuations and Climate Change: Coordinated research is needed to understand how climate change is impacting Caspian Sea levels – Working paper. 2024. Available at: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/46560> (Accessed: 3 June 2025)

Поступила 04.11.2025; принята в печать 17.03.2026.  
Submitted 04.11.2025; accepted for publication 17.03.2026.