

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-1-56-70>

УДК 551.515:551.461(262.81)

## Влияние колебаний циркуляции атмосферы на уровень Каспийского моря

*Е.С. Нестеров, А.В. Павлова*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
nesterov@mecom.ru*

Рассматриваются изменения уровня Каспийского моря с 1950 по 2023 год. Основное внимание уделено интенсивному падению уровня моря с 2005 по 2023 год. В этот период в результате глобального потепления увеличилось число случаев блокирования западного переноса в атмосфере летом, что привело к росту температуры воздуха в регионе Каспийского моря. Подтверждено влияние на эти процессы отрицательных фаз атмосферных колебаний EA/WR (Восточная Атлантика – западная часть России) и NAO (североатлантическое колебание), которые установились после 2000 года. Предполагается, что повышение температуры воздуха способствовало интенсивному испарению с поверхности Каспийского моря и падению его уровня.

*Ключевые слова:* Каспийское море, уровень, колебания циркуляции атмосферы, глобальное потепление, испарение

## Influence of atmospheric circulation fluctuations on the Caspian Sea level

*E.S. Nesterov, A.V. Pavlova*

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,  
Moscow, Russia  
nesterov@mecom.ru*

Changes in the Caspian Sea level from 1950 to 2023 are considered. The focus is on the intense sea level drop from 2005 to 2023. During this period, as a result of global warming, the number of cases of westerlies blocking in the summer atmosphere increased, which led to an air temperature rise in the Caspian Sea region. The influence on these processes of the negative phases of the EA/WR (East Atlantic-Western Russia) and NAO (North Atlantic Oscillation) atmospheric circulation patterns that set in after 2000 is confirmed. It is assumed that the air temperature rise contributed to intense evaporation from the surface of the Caspian Sea and the drop of its level.

*Keywords:* Caspian Sea, sea level, atmospheric circulation fluctuations, global warming, evaporation

### Введение

За последние 45 лет в ходе уровня Каспийского моря (УКМ) произошли два значительных события: подъем в 1978–1995 гг. и падение в 2007–2023 гг., которое продолжается до сих пор. Эти события вызвали серьезные

экономические и экологические проблемы для прибрежной зоны прикаспийских стран. Так, в результате подъема уровня произошло затопление и подтопление населенных пунктов, промышленных объектов, разрушение гидротехнических и портовых сооружений. При падении уровня возникают проблемы для судоходства и рыболовства.

В период подъема уровень увеличился на 2,4 м. Средняя скорость подъема составила 14 см в год, в отдельные годы достигала 30 см в год [21]. На стадии падения уменьшение уровня составляет до 20 см в год.

Причины этих явлений исследовались во многих публикациях [1, 2, 5, 7, 25, 26]. Количественная оценка вклада различных механизмов дана в [24], где указывается, что повышение уровня в 1978–1995 гг. было вызвано: на 54 % – увеличением речного стока в море; на 29 % – уменьшением испарения с его поверхности; на 10 % – увеличением количества осадков на поверхность моря; на 7 % – регулированием оттока вод в залив Кара-Богаз-Гол. В монографии [22] предложена динамико-стохастическая модель колебаний уровня Каспийского моря на основе учета речного стока и эффективного испарения.

Конкретное обоснование этих механизмов также приводится во многих публикациях. Например, в [9] указывается, что увеличение стока рек Волжского бассейна произошло из-за того, что в северной части водосбора Волги (реки Кама, Вятка, Ветлуга, Верхняя Волга) в осенне-зимний период было увеличение осадков. Увеличение осадков на водосборе Волги в теплую часть года отмечается в [12]. Влияние осадков на уровень моря с использованием гидродинамической модели исследовалось в [10]. Получено, что повышение средней интенсивности осадков на 50 % дает дополнительный прирост уровня на 8,5 см в год. В численном эксперименте с естественным расходом рек, то есть без учета изъятий 12 % вод на хозяйственные нужды, прирост уровня составил 9,5 см в год.

В [8] показано, что уменьшение испарения с поверхности моря в теплую часть года на стадии подъема уровня произошло в результате уменьшения скорости ветра над морем и уменьшения солнечной радиации в результате увеличения облачности. В работе [21] указывается, что одной из причин подъема уровня стало перекрытие в 1980–1984 гг. стока вод в залив Кара-Богаз-Гол и дальнейшее до 1992 г. незначительное поступление в залив вод в объеме менее 2 км<sup>3</sup>.

В [20] отмечаются положительные среднегодовые аномалии осадков, температуры воздуха и облачности в регионе Каспийского моря, что сказалось на процессах испарения в период подъема уровня. Эти особенности связываются с изменением повторяемости форм атмосферной циркуляции по классификации Вангенгейма.

Влияние поля ветра в регионе моря на изменения уровня исследовалось в [6]. Показано, что в периоды роста уровня в регионе Каспийского моря преобладают северные ветры, что уменьшает интенсивность испарения и способствует росту уровня.

В работе [15] исследовалось влияние различных колебаний атмосферной циркуляции на УКМ. Было получено, что существенным является влияние колебаний EA/WR (Восточная Атлантика – западная часть России), EA (Восточная Атлантика) и EA-Jet, то есть тех колебаний, основные узлы которых расположены в восточной части Северной Атлантики. Интересно, что наибольшее влияние на УКМ оказывает колебание EA/WR, один из узлов которого расположен над Каспийским морем.

При этом многолетний ход индекса EA-Jet оказался самым близким к ходу УКМ среди всех рассматриваемых индексов. Этот результат представляется несколько неожиданным, поскольку колебание EA-Jet – единственное из колебаний, которое выражено только в теплую часть года.

Эти результаты свидетельствуют о важной роли процессов в теплую часть года, особенно испарения и осадков, в формировании межгодовой изменчивости УКМ. Поскольку индекс EA-Jet характеризует условия атмосферной циркуляции (а значит, косвенно, и эффективное испарение) в апреле–августе, то это может быть одной из причин подобия многолетнего хода индекса и УКМ. В настоящее время индекс EA-Jet не рассчитывается.

Изучение процессов испарения с поверхности Каспийского моря показало, что максимальное испарение происходит в июле–сентябре [11, 18], причем оно существенно зависит от скорости ветра. В [18] испарение рассчитывалось для трех условных частей Каспийского моря: северной, средней и южной за период с 1940 по 1985 г. Получено, что в северной части испарение достигает максимальных значений в августе, а в средней и южной частях – в сентябре.

Отмечается, что межгодовой ход только северной (мелководной) части соответствует ходу уровня Каспийского моря с характерным переломом от падения уровня к его росту в 1976–1977 гг. Величина испарения в рассматриваемый период колебалась от 90 до 105 см в год. В [18] сделан вывод, что величина испарения в северной части моря является основным фактором в изменчивости водного баланса всего моря.

Связь между индексами колебаний циркуляции атмосферы и межгодовыми изменениями УКМ исследовалась в [16]. С использованием пошаговой и множественной регрессии было получено уравнение зависимости межгодовых приращений уровня в пункте Махачкала за 1950–2000 гг. и индексами NAO (североатлантическое колебание), EA, EA/WR, SCA (скандинавское колебание), POL (колебание полярная область – Евразия), PNA (колебание Тихий океан – Северная Америка), SOI (Южное колебание).

Коэффициент детерминации, характеризующий связь между фактическими изменениями уровня и полученными по уравнению множественной регрессии, оказался равным 0,37, то есть построенная регрессия объясняет 37 % разброса межгодовых изменений уровня относительно среднего, что недостаточно для использования уравнения в целях прогноза. Вместе с тем использование индексов колебаний циркуляции атмосферы в качестве предикторов может быть полезным при оценке возможных изменений УКМ.

Для исследования влияния различных характеристик атмосферы на уровень Каспийского моря в летний период использовался также индекс Палмера, который рассчитывается по среднемесячным данным о температуре воздуха и осадках и характеризует сухие и влажные периоды [28]. Среднее значение индекса Палмера для большей части Каспийского моря в 1978–1992 гг. оказалось положительным (преобладание влажных периодов), то есть процессы в атмосфере в этот период препятствовали развитию испарения, что отразилось в повышении уровня моря.

### Современные изменения уровня Каспийского моря

Современные изменения уровня Каспийского моря происходят в условиях глобального потепления. На Европейской территории России (ЕТР) в летний период с 1980-х гг. растет число дней с экстремально высокой температурой воздуха [3]. На территории России за период 1998–2021 гг. более 40 % опасных метеорологических явлений, к которым относится в том числе сильная жара, отмечается в летние сезоны. Скорость потепления в России в 2,5 раза больше скорости глобального потепления [13]. В этой работе делается вывод, что в условиях быстрого потепления климата следует ожидать увеличения продолжительности летних волн жары в результате изменений режимов атмосферной циркуляции. Результаты анализа наблюдений и модельные расчеты свидетельствуют о том, что глобальное потепление приводит к увеличению повторяемости блокирующих ситуаций в атмосфере [14] и к увеличению количества засух [27, 33].

В [19] рассматриваются летние волны жары на ЕТР, в которых аномалия среднесуточной температуры воздуха превышала заданный порог, а длительность была не менее 5 суток. Анализ показал, что начиная с 2005 г. волны жары наблюдаются ежегодно. В 2010 и 2016 гг. длительность жары превысила 35 суток. Такие явления чаще всего происходят при блокировании западного переноса в условиях антициклонической активности. В среднем за период 1951–2020 гг. продолжительность волн жары составила 7 суток, для периода 2005–2014 гг. – 12,2 суток, для 2015–2020 гг. – 12,6 суток [19].

В [4] показано, что суммарная продолжительность эпизодов блокирования летом на ЕТР резко возрастает в отрицательной фазе колебания EA/WR, которая сформировалась после 2000 г. Максимум повторяемости блокирований находится в восточной части ЕТР, где при этом наблюдаются продолжительные периоды аномальной жары и дефицита осадков (засухи). В качестве примера приводится сильнейшая засуха в 2010 г., которая была обусловлена тремя эпизодами блокирования в июне–августе 2010 г. при больших отрицательных значениях индекса EA/WR.

Связь между индексом EA/WR и характеристиками засух исследована в [30]. Показано, что в определенных фазах колебаний EA/WR и NAO происходит ослабление преобладающей западной циркуляции и развитие

засухи. Повышение температуры воздуха и усиление засух в различных регионах Европы и Азии в 2000–2016 гг. отмечается в [31]. Численные эксперименты с использованием моделей глобальной и региональной циркуляции атмосферы показали, что в 2071–2100 гг. количество засух увеличится по сравнению с 1981–2010 гг. [32].

Сильные засухи в Поволжье и Северном Прикаспии наблюдались в периоды с экстремально высокой температурой воды в Северной Атлантике. Эти засухи были также связаны с изменениями атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском регионе в летние месяцы, а именно с развитием отрицательных фаз колебаний NAO и EA/WR [23]. Повторяемость блокирований в восточной части ЕТР в отрицательной фазе EA/WR в три раза превышала повторяемость в положительной фазе EA/WR. Подобная закономерность характерна также для фаз колебания NAO.

Увеличение повторяемости сильных засух в Поволжье было связано с усилением антициклонической активности (блокированием) в регионе за счет более частой повторяемости отрицательной фазы EA/WR, а в Северном Прикаспии за счет более частой повторяемости отрицательной фазы NAO [23].

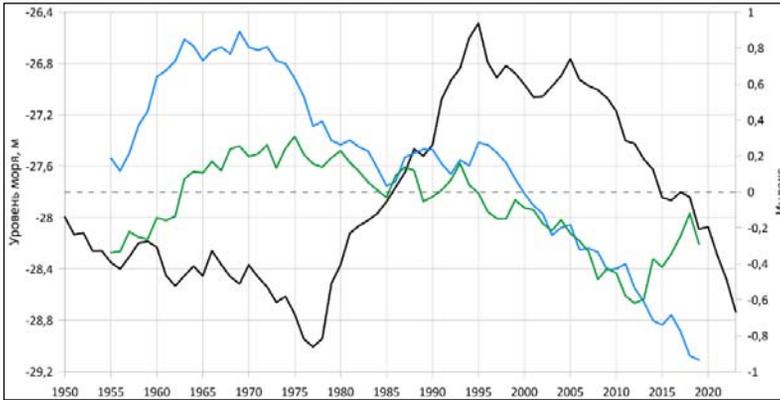
### **Колебания циркуляции атмосферы и уровень Каспийского моря**

Известно, что в отрицательной фазе NAO происходит ослабление зонального переноса и усиление меридиональных процессов, усиление процессов блокирования. В период положительной фазы NAO блокирование наблюдается гораздо реже, чем при отрицательной фазе [17].

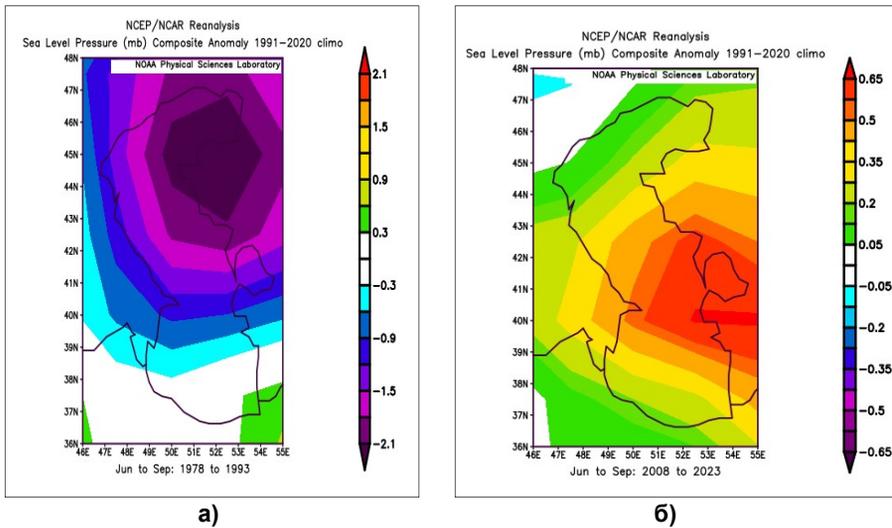
Как указывалось выше, блокирующие ситуации в атмосфере в регионе Каспийского моря были связаны с отрицательными фазами колебаний NAO и EA/WR. Нас будут интересовать значения индексов этих фаз в июне–сентябре, т. е. в период наибольшего испарения в Каспийском море. На рис. 1 видно, что устойчивые отрицательные фазы колебаний NAO и EA/WR в июне–сентябре сформировались после 2000 г., что совпадает с данными [4]. В этот же период началось наиболее интенсивное падение УКМ.

Поскольку блокирование атмосферной циркуляции в летний период приводит к повышению температуры воздуха, то было интересно сравнить характеристики давления и температуры воздуха в регионе Каспийского моря на стадии наиболее выраженного подъема УКМ (1978–1993 гг.) и аналогичной стадии падения (2008–2023 гг.).

Как видно из рис. 2а, на стадии подъема УКМ преобладала отрицательная аномалия давления, что частично можно трактовать как усиление циклонической активности, а на стадии падения уровня – положительная аномалия давления, связанная с блокированием (рис. 2б).



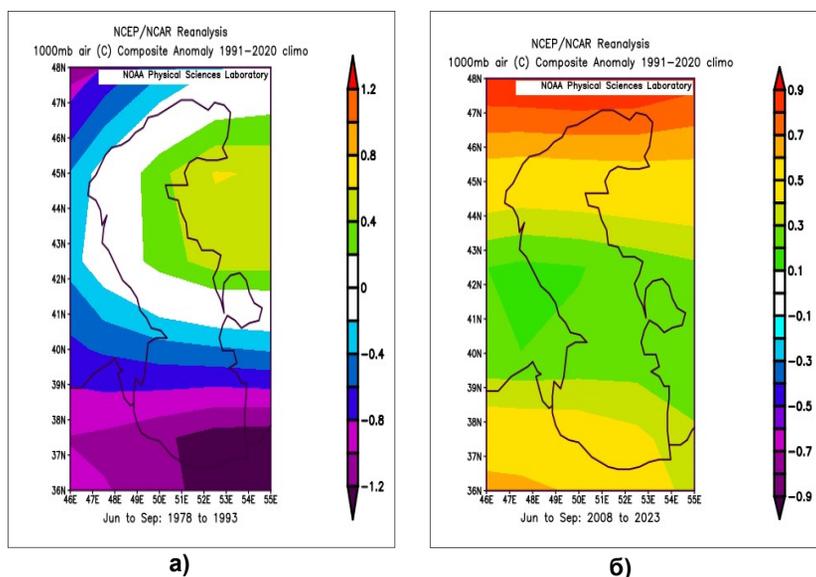
**Рис. 1.** Средние за июнь–сентябрь значения индексов NAO (зеленая линия) и EA/WR (синяя линия) (10-летнее скользящее сглаживание) и уровень моря в Махачкале (черная линия).  
**Fig. 1.** Average values of the NAO (green line) and EA/WR (blue line) indices for June-September (10-year moving smoothing) and sea level in Makhachkala (black line).



**Рис. 2.** Композитная аномалия приземного давления в июне-сентябре 1978-1993 гг. (а) и 2008-2023 гг. (б).  
**Fig. 2.** Composite anomaly of surface pressure in June-September 1978-1993 (a) and 2008-2023 (б).

Характеру атмосферной циркуляции в эти периоды соответствует и температура воздуха. На стадии подъема уровня в южной и северо-западной части региона преобладает значительная отрицательная аномалия температура воздуха (рис. 3а), а в восточной части – менее выраженная положительная аномалия. В то же время на стадии падения уровня в условиях

блокирования температура воздуха была выше нормы во всем регионе (рис. 3б).



**Рис. 3.** Композитная аномалия приземной температуры воздуха в июне-сентябре 1978-1993 гг.(а) и 2008-2023 гг. (б).

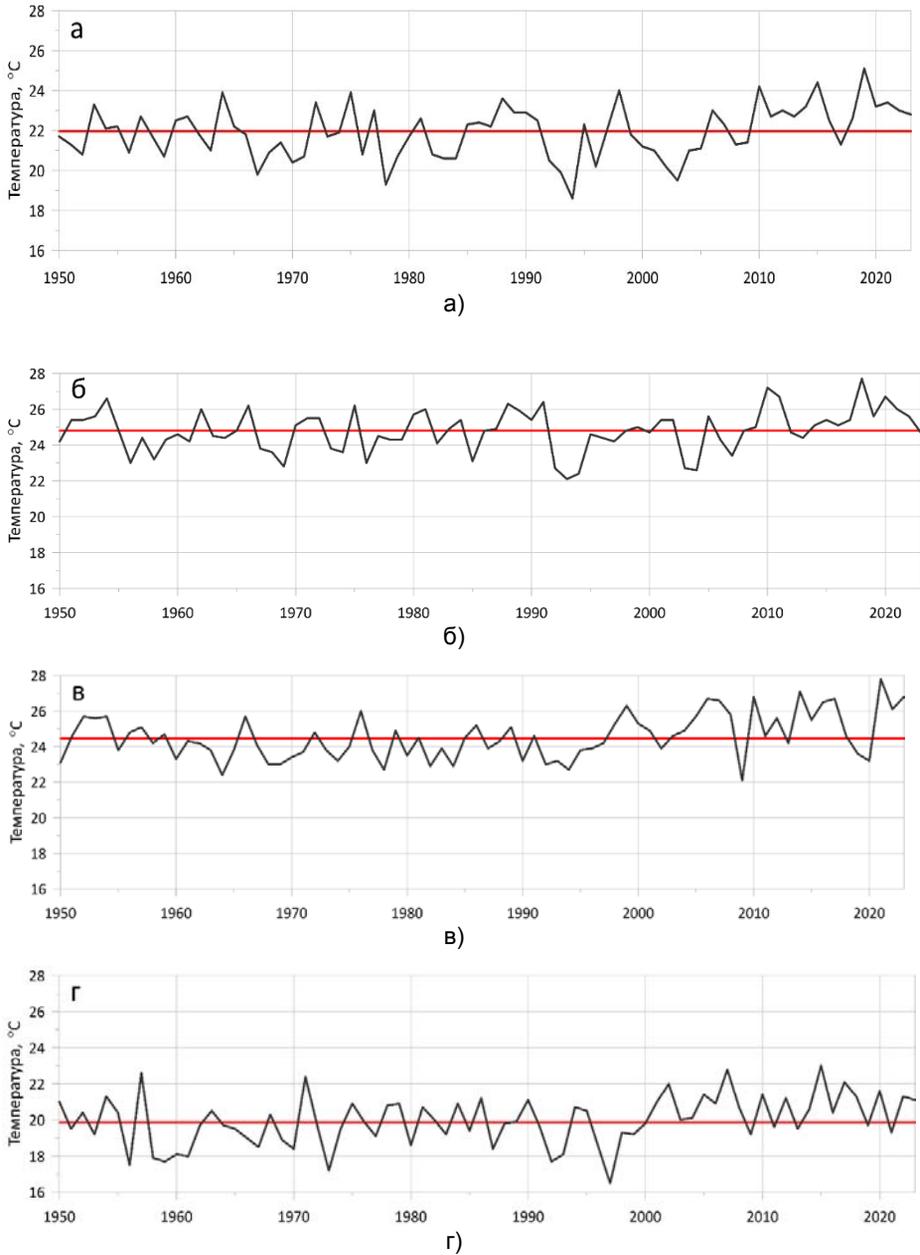
**Fig. 3.** Composite anomaly of surface air temperature in June-September 1978-1993 (a) and 2008-2023 (b).

Повышение температуры воздуха в июне–сентябре в регионе Каспийского моря примерно после 2005 г. подтверждается данными инструментальных наблюдений (рис. 4).

Аналогично по данным реанализа ERA5 [29] были получены данные по испарению с поверхности Каспийского моря в июне–сентябре 1950–1923 гг. (рис. 5). Параметр испарения представляет собой накопленное количество воды, испарившейся с поверхности Земли. Период накопления составляет 1 сутки.

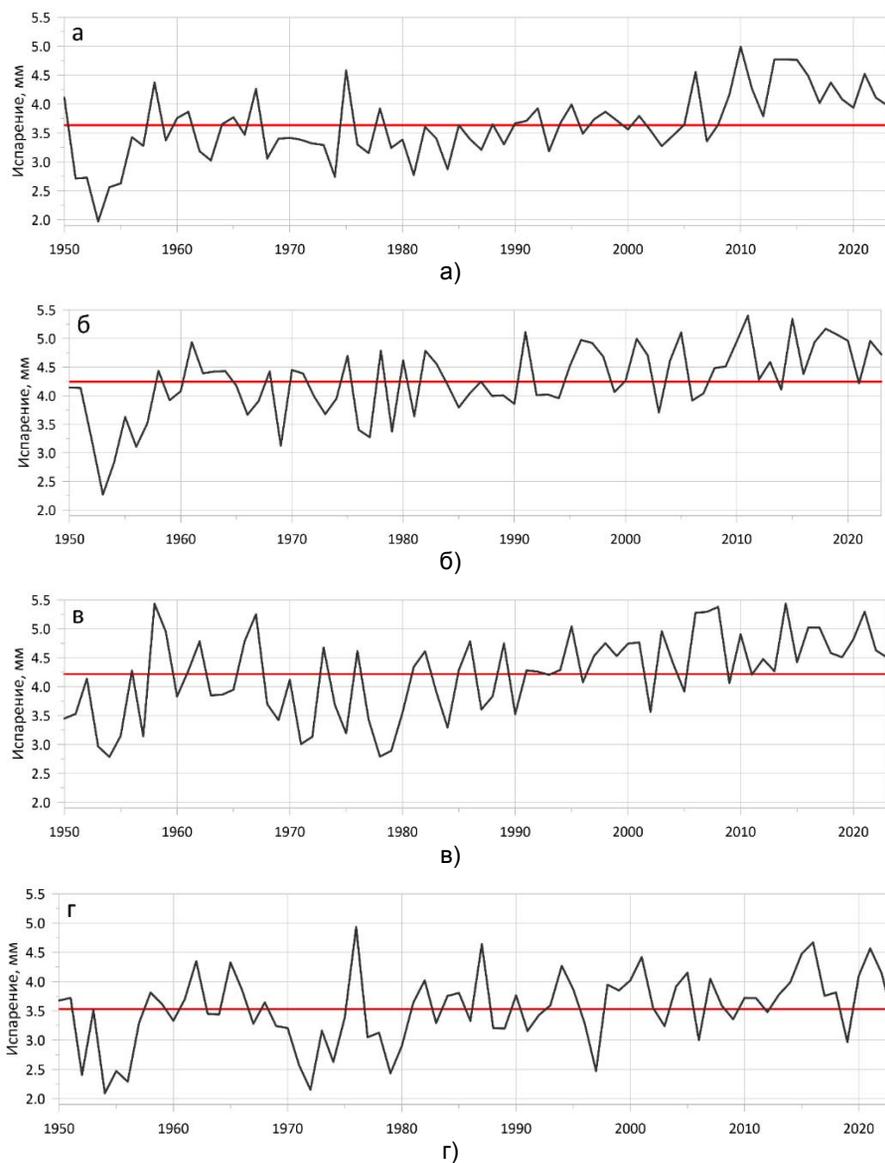
Из рис. 5 видно, что после 2005 г. испарение, как и температура воздуха, стало выше средних значений. Так как испарение является одной из главных составляющих водного баланса, которое вносит вклад в понижение уровня моря, его увеличение выше средних значений вносит значительный вклад в дальнейшее понижение УКМ.

Межгодовая изменчивость УКМ на стадии падения в 2000–2023 гг. была в диапазоне от -25 до +14 см (рис. 6). Наиболее значительное уменьшение уровня отмечалось в 2006, 2011, 2015, 2019 и 2023 гг. Вместе с тем есть периоды, когда уровень от года к году увеличивался (2005 и 2017 гг.).



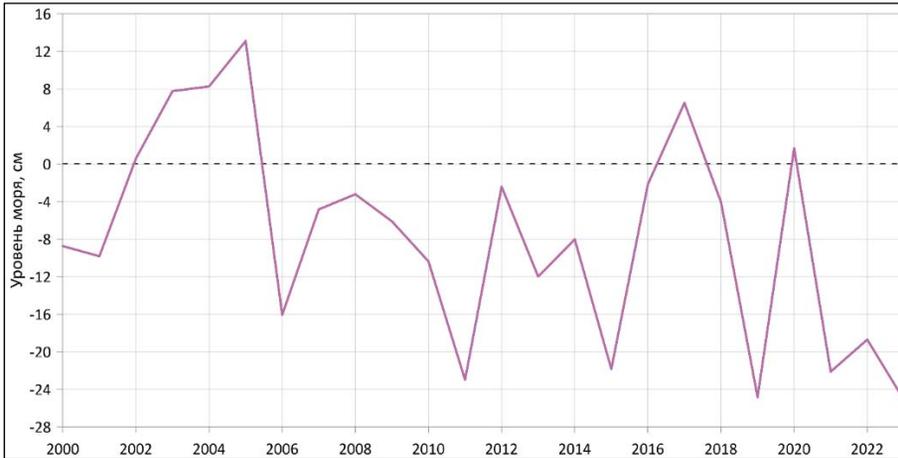
**Рис. 4.** Среднемесячная приземная температура воздуха в июне (а), июле (б), августе (в), сентябре (г) в Махачкале в 1950-2023 гг. и ее среднее значение (красный цвет).

**Fig. 4.** Average monthly surface air temperature in June (а), July (б), August (в), September (г) in Makhachkala in 1950-2023 and its average value (red).



**Рис. 5.** Среднемесячное испарение с поверхности Каспийского моря в июне (а), июле (б), августе (в), сентябре (г) в 1950-2023 гг. и его среднее значение (красный цвет).

**Fig. 5.** Average monthly evaporation from the surface of the Caspian Sea in June (a), July (б), August (в), September (г) in 1950-2023 and its average value (red).



**Рис. 6.** Межгодовые изменения уровня Каспийского моря в 2000–2023 гг.

**Fig. 6.** Interannual changes of the Caspian Sea level in 2000-2023.

В [7] было получено, что уровень Каспийского моря реагирует на значительные колебания атмосферной циркуляции примерно через 5 лет. Из рис. 6 следует, что на стадии падения уровня наиболее низкие значения уровня возникают примерно через 4–5 лет. Похожая дискретность прослеживается в возникновении летних максимумов температуры воздуха в Астрахани и величин испарения с поверхности Каспийского моря после 2000-2005 гг. (рис. 4, 5). Можно предположить, что в реакцию уровня моря на значительные колебания атмосферной циркуляции вносит вклад испарение в аномально жаркие летние сезоны.

### Заключение

По опубликованным ранее оценкам повышение уровня Каспийского моря в 1978–1995 гг. в основном было вызвано увеличением речного стока в море (54 %) и уменьшением испарения с его поверхности (29 %). В последующие десятилетия в результате глобального потепления существенно изменилась циркуляция атмосферы на Европейской территории России. В частности, это проявилось в увеличении случаев блокирования западного переноса в условиях антициклонической активности. При этом зафиксировано увеличение количества и продолжительности так называемых летних волн жары, что проявилось в росте числа дней с экстремально высокой температурой воздуха.

Подтверждено, что суммарная продолжительность эпизодов блокирования летом на ЕТР резко возрастает в отрицательных фазах колебания EA/WR (Восточная Атлантика – западная часть России) и NAO (североатлантическое колебание). Устойчивые отрицательные фазы колебаний NAO

и EA/WR в летний период сформировались после 2000 г. В этот же период началось наиболее интенсивное падение уровня Каспийского моря.

Для стадии падения уровня (2000–2023 гг.) в регионе Каспийского моря характерна композитная положительная аномалия давления в летний период, связанная с увеличением эпизодов блокирования, и положительная аномалия температура воздуха в результате интенсивного нагревания. По данным инструментальных наблюдений температура воздуха в июне–сентябре в северной части Каспийского моря после 2005 г. в основном была выше средних значений. Такая же особенность характерна для испарения с поверхности Каспийского моря.

В межгодовой изменчивости УКМ на стадии падения наиболее значительные уменьшения уровня происходят с интервалом 4–5 лет. Возможно, таким образом уровень моря реагирует на эпизоды с наибольшим летним испарением. Можно сделать предварительный вывод, что в связи с глобальным потеплением вклад испарения в изменения уровня Каспийского моря в последние десятилетия увеличился по сравнению с вкладом речного стока.

### Список литературы

1. Абузяров З. К., Нестеров Е. С. Некоторые особенности пространственно-временной изменчивости уровня Каспийского моря // Труды Гидрометцентра России. 2011. Вып. 345. С. 5-23.

2. Абузяров З. К., Нестеров Е. С., Красюк В. С., Лежнева Н. Г. Развитие методов и технологий прогноза уровня Каспийского моря в Гидрометцентре России // Материалы Международной научной конференции «Изменения климата и водного баланса Каспийского региона». Астрахань, 19-20 октября 2010. С. 185-192.

3. 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.

4. Бардин М. Ю., Платова Т. В., Самохина О. Ф. Изменчивость антициклонической активности в умеренных широтах Северного полушария // Фундаментальная и прикладная климатология. 2019. Т. 3. С. 32-58.

5. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / Под ред. Е. С. Нестерова. М.: Триада лтд, 2016. 378 с.

6. 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.

7. Выручалкина Т. Ю., Филатов Н. Н., Дианский Н. А., Гусев А. В. О прогнозе многолетних изменений уровня воды крупных озер // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 9. С. 3-16.

8. Георгиевский В. Ю., Голубев В. С. Испарение с поверхности Каспийского моря и его многолетняя изменчивость // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. С. 230-238.

9. Георгиевский М.В. Особенности гидрометеорологического режима в бассейне Каспия в период повышения его уровня в 1978-1995 гг. // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. С. 33-53.

10. Дьяконов Г.С., Ибраев Р.А. Воспроизведение многолетней изменчивости уровня Каспийского моря в гидродинамической модели высокого разрешения // Океанология. 2018. Т. 58, № 1. С. 11-22.

11. Лобанов В.В. Испарение с поверхности Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 1987. № 10. С. 62-68.

12. Меццерская А.В., Александрова Н.А., Голод М.П. Температурно-влажностный режим на водосборах Волги и Урала и оценка его влияния на изменения уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1994. Т. 21, № 4. С. 463-470.

13. Мохов И.И. Сезонные особенности изменений повторяемости опасных метеорологических явлений в российских регионах в последние десятилетия // Метеорология и гидрология. 2023. № 11. С. 50-64.

14. Мохов И.И., Семенов В.А. Погодно-климатические аномалии в российских регионах и их связь с глобальными изменениями климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 16-28.

15. Нестеров Е.С. Низкочастотная изменчивость циркуляции атмосферы и уровень Каспийского моря во второй половине XX века // Метеорология и гидрология. 2001. № 11. С. 27-36.

16. Нестеров Е.С. О связи индексов колебаний циркуляции атмосферы и уровня Каспийского моря. Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. С. 323-326.

17. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада лтд, 2013. 144 с.

18. Панин Г.Н. Испарение и теплообмен Каспийского моря. М.: Наука, 1987. 88 с.

19. Ранькова Э.Я., Алексеев Г.В., Алешина М.А. и др. Статистическая климатология: современные достижения и новые идеи // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8, № 1. С. 5-50.

20. Сидоренков Н.С., Швейкина В.И. Исследование климатического режима бассейна Волги и Каспийского моря за последнее столетие // Водные ресурсы. 1996. Т. 23, № 4. С. 401-406.

21. Терзиев Ф.С., Никонова Р.Е. Некоторые итоги изучения современного состояния гидрометеорологического режима Каспийского моря и перспективы дальнейших исследований. Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. С. 239-253.

22. Фролов А.В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М.: ГЕОС, 2003. 174 с.

23. 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.

24. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Причины повышения уровня Каспийского моря. Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. С. 254-266.

25. Arpe K., Bengtsson L., Golitsyn G. S., Mokhov I. I. et al. Connection between Caspian Sea level variability and ENSO // *Geophysical research letters*. 2000. Vol. 27, no. 17. P. 2693-2696.
26. Arpe K., Leroy S.A.G. The Caspian sea level forced by the atmospheric circulation, as observed and modelled // *Quaternary international*. 2007. Vol. 173. P. 144-152.
27. Dai A. Hydroclimatic trends during 1950–2018 over global land // *Climate Dynamics*. 2021. Vol. 56. P. 4027-4049. DOI: 10.1007/s00382-021-05684-1.
28. Dai A., Trenberth K. E., Karl T. Global variations in droughts and wet spells: 1900-1995 // *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol. 25. P. 3367-3370.
29. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S. et al. The ERA5 global reanalysis // *Quart. J. Res. Met. Soc.* 2020. Vol. 146. P. 1-51. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
30. Kingston D.G., Stagge J.H., Tallaksen L.M., Hannah D. European-scale drought: understanding connections between atmospheric circulation and meteorological drought indices // *J. Climate*. 2015. Vol. 28, no. 2. P. 505-516.
31. Mukherjee S., Mishra A.K. Increase in compound drought and heatwaves in a warming world // *Geophys. Res. Letters*. 2021. Vol. 48. P. e2020GL090617. <https://doi.org/10.1029/2020GL090617>.
32. Spinoni J. et al. Future global meteorological drought hot spots: a study based on CORDEX data // *J. Climate*. 2020. Vol. 33, no. 9. P. 3635-3661.
33. Zhi Li, Yaning Chen, Gonghuan Fang, Yupeng Li. Multivariate assessment and attribution of droughts in Central Asia // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. P. 1316. DOI:10.1038/s41598-017-01473-1.

## References

1. Abousiarov Z.K., Nesterov E.S. Certain features of spatio-temporal variability of Caspian sea level. *Trudy Gidrometsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2011, vol. 345, pp. 5-23 [in Russ.].
2. Abuzyarov Z.K., Nesterov E.S., Krasnyuk V.S., Lezhneva N.G. Razvitie metodov i tekhnologii prognoza urovnya Kaspiyskogo morya v Gidrometcentre Rossii. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferencii «Izmeneniya klimata i vodnogo balansa Kaspiyskogo regiona»*. Astrahan', 19-20 oktyabrya 2010, pp. 185-192 [in Russ.].
3. 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, pp. 791–801. DOI: 10.3103/S106837391912001X.
4. Bardin M.Yu., Platova T.V., Samokhina O.F. Variability of anti-cyclonic activity in the Northern Extratropics. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and applied climatology]*, 2019, vol. 3, pp. 32-58 [in Russ.].
5. Vodnyy balans i kolebaniya urovnya Kaspiyskogo morya. Modelirovanie i prognoz. Pod red. E.S. Nesterova. Moscow, Triada LTD publ., 2016, 378 p. [in Russ.].
6. Vyrychalkina 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: 10.31857/S0321059620020194.
7. Vyrychalkina T.Yu., Filatov N.N., Diansky N.A., Gusev A.V. On forecasting long-term variations of water level in large lakes. *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN*

[*Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science, Limnology*], 2016, no. 9, pp. 3-16 [in Russ.].

8. *Georgievskiy V.Yu., Golubev V.S.* Isparenie s poverhnosti Kaspiyskogo morya i ego mnogoletnyaya izmenchivost'. Gidrometeorologicheskie aspekty problemy Kaspiyskogo morya i ego basseyna. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 2003, pp. 230-238 [in Russ.].

9. *Georgievskiy M.V.* Osobennosti gidrometeorologicheskogo rezhima v basseyne Kaspiya v period povysheniya ego urovnya v 1978-1995 gg. Gidrometeorologicheskie aspekty problemy Kaspiyskogo morya i ego basseyna. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 2003, pp. 33-53 [in Russ.].

10. *Dyakonov G.S., Ibrayev R.A.* Reproduction of Interannual Variability of the Caspian Sea Level in a High-Resolution Hydrodynamic Model. *Oceanology*, 2018, vol. 58, no. 1, pp. 8-18. DOI: 10.1134/S0001437018010046.

11. *Lobanov V.V.* Isparenie s poverhnosti Kaspiyskogo moray. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 1987, no. 10, pp. 62-68 [in Russ.].

12. *Meshcherskaya A.V., Aleksandrova N.A., Golod M.P.* Temperaturno-vlazhnostnyy rezhim na vodosborah Volgi i Urala i ocenka ego vliyaniya na izmeneniya urovnya Kaspiyskogo morya. *Vodnye resursy [Water Resources]*, 1994, vol. 21, no. 4, pp. 463-470 [in Russ.].

13. *Mokhov I.I.* Seasonal Features of the Changes in the Frequency of Severe Weather Events in Russian Regions over the Past Decades. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, pp. 954-965. DOI: 10.3103/S1068373923110043.

14. *Mokhov I.I., Semenov V.A.* Weather and Climate Anomalies in Russian Regions Related to Global Climate Change. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2016, vol. 41, pp. 84-92. DOI: 10.3103/S1068373916020023.

15. *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, vol. 11, pp. 27-36 [in Russ.].

16. *Nesterov E.S.* O svyazi indeksov kolebaniy cirkulyacii atmosfery i urovnya Kaspiyskogo morya. Gidrometeorologicheskie aspekty problemy Kaspiyskogo morya i ego basseyna. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 2003, pp. 323-326 [in Russ.].

17. *Nesterov E.S.* Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean. Moscow, Triada LTD publ., 2013, 144 p. [in Russ.].

18. *Panin G.N.* Isparenie i teploobmen Kaspiyskogo morya. Moscow, Nauka publ., 1987, 88 p. [in Russ.].

19. *Rankova E.Ya., Alekseev G.V., Aleshina M.A., et al.* Statistical climatology: modern achievements and new ideas (Scientific readings in memory of G.V. Gruza). *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and applied climatology]*, 2022, vol. 8, no. 1, pp. 5-50 [in Russ.].

20. *Sidorenkov N.S., Shveykina V.I.* Issledovanie klimaticheskogo rezhima basseyna Volgi i Kaspiyskogo morya za poslednee stoletie. *Vodnye resursy [Water Resources]*, 1994, vol. 21, no. 4, pp. 463-470 [in Russ.].

21. *Terziev F.S., Nikonova R.E.* Nekotorye itogi izucheniya sovremennogo sostoyaniya gidrometeorologicheskogo rezhima Kaspiyskogo morya i perspektivy dal'neyshih issledovaniy. Gidrometeorologicheskie aspekty problemy Kaspiyskogo morya i ego basseyna. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 2003, pp. 239-253 [in Russ.].

22. *Frolov A.V.* Modelirovanie mnogoletnih kolebaniy urovnya Kaspiyskogo morya: teoriya i prilozheniya. Moscow, GEOS, 2003, 174 p. [in Russ.].

23. Cherenkova E.A., Bardin M.Y., 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.

24. Shiklomanov I.A., Georgievskiy V.Yu., Shalygin A.L. Prichiny povysheniya urovnya Kaspiyskogo morya. *Gidrometeorologicheskie aspekty problemy Kaspiyskogo morya i ego basseyna*. Saint Petersburg, *Gidrometeoizdat publ.*, 2003, pp. 254-266 [in Russ.].

25. Arpe K., Bengtsson L., Golitsyn G. S., Mokhov I. I. et al. Connection between Caspian Sea level variability and ENSO. *Geophysical research letters*, 2000, vol. 27, no. 17, pp. 2693-2696.

26. Arpe K., Leroy S.A.G. The Caspian sea level forced by the atmospheric circulation, as observed and modeled. *Quaternary international*, 2007, vol. 173, pp. 144-152.

27. Dai A. Hydroclimatic trends during 1950–2018 over global land. *Climate Dynamics*, 2021, vol. 56, pp. 4027-4049. DOI: 10.1007/s00382-021-05684-1.

28. Dai A., Trenberth K. E., Karl T. Global variations in droughts and wet spells: 1900-1995. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, vol. 25, pp. 3367-3370.

29. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Res. Met. Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 1-51. DOI: 10.1002/qj.3803.

30. Kingston D.G., Stagge J.H., Tallaksen L.M., Hannah D. European-scale drought: understanding connections between atmospheric circulation and meteorological drought indices. *J. Climate*, 2015, vol. 28, no. 2, pp. 505-516.

31. Mukherjee S., Mishra A. K. Increase in compound drought and heatwaves in a warming world. *Geophys. Res. Letters*, 2021, vol. 48, pp. e2020GL090617. DOI: 10.1029/2020GL090617.

32. Spinoni J. et al. Future global meteorological drought hot spots: a study based on CORDEX data. *J. Climate*, 2020, vol. 33, no. 9, pp. 3635-3661.

33. Zhi Li, Yaning Chen, Gonghuan Fang, Yupeng Li. Multivariate assessment and attribution of droughts in Central Asia. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, 1316 p. DOI: 10.1038/s41598-017-01473-1.

Поступила 14.02.2024; одобрена после рецензирования 15.03.2024;  
принята в печать 10.04.2024.

Submitted 14.02.2024; approved after reviewing 15.03.2024;  
accepted for publication 10.04.2024.