

Гидрометеорология и экология. 2025. № 80. С. 510—529.  
Hydrometeorology and Ecology. 2025;(80):510—529.

## ***OCEANOLOGY***

---

Научная статья  
УДК [556.132.2:528.71](262/81)  
doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-510-529

### **К оценке межгодовой изменчивости испарения с акватории Каспия по спутниковым данным**

***Валерий Николаевич Малинин, Мария Дмитриевна Кудель***

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург,  
malinin@rshu.ru

*Аннотация.* Для оценки межгодовой изменчивости испарения для периодов повышения уровня (1979—1995 гг.) и его понижения (с 1996 г.) обсуждается использование 5 архивов ре-анализа: R-1, R-2, ERA5, MERRA-2 и CFS. Рассчитаны основные статистические характеристики. Отмечены расхождения в межгодовом ходе испарения по данным архивов, особенно значительные в период понижения уровня. Показана слабая корреляция температуры воздуха и температуры поверхности моря с испарением, причем при росте температуры воздуха она отрицательная. Предложена формула определения морфометрического фактора и выявлена его приближенная оценка для периода понижения уровня. Вклад морфометрического фактора в изменения водного баланса и уровня моря составляет 34 %. Доминирующая роль в этом принадлежит уменьшению суммарного притока речных вод к морю за счет отрицательного тренда, которое более, чем в 10 раз выше роста испарения.

*Ключевые слова:* Каспийское море, испарение, водный баланс, уровень моря, морфометрический фактор.

*Благодарности:* Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ FSZU-2023-0002.

*Для цитирования:* Малинин В. Н., Кудель М. Д. К оценке межгодовой изменчивости испарения с акватории Каспия по спутниковым данным // Гидрометеорология и экология. 2025. № 80. С. 510—529. doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-510-529.

## ***OCEANOLOGY***

---

Original article

### **To estimate the interannual variability of evaporation from the Caspian Sea using satellite data**

***Valery N. Malinin, Maria D. Kudel***

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russian Federation

*Summary.* The use of standard hydrometeorological data in the surface layer over the sea indicate an unsatisfactory state of the problem of evaporation knowledge. In fact, the only alternative to determining

---

© Малинин В. Н., Кудель М. Д., 2025

evaporation from the sea surface is satellite information, which is assimilated in reanalysis archives. This paper discusses the use of 5 archives: R-1, R-2, ERA5, MERRA-2 and CFS for assessing the interannual variability of evaporation for periods of sea level rise (1979—1995) and sea level decrease (since 1996). The main statistical characteristics are calculated. Discrepancies in the interannual course of evaporation according to the archive data are shown, especially significant during the period of sea level decline. Correlation links between evaporation of different archives differ for periods of sea level rise and fall. The closest links are noted between the R-1 and R-2 archives. Additionally, the interannual course of air temperature and sea surface temperature is calculated. A weak correlation of these parameters with evaporation is shown, and with an increase in air temperature it is negative. A formula for determining the morphometric factor is proposed and its approximate estimate is shown for the period of the level drop. At the same time, a significant contribution of the morphometric factor to changes in the water balance and sea level is revealed, which is 34 %. The dominant role in this belongs to the rate of decrease in the total inflow of river waters to the sea, which is more than 10 times higher than the rate of increase in evaporation. The morphometric factor significantly distorts the interannual course of evaporation. This distortion is greater the longer the sea level falls.

*Keywords:* Caspian Sea, evaporation, water balance, sea level, morphometric factor.

*Acknowledgments:* The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation № FSZU-2023-0002.

*For citation:* Malinin V. N., Kudel M. D. To estimate the interannual variability of evaporation from the Caspian Sea using satellite data. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(80):(510—529). doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-510-529. (In Russ.).

## Введение

Испарение представляет собой важнейшую расходную компоненту водного баланса моря. Хотя исследованиям испарения с поверхности Каспийского моря посвящено много работ, однако достаточно надежных методов расчета испарения с поверхности моря до настоящего времени не существует, а оценки испарения, полученные разными авторами, значительно расходятся [1]. В течение многих десятилетий испарение рассчитывалось по стандартной гидрометеорологической информации береговых и островных станций или по замыканию уравнения водного (теплого) баланса моря. В первом случае используются, как правило, различные полуэмпирические формулы и возникают искажения, обусловленные влиянием локальных (местных) факторов на процесс испарения, учесть которые оказывается чрезвычайно сложно, поэтому экстраполяция этих результатов на открытые районы моря может приводить к значительным погрешностям. Во втором определении испарения как остаточного члена уравнения баланса включает в себя суммарную ошибку расчета остальных компонент, которую также очень трудно оценить. Достаточно подробные обзоры проблемы изученности испарения содержатся в работах [1—8 и др.].

С методической точки зрения, представляется интересным сопоставить оценки испарения, полученные разными авторами за один и тот же период времени. В качестве такого периода в работе [2] был принят интервал 1940—1969 гг. ( $N = 30$ ), для которого имеются значения испарения, полученные практически всеми методами. В этот период уровню моря были свойственны преимущественно случайные колебания на фоне небольшого снижения уровня, которое составило около 50 см. Это означает, что морфометрический фактор не оказывал заметного влияния на испарение.

В табл. 1 приводятся статистические характеристики и коэффициенты корреляции между оценками испарения, рассчитанные разными авторами. Расхождение между средними оценками испарения составляет 121 мм или 12 % от общей средней (993 мм). Что касается межгодовой изменчивости испарения, то по СКО она различается в 2,5 раза, а по размаху колебаний — в 3 раза.

Таблица 1

Статистические характеристики испарения с акватории моря по данным разных авторов за 1940—1969 гг.  
Statistical characteristics of evaporation from sea waters according to data from different authors for 1940—1969

	Смирнова [9]	Панин [10]	Архипова [11]	Лобанов [5]		Георгиевский [12]
	Эмпирическая формула	Модель приводного слоя	Эмпирическая формула	Аэродинамический метод	Метод теплового баланса	Метод водного баланса
Среднее, мм	1011	980	957	946	1067	998
СКО, мм	33,2	29,1	74,5	58,3	73,3	58,3
Размах колебаний, мм	121	129	363	260	280	240
Коэффициент корреляции	1	0,22	0,34	0,37	0,47	0,59
		1	0,22	-0,09	0,04	0,12
			1	0,09	0,25	0,64
				1	0,16	0,45
				1	0,62	

Из распределения коэффициентов корреляции следует, что в большинстве случаев они являются незначимыми, а между данными Панина и Лобанова (аэродинамический метод) корреляция вообще оказалась отрицательной. Лучше всех коррелируют с другими рядами оценки испарения, полученные методом водного баланса, а хуже — данные Панина. Как видим, даже совершенный метод расчета еще не гарантирует высокой точности, если гидрометеорологические данные не соответствуют требованиям метода к исходной информации. Таким образом, приведенные выше результаты свидетельствуют о явно неудовлетворительном состоянии проблемы изученности испарения на основе стандартных гидрометеорологических данных в приземном слое над морем.

Похожий вывод был сделан позже в работе [8], согласно которой в настоящее время нет возможности рассчитать испарение с поверхности Каспийского моря по данным инструментальных наблюдений, поскольку такая информация в требуемом объеме отсутствует.

Очевидно, необходим поиск альтернативных способов определения испарения с морской поверхности. В частности, большие надежды возлагаются на спутниковую информацию, которая ассимилируется в архивах ре-анализа и используется при построении мощных климатических моделей. При этом возможно два подхода. В первом из архива ре-анализа выбираются спутниковые данные

температуры поверхности воды, влажность воздуха, скорость ветра в приводном слое и др., которые необходимы для расчета испарения. Таким образом, например, определялось испарение на основе известного архива NCEP/NCAR Reanalysis-1 [8, 13] и архива GHRSSST (GODAE High Resolution SST) [14]. В работе [8] с учетом относительно редкой сетки ( $1,9^\circ \times 1,9^\circ$ ) был осуществлен переход к более плотной сетке с шагом в 30 минут. Данные к новой сетке приводились методом билинейной интерполяции, который был выбран из-за того, что при минимальной сложности он даёт довольно гладкий результат. Затем были выполнены расчеты и построены карты по данным ре-анализа в новой сетке для Каспийского моря для величин, использованных при расчете испарения: температуре воды, воздуха, скорости ветра, удельной влажности, атмосферного давления за период 1948—2002 гг., которые сравнивались с натурными данными на о. Тюлений и гмс Махачкала. Сравнение показало существенные расхождения, особенно для Махачкалы. Однако расчет непосредственно испарения в данной работе не выполнен. Он был выполнен по данной методике за 1948—2002 гг. в работе [13]. Среднемноголетнее значение испарения составило 985 см. В работе [14] использовался комбинированный подход, когда часть переменных (температура воды, скорость ветра, влажность воздуха) определялась спутниковым зондированием (архив GHRSSST, GODAE High Resolution SST), а другая часть (атмосферное давление, температура воздуха) по данным прибрежных метеостанций. Среднее значение испарения за 2000—2004 гг. составило 700 мм/год, что явно занижено, при этом межгодовая изменчивость достигала  $\pm 27\%$ .

Другой подход заключается в непосредственном использовании климатических моделей, в которых рассчитывается испарение (затраты тепла на испарение). К сожалению, в документации к моделям обычно не указываются конкретные методы расчета и вычислительные схемы, что затрудняет анализ результатов. Кроме того, высокая неопределенность в оценках испарения связана с тем, что точность их практически невозможно проверить, ибо не существует «эталонных» оценок испарения. Дополнительная проблема заключается в морфометрических особенностях Каспия: его вытянутость по меридиану, значительные различия в климатическом режиме западного и восточного побережья, которые приводят к огромным пространственным градиентам многих гидрологических характеристик, особенно осадков. Однако других альтернативных вариантов дистанционным методам нет.

Цель настоящей работы состоит в сопоставлении межгодовой изменчивости испарения по различным архивам ре-анализа и климатическим моделям для периодов повышения уровня (1979—1995 гг.) и его понижения (с 1996 г.).

### Исходные данные

Каспий является самым уникальным и непредсказуемым в мире водоемом по уровенному режиму. За последние 2000 лет, по данным палеоклиматических реконструкций, размах колебаний мог составить 12 м. Самая низкая отметка уровня отмечалась в середине V в. ( $-34,5$  м), наивысшая — в начале нашей эры ( $-22,5$  м). Наличие серий длительных однонаправленных колебаний большой амплитуды

из-за бессточности водоема приводят к тому, что водная экосистема и экономика прибрежных стран вынуждены приспосабливаться к резко изменяющемуся уровенному режиму [15, 16]. На рис. 1 приводится межгодовой ход УКМ с 1950 г. по 2022 г. Для оценки УКМ до 1993 г. использовались данные четырех береговых станций, а после 1993 г. — данные по уровню, полученные с помощью альтиметрии. Нетрудно заметить, что для колебаний УКМ характерны две противоположные фазы с длительными однонаправленными изменениями уровня: понижения и повышения. Стремительный рост уровня на 2,4 м к 1995 г. сменился столь же стремительным, особенно после 2010 г., снижением уровня.

В работе использовались несколько хорошо известных спутниковых глобальных архивов ре-анализа, пользующихся высокой репутацией. Это архив NCEP/NCAR (*англ.* National Center for Atmospheric Research, Национальный центр исследований атмосферы США) Reanalysis-1 [17] и его продолжение архив NCEP/DOE AMIP-II reanalysis (*англ.* National Centers for Environmental Prediction, Department of Energy — Национальный центр экологических прогнозов США, Департамент энергетики; *англ.* Atmospheric Model Intercomparison Project) (Reanalysis-2) [18]. Первоначально R-2 предназначался для исправления выявленных в R-1 недостатков. Однако поскольку проект R-2 стал показывать многообещающие результаты, то он дополнительно стал использоваться для анализа, интерпретации, моделирования и синтеза большого массива разнородных натуральных данных. В описании глобальных проектов R-1 и R-2 четко указано, что «оба повторных анализа являются глобальными, привязаны к сетке и инициализируются исходными данными с наземных приборов, аэростатов, самолетов и спутников» (<https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/reanalysis-1-2>). Отсюда видно,

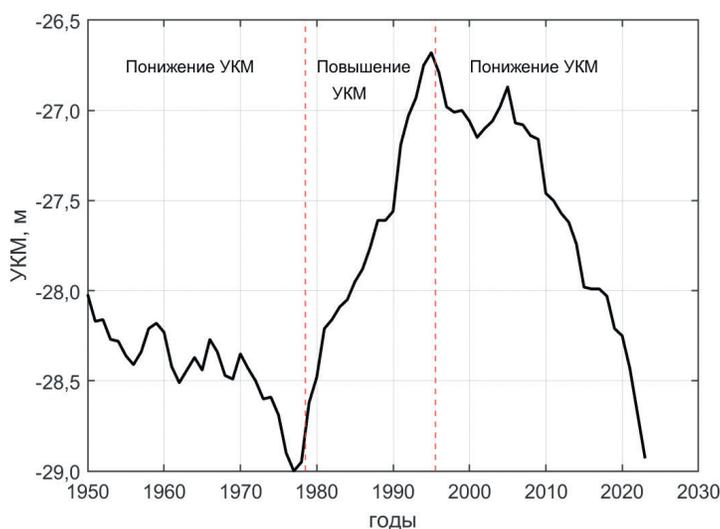


Рис. 1. Межгодовой ход уровня Каспийского моря с 1950 г. по 2022 г.

Fig. 1. Interannual variations in the Caspian Sea level from 1950 to 2022.

что в этих архивах применяется комбинированный подход к усвоению всех видов исходной информации, однако основой является дистанционное зондирование со спутников. С большой вероятностью расчет затрат тепла на испарение в обоих архивах осуществлялся с помощью традиционного аэродинамического метода. Оба архива пользуются постоянной поддержкой. Пространственное разрешение  $1,9^\circ$  по широте и долготе. На акватории Каспия с таким разрешением можно выделить 12 точек: по 4 в северной, центральной и южной частях моря. Данные архива R-2 находятся в свободном доступе на сайте ([http://apdrc.soest.hawaii.edu/dods/public\\_data/Reanalysis\\_Data/NCEP/NCEP2/monthly/gaussian\\_grid/dlwrf](http://apdrc.soest.hawaii.edu/dods/public_data/Reanalysis_Data/NCEP/NCEP2/monthly/gaussian_grid/dlwrf)), а данные архива R-1 на сайте [https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/.Diagnostic/.surface/.latent/.heat\\_flux](https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/.Diagnostic/.surface/.latent/.heat_flux).

Для выбранных точек выбирались среднемесячные значения затрат тепла на испарение за период с 1979 г. по 2024 г. для архива R-1 и с 1979 г. по 2018 г. для архива R-2, которые пересчитывались в испарение. Затем простым арифметическим осреднением находилась оценка испарения для всего моря. При сравнении испарения этих архивов (рис. 2) обнаружено, что в период повышения уровня Каспийского моря (1979—1995 гг.) значения испарения практически идентичны: величины трендов одинаковы, средние значения за период различаются на 3 см водного эквивалента в год. В период понижения УКМ (с 1996 г.) различия более ощутимы: величины трендов противоположны, средние значения за период различаются на 7 см водного эквивалента в год. При сравнении среднемноголетних значений наибольшие изменения затрагивают самые северные точки (значения R-2 больше

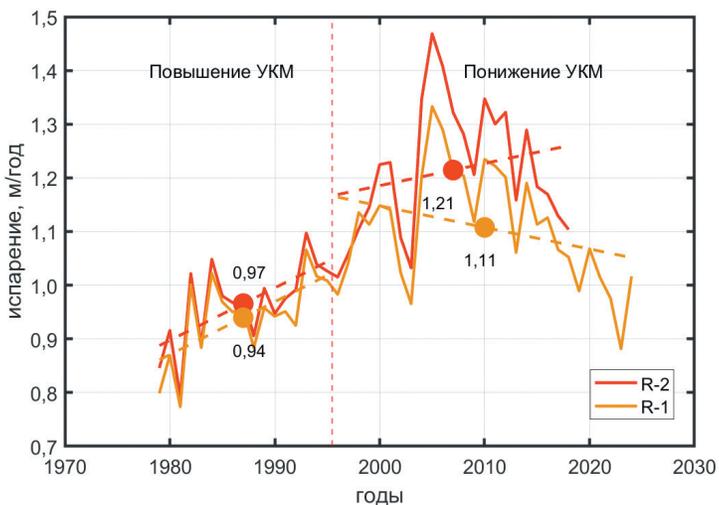


Рис. 2. Межгодовой ход среднего для моря испарения (в м) по архивам ре-анализа R-1 и R-2.

Средние оценки испарения для периодов подъема и повышения уровня моря возле кружков.

Fig. 2. Interannual variation of the average sea evaporation (in m) according to the R-1 and R-2 reanalysis archives.

Average evaporation estimates for periods of sea level rise and fall near the circles.

значений R-1 на 10—20 см/год), и южные точки (39° с.ш.) (R-1 больше R-2 на 5 см в год). Оценки испарения по архиву R-1 представляются более реалистичными.

Архив ERA-5, представляет собой атмосферный ре-анализ глобального климата ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) пятого поколения, охватывающий период с января 1940 г. по настоящее время. Ежемесячные обновления массива ERA5 гарантированного качества (с 1979 г. по настоящее время) публикуются в течение 3 месяцев в режиме реального времени. Реанализ ERA-5 объединяет данные разных моделей с наблюдениями со всего мира в глобально полный и согласованный набор данных с использованием законов физики. Данные охватывают Землю в сетке с шагом 31 км. Подробная документация архива содержится в работе [19]. На акватории Каспийского моря было выделено 42 широтных разреза с шагом 31 км, на которых были размещены точки архива ERA5. Число точек на разрезах варьировалось от 8 до 26. Для выбранных точек из архива ERA5 [20] выбирались среднемесячные значения испарения за период с 1979 г. по 2024 г., которые вначале усреднялись для каждой широты, а затем для всего моря. При этом учитывалось число точек на каждой широте, т.е.

$$E_{cp} = N^{-1} \sum_{i=1}^N E_i * n_i, \text{ где } N \text{ — суммарное число точек, равное 700.}$$

MERRA-2 представляет новейший ретроспективный атмосферный анализ современной спутниковой эпохи, созданный Управлением глобального моделирования и ассимиляции НАСА (GMAO). MERRA-2 использует типы наблюдений, недоступные для своего предшественника MERRA (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications). Основной причиной замены MERRA на MERRA-2 является то, что MERRA (выпущенная в 2008 г.) не способна обрабатывать важные новые типы данных, а устаревание и выход из строя старых спутниковых приборов значительно сократили объём данных, доступных для обработки при проведении предыдущего повторного анализа. Система использует обновлённую версию глобальной атмосферной модели GEOS и охватывает период спутниковых наблюдений с 1980 г. по настоящее время с пространственным разрешением  $0,5^\circ \times 0,625^\circ$  и временным разрешением 1 час. Цели MERRA-2 — предоставить однородную информацию о глобальной атмосфере с регулярной сеткой и включить дополнительные аспекты климатической системы, в том числе состав газов (стратосферный озон), улучшенное представление о поверхности суши и криосферных процессов. Документацию архива можно найти в работе [21]. Продукты MERRA-2 доступны онлайн через Центр информационных услуг NASA Goddard Earth Sciences Data (GES DISC). Данные по затратам тепла на испарение LE содержатся в открытом доступе на сайте [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2TMNXFLX\\_5.12.4/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2TMNXFLX_5.12.4/summary). За период с 1980 г. по 2024 г. были выбраны среднемесячные значения LE на 21 широтном разрезе, включающие от 4 до 11 точек, которые делением на L переводились в испарение. Всего  $N = 140$ . Среднее испарение для моря определялось точно также, как по архиву ERA-5.

Кроме того, в работе использовались оценки испарения за период с 1979 г. по 2015 г., рассчитанные в [22] по климатической модели Climate Forecast System

(CFS), представляющей собой полностью связанную климатическую модель, включающую компоненты атмосферы, океана, морского льда и суши.

В большинстве глобальных климатических моделей, а также в массовых экспериментальных расчетах наиболее широкое распространение получил аэродинамический метод (балк-метод), несомненным достоинством которого является то, что он требует минимум исходной информации, т.е. данных только о средней скорости ветра, температуре и влажности воздуха на высоте 10 м ( $U_{10}$ ,  $T_{10}$ ,  $q_{10}$ ) и температуре поверхности моря  $T_w$  [23]:

$$E = \rho_a C_E (q(T_w) - q_{10}) U_{10}, \quad (1)$$

где  $\rho_a$  — плотность воздуха,  $C_E$  — коэффициент влагообмена (число Дальтона),  $q(T_w)$  — насыщающая упругость водяного пара, определяемая по температуре воды (в океане с учетом солёности),  $q_{10}$  и  $U_{10}$  — соответственно удельная влажность воздуха и скорость ветра на высоте 10 м. В некоторых случаях стандартная высота берется на высоте 2 м. Величина  $\rho_a$  обычно принимается постоянной. Значения температуры воздуха и воды, скорость ветра определяются непосредственно по спутниковым данным, удельная влажность в приводном слое — через влагосодержание атмосферы, которое с высокой точностью измеряется со спутников. Частным случаем аэродинамического метода является закон Дальтона, согласно которому, скорость испарения пропорциональна дефициту влажности. Наибольшие трудности при оценке величины  $E$  связаны с определением числа Дальтона. Поскольку до настоящего времени еще не найдены универсальные зависимости, то в расчетах используются самые различные варианты, начиная от принятия  $C_E$  постоянной величиной, до сложных многопараметрических зависимостей  $C_E$  от характеристик приводного слоя [2].

### Результаты расчетов и их обсуждение

На рис. 3 приводится межгодовой ход осредненных для акватории моря оценок испарения по 5 разным архивам ре-анализа. Черной кривой дается среднее значение испарения, рассчитанное до 2015 г. по всем архивам, до 2018 г. по 4 архивам и далее по 3 архивам. Наиболее высокое испарение в период повышения уровня соответствует архиву CFS, а в период понижения — архиву R-2. В отдельные годы расхождения между оценками испарения огромные. В 2005 г. расхождение составляет 50 см, т.е. половину годовой оценки испарения.

В табл. 2 представлены количественные статистические характеристики испарения отдельно для периодов повышения и понижения уровня моря. По данным работы [1], среднемноголетнее испарение с акватории моря равно 97 см. В период роста уровня эта оценка практически совпадает со средним испарением, приведенным в табл. 2 (96 см). В период падения уровня среднее испарение заметно выше (107 см). Разность в оценках испарения 11 см. В работе [22] разность между испарением в периоды повышения и снижения уровня составила 9 см, однако, по мнению авторов, это стало доминирующим фактором перехода от роста УКМ к его падению.

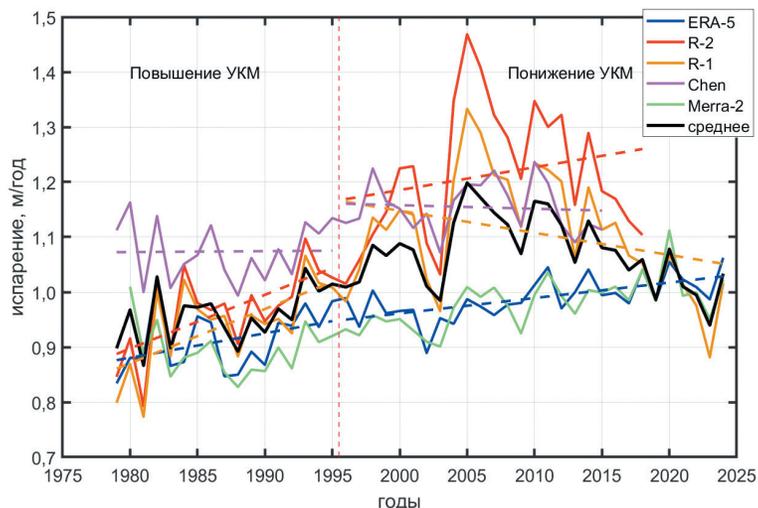


Рис. 3. Межгодовой ход осредненных для акватории моря оценок испарения по 5 разным архивам ре-анализа для периодов роста (1979—1995 гг.) и падения (с 1996 г.) уровня.

Черной кривой дается среднее значение испарения. Пунктир — линии тренда.

Fig. 2. Interannual variation of averaged evaporation estimates for the sea area based on 5 different reanalysis archives for periods of rising (1979—1995) and falling (since 1996) sea level.

The black curve shows the average evaporation value. The dotted line is the trend line.

Таблица 2

Статистические характеристики испарения для периодов роста и понижения уровня для разных архивов  
Statistical characteristics of evaporation for periods of increase and decrease in the level for different archives

Архив	Рост уровня (1979—1995 гг.)				Понижение уровня (с 1996г)			
	$X_{cp}$ , м	СКО, м	$Tr$ , см/год	$R^2$	$X_{cp}$ , м	СКО, м	$Tr$ , см/год	$R^2$
R-1	0,94	0,08	0,99	0,40	1,11	0,11	-0,40	0,10
R-2	0,97	0,08	0,98	0,41	1,21	0,12	0,41	0,05
ERA-5	0,92	0,06	0,44	0,16	0,99	0,04	0,28	0,39
MERRA-2	0,89	0,05	-0,17	0,03	0,98	0,05	0,32	0,38
CFS (Chen et al. 2017)	1,07	0,05	0,017	0,00	1,15	0,05	-0,07	0,007
Среднее	0,96	0,05	0,45	0,21	1,07	0,06	-0,20	0,06

Из табл. 2 видно, что расхождение в испарении между архивами составляет 13 см при росте уровня и 23 см при его падении. Межгодовая изменчивость, согласно СКО, для периодов роста и падения уровня в среднем практически одинакова (5 и 6 см), но при этом различие между архивами в первом случае всего 3 см,

а во втором — 8 см. Изменчивость испарения архивов R-1 и R-2 в период падения уровня в 2—3 раза выше по сравнению с другими архивами.

Очень интересным представляется поведение трендов испарения. В период роста уровня значительный рост испарения наблюдается для архивов R-1 и R-2 (табл. 2). Для других архивов тренд испарения незначим по критерию Фишера при  $\alpha = 0,05$ , поэтому для  $E_{cp}$  тренд хотя и положительный, но на грани значимости. Для периода понижения уровня уверенный рост испарения демонстрируют архивы ERA-5 и Метга-2. Остальные тренды незначимы, причем для R-1 испарение уменьшается, что не согласуется с трендом на потепление климата. Согласно архивам R-1 и R-2, до 2005 г. отмечался резкий рост испарения, затем началось не менее стремительное его снижение. К 2023 г., по архиву R-1, оно снизилось на 45 см. Заметим, что по архивам ERA-5 и Метга-2, испарение также начало уменьшаться с 2020 г.

Среднее испарение растет при росте уровня и уменьшается при его падении. Вот такой внешне странный вывод следует из табл. 2, ибо, исходя из уравнения водного баланса моря, физически более обоснованным является противоположный вывод. Впрочем, такой результат становится понятным, если обратиться к тренду суммарного притока речных вод, который за период падения уровня равен  $-2,83 \text{ км}^3/\text{год}$ , что соответствует уменьшению стока на  $84,9 \text{ км}^3$  или 23,8 см слоя. Отсюда следует, суммарный приток речных вод к морю уменьшался со скоростью  $0,79 \text{ см}/\text{год}$ , что в 4 раза выше тренда по испарению. Очевидно, это объясняет ведущую роль притока речных вод по сравнению с испарением в падении УКМ.

В табл. 3 приводятся коэффициенты корреляции испарения по данным разных архивов для периодов повышения (верхний треугольник) и понижения (нижний треугольник) морского уровня. Как и следовало ожидать, почти функциональная связь отмечается между испарением архивов R-1 и R-2. Довольно высокая связь наблюдалась также между испарением по архивам CFS и MERRA-2 в период роста УКМ. Среднее испарение имеет высокую корреляцию с испарением по архивам R-1 и R-2, так как изменчивость испарения по этим архивам наибольшая.

Таблица 3

Корреляционная матрица испарения по данным разных архивов. Верхний треугольник — период повышения уровня. Нижний треугольник — период понижения уровня

Correlation matrix of evaporation based on data from different archives. Upper triangle — period of rising sea level. Lower triangle — period of falling sea level

Архив	ERA-5	R-1	R-2	CFS	MERRA-2	Среднее
ERA-5	1,00	0,62	0,62	0,55	0,53	0,82
R1	-0,01	1,00	0,98	0,36	0,21	0,87
R2	0,18	0,96	1,00	0,42	0,26	0,89
Chen	0,20	0,67	0,52	1,00	0,89	0,74
MERRA-2	0,74	0,27	0,55	0,55	1,00	0,64
Среднее	0,12	0,98	0,95	0,55	0,39	1,00

По трем архивам R-1, ERA-5 и MERRA-2, с наиболее полными данными за период с 1979 г. по 2024 г. дополнительно выполнен расчет температуры воздуха (ТВ) и температуры поверхности моря (ТПМ) точно таким же образом, как определялось среднее испарение. В период повышения УКМ, по данным всех архивов, характерны случайные колебания ТВ с отсутствием тренда. Наиболее высокая ТВ свойственна архиву R-1, а наименьшая — архиву MERRA-2. В период понижения УКМ в ТВ отмечается наличие устойчивых трендов для всех архивов, из них самый высокий для архива ERA-5. Похожая картина наблюдается в изменчивости ТПМ.

На рис. 4 приводится межгодовой ход осредненных значений ТВ, ТПМ и  $E_{cp}$  для трех рассматриваемых архивов за период с 1979 г. по 2024 г. Нетрудно увидеть, что в период роста УКМ тренды в ТВ и ТПМ отсутствуют, но отмечается сильный положительный тренд в  $E_{cp}$ . При падении УКМ значимый положительный тренд имеет место только для температуры воздуха. Для всех трех характеристик средние значения в период падения уровня несколько увеличились по сравнению с падением уровня (табл. 4). При этом наиболее высокая межгодовая изменчивость согласно коэффициенту вариации отмечается для испарения, наименьшая — для ТПМ. В период роста уровня при повышении ТВ наблюдается тенденция к уменьшению испарения ( $r = -0,40$ ), а при его падении корреляция

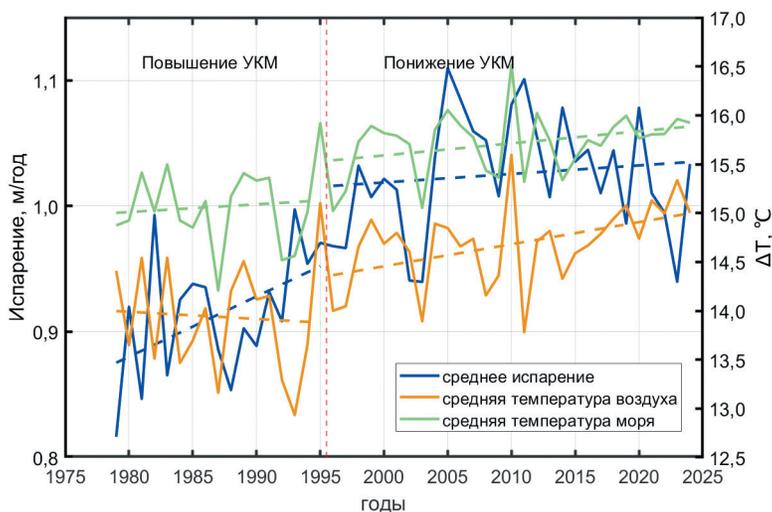


Рис. 4. Межгодовой ход средних значений температуры воздуха, температуры поверхности моря и испарения по данным 3 архивов ре-анализа R-1, ERA-5 и MERRA-2 для периодов роста (1979—1996 гг.) и падения (с 1996 г.) уровня моря.

Пунктирной линией даны тренды.

Fig. 4. Interannual variations in average air temperature, sea surface temperature and evaporation values based on data from three reanalysis archives R-1, ERA-5 and MERRA-2 for periods of rising (1979—1996) and falling (since 1996) sea level.

The dotted line shows the trends.

между ними отсутствует. Итак, при использовании одних и тех же архивных данных можно полагать, что испарение почти не зависит от ТВ, хотя довольно часто, особенно в долгосрочных прогнозах и при построении климатических моделей, такая зависимость считается очень важной.

Таблица 4

Статистические характеристики осредненных для архивов R-1, MERRA-2, ERA-5 значений испарения, температуры воздуха и температуры воды для периодов повышения (1979—1995 гг.) и понижения (с 1996 г.) уровня моря

Statistical characteristics of the averaged values of evaporation, air temperature and water temperature for the periods of sea level rise (1979—1995) and fall (since 1996) for the R-1, MERRA-2, ERA-5 archives

	Среднее, повышение / понижение	Коэффициент вариации, % повышение / понижение	Тренд, повышение понижение	Коэффициенты корреляции, (верхний треугольник — повышение уровня, нижний треугольник — понижение уровня)		
Испарение, м/год	0,91 / 1,03	5,5 / 4,9	5 мм/год 0,7 мм/год	1	-0,40	-0,05
Температура воздуха, °С	13,94 / 14,68	4,1 / 2,8	-0,007 °С/год 0,020 °С/год	0,06	1	0,89
Температура воды, °С	15,07 / 15,71	2,6 / 2,0	0,008 °С/год 0,012 °С/год	0,33	0,91	1

Рассмотрим, от чего зависит такое поведение межгодовых колебаний испарения. Испарение непосредственно связано с морфометрическим фактором (МФ), т.е. изменяющейся площадью водоема, поскольку его берега не являются отвесными, поэтому она при изменениях уровня стремится вернуть его в некоторое равновесное состояние. Итак, морфометрический фактор отражает отрицательную обратную связь в механизме колебаний УКМ, образованную зависимостью объема испарения от уровня моря [24]. Хотя значение данной обратной связи как стабилизирующего фактора в колебаниях уровня известно давно, однако практические оценки изменений испарения под влиянием МФ для длительных периодов роста или падения уровня отсутствуют. Вклад МФ в водный баланс моря при удлинении постоянного периода роста (падения) уровня будет быстро возрастать.

Когда уровень находится в равновесном состоянии, приток воды к морю за счет речных вод и осадков ( $V_{(Q+P)}$ ) равен ее оттоку за счет испарения и стока в з. Кара-Богаз-Гол ( $V_{(E+q)}$ ), поэтому площадь моря не меняется во времени. Предположим, начало отмечаться устойчивое превышение оттока над притоком, т.е. сформировалась фаза понижения уровня. В этом случае уровень и площадь моря уменьшаются. В результате происходит осушение некоторой части мелководных районов, прежде всего северной части моря, поэтому суммарный объем испарившейся влаги с акватории моря ( $\text{км}^3$ ) уменьшается на тот ее объем, который был бы при отсутствии осушения части акватории. При длительном превышении оттока воды над ее притоком эта разность увеличивается и в некоторый момент времени отток становится таким, что новое осушение акватории моря прекращается. Уровень приходит в новое равновесное состояние, при котором  $V_{(Q+P)} = V_{(E+q)}$ .

В работе [25] МФ рассматривается как «реактивный» фактор, ограничивающий размах колебаний уровня, представляющий зависимость между наполнением водоема и количеством теряемой им воды, для оценки которого предложена формула:

$$\Delta V_i^{\text{МФ}} = -E_{\text{эф}i} (A_{\text{Mi}} - A_{\text{M}}^*), \quad (2)$$

где  $\Delta V_i^{\text{МФ}}$  означает изменения объема моря в  $i$ -год за счет действия МФ,  $E_{\text{эф}i}$  — эффективное испарение, т.е. разность между испарением и осадками на акваторию моря. В скобках дано отклонение площади моря в  $i$ -тый год от среднемноголетней площади  $A_{\text{M}}^*$ . Последовательное суммирование за  $m$  лет ( $\sum \Delta V_i^{\text{МФ}}$ ) и сравнение с изменением объема вод, рассчитанным по уравнению водного баланса ( $\sum \Delta V_i^{\text{кп}}$ ), позволяет оценить вклад МФ. Однако, на наш взгляд, уравнение (2) не в полной мере отвечает сути МФ, ибо другие компоненты водного баланса (приток речных вод и сток в залив КБГ) также влияют на изменения площади моря. Очевидно, более точной оценкой морфометрического фактора может служить формула:

$$\Delta V_i^{\text{МФ}} = (v_{(Q+P)i} - v_{(E+q)i}) \Delta A_i. \quad (3)$$

Или с учетом  $P \ll Q, q \ll E$ ,

$$\Delta V_i^{\text{МФ}} = (v_{Qi} - v_{Ei}) \Delta A_i, \quad (3, a)$$

где  $v_x$  — компонента водного баланса в единицах слоя,  $\Delta A_i$  — разность между площадью моря, соответствующей начальному уровню моря, от которого ведется отсчет ( $A_{\text{н}}$ ) и площадью моря в  $i$ -год  $A_i$ . При  $i = 0$  МФ отсутствует, уравнение (3) будет представлять климатологический водный баланс, определяемый по площади  $A_{\text{н}}$ . При устойчивом понижении уровня  $A_i < A_{\text{н}}$  и разность  $\Delta A_i$  по абсолютной величине увеличивается. Это происходит, когда  $(v_{Qi+1} - v_{Ei+1}) < (v_{Qi} - v_{Ei})$ . Произведение двух отрицательных величин дает положительное значение  $\Delta V_i^{\text{МФ}}$ . При росте уровня  $A_i > A_{\text{н}}$  имеем  $(v_{Qi+1} - v_{Ei+1}) > (v_{Qi} - v_{Ei})$  и, соответственно, увеличение  $\Delta A_i$ .

Оценка вклада МФ в изменения УКМ может быть выполнена путем последовательного суммирования на любой  $i$ -год или сразу за период  $m$  на основе оценок линейных трендов компонент водного баланса моря. Выполним приближенную оценку МФ по рассмотренной схеме на примере падения уровня в целом за период с 1995 г. 2024 г. Исходя из морфометрии водоема [1, 7], площадь моря к 2024 г. уменьшилась на 43 тыс. км<sup>2</sup>, в том числе в Северном Каспии (СК) на 37 тыс. км<sup>2</sup>, причем при дальнейшем падении уровня осушаемая площадь моря будет еще больше возрастать и соответственно увеличиваться объем воды, который мог бы испаряться с нее.

При отметке уровня  $-28$  м площадь моря равна 376 тыс. км<sup>2</sup>. Тогда площадь северного Каспия (СК)  $0,25 \times 376 = 94$  тыс. км<sup>2</sup>, т.е. площадь СК сократилась на 39 %. Среднемноголетнее испарение в СК составляет около 80 км<sup>3</sup>/год, а всего моря примерно 360 км<sup>3</sup>/год [10], т.е. оно составляет 22 % от суммарного испарения. С 1 тыс. км<sup>2</sup> в Северном Каспии испаряется  $80/94 = 0,85$  км<sup>3</sup>/год. Тогда в 2024 г. с дополнительной площади 37 тыс. км<sup>2</sup> по отношению к первоначальной площади

моря в 1995 г. могло бы испариться  $31,45 \text{ км}^3/\text{год}$ , что применительно к испарению со всей акватории Каспия составит толщину слоя воды  $31,45/357 = 0,088 \text{ м/год}$  или  $8,8 \text{ см/год}$ . Отсюда следует, что в 2024 г. испарение при начальной площади  $A_n$  могло бы составить  $103 - 8,8 = 94,2 \text{ см}$ . В среднем за 30-летний период испарение за счет МФ уменьшалось со скоростью  $0,29 \text{ см/год}$ . За 30 лет суммарное дополнительное испарение за счет МФ только на акватории Северного Каспия могло бы составить около  $400 \text{ км}^3$ , причем эта цифра будет возрастать при последующих снижениях уровня. Отметим, что около  $400 \text{ км}^3$  испаряется за год со всей акватории моря. С учетом того, что к 2038 г. сток в залив КБГ может вообще прекратиться, следует ожидать переход уровня из фазы понижения в фазу стабилизации, состоящую из незначительных случайных колебаний без значимого тренда. При этом вследствие бессточности водоема роль МФ в стабилизации уровня, тем более из-за прекращения стока в з. КБГ, может быть решающей.

Сравним указанную оценку МФ с изменениями компонент водного баланса. Повышение испарения в соответствии с трендом (табл. 4) в 2024 г. составляет  $0,7 \text{ мм/год} \times 30 \text{ лет} = 2,1 \text{ см}$ . Отсюда видно, что МФ в 4 раза превышает изменения условно «фактического» испарения с моря. По сути, МФ за период падения уровня в 1995—2024 гг. доминирует над межгодовой изменчивостью испарения. Оценка тренда суммарного притока речных вод к морю равна  $-2,83 \text{ км}^3/\text{год}$ , что соответствует уменьшению стока на  $84,9 \text{ км}^3$  или  $23,8 \text{ см}$  слоя. Отсюда видно, что оценка уменьшения притока речных вод к морю более, чем в 10 раз выше роста испарения. Именно уменьшение притока речных вод оказывает в данном случае решающее воздействие на уменьшение площади Каспия. Итак, даже приближенная оценка МФ показывает, что его вклад в изменения водного баланса и уровня моря составляет  $8,8/25,9 = 0,34$ , т. е. он весьма значительный, поэтому его необходимо учитывать в расчетах водного баланса за продолжительные периоды времени, особенно при длительных однонаправленных изменениях уровня. Очевидно, что морфометрический фактор значительно искажает межгодовой ход испарения, которое тем больше, чем больше падает уровень моря.

Если в рассматриваемых климатических моделях испарение определялось аэродинамическим методом, то наиболее важными переменными в формуле (1) являются вертикальный перепад влажности в приводном слое ( $q(T_w) - q_{10}$ ) и скорость ветра  $U_{10}$ . Как было указано выше,  $q(T_w)$  определяется по температуре воды, а удельная влажность через влагосодержание атмосферы, которое измеряется по спутниковым данным с высокой точностью. Поскольку одновременно существует высокая корреляционная связь между  $q_{10}$  и ТВ, то должна существовать связь и между перепадами влажности и температуры в приводном слое. Если принять коэффициент влагообмена постоянным, то отсюда следует, что  $E = F[\Delta T_{10}, U_{10}]$ . Осредненное испарение по трем архивам рассчитывалось с помощью пошагового алгоритма МЛР отдельно для периодов повышения ( $E_+$ ) и понижения ( $E_-$ ) уровня:

$$E_+ = 0,12\Delta T + 0,02V + 0,67 \quad (4)$$

$$E_- = 0,18V + 0,08\Delta T + 0,05. \quad (5)$$

Коэффициент детерминации первой зависимости  $R^2 = 0,55$ , стандартная ошибка модели — 0,04 м, относительная ошибка в долях СКО = 0,80, причем на долю  $\Delta T$  приходится 54 % объясненной дисперсии  $E_+$ , на долю  $V$  — 1 %. Коэффициент детерминации второй зависимости  $R^2 = 0,42$ , при этом стандартная ошибка модели и относительная ошибка в долях СКО полностью совпадают с первой зависимостью. Но в отличие от первой модели главной переменной является ветер, на долю которого приходится 31 % объясненной дисперсии  $E_-$ , на долю  $\Delta T$  — 11 %. Обе модели являются адекватными по критерию Фишера.

Итак, мы видим принципиальные различия формирования изменчивости испарения в период роста и падения уровня. При повышении уровня испарение практически полностью зависит от перепада температуры. При понижении уровня главным фактором является ветер. Более детальный анализ зависимости (4) показал, что влияние ветра на испарение идет через тренд, в то время как корреляция между ними носит незначимый характер. Влияние  $\Delta T$  на испарение, наоборот, заключается в высокой корреляции между ними.

На рис. 5 представлено сопоставление «фактических» и вычисленных по зависимостям (4)—(5) значений испарения. Нетрудно видеть почти полное совпадение средних значений. Если при росте уровня отмечается идентичное направление в сторону повышения «фактических» и вычисленных значений испарения, то при падении уровня в «фактических» значениях испарения тренд отсутствует, в то время как в вычисленных значениях присутствует значимый отрицательный тренд.

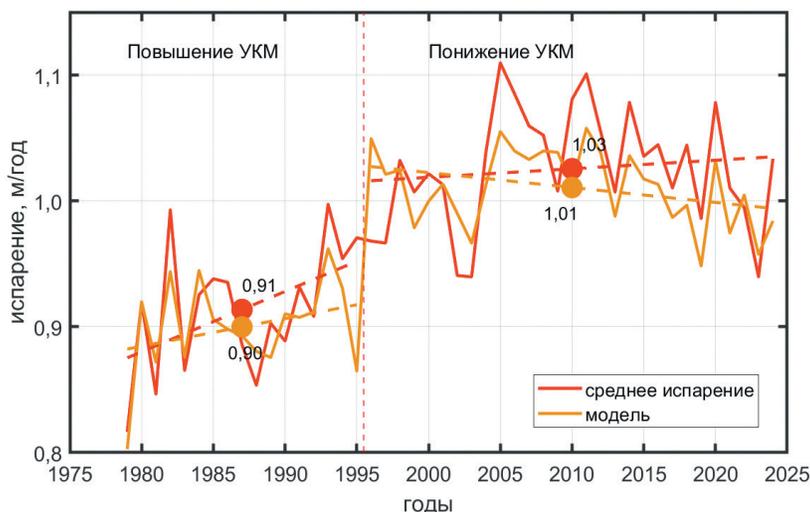


Рис. 5. Межгодовая изменчивость «фактических» и вычисленных по зависимостям (4)—(5) значений испарения.

Fig. 5. Interannual variability of “actual” and calculated evaporation values using dependencies (4)—(5).

## Заключение

Использование стандартных гидрометеорологических данных в приземном слое над морем свидетельствуют о неудовлетворительном состоянии проблемы изученности испарения. По сути, единственной альтернативой определения испарения с морской поверхности является спутниковая информация, которая ассимилируется в архивах ре-анализа. В данной работе обсуждается использование 5 архивов: R-1, R-2, ERA5, MERRA-2 и CFS для оценки межгодовой изменчивости испарения для периодов повышения уровня (1979—1995 гг.) и его понижения (с 1996 г.). Рассчитаны основные статистические характеристики. Показаны расхождение в межгодовом ходе испарения по данным архивов, которое составляет 13 см при росте уровня и 23 см при его падении. Корреляционные связи между испарением различных архивов различаются для периодов повышения и понижения уровня. Как и следовало ожидать, наиболее тесные связи отмечаются между архивами R-1 и R-2.

Если по данным 5 архивов в межгодовом ходе среднего испарения при повышении уровня также отмечается уверенное повышение, то при падении уровня испарение имеет тенденцию к уменьшению. Итак, среднее испарение растет при повышении уровня и уменьшается при его падении. Очевидно, исходя из уравнения водного баланса моря, физически более обоснованным представляется противоположный вывод. Впрочем, такой результат становится понятным, если обратиться к тренду суммарного притока речных вод к морю, который в несколько раз выше тренда испарения в периоды повышения и понижения уровня. Так, при падении уровня тренд притока речных вод в 4 раза выше тренда в испарении.

Для 3 архивов (R-1, ERA5, MERRA-2), имеющих постоянную поддержку во времени, за период с 1979 г. по 2024 г. рассчитаны температура воздуха (ТВ) и поверхности моря (ТПМ). Показана слабая корреляция этих параметров с испарением, причем при росте температуры воздуха она отрицательная. Это противоречит распространенному мнению о том, что при потеплении климата испарение повышается. Именно такое предположение часто принимается в долгосрочных прогнозах уровня и при построении климатических моделей.

Предложена формула определения морфометрического фактора и показана его приближенная оценка для периода понижения уровня на основе анализа трендов компонент водного баланса. Под действием МФ испарение уменьшалось со скоростью 0,29 см/год и в 2024 г. уменьшилось на 8,8 см. Фактически испарение к 2024 г. повысилось на 2,1 см, т. е. влияние МФ на испарение в 4 раза выше. Такая ситуация возникла потому, что уменьшение притока речных вод за счет отрицательного тренда к морю более чем в 10 раз больше роста испарения. Учет роли МФ необходим в расчетах водного баланса за продолжительные периоды времени, особенно при длительных однонаправленных изменениях уровня. МФ значительно искажает межгодовой ход испарения, которое тем больше, чем дольше падает уровень моря. С учетом того, что к 2038 г. сток в залив КБГ может вообще прекратиться, следует ожидать переход уровня из фазы понижения в фазу

стабилизации, состоящую из незначительных случайных колебаний без значимого тренда. При этом вследствие бессточности водоема роль МФ в стабилизации уровня из-за прекращения стока в з. КБГ, становится решающей.

Нетрудно показать, что при использовании аэродинамического метода для расчета испарения, можно получить приближенную зависимость  $E = F[\Delta T_{10}, U_{10}]$ . Осредненное испарение по трем архивам по данным о перепаде температуры и скорости ветра рассчитывалось с помощью пошагового алгоритма МЛР отдельно для периодов роста ( $E_+$ ) и падения ( $E_-$ ) уровня. Коэффициент детерминации зависимости (4) равен 0,55, причем на долю  $\Delta T$  приходится 54 % объясненной дисперсии  $E_+$ , на долю  $V$  — 1 %. Коэффициент детерминации зависимости (5)  $R^2 = 0,42$ . Главная переменная — ветер, на долю которого приходится 31 % объясненной дисперсии  $E_-$ , на долю  $\Delta T$  — 11 %. Детальный анализ зависимости (4) показал, что влияние ветра на испарение идет через тренд, в то время как корреляция между ними носит незначимый характер. Влияние  $\Delta T$  на испарение, наоборот, заключается в высокой корреляции между ними.

Авторы искренне признательны д.т.н. А. В. Фролову за содержательную дискуссию и полезные замечания, которые позволили улучшить текст статьи.

### Список литературы

1. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / Под ред. Е. С. Нестерова. М.: Триада Лтд, 2016. 378 с.
2. Малинин В. Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб.: Изд-во РГМИ, 1994. 160 с.
3. Абузьяров З. К., Нестеров Е. С. Некоторые особенности пространственно-временной изменчивости уровня Каспийского моря // Труды Гидрометцентра, 2011. Вып. 345. С. 5—22.
4. Георгиевский В. Ю., Голубев В. С. Испарение с поверхности Каспийского моря и его многолетняя изменчивость / Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. СПб: Гидрометеоиздат, 2003. С. 230—238.
5. Лобанов В. В. Испарение с поверхности Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 1987. № 10. С. 47—53.
6. Панин Г. Н., Мамедов Р. М., Митрофанов И. В. Современное состояние Каспийского моря. М.: Наука, 2005. 356 с.
7. Фролов А. В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М.: Геос, 2003. 170 с.
8. Болгов М. В., Красножон Г. Ф., Любушин А. А. Каспийские море: экстремальные гидрологические события / Под ред. М. Г. Хубляряна. М.: Наука, 2007. 381 с.
9. Смирнова К. И. Водный баланс и долгосрочный прогноз уровня Каспийского моря. Труды Гидрометцентра СССР, 1972. Вып. 94. 123 с.
10. Панин Г. Н. Испарение и теплообмен Каспийского моря. М.: Наука, 1987. 89 с.
11. Архипова Е. Г., Макарова Р. Е., Крюков В. В. Многолетние изменения испарения на Каспийском море // Труды ГОИН, 1975. Вып. 125, С. 86—94.
12. Георгиевский В. Ю. Водный баланс Каспийского моря по данным наблюдений // Труды ЛГМИ, 1982. Вып. 79, С. 76—85.
13. Трубецкова М. Д., Филимонова М. К. Об оценке испарения с поверхности Каспийского моря в современный период / Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе. Труды международной научной конференции. Москва, 19—20 октября 2006 г. С. 79—84.
14. Лебедев С. А., Сирота А. М., Остроумова Л. П., Костяной А. Г. Расчет испарения с акватории Каспийского моря по данным дистанционного зондирования / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга

- окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. Выпуск 5. Том II. М.: ООО «Азбука-2000», 2008. С. 141—147.
15. Малинин В. Н. Грозит ли Каспию судьба Арала? // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 746—760.
  16. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Уровень Каспийского моря как индикатор крупномасштабного влагообмена в системе «океан–атмосфера–суша» // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2020. № 4. С. 5—20. DOI 10.17076/lim1156.
  17. Kalnay E. and Coauthors, The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1996. Vol. 77. P. 437—471.
  18. Kanamitsu M. Description of the NMC Global Data Assimilation and Forecast System // Weather and Forecasting. 1989. V. 4. No. 3. P. 335—342. DOI: 10.1175/15200434(1989)004<0335:DOTNGD>2.0.CO;2.
  19. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2020. Vol. 146. P. 1999—2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
  20. Электронный ресурс «Copernicus Climate Data Store.» [<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=overview>] режим доступа – свободный. Дата обращения 22.02.2025.
  21. Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // J. Clim. 2017 June 20; Volume 30(Iss 13): 5419—5454. doi:10.1175/JCLI-D-16-0758.1. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
  22. Chen J. L., Pekker T., Wilson C. R. et al. Longterm Caspian Sea level change // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44. P. 6993—7001. doi:10.1002/2017GL073958.
  23. Малинин В. Н. Общая океанология. Ч. 1 Физические процессы. СПб: Изд. РГГМУ, 1998. 342 с.
  24. Фролов А. В. Особенности механизма многолетних колебаний уровня Каспийского моря // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 55. С. 120—128.
  25. Крицкий С. Н., Коренистов Д. В., Раткович Д. Я. Колебания уровня Каспийского моря. М.: Наука, 1975. 175 с.

### References

1. *Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovanie i prognoz = Water balance and level fluctuations of the Caspian Sea. Modeling and predicting.* Moscow: Triada Ltd, 2016: 378 p. (In Russ.)
2. Malinin V. N. *Problema prognoza urovnya Kaspiiskogo morya = The problem of predicting the Caspian Sea level.* St. Petersburg: RSHI Publ., 1994: 160 p. (In Russ.)
3. Abuzyarov Z. K., Nesterov E. S. Some features of spatial and temporal variability of the Caspian Sea level. *Trudy Gidrometsentra = Proceedings of the Hydrometeorological Center.* 2011; (345): (5—22). (In Russ.)
4. Georgievskiy V. Yu., Golubev V. S. Evaporation from the surface of the Caspian Sea and its long-term variability. *Gidrometeorologicheskiye aspekty problemy Kaspiyskogo morya i yego basseyna = Hydro-meteorological aspects of the problem of the Caspian Sea and its basin.* St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003; (230—238). (In Russ.)
5. Lobanov V. V. Evaporation from the surface of the Caspian Sea. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology.* 1987; (10): (47—53). (In Russ.)
6. Panin G. N., Mamedov R. M., Mitrofanov I. V. *Sovremennoye sostoyaniye Kaspiyskogo morya = Current state of the Caspian Sea.* M.: Nauka, 2005: 356 p. (In Russ.)
7. Frolov A. V. *Modelirovaniye mnogoletnikh kolebaniy urovnya Kaspiyskogo morya: teoriya i prilozheniya = Modeling of long-term fluctuations in the Caspian Sea level: theory and applications.* 2003. M.: Geos, 170 p. (In Russ.)
8. Bolgov M. V., Krasnozhon G. F., Lyubushin A. A. *Kaspiyskiye more: ekstremal'nyye gidrologicheskiye sobytiya = Caspian Sea: extreme hydrological events.* / Edit. M. G. Khublaryan. M.: Nauka, 2007: 381 p. (In Russ.)

9. Smirnova K. I. Water balance and long-term forecast of the Caspian Sea level. *Trudy Gidromettsentra SSSR = Works of the Hydrometeorological Center of the USSR*. 1972; (94): (123). (In Russ.).
10. Panin G. N. *Ispareniye i teploobmen Kaspiyskogo morya. = Evaporation and heat exchange of the Caspian Sea*. M.: Nauka, 1987: 89 p. (In Russ.).
11. Arkhipova E. G., Makarova R. E., Kryukov V. V. Long-term changes in evaporation in the Caspian Sea. *Trudy GOIN = Proceedings of GOIN*. 1975; (125):(86—94). (In Russ.).
12. Georgievskiy V. Yu. Water balance of the Caspian Sea based on observation data. *Trudy LGMI = Proceedings of the LGMI*. 1982; (79): (76—85). (In Russ.).
13. Trubetskova M. D., Filimonova M. K. On the assessment of evaporation from the surface of the Caspian Sea in the modern period / Extreme hydrological events in the Aral-Caspian region. Proceedings of the international scientific conference. M., October 19—20, 2006; (79—84).
14. Lebedev S. A., Sirota A. M., Ostroumova L. P., Kostyanoy A. G. Calculation of evaporation from the Caspian Sea using remote sensing data. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space: Physical foundations, methods and technologies for monitoring the environment, potentially hazardous phenomena and objects. Collection of scientific articles*. 2008; 5(II):(141—147). (In Russ.).
15. Malinin V. N. Does the fate of the Aral Sea threaten the Caspian? *Gidrometeorologiya I Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69):(746—760). doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-746-760. (In Russ.).
16. Malinin V. N., Gordeeva S. M. Caspian sea level as an indicator of large-scale moisture exchange in the ocean-atmosphere-land system. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2020;(4):(5—20). doi: 10.17076/lim1156. (In Russ.).
17. Kalnay E. and Coauthors, The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996; (77): 437—471.
18. Kanamitsu M. Description of the NMC Global Data Assimilation and Forecast System. *Weather and Forecasting*. 1989; 4(3):335—342. DOI: 10.1175/15200434(1989)004<0335:DOTNGD>2.0.CO;2.
19. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020;(146): 1999—2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
20. Электронный ресурс «Copernicus Climate Data Store» [<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=overview>] режим доступа — свободный. Дата обращения 22.02.2025.
21. Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *J. Clim.* 2017; 30(13): 5419—5454. doi:10.1175/JCLI-D-16-0758.1. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
22. Chen J. L., Pekker T., Wilson C. R. et al. Longterm Caspian Sea level change. *Geophysical Research Letters*. 2017; (44):6993—7001. doi:10.1002/2017GL073958.
23. Malinin V. N. *Obshchaya okeanologiya. Chast 1. Fizicheskiye protsessy. = General oceanology. Part 1 Physical processes*. SPb: Publishing house. RGGMU, 1998: 342 p.
24. Frolov A. V. Features of the mechanism of the long-term fluctuations in the Caspian sea level. *Uchenyye zapiski RGGMU = Proceedings RSHU*. 2019;(55):120—128. (In Russ.).
25. Kritsky S. N., Korenistov D. V., Ratkovich D. Ya. *Kolebaniya urovnya Kaspiyskogo morya = Fluctuations in the Caspian Sea level*. M.: Nauka, 1975: 175 p.

### Сведения об авторах

Малинин Валерий Николаевич, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами, Институт гидрологии и океанологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, malinin@rshu.ru.

Кудель Мария Дмитриевна, студентка, Институт гидрологии и океанологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, belca2004@mail.ru.

***Informations about authors***

*Malinin Valery N.*, Doctor of Geological Sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Institute of Hydrology and Oceanology, Russian State Hydrometeorological University, malinin@rshu.ru.

*Kudel Maria Dmitrievna*, student of the Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Institute of Hydrology and Oceanology, Russian State Hydrometeorological University, belca2004@mail.ru.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 30.07.2025*

*Принята в печать 26.08.2025*

*The article was received on 30.07.2025*

*The article was accepted on 26.08.2025*