

Гидрометеорология и экология. 2026. № 82. С. 75—89.
Hydrometeorology and Ecology. 2026;(82):75—89.

Научная статья
УДК [551.461.2:556.12:528.71](262.81)
doi: 10.33933/2713-3001-2026-82-75-89

Межгодовая изменчивость осадков над акваторией Каспия по спутниковым данным для периодов повышения и понижения уровня

Валерий Николаевич Малинин, Мария Дмитриевна Кудель

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

Аннотация. Для оценки межгодовой изменчивости осадков Каспийском море для периодов повышения уровня (1979—1995 гг.) и его понижения (с 1996 г.) обсуждается использование 4 спутниковых архивов ре-анализа: R-1, R-2, ERA5, MERRA-2. Отмечены расхождения в межгодовом ходе осадков по данным архивам, особенно значительные в период повышения уровня. Показано, что архивы ERA5, MERRA-2 значительно завышают осадки над морем. Выявлена полная согласованность годовых сумм осадков по архивам R-1, R-2 с другими компонентами водного баланса для различных временных промежутков. Выполнен расчет статистических характеристик осадков, показана их высокая межгодовая изменчивость и наличие отрицательных трендов осадков для обеих фаз изменений уровня. Рассматриваются особенности сезонной изменчивости осадков для периодов повышения и понижения уровня моря.

Ключевые слова: Каспийское море, осадки, водный баланс, уровень моря.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ FSZU-2026-0003.

Для цитирования: Малинин В. Н., Кудель М. Д. Межгодовая изменчивость осадков на акватории Каспия по спутниковым данным для периодов повышения и понижения уровня // Гидрометеорология и экология. 2026. № 82. С. 75—89. doi: 10.33933/2713-3001-2026-82-75-89.

Original article

Interannual variability of precipitation over the Caspian Sea using satellite data for periods of elevation and lowering of the sea level

Valery N. Malinin, Maria D. Kudel

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russian Federation

Summary. The paper considers the interannual variability of precipitation for periods of rising sea levels (1979—1995) and falling sea levels (since 1996). For this purpose, four satellite reanalysis archives are used: R-1, R-2, MERRA-2, and ERA-5. A comparison of these archives showed that R-1 can be combined with R-2, and MERRA-2 with ERA-5, for precipitation estimates. A significant overestimation of P (ERA-5, MERRA-2) values is shown in relation to P (R-1, R-2), and especially to precipitation estimates

determined from meteorological station data. In this regard, only averaged precipitation from the R-1 and R-2 archives was considered in the paper. An indirect procedure was used to assess the accuracy of precipitation determination. Its essence consisted in finding long periods of time for which the sea level at the final and initial moments of time was equal, i.e. $h_{\text{fin}} - h_{\text{start}} = \Delta h = 0$. For these periods, a comparison of the total values of water inflow and outflow to the sea was performed. The discrepancy between them will indicate the total systematic error (residual). Five residual values were calculated, revealing that the residual is less than 1 cm, and for long periods (more than 35 years), it approaches zero. This indicates complete consistency between the water balance components. Statistical characteristics of precipitation were calculated, demonstrating their high interannual variability. A negative precipitation trend is noted for both phases of sea level changes, but its decrease is more rapid with rising sea levels. The seasonal course of precipitation has two maxima: the main one in November and a local one in February. The minimum precipitation is observed in August.

Keywords: Caspian Sea, precipitation, water balance, sea level.

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-2026-0003.

For citation: Malinin V. N., Kudel M. D. Interannual variability of precipitation over the Caspian Sea using satellite data for periods of elevation and lowering of the sea level *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(82):(75—89). doi: 10.33933/2713-3001-2026-82-75-89. (In Russ.).

Введение

Осадки, выпадающие на поверхность Каспийского моря, являются третьим по значимости фактором влияния на его уровень после притока речных вод и испарения с поверхности моря и примерно в 4 раза их меньше. Видимо, поэтому систематическому анализу пространственно-временной изменчивости осадков уделяется сравнительно мало внимания. Осадки являются самой плохо определяемой компонентой водного баланса, точность которой ниже притока речных вод и даже испарения. Это связано с рядом причин. Техническая причина — малое число стационарных метеорологических станций, физическая — наличие значительной пространственной неоднородности в распределении осадков по акватории моря, которая обусловлена сложным рельефом на западном и южном побережьях, наличием большого числа островов и резкими климатическими изменениями на малом расстоянии. В юго-западной части моря вблизи Азербайджана осадков выпадает до 1700 мм/год, а наименьшее — до 100 мм/год на восточном берегу моря, поэтому для Каспия характерен огромный широтный градиент осадков, составляющий примерно 300 мм/год на 1 км [1].

Но даже определение осадков по данным малого числа стационарных метеорологических станций встречает серьезные затруднения. Измеренные осадки на станциях, как на побережье моря, так и на некоторых островах, искажены влиянием орографических особенностей района и не отражают истинное количество осадков в открытом море. Особенно сильное искажение осадков происходит в гористой западной и южной части моря. В открытом море наблюдения за осадками носят эпизодический характер. В результате рассчитанные тем или иным способом осадки для акватории моря [2, 3, 4 и др.] имеют значительные неопределенности, учесть которые не представляется возможным.

Обзор публикаций на начало 1990 г. [1] показал, что расхождение между крайними среднемноголетними оценками осадков (246 мм и 194 мм) составляет

52 мм или 25 % от общей средней (208 мм). Последующие публикации подтверждают значительные расхождения в оценках осадков (табл. 1). В работе [2] дается диапазон изменчивости оценок осадков по данным разных авторов, среднее значение которого равно 218 мм. В работе [5] также приводится среднее значение по данным разных авторов, которое, как нетрудно видеть, заметно ниже аналогичных оценок, полученных другими авторами. Все это свидетельствует о явно неудовлетворительном состоянии определения осадков над акваторией моря на основе использования стационарных метеорологических станций. Однако с учетом того, что величина осадков в несколько раз меньше притока речных вод и испарения, это во многих случаях позволяет удовлетворительно замыкать уравнение водного баланса моря.

Таблица 1

Климатические оценки осадков над Каспийским морем
по метеорологическим данным в XX столетии
Climatic estimates of precipitation over the Caspian Sea
based on meteorological data in the twentieth century

Автор	Год публикации	Период наблюдений	Оценка, мм/год
Малинин [1]	1994	XX столетие	194—246
Терзиев, Никонова [6]	2003	XX столетие	192
Нестеров [2]	2016	XX столетие	171—263
Костяной и др. [5]	2025	XX столетие	180

В связи с этим возникает необходимость привлечения альтернативных способов определения осадков на морской поверхности. Единственным вариантом является спутниковая информация, которая ассимилируется в архивах ре-анализа и используется при построении климатических моделей. Однако следует иметь в виду, что до настоящего времени точность определения осадков над водной поверхностью является весьма низкой, и для большинства архивов ре-анализа не отвечает элементарным физическим критериям точности [7, 8].

Если на суше спутниковые измерения осадков можно сравнивать с наземными оценками, точность которых контролируется, то над морской поверхностью нет возможности сравнения спутниковых осадков с их «эталонными» значениями. Отсутствие описания методик и алгоритмов определения осадков в архивах ре-анализа не позволяет судить об их систематических ошибках.

Одной из первых работ по оценке осадков на основе спутниковой информации является работа [9], в которой использовался глобальный архив CDAS (Climate Data Assimilation System), являющийся частью системы так называемого «ретроспективного» анализа» (реанализ) NOAA NCEP/NCAR Reanalysis [10]. Из данного архива в узлах широтно-долготной сетки $1,875^\circ \times 1,875^\circ$ были выбраны среднемесячные значения осадков на акватории моря в 11 точках за период с 1949 г. по 2005 г. Средняя оценка осадков за этот период составила 230 мм, причем за период с 1980 г. по 2005 г. она снизилась до 200 мм/год. В межгодовом ходе осадков отчетливо отмечается сильный отрицательный тренд в течение периода с 1970 г. по 1989 г. и последующий положительный тренд.

При построении климатической модели водного баланса Каспия на основе глобальной модели Climate Forecast System (CFS) [11] осадки рассчитывались для периода (фаз) повышения (1979—1995 гг.) и снижения (1996—2015 гг.) уровня. Для первого периода среднее значение осадков составило 397 мм/год, а для второго — 345 мм/год. Нетрудно видеть завышение значений осадков по сравнению с инструментальными данными почти в 2 раза, что маловероятно.

В последние десятилетия расчеты осадков над морем по спутниковой информации приняли массовый характер в связи с прогнозированием уровня Каспия на конец столетия по климатическим моделям [12—15], которые почти все дают сильное снижение уровня за счет значительного повышения испарения и уменьшения притока речных вод. При этом в большинстве случаев внимание анализу осадков не уделяется. Только в работе [16] дается прогноз уровня на перспективу на основе 13 глобальных климатических моделей из 6-го этапа проекта CMIP6 по 4 сценариям. Будущие прогнозы показывают, что изменения осадков могут снизиться на 2,3—20 % в зависимости от сценария. Хотя неопределенность таких оценок высока, однако они точно идут в русле роста испарения и уменьшения притока речных вод, определяющих сильное снижение уровня Каспия.

Однако известно, что при интегрировании климатических моделей на длительный срок происходит накопление систематических ошибок, вследствие чего полученные результаты могут стать ненадежными. В результате систематические ошибки в оценках осадков смогут оказывать существенное влияние на изменения уровня моря.

Цель настоящей работы состоит в выявлении межгодовой изменчивости осадков над Каспием по различным известным архивам ре-анализа и климатическим моделям для фаз повышения (1978—1995 гг.) и понижения уровня (с 1996 г.) и оценке степени согласованности с другими компонентами водного баланса.

Исходные данные

В работе использовались 4 хорошо известных спутниковых глобальных архивов ре-анализа, пользующихся высокой репутацией:

— архив NCEP/NCAR (*англ.* National Center for Atmospheric Research, Национальный центр исследований атмосферы США) Reanalysis-1 (R-1);

— 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 (R-2), являющийся продолжением архива R-1;

— архив MERRA-2, представляющий новейший ретроспективный атмосферный анализ современной спутниковой эпохи, созданный Управлением глобального моделирования и ассимиляции НАСА (GMAO). Архив ERA-5 — это атмосферный ре-анализ глобального климата ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) пятого поколения, охватывающий период с января 1940 г. по настоящее время.

— архив ERA-5 представляющий атмосферный ре-анализ глобального климата ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) пятого поколения, охватывающий период с января 1940 г. по настоящее время.

Отметим, что документации этих архивов [10, 17—19] достаточно подробно приводятся в статье [20] применительно к расчету испарения с акватории моря. В данной работе эта схема полностью повторяется. Расчетный период составил 47 лет (1978—2024 гг.) и включал период сильного повышения уровня (до 1995 г.) и не менее сильного понижения уровня с 1996 г. Из архивов R-1 и R-2 с пространственным разрешением $1,9^\circ$ по широте и долготе на акватории Каспия были выделены 13 точек: 5 точек в Северном Каспии и по 4 в центральной и южной частях моря. Оценка осадков для всего моря находилась простым арифметическим усреднением их в узлах сетки.

Из архива ERA-5 с пространственным разрешением 31 км было выделено 42 широтных разреза. Число точек на разрезах варьировалось от 8 до 26. Общее число точек составило 700. Выбранные в узлах сетки среднемесячные значения осадков вначале усреднялись для каждой широты, а затем для всего моря. При этом учитывалось число точек на каждой широте.

Поскольку в архиве MERRA-2 пространственное разрешение составляло $0,5^\circ \times 0,625^\circ$ по широте и долготе, то был выделен 21 широтный разрез, каждый из них включал от 4 до 11 точек. Общее число точек составило 140. Среднее количество осадков для моря определялось точно также как по архиву ERA-5.

Результаты расчетов и их обсуждение

Обратимся к рис. 1, на котором приводится межгодовой ход осадков по 4 архивам ре-анализа. Поскольку межгодовые колебания осадков по архивам R-1 и

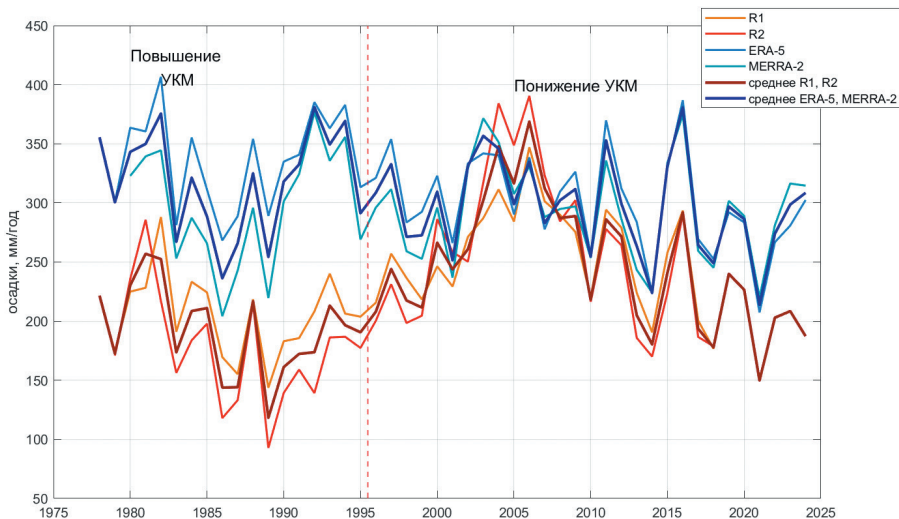


Рис. 1. Межгодовой ход осредненных осадков над акваторией моря по данным разных архивов ре-анализа.

Fig. 1. Interannual course of averaged precipitation over the sea area according to data from various archives of reanalysis.

R-2, а также по архивам ERA-5 и MERRA-2 близки друг к другу, то для них выполнено осреднение и осредненные кривые осадков $P_{(R-1, R-2)}$, $P_{(ERA, MERRA)}$ тоже приводятся на графике. Расхождение этих осредненных кривых весьма значительно, особенно в период повышения уровня моря, когда оценки $P_{(ERA, MERRA)}$ существенно превосходят $P_{(R-1, R-2)}$. В период понижения уровня это превышение меньше.

В табл. 2 представлены количественные статистические характеристики осадков отдельно для периодов повышения и понижения уровня моря. Отметим, что величины осадков $P_{(ERA, MERRA)}$ превышают $P_{(R-1, R-2)}$ для фазы повышения УКМ более, чем в полтора раза. Сравнение осадков $P_{(R-1, R-2)}$ и $P_{(ERA, MERRA)}$ с аналогичными оценками, полученными по метеорологическим данным (табл. 1) свидетельствует, что архивы ERA и MERRA завышают осадки примерно в 1,5 раза, в то время как, согласно архивам R-1 и R-2, некоторое завышение осадков отмечается только в период понижения УКМ. Отметим также сравнительно высокую межгодовую изменчивость осадков, особенно для архивов R-1 и R-2, коэффициент вариации для которых составляет 0,20—0,22. Изменчивость осадков над акваторией моря существенно выше, чем на водосборном бассейне [21].

Таблица 2

Статистические характеристики осадков
для периодов роста и понижения уровня по данным разных архивов
Statistical characteristics of precipitation for periods of rising and
falling levels according to data from various archives

Архив	Рост уровня (1979—1995 гг.)					Понижение уровня (с 1996 г.)				
	$X_{\text{сп}}$, мм/год	СКО, мм/год	К-т ва- риации	Tr , мм/год	R^2	$X_{\text{сп}}$, мм/год	СКО, мм/год	К-т ва- риации	Tr , мм/год	R^2
$P_{(R-1, R-2)}$	192	37,9	0,20	-2,63	0,14	247	53,6	0,22	-0,26	0,11
$P_{(ERA, MERRA)}$	318	43,3	0,13	0,14	0,00	297	39,9	0,13	-1,12	0,06
Среднее	255	37,4		-1,2	0,03	272	43,2		-1,90	0,14

В осредненных по 4 архивам осадках при понижении уровня отмечается значимый отрицательный тренд равный $-1,9$ мм/год. В осадках по архивам ERA, MERRA тренды отсутствуют при повышении и понижении уровня, т. е. осадкам присущ случайный характер колебаний. Своеобразный характер трендов отмечается в осадках по архивам R-1 и R-2. В оба периода изменений уровня осадки уменьшаются, но более быстрыми темпами при повышении уровня, что с физической точки зрения представляется не очень логичным. На этом фоне отмечается мощный локальный положительный тренд в течение периода с 1989 г. по 2006 г. который не привязан к фазам изменений уровня.

Очевидно, очень высокие оценки осадков по архивам ERA и MERRA сильно завышающие их климатические нормы следует считать маловероятными, поэтому ограничимся вопросом оценки точности осадков по архивам R-1 и R-2. Как было отмечено выше, прямого контроля для оценки точности осадков нет, вследствие этого необходимо привлекать косвенные методы. Для косвенной оценки точности осадков воспользуемся следующей процедурой. За некоторый длительный период времени уравнение водного баланса Каспийского моря имеет простой вид [1]:

$$n^{-1} \sum \left(v_{(Q+P)i} - v_{(E+q)i} \right) - \Delta h = \eta, \quad (1)$$

где $v_{(Q+P)i}$ — приток воды к морю за счет годового суммарного стока речных вод ($Q_{\text{сум}}$) и выпадения осадков на поверхность моря (P) в i -тый год, в см, $v_{(E+q)i}$ — отток воды за счет годовых значений испарения (E) и стока в з. Кара-Богаз-Гол (q) в i -тый год, в см, Δh — разность между конечным ($h_{\text{кон}}$) и начальным ($h_{\text{нач}}$) значением уровня Каспия, η — невязка (суммарная систематическая погрешность) компонент водного баланса.

Основой суммарного стока речных вод послужили данные по стоку Волги из работы [5]. Умножением на коэффициент 1,2 [22], который характеризует вклад стока других рек в Каспий и подземный приток, сток Волги переводился в суммарный приток речных вод $Q_{\text{сум}}$ к Каспию. Данные по испарению заимствованы из работы [20], а сток в з. Кара-Богаз-Гол (КБГ) из [2, 23]. Уровень Каспия определяется по 4 береговым станциям (Баку, Махачкала, Форт Шевченко и Красноводск), а после 1993 г. — по спутниковой альтиметрии.

Несмотря на простой вид уравнения (1), оценка η представляет существенные сложности, ибо кроме ошибок приходных и расходных компонент баланса необходимо дополнительно учитывать ошибки величин Δh . Ошибок Δh можно избежать, если в качестве начального и конечного уровня задать одну и ту же его величину. В этом случае $\Delta h = h_{\text{кон}} - h_{\text{нач}} = 0$.

В данной работе в качестве «реперных» значений уровня приняты его оценки через 0,5 м: $-27,0, -27,5 \dots -29,0$ м. За рассматриваемый период с 1978 г. по 2024 г. (рис. 1) начальная оценка $-27,0$ м отмечалась в 1992 г., конечная — в 2006 г., т. е. продолжительность периода составила 15 лет (табл. 3). Естественно, продолжительность следующих периодов увеличивалась по нарастающей. Как видно из табл. 3 только для уровня -28 м невязка была выше 1 см. Это связано со стоком Волги ниже нормы и одновременно испарением выше нормы в промежутке уровня между $-27,5$ и $-28,0$ м. Для остальных периодов невязка меньше 1 см, причем для длинных промежутков (более 35 лет) она приближается к нулю. Выполненные расчеты свидетельствуют о полной согласованности компонент водного баланса. Если в компонентах водного баланса присутствуют систематические ошибки, то они за счет разных знаков компенсируют друг друга. Итак, осредненные над морем спутниковые осадки $P_{\text{сп}}$, рассчитанные по архивам R-1 и R-2, имеют вполне достаточную точность с точки зрения выполнения воднобалансовых расчетов.

Таблица 3

Оценки невязки уравнения водного баланса (1) для различных промежутков времени при условии $\Delta h = 0$

Estimates of the inconsistency of the water balance equation (1) for various time intervals under the condition of $\Delta h = 0$

Отметка уровня, м.	Продолжительность периода, годы	Длина периода, годы	$\sum \left(v_{(Q+P)i} - v_{(E+q)i} \right)$, см	Невязка, см/год
-27,0	1992—2006	15	10,6	0,70
-27,5	1990—2011	15+7 = 22	-17,75	-0,80

Отметка уровня, м.	Продолжительность периода, годы	Длина периода, годы	$\sum (v_{(Q+P)i} - v_{(E+q)i})$, см	Невязка, см/год
-28,0	1984—2018	22+13 = 35	-45,85	-1,3
-28,5	1980—2021	35+7 = 42	-7,13	-0,17
-29,0	1978—2024	42+ 5 = 47	10,05	0,22

На рис. 2 представлена карта пространственного распределения годовых значений осадков за период с 1978 г. по 2024 г. Изолинии осадков имеют малую извилистость, что обусловлено значительным пространственным шагом сетки архивов R-1 и R-2 ($1,9^\circ$). В целом карта правильно описывает известные закономерности в пространственном распределении осадков, однако их некоторые мелкомасштабные особенности она естественно отражать не может. Максимальное

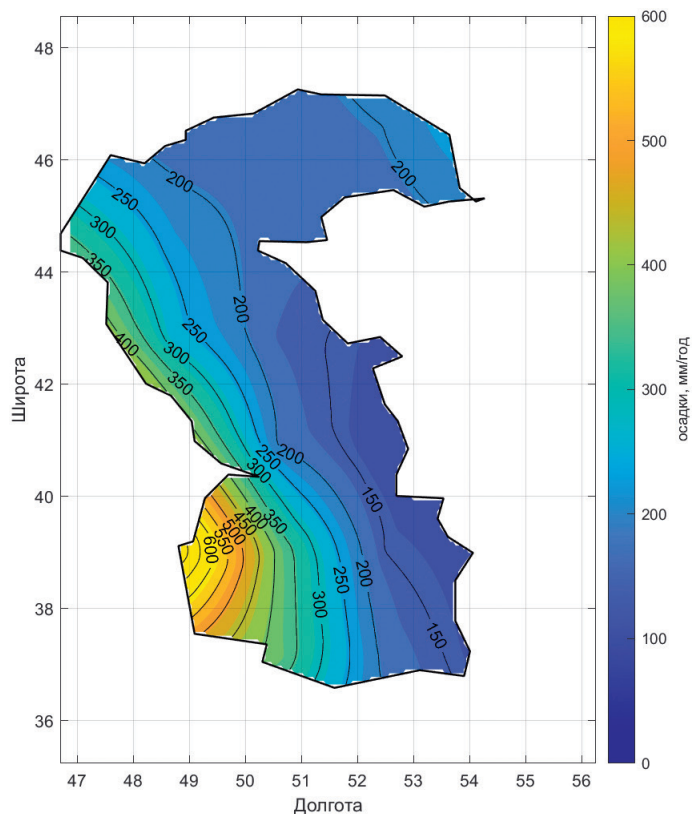


Рис. 2. Распределение среднегоголетних значений осадков над Каспийским морем за период с 1978 г. по 2024 г. в мм/год.

Fig. 2. Distribution of average annual precipitation values over the Caspian Sea for the period 1978—2024 in mm/year.

количество осадков выпадает в юго-западной части моря вблизи Ленкорани (более 1500 мм/год) и тянется узкой полосой к иранскому побережью. Абсолютный максимум среднеголетних осадков (1850 мм/год) отмечается около иранского города Анзали [24]. Минимальное количество осадков (менее 100 мм/год) выпадает вблизи восточного побережья моря в его центральной части и у з. КБГ. Наибольший пространственный широтный градиент осадков отмечается в южной части моря, который по направлению на северо-восток уменьшается. У северного побережья пространственный градиент осадков выражен существенно слабее.

На рис. 3 представлено распределение среднеголетних месячных сумм осадков над морем для периодов повышения и понижения уровня моря, а также осредненный сезонный ход осадков, рассчитанных по данным островных и береговых метеорологических станций 5 авторами за различные длительные промежутки времени XX века, которые систематизированы в работе [1]. В спутниковых осадках присутствует хорошо выраженный сезонный ход с двумя максимумами: главный — в ноябре и локальный — в феврале. Минимум отмечается в августе. Наибольшие расхождения в оценках осадков свойственны зимнему сезону, а

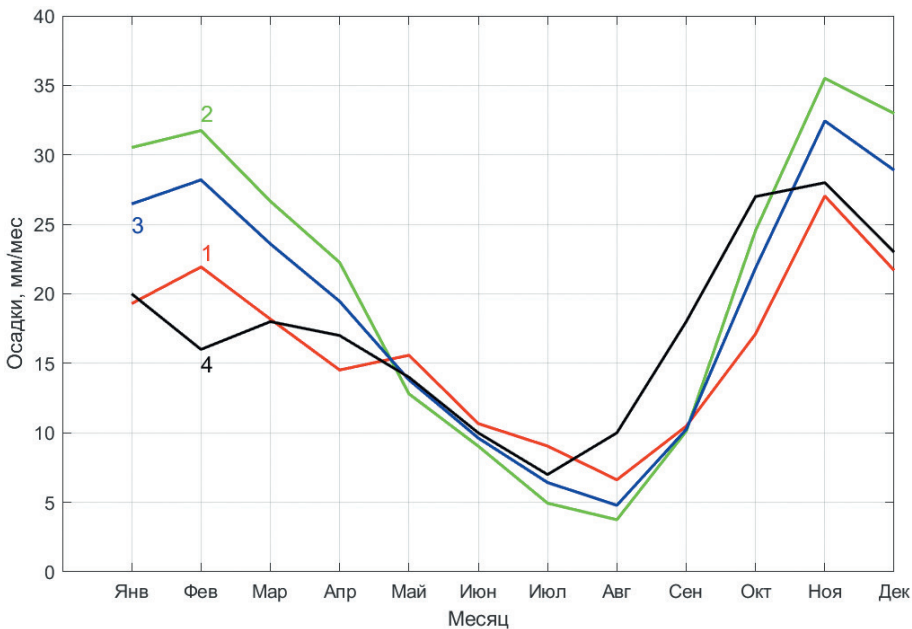


Рис. 3. Сезонный ход среднеголетних месячных сумм осадков над Каспийским морем для периодов повышения (1978—1995 гг.) (1) и понижения (1996—2024 гг.) (2) уровня, за период с 1978 г. по 2024 г. (3) и за различные длительные промежутки времени XX века [1] (4).

Fig. 3. The seasonal course of the average annual monthly precipitation over the Caspian Sea for the periods of increasing (1978—1995) (1) and decreasing (1996—2024) (2) levels, for 1978—2024 (3) and for various long periods of the 20th century [1] (4).

минимальные расхождения — летнему. Максимальное различие в осадках между периодами повышения и понижения уровня имеет место в январе и превышает 10 мм.

Сезонной изменчивости осадков, определенных по метеорологическим станциям, присущ более сглаженный ход. Главный максимум совпадает со спутниковыми данными, локальный максимум и минимум отличаются от спутниковых данных на 1 месяц. Основные расхождения между спутниковыми и метеорологическими осадками наблюдаются в зимний период. В феврале оно достигает 12 мм, т. е. составляет примерно половину месячной суммы. Летом они минимальны.

Рассмотрим особенности линейной связи осредненных по морю осадков (P_{cp}) с осадками в отдельных районах. Для этого сначала рассчитывалась корреляция для всех 13 узлов сеточной области, а затем выполнялось осреднение по районам моря (табл. 4). Наибольшая корреляция отмечается для Среднего Каспия, причем при понижении уровня она выше ($r = 0,82$), чем при его росте. При повышении уровня наименьшая корреляция свойственна Северному Каспию в основном за счет двух узлов, находящихся вблизи побережья ($r = 0,68$). Незначительная положительная корреляция имеет место для осадков в Южном Каспии с осредненными осадками при понижении уровня ($r = 0,27$) из-за отсутствия корреляции осадков в 2 узлах вблизи побережья Ирана с осадками на остальной акватории моря.

Таблица 4

Распределение коэффициентов корреляции осредненных осадков по акватории моря с осадками в отдельных районах
Distribution of the coefficients of correlation of average precipitation over the sea area with precipitation in individual areas

Район	повышение УКМ	понижение УКМ	весь период
Северный Каспий	0,676	0,730	0,782
Средний Каспий	0,777	0,825	0,850
Южный Каспий	0,712	0,270	0,380

В значительной степени это связано с изменившимся характером синоптических процессов в текущем столетии под влиянием горной системы Эльбурс, расположенной вблизи южного побережья моря и усилением «озерного эффекта» [25]. Влияние озерного эффекта состоит в натекании холодного северного ветра на очень теплую поверхность моря, которое активизирует тепло- и влагообмен и выпадение осадков.

Расчет пошаговых регрессий осредненных осадков P_{cp} с осадками в 13 узлах пространственной сетки показал, что при повышении уровня двухшаговая модель описывает 87 % дисперсии P_{cp} с относительной ошибкой в долях СКО равной 0,4, а трехшаговая модель — 94 % дисперсии P_{cp} . При понижении уровня аналогичная двухшаговая модель имеет еще более высокую точность: она описывает 94 % дисперсии P_{cp} с ошибкой 0,26. Однако в эти уравнения входят разные узлы, что отражает неодинаковость условий выпадения осадков над морем в разные фазы изменений УКМ.

Заключение

В работе рассматривается межгодовая изменчивость осадков для периодов повышения уровня (1979—1995 гг.) и его понижения (с 1996 г.). Отмечается явно неудовлетворительное состояние определения осадков над акваторией моря на основе использования стационарных метеорологических станций, поэтому возникает необходимость привлечения альтернативных способов определения осадков на морской поверхности. По сути, единственным вариантом является спутниковая информация, которая ассимилируется в архивах ре-анализа и используется при построении климатических моделей. С этой целью используются 4 известных архива ре-анализа: R-1, R-2, MERRA-2 и ERA-5. Сопоставление этих архивов показало, что для оценок осадков можно объединить R-1 с R-2, а MERRA-2 с ERA-5. При этом отмечается существенное завышение значений $P_{(ERA, MERRA)}$ по отношению к $P_{(R-1, R-2)}$ и более чем в 1,5 раза к климатологическим оценкам осадков, определенных по данным метеорологических станций. В связи с этим далее рассматривались только осредненные осадки P_{cp} по архивам R-1 и R-2.

Поскольку непосредственно оценить точность определения осадков нереально, то использовалась косвенная процедура. Суть ее состояла в том, что за достаточно длительный период времени в уравнении водного баланса Каспийского моря принималось равенство уровня за конечный и начальный момент времени, т. е. $h_{кон} - h_{нач} = \Delta h = 0$. Отсюда следует равенство приходной и расходной части водного баланса моря. При условии независимого определения всех компонент баланса невязка η будет показывать их суммарную систематическую ошибку. Принимая в качестве реперных значений уровня его оценки через 0,5 м (–27,0, –27,5 ... –29,0 м), были рассчитаны 5 значений невязки. Только для уровня –28 м невязка была выше 1 см/год. Для остальных периодов невязка меньше 1 см/год, причем для длинных промежутков (более 35 лет) она приближается к нулю. Это свидетельствует о полной согласованности компонент водного баланса. Но если в компонентах водного баланса присутствуют систематические ошибки, то они за счет разных знаков компенсируют друг друга, поэтому спутниковые осадки, рассчитанные по архивам R-1 и R-2, имеют достаточную точность при их использовании в воднобалансовых расчетах.

Выполнен расчет статистических характеристик. Среднее значение для периодов повышения и понижения уровня оставляет 192 и 247 мм/год. При этом отмечается их сравнительно высокая межгодовая изменчивость (коэффициент вариации 0,20—0,22). Тренд осадков отрицательный для обеих фаз изменений уровня, но уменьшение осадков идет более быстрыми темпами при повышении уровня. На этом фоне отмечается хорошо выраженный локальный положительный тренд в течение периода с 1989 г. по 2006 г., который не привязан к фазам изменений уровня. Сезонный ход осадков имеет 2 максимума: главный — в ноябре и локальный — в феврале. Минимум осадков отмечается в августе. Главный максимум «метеорологических» осадков совпадает со спутниковыми данными, локальный максимум и минимум отличается от спутниковых данных на 1 месяц. Основные расхождения между спутниковыми и метеорологическими осадками

наблюдаются в зимний период. В феврале оно достигает 12 мм. В целом спутниковые осадки адекватно описывают сезонную изменчивость.

Итак, полученные результаты показали, что спутниковые архивы R-1 и R-2 позволяют получить достаточно надежные оценки P_{cp} , которые можно использовать в воднобалансовых расчетах.

Список литературы

1. Малинин В. Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб.: Изд-во РГМИ, 1994. 160 с.
2. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / Под ред. Е. С. Нестерова. М.: Триада Лтд, 2016. 378 с.
3. Смирнова К. И., Луныкова Л. Г. Многолетние характеристики составляющих водного баланса Каспийского моря // Труды Гидрометцентра СССР. 1984. Вып. 263. С. 113—122.
4. Никонова Р. Е., Бортник В. Н. Характеристика межгодовой и сезонной изменчивости составляющих водного баланса и уровня Каспийского моря за период его современного повышения // Водные ресурсы. 1994. Том 21, № 4. С. 410—414.
5. Костяной А. Г., Малинин В. Н., Фролов А. В. Основные причины изменения уровня Каспийского моря // Фундаментальная и прикладная климатология. 2025 т. 11, № 3. С. 5—40. doi:10.21513/2410-8758-2025-3-5-40.
6. 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., 2003. Гидрометеороиздат, С. 239—253.
7. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Изменчивость испарения и осадков над океаном по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2016, № 4, С. 23—34. DOI: 10.7868/S0205961416040047.
8. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Влияние влагообмена в Северной Атлантике на увлажнение европейской части России и годовой сток Волги // Водные ресурсы. 2019, том 46, № 3, С. 466—479. DOI: 10.31857/S0321-0596463318-332
9. Малинин В. Н., Рашад С. Т. Изменчивость полей испарения и осадков в Каспийском море, Вопросы промысловой океанологии, 2008. вып. 5, № 1, ВНИРО, с. 201—212.
10. Kanamitsu M. Description of the NMC Global Data Assimilation and Forecast System // Weather and Forecasting. 1989. vol. 4. no. 3. P. 335—342. DOI:10.1175/15200434(1989)004<0335:DOTNGD>2.0.CO;2.
11. 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.
12. Hoseini S. M., Soltanpour M., Zolfaghari M. R. Projected changes in Caspian Sea level under CMIP6 climate change scenarios: probabilistic and deterministic approaches // Climate Dynamics. 2025. vol. 63, no. 1, P. 1—18, doi: 10.1007/s00382-024-07548-w.
13. Lahijani H., Leroy S.A.G., Arpe K., Cretaux J.-F. Caspian Sea level changes during instrumental period, its impact and forecast: A review // Earth- Science Reviews 2023. vol. 241, no. 104428, URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104428>.
14. Prange M., Wilke T., Wesselingh F. P. The other side of sea level change // Communications Earth & Environment 2020. vol. 1, no. 69, URL: <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>.
15. Samant R., Prange M. Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections // Communications Earth & Environment 2023. vol. 4, no. 357, URL: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01017-8>.
16. Hoseini S. M., Soltanpour M., & Zolfaghari M. R. Climate change impacts on temperature and precipitation over the Caspian Sea // International Journal of Water Resources Development. 2024. 1—26. <https://doi.org/10.1080/07900627.2024.2313050>
17. 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.

18. 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 22.12.2025.
19. 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. Vol. 30(13): 5419—5454. doi:10.1175/JCLI-D-16-0758.1. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
20. 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. (In Russ.).
21. Смирнов Н. П., Малинин В. Н. Водный баланс атмосферы как гидрологическая задача. Л.: изд. СПбУ.1988. 200 с.
22. Георгиевский В. Ю., Цыценко К. В., Шалыгин А. Л. Оценка притока поверхностных вод в Каспийское море. В кн.: *Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна*. СПб., 2003. Гидрометеоиздат, С. 217—229.
23. Малинин В. Н. Грозит ли Каспию судьба Арала? // *Гидрометеорология и экология*. 2022. № 69, С. 746—760, doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-746-760.
24. Molavi-Arabshahi M., Arpe K., & Leroy S. A. G. Precipitation and temperature of the southwest Caspian Sea region during the last 55 years: Their trends and teleconnections with large-scale atmospheric phenomena // *International Journal of Climatology*. 2016. 36(5), 2156—2172. <https://doi.org/10.1002/joc.4483>.
25. Торопов П. А., Шестакова А. А., Кислов А. В., Рухоллах О. Сильные осадки на иранском побережье Каспийского моря // *Океанологические исследования*. 2019, Том 47. № 5. С. 116—129. DOI: 10.29006/1564—2291.JOR—2019.47(5).9.

References

1. 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.).
2. *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.).
3. Smirnova K. I., Lunyakova L. G. Long-term characteristics of the components of the water balance of the Caspian Sea. *Trudy Gidromettsentra SSSR = Proceedings of the Hydrometeorological Center of the USSR*. 1984; (263):(113—122). (In Russ.).
4. Nikonova R. E., Bortnik V. N. Characteristics of interannual and seasonal variability of water balance components and the level of the Caspian Sea during the period of its modern rise. *Vodnyye resursy = Water resources*. 1994; 21(4): (410—14). (In Russ.).
5. Kostianoy A. G., Malinin V. N., Frolov A. V. Main causes of changes in the Caspian Sea level. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*. 2025; 11(3):(5—40). doi:10.21513/2410-8758-2025-3-5-40. (In Russ.).
6. Terziev F. S., Nikonova R. E. Some results of the study of the current state of the hydrometeorological regime of the Caspian Sea and prospects for further research. *Gidrometeorologicheskiye aspekty problemy Kaspiyskogo morya i yego basseyna = Hydrometeorological aspects of the problem of the Caspian Sea and its basin* St. Petersburg, Gidrometeoizdat. 2003; (239—253). (In Russ.).
7. Malinin V. N., Gordeeva S. M. Variability of evaporation and precipitation over the ocean based on satellite data. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa. = Earth Research from Space*. 2016; (4):(23—34). DOI: 10.7868/S0205961416040047. (In Russ.).
8. Malinin V. N., Gordeeva S. M. The influence of moisture exchange in the North Atlantic on the humidification of the European part of Russia and the annual runoff of the Volga. *Vodnyye resursy = Water resources*. 2019; 46(3):(466—479). (In Russ.).
9. Malinin V. N., Rashad S. T. Variability of evaporation and precipitation fields in the Caspian Sea. *Voprosy promyslovoy okeanologii = Issues of Commercial Oceanology*. 2008; 5(1):(201—212).

10. 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. (In Russ.).
11. 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.
12. Hoseini S. M., Soltanpour M., Zolfaghari M. R. Projected changes in Caspian Sea level under CMIP6 climate change scenarios: probabilistic and deterministic approaches. *Climate Dynamics*. 2025; 63(1):(1—18). doi: 10.1007/s00382-024-07548-w.
13. Lahijani H., Leroy S. A. G., Arpe K., Cretaux J.-F. Caspian Sea level changes during instrumental period, its impact and forecast: A review. *Earth-Science Reviews*, 2023; (241): 104428, URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104428>.
14. Prange M., Wilke T., Wesselingh F. P. The other side of sea level change. *Communications Earth and Environment*. 2020; 1:(69) URL: <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>.
15. Samant R., Prange M. Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections. *Communications Earth and Environment*. 2023; (4): 357. URL: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01017-8>.
16. Hoseini S. M., Soltanpour M., Zolfaghari M. R. Climate change impacts on temperature and precipitation over the Caspian Sea. *International Journal of Water Resources Development*. 2024; (1—26). <https://doi.org/10.1080/07900627.2024.2313050>.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.).
21. Smirnov N. P., Malinin V. N. *Vodnyy balans atmosfery kak gidrologicheskaya zadacha = Atmospheric water balance as a hydrological problem*. L.: Leningrad University Publishing House 1988: 200 p.
22. Georgievskiy V. Yu., Tsytsenko K. V., Shalygin A. L. Assessment of surface water inflow into the Caspian Sea. In: *Gidrometeorologicheskiye aspekty problemy Kaspiyskogo morya i yego basseyna = Hydrometeorological aspects of the problem of the Caspian Sea and its basin*. St. Petersburg. Gidrometeoizdat: 2003; (217—229).
23. 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.).
24. Molavi-Arabshahi M., Arpe K., & Leroy S. A. G. Precipitation and temperature of the southwest Caspian Sea region during the last 55 years: Their trends and teleconnections with large-scale atmospheric phenomena. *International Journal of Climatology*. 2016; 36(5): 2156—2172. <https://doi.org/10.1002/joc.4483>.
25. Toropov P. A., Shestakova A. A., Kislov A. V., Ruhollah O. Heavy precipitation on the Iranian coast of the Caspian Sea. *Okeanologicheskkiye issledovaniya = Oceanological research*. 2019; 47(5): 116—129. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(5).9. (In Russ.).

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 27.01.2026

Принята в печать 27.02.2026

The article was received on 27.01.2026

The article was accepted on 27.02.2026