

Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 746—760.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(69): 746—760.

Научная статья
УДК 551.461.2:[556.12/.16+551.583](262.81)
doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-746-760

Грозит ли Каспию судьба Арала?

Валерий Николаевич Малинин

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

Аннотация. В статье обсуждаются особенности генезиса колебаний уровня Каспийского моря (УКМ) в XX в., возможные причины резкого падения уровня в XXI в. и его возможные изменения к концу столетия. Показано, что в XX в. сток Волги на две трети ($R^2 = 0,64$) определял изменчивость уровня Каспия. С начала 1990-х гг. вследствие глобального потепления начался рост испарения с поверхности моря и уменьшение стока Волги, что сказалось на увеличении интенсивности падения уровня с 1996 г. Однако основной причиной его падения является сток вод в залив Кара-Богаз-Гол, дающий вклад 72 %, вклад испарения — 14 %, вклад стока рек — 10 %. Показано, что климатические модели очень плохо описывают даже современный климат Каспия, что указывает их непригодность для прогноза уровня моря на длительную перспективу (конец столетия).

Ключевые слова: Каспийское море, изменения уровня моря, испарение, осадки, климатические модели, прогноз уровня на конец столетия.

Благодарности. Исследование проводилось в рамках проекта «The Caspian Sea Digital Twin», поддержанного МОК ЮНЕСКО и выполняемого в рамках мероприятий, связанных с Десятилетием наук об океане в интересах устойчивого развития (2021—2030 гг.) ООН.

Для цитирования: 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.

Original article

Does the fate of the Aral Sea threaten the Caspian?

Valerii N. Malinin

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia, malinin@rshu.ru

Summary. The article discusses the features of the genesis of fluctuations in the level of the Caspian Sea in the 20th century, possible causes of a sharp drop in the level in the 21st century and its possible changes by the end of the century. It is shown that the long-term variability of the Caspian level is an integral indicator of large-scale moisture exchange in the ocean (North Atlantic) — atmosphere — land surface (Volga basin) system. At the same time, in the twentieth century approximately two thirds ($R^2 = 0.64$) of the interannual variability of the level increments are due to the inflow of the Volga River waters. Another third of the level variability is described by effective evaporation ($E-P$). At the same time, the $E-P$ contribution to level changes is mainly concentrated in the white noise range, since the $E-P$ variability is predominantly random. Since the early 90s of the last century, due to global warming, a rapid increase in evaporation from the sea surface and a decrease in the Volga runoff have begun, affecting the increase in the intensity of the level drop since 1996. However, the main reason for its fall is the water runoff into the Kara-Bogaz-Gol

Bay, the contribution of which is 72 %, the contribution of evaporation, river runoff and precipitation being 14 %, 10 % and 4 % respectively. The climate models are shown to describe the modern climate of the Caspian very poorly, which indicates their unsuitability for predicting the Caspian Sea level in the long term (end of the century).

Keywords: Caspian Sea, sea level changes, evaporation, precipitation, climate models, level forecast at the end of the century.

Acknowledgments. The research was conducted in the framework of the “The Caspian Sea Digital Twin” Project endorsed by the IOC UNESCO and performed as part of the activities related to the UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021—2030).

For citation: 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.)

Введение

Каспий — уникальный водоем, не имеющий аналогов в мире по биологическому многообразию флоры и фауны. Для населения прибрежных государств экономическое значение Каспийского моря трудно переоценить. Социально-экономическое развитие в прибрежной зоне моря в значительной степени зависит от колебаний его уровня. Из-за бессточности водоема значительные межгодовые колебания уровня Каспийского моря (УКМ), чередование длительных серий его понижения и повышения из-за бессточности водоема приводят к тому, что водная экосистема и экономика прибрежных стран вынуждены приспосабливаться к резко изменяющемуся уровенному режиму. За последние 2000 лет, по данным палеоклиматических реконструкций, размах колебаний уровня мог составить 12 м, при этом его самая низкая отметка отмечалась в середине V в. (–34,5 м), наивысшая — в начале нашей эры (–22,5 м) [1].

В XX столетии размах колебаний уровня составил 3,2 м (рис. 1). Если до 1930 г. отмечался равновесный режим уровня, то в 1930—1978 гг. — резкое падение уровня на 3 м. В 1978—1996 гг. происходит стремительный рост уровня



Рис. 1. Межгодовой ход уровня Каспийского моря по инструментальным наблюдениям (за ноль принята отметка –28 м БС).

Fig. 1. The interannual variation of the Caspian Sea level according to instrumental observations (zero is set to value –28 m of BS).

на 2,4 м. В результате имеем 3 фазы относительно однородных колебаний уровня (стояние, падение, рост), которые названы в 1994 г. естественными климатическими периодами (ЕКП) [2]. По палеоклиматическим данным об уровне за 2000 лет выделены 39 ЕКП, и показано, что их минимальная продолжительность составляет 40 лет. Это послужило основанием считать, что продолжительность ЕКП не менее 40 лет должна остаться и в будущем.

Для последнего периода ЕКП, начавшегося в 1979 г. была предложена аналитическая модель межгодовых колебаний уровня, позволяющая вычислить уровень тяготения с большой заблаговременностью [3]. Исходя из характера колебаний уровня в XX столетии, ЕКП может быть разбит на две существенно различные стадии. Первая представляет собой резкие однонаправленные колебания уровня в начале ЕКП, связанные со скачкообразным изменением составляющих водного баланса и соответственно с переходом на новый уровень тяготения. Вторая стадия состоит в стабилизации уровня в результате действия морфометрического фактора, роль которого быстро нарастает с увеличением продолжительности ЕКП. Это означает приближение реального уровня к равновесному (уровню тяготения), при котором приходная и расходная части водного баланса моря взаимно уравниваются. За конец первой стадии был принят 1995 г. Было показано, что к 2020 г. уровень моря асимптотически приблизится к уровню тяготения и может составить $-26,6 \pm 0,2$ м. Однако прогноз не оправдался, в 2020 г. УКМ достиг отметки -28 м. Причины этого будут указаны ниже.

Особое значение приобретает прогноз реперных лет ЕКП, свидетельствующих о формировании новых длительных тенденций в колебаниях УКМ. Так, переломные годы (1978—79 и 1996—97) в колебаниях уровня современная наука оказалась не в состоянии предсказать. Заметим, что в работе [3] конечный год стадии повышения уровня был определен практически точно (1995 г.). Необходимо также отметить, что выполненный в монографии [4] обзор нескольких десятков методов прогноза УКМ с длительной заблаговременностью свидетельствует о плачевном состоянии проблемы прогноза уровня. Ни один из них не получил полного признания, поэтому мы до настоящего времени не можем уверенно судить о том, когда начнется новый длительный рост (снижение) УКМ.

В данной работе обсуждаются особенности генезиса колебаний УКМ в XX в., возможные причины резкого падения уровня в XXI столетии и его возможные изменения к концу столетия.

Климатическая концепция изменений уровня моря в XX столетии

В общем случае на уровень оказывает большое число разных по своей природе факторов, которые можно свести в четыре большие группы: космогеофизические факторы, геолого-геодинамические процессы, гидрометеорологические процессы, антропогенные факторы. Их подробный анализ в работе [2] показал, что в диапазоне межгодовой изменчивости доминируют климатические процессы, которые обуславливают колебания уровня главным образом через изменения компонент водного баланса.



Рис. 2. Генетическая модель формирования межгодовых колебаний уровня Каспийского моря.

Fig. 2. Genetic model of formation of interannual fluctuations of the Caspian Sea level.

Подробный анализ гидрологической системы «Каспийское море», под которой понимается собственно море, его водосборный бассейн и атмосфера над морем и бассейном, позволил выявить всю цепочку причинно-следственных связей от изменений уровня моря до процессов крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в виде трех ветвей: наземной, атмосферной и океанической [2, 5, 6]. В результате была сформулирована климатическая концепция, согласно которой долгопериодная изменчивость уровня Каспия представляет собой интегральный индикатор крупномасштабного влагообмена в системе океан (Северная Атлантика) — атмосфера — поверхность суши (бассейн Волги). Суть этой концепции представлена в виде блок-схемы на рис. 2. При усилении процессов циклонической активности в Северной Атлантике и, прежде всего, в области Исландской депрессии увеличивается испарение, влагосодержание атмосферы. Одновременно с этим повышается зональная составляющая скорости горизонтального переноса атмосферной влаги, характеризующая количество переносимого водяного пара в системе средней циркуляции и крупномасштабных синоптических вихрей.

При росте циклонической активности происходит углубление Исландского минимума давления и его пространственные миграции. В свою очередь, его углубление усиливает интенсивность Североатлантического колебания (САК), которое в значительной степени регулирует адвективный (за счет средней циркуляции)

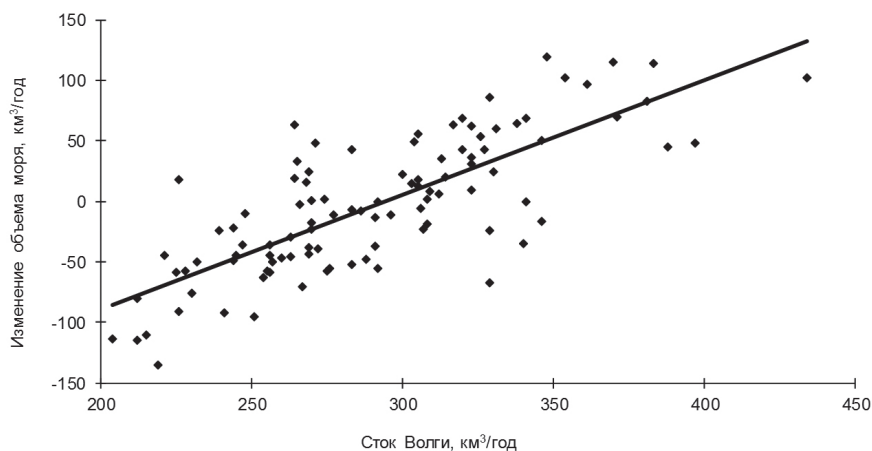


Рис. 3. Диаграмма рассеяния внутригодовых изменений объема Каспийского моря ($\text{км}^3/\text{год}$) в зависимости от годового стока Волги в г. Самара ($\text{км}^3/\text{год}$) за период с 1890 по 1990 г.

Fig. 3. Ratio of intra-annual changes in the Caspian Sea volume (km^3/year) to the annual Volga runoff in Samara (km^3/year) for the period 1890—1990.

зональный перенос атмосферы в умеренных широтах. Это должно приводить к значительному повышению зонального переноса водяного пара в системе общей циркуляции и синоптических вихрей на европейский континент и европейскую территорию России и как следствие к увеличению количества осадков на территории бассейна Волги.

При повышении годового стока Волги происходит увеличение внутригодовых приращений объема моря, а значит рост УКМ (рис. 3). Из рис. 3 следует, что в XX в. примерно две трети ($R^2 = 0,64$) межгодовой изменчивости приращений уровня обусловлены притоком речных вод, сформированным в лесной зоне бассейна Волги, находящимся за тысячу км от моря. Другая треть изменчивости уровня описывается эффективным испарением ($E-P$). При этом вклад $E-P$ в изменения уровня в основном сконцентрирован в области белого шума, поскольку изменчивость $E-P$ носила преимущественно случайный характер. Поэтому при описании межгодовых колебаний уровня им можно было пренебречь.

Климат Каспийского моря в XXI столетии

В связи с интенсивным глобальным потеплением климатическая ситуация в Каспийском регионе начала быстро меняться с конца XX века. Повышается температура воздуха и поверхности моря, уменьшается площадь ледяного покрова, увеличивается испарение, уменьшается приток речных вод и количество осадков, выпадающих на акваторию моря [7—11]. Однако происходит это не одновременно

и разными темпами. Согласно работе [7] среднегодовая приповерхностная температура воздуха в Каспийском регионе (море и прилегающие районы) почти монотонно повышалась в течение 41-летнего периода (1980—2020 гг.) со скоростью 0,030 °С, т. е. повышение составило 1,2 °С. Еще выше оказалось потепление температуры поверхности моря (на 1,4 °С).

В течение 1978—1990 г. приток речных вод Волги в Каспий был существенно выше нормы, что явилось одной из важнейших причин роста УКМ. Однако в 90-е годы началась маловодная фаза в увлажнении бассейна Волги, в значительной степени обусловленная ростом засушливых условий в летний период. В результате с 1992 г. отмечается значительный отрицательный тренд волжского стока со скоростью за 24-летний период (1992—2016 гг.) примерно $-2,5 \text{ км}^3/\text{год}$, что соответствует уменьшению слоя воды — 0,64 см/год [8]. Можно напомнить катастрофическую летнюю засуху на европейской территории России в 2010 г., вследствие которой сток Волги резко упал в последующие два года.

Осадки, выпадающие на поверхность моря, меняются значительно меньше по сравнению с речным притоком и испарением. Так, за 15-летний период 2003—2017 гг. среднегодовое количество осадков уменьшилось примерно на 38 мм, что эквивалентно уменьшению уровня Каспия примерно на 4 см, что составляет уменьшение осадков со скоростью 2,6 мм/год [8].

Для оценки скорости падения УКМ не обязательно использовать тренды в уровнеобразующих факторах. В работе [9] рассчитаны средние оценки испарения, осадков и стока речных вод за периоды роста уровня (1979—1995 гг.) и его уменьшения (1966—2015 гг.) Разность в средних оценках за указанные периоды времени дают возможность оценить роль каждого из этих факторов в изменениях уровня. На рис. 4 приводится временной ход испарения, осадков и стока Волги за период 1979—2015 гг. Нетрудно видеть, что все эти компоненты с 1996 г. действуют в одном направлении — усиливают падение уровня моря. При этом наибольший вклад в падение уровня дает испарение. Разность в испарении между 1979—1995 гг. и 1966—2015 гг. составила 10 см.

В табл. 1 представлены оценки компонент водного баланса в сопоставлении с фактическими значениями УКМ за рассматриваемые промежутки времени. Из этой таблицы следует, что наблюдается полное соответствие суммарного водного бюджета ($P - E + Q^*$) как в период роста УКМ, так и в период падения. Авторы отмечают, что именно *увеличение скорости испарения над Каспийским морем в течение 37-летнего периода сыграло доминирующую роль в изменении тенденций УКМ и привело к его текущему снижению*, превышающему влияние изменений притока реки Волги. При этом даже при современном уровне испарения северная часть Каспийского моря может полностью исчезнуть за 75 лет. По мнению авторов, превосходное соответствие между наблюдаемыми и вычисленными значениями УКМ обусловлено использованием для расчета среднемесячных значений испарения и осадков над морем климатической модели Climate Forecast System (CFS), которая представляет собой полностью связанную климатическую модель, включающую компоненты атмосферы, океана, морского льда и суши, и охватывает период с 1979 г. по настоящее время [12].

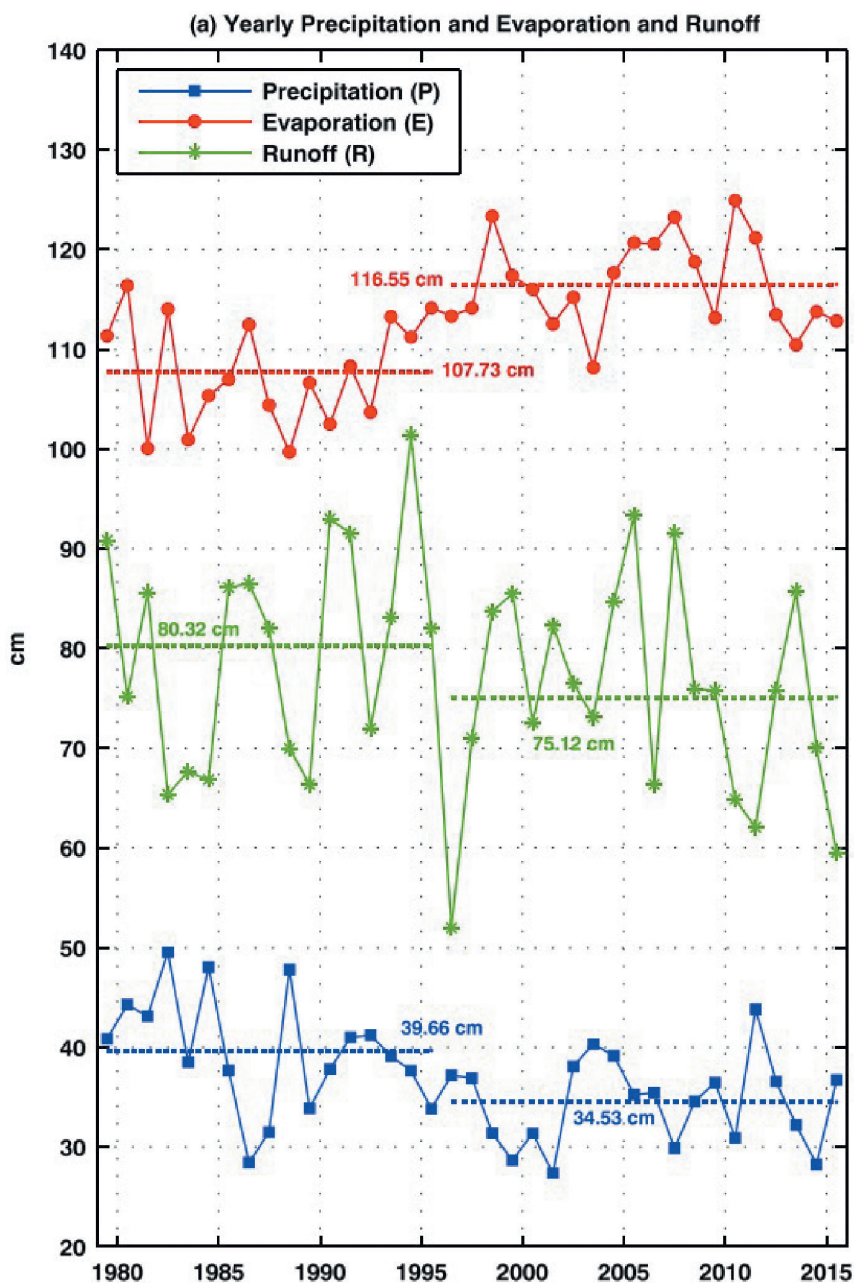


Рис. 4. Межгодовая изменчивость испарения (E), осадков (P) и суммарного притока речных вод к Каспию (R) за период 1980—2015 гг. [9].

Fig. 4. Interannual variability of evaporation (E), precipitation (P) and total inflow of river waters to the Caspian Sea (R) for the period 1980—2015 [9].

Таблица 1

Средние темпы изменения уровня Каспийского моря за периоды 1979—1995 и 1996—2015 гг. с оценками вкладов среднегодового количества осадков (P), испарения (E), речного стока (Q) по данным работы [9]

Average rate of change in the level of the Caspian Sea for the periods 1979—1995 and 1996—2015 with estimates of the contributions of the average annual precipitation (P), evaporation (E), river runoff (Q) according to the data of [9]

Характеристика	1979—1995 гг., см/год	1966—2015 гг., см/год
Уровень моря	12,74	-6,72
Испарение (E)	107,73	116,55
Осадки (P)	39,66	34,53
Волжский сток (Q)	74,02	65,23
Общий сток (Q^*)	80,32	75,12
$P - E + Q$	12,25	-6,90
$P - E + Q^*$	12,38	-6,79

Отметим, что в табл. 1 пропущена компонента водного баланса, представляющая собой сток каспийских вод в залив Кара-Богаз-Гол (КБГ). Авторы поместили ее в разряд «неопределенностей» расчетов, объяснив, что «количественная оценка потенциального вклада оттока в залив КБГ в долгосрочное изменение УКМ затруднена». В действительности достаточно надежные годовые оценки стока в з. КБГ могут быть получены при использовании простой нелинейной зависимости от среднегодового уровня моря [4]. При полном разрушении дамбы в 1992 г. поперечное сечение пролива увеличилось примерно в два раза [13]. Огромный поток каспийских вод устремился в залив. Через несколько лет сток в з. КБГ пришел в равновесие с уровнем моря. По данным [4], сток за период 1996—2012 гг. составил $19,5 \text{ км}^3/\text{год}$ (5,0 см слоя моря). Можно легко досчитать сток за 2013—2015 гг. Получим, что годовой сток за период 1996—2015 гг. равен $18,9 \text{ км}^3/\text{год}$ или 4,85 см слоя моря. Отсюда вклад стока в з. КБГ в падение УКМ достигает 72 %. Только 28 % приходится на все остальные компоненты водного баланса. Отсюда следует, что именно **полное разрушение дамбы в 1992 г. стало главной причиной сильного падения уровня моря после 1996 г.**, а не рост испарения. С учетом оценок вклада в падение уровня речного стока и осадков (0,64 и 0,26 см/год), получаем, что вклад испарения должен составлять $1,87 - 0,90 = 1,00 \text{ см/год}$ или 14,4 %. На вклад речного стока приходится 9,5 %. Таким образом, о доминирующей роли испарения в падении УКМ [9] не может быть и речи.

Роль испарения состоит в том, что в определенный момент времени за счет уменьшения Q^* оно превысило сумму притока речных вод и осадков и сформировало отрицательный тренд в $P - E + Q^*$, продолжительность которого трудно оценить. По сути, приведенные в табл. 1 результаты расчетов свидетельствуют о значительных систематических ошибках компонент водного баланса, причем суммарная ошибка по отношению к наблюдаемому уровню моря превышает 70 %. На наш взгляд, это вызвано, прежде всего, систематическими ошибками в оценках испарения и осадков по модели CFS. В значительной степени они обусловлены

отсутствием сопоставления с фактическими значениями испарения и осадков на морских станциях и постах в акватории моря.

Вследствие исключительной специфики физико-географических, климатических, гидрологических и иных условий Каспийского моря современные климатические модели до сих пор не в состоянии адекватно описать не только различные процессы на его акватории, но даже пространственное распределение такой характеристики как температура воздуха [10].

В работе [10] было отобрано 10 лучших климатических моделей из проекта СМIP5, температура воздуха из которых сравнивалась за зимний сезон 1960—2004 гг. с аналогичными эмпирическими данными для 8 морских станций на Каспии (табл. 2). Основной вывод из результатов табл. 2 состоит в том, что все модели систематически завышают среднюю температуру воздуха от 3 до почти 12 °С, превышая, иногда в несколько раз, естественную изменчивость, которая в среднем равна 3,2 °С. Кроме того, можно отметить, что коэффициенты корреляции между наблюдаемыми и рассчитанными по моделям временными рядами среднемесячных температур были очень низкими и даже статистически незначимыми. По сути модели климата не могут воспроизводить фактическую межгодовую изменчивость температуры воздуха, а возможно и компонент водного баланса моря.

Таблица 2

Разности между рассчитанными по моделям температурой воздуха и среднемноголетними фактическими значениями за зимний сезон 1960—2005 гг. для станций Северного и Среднего Каспия [10]

Differences between model temperature and the average long-term observed of the winter season for 1960—2005 on stations of the North and Middle Caspian [10]

Модель	Номер метеостанции							
	1	2	3	4	5	6	7	8
BCC	7,6	6,2	5,0	5,4	4,9	5,5	5,3	6,6
CanESM2	11,0	9,0	8,4	8,6	7,5	8,7	7,8	8,7
CCSM	9,8	8,4	7,2	7,4	7,7	7,5	8,1	9,8
CNRM	6,7	4,1	4,1	5,0	5,5	5,0	5,9	8,0
CSIRO	8,4	5,4	5,8	7,2	6,1	7,2	6,4	6,5
Hadley	5,7	4,4	3,1	4,9	6,3	4,9	6,6	9,3
INM	6,8	5,2	4,2	4,9	5,9	4,9	6,3	7,3
MPI	7,7	6,5	5,1	5,5	6,9	5,6	7,1	9,3
MIROC	11,9	10,3	9,3	8,8	6,9	8,9	7,3	7,3
IPSL	8,2	6,1	5,6	5,5	4,8	5,6	5,1	6,6
CKO	3,8	4,0	3,4	3,0	2,5	3,1	2,9	3,0

Примечание: 1 — Пешной, 2 — Атырау, 3 — Астрахань, 4 — Лагань, 5 — о. Тюлений, 6 — о. Кулалы, 7 — Форт-Шевченко, 8 — Актау.

О прогнозе уровня Каспия на перспективу

Выше уже говорилось о крайне неудовлетворительном состоянии прогнозов УКМ на перспективу, особенно о смене тенденций длительного роста (падения)

уровня. Сначала нынешнего столетия все большее распространение для оценивания уровня на перспективу получают климатические модели, причем их авторы, особенно не задумываясь, рассчитывают уровень на конец столетия. Известно, что современным климатическим моделям свойственны значительные неопределенности, причем они накапливаются с увеличением расчетного промежутка и могут превысить все разумные рамки.

Укажем ряд моделей, в которых дается прогноз УКМ на конец XXI века по различным моделям [14—18 и др.]. Все они, исключая работу [18], дают сильное снижение уровня, но наиболее широкую известность получила работа [14], очевидно, вследствие экстремальности полученных результатов. В данной работе на основе модели CESM1.2.2 рассматриваются основные режимы зимней изменчивости климата в Северной Атлантике и атмосферные дальние связи, которые потенциально влияют на гидроклимат Каспийского водосборного региона. По модельным данным получен слабо положительный коэффициент корреляции ($r = 0,2$) между зимним водным бюджетом водосбора (осадки минус испарение) и САК для исторического периода 1850—2000. Было принято, что САК остается ведущим режимом зимней изменчивости с доминирующим влиянием на климат в Каспийском водосборном регионе. В соответствии со сценарием RCP4.5 корреляция между зимним NAO и зимним $P-E$ над водосборным бассейном Каспийского моря увеличивается ($r = 0,5$). Однако для RCP8.5 эта корреляция исчезает из-за дипольной модели север—юг с положительной аномалией $P-E$ над северными и отрицательной аномалией над южными частями водосборного бассейна Каспийского моря, что сводит на нет влияние на общий водный бюджет Каспия. Тем не менее из-за увеличения ежегодного испарения над Каспийским морем в условиях потепления климата модель прогнозирует дополнительное снижение УКМ примерно на 9 и 18 м между 2020 и 2100 гг. для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 соответственно, причем общая площадь Каспия сократится на четверть (рис. 5). В результате произойдет грандиозная социально-экономическая и экологическая катастрофа, которая по своему масштабу может превзойти катастрофу Арала.

Впрочем, подобный прогноз является скорее фантастическим, чем научным. Действительно, главный базис, т. е. на чем строится модель — это коэффициент корреляции, равный 0,2 между зимним водным бюджетом водосбора (осадки минус испарение) и САК. Вряд ли к такому «базису» можно относиться серьезно, скорее, только с улыбкой. Использование в виде основы прогноза зимнего бюджета волжского бассейна также вызывает серьезные возражения, поскольку летнее увлажнение вносит существенный вклад в формирование годового стока Волги. Очевидно, другие предположения уже нет необходимости комментировать. Что касается других моделей, ориентированных на прогноз уровня, то в них тоже делаются плохо обусловленные предположения относительно межгодовой изменчивости компонент водного баланса. При интегрировании моделей на длительный срок происходит накопление ошибок, вследствие чего полученные результаты становятся крайне ненадежными.

В принципе, даже без использования сложных климатических моделей можно высказать соображения, когда может произойти стабилизация колебаний УКМ.

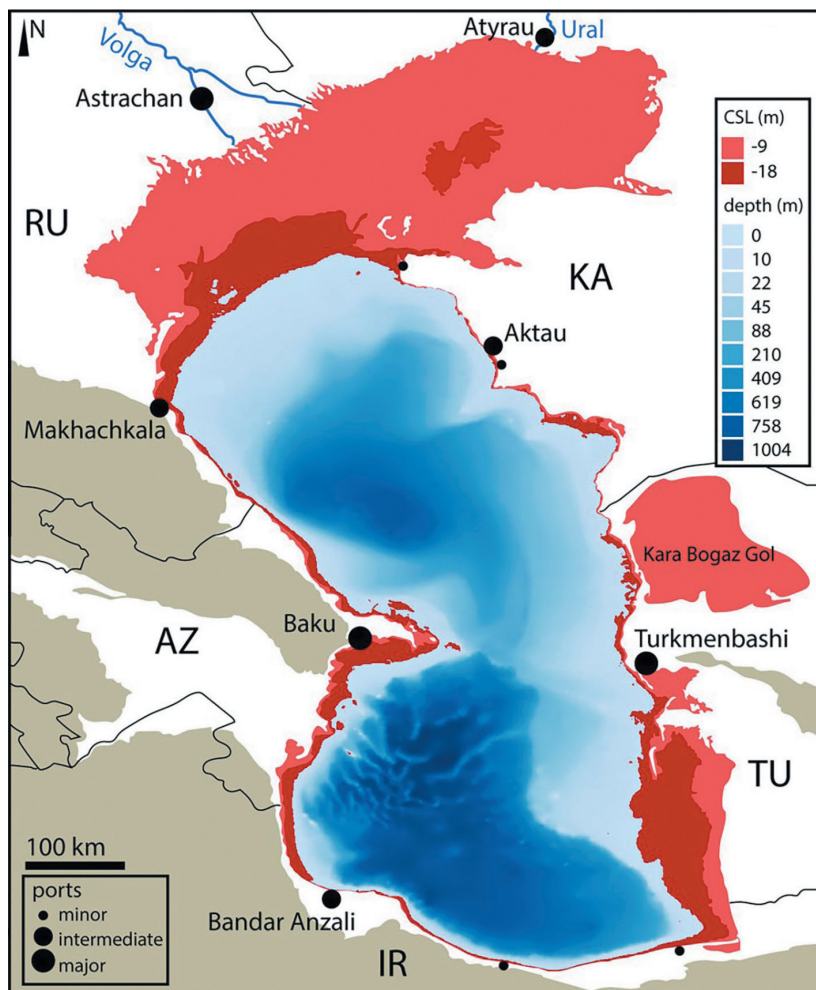


Рис. 5. Изменения уровня Каспийского моря на конец столетия для климатических сценариев RCP4.5 и RCP8.5 [14].

Fig. 5. Changes in the level of the Caspian Sea at the end of the century for climate scenarios RCP4.5 and RCP8.5 [14].

Согласно [4] отметка дна пролива КБГ составляет $-30,6$ м БС, поскольку при таком уровне моря сток в залив прекращается. Учет также действие морфометрического фактора, в соответствии с которым существует отрицательная обратная связь уровня с испарением с его поверхности [13]. С уменьшением уровня и соответственно площади моря происходит сокращение объема испарившейся воды, что в свою очередь способствует сокращению падения уровня. Поскольку испарение в последнее десятилетие уже начало снижаться [9], то не исключено, что это

может быть связано с действием морфометрического фактора. Поэтому вполне вероятно, что отметка уровня -31 м БС является уже уровнем тяготения, ниже которого УКМ вряд ли опустится ниже при современных климатических условиях.

Заключение

Показано, что основной причиной быстрого снижения УКМ с 1996 г. является не интенсивный рост испарения с поверхности моря, а годовой сток каспийских вод в залив КБГ в результате полного разрушения дамбы в 1992 г., который за период 1996—2015 гг. составлял $18,9$ км³/год или $4,85$ см слоя моря. Отсюда вклад стока в з. КБГ в падение УКМ достигает 72 %. Только 28 % приходится на все остальные компоненты водного баланса. При этом вклад испарения примерно $1,00$ см/год или $14,4$ %. На вклад речного стока приходится $9,5$ %. Оставшиеся 4 % — вклад осадков. Роль испарения состоит в том, что в определенный момент времени за счет уменьшения Q^* оно превысило сумму притока речных вод и осадков и сформировало отрицательный тренд в $P - E + Q^*$, возможная продолжительность которого не поддается оценке. Как уже было отмечено выше, природа длительности долговременных однонаправленных колебаний уровня (естественных климатических периодов) до настоящего времени не выявлена и не поддается реальному прогнозу.

В настоящее время УКМ находится примерно на отметке $-28,5$ м. Есть основания полагать, что в ближайшие годы уровень может опуститься ниже 29 м! Это означает катастрофу для рыбного промысла, поскольку произойдет осушение нерестилищ ценных пород рыбы в северной части моря. В Советском Союзе этой проблемой занимались на государственном уровне. Так, в 1960—70-е гг. перед явной угрозой снижения уровня ниже 29 м была разработана комплексная государственная Программа переброски стока ряда северных рек в Волгу, что позволило бы стабилизировать уровень Каспия. В конце 70-х Программа была принята Советом Министров, и началась ее реализация. К 1983 г. была уже освоена гигантская по тем временам сумма — около 3 млрд руб. В 1986 г. в связи с устойчивым ростом уровня Программа была закрыта. А что сейчас? Похоже, государственные органы данная проблема не волнует. Или в Каспийском море уже не осталось островных? Не выделяются деньги даже на научные программы комплексных исследований Каспийского моря. В результате через несколько лет мы можем оказаться у разбитого корыта. Уровень катастрофически снизится, а мы не будем знать, как с этим бороться. При дальнейшем падении уровня начнется осолонение вод моря, вследствие чего его водная экосистема будет угнетаться, и неизвестно, сможет ли она приспособиться к новым быстро изменяющимся экологическим условиям.

Вследствие возможного падения уровня ниже отметки 29 м и в связи с этим огромным экономическим ущербом для прикаспийских стран проблема прогноза уровня на перспективу приобретает стратегическое научное и практическое значение. Насущной задачей является установление детального генезиса длительных изменений уровня и на этой основе разработки методологии его междесятилетнего прогнозирования. Серьезную озабоченность резким падением уровня моря

выразил Президент Азербайджана Г. Алиев, который на Каспийском саммите 2022 г. сказал, что проблема обмеления моря нас крайне волнует. И поэтому необходима тщательная экспертиза ее причин.

Однако надежных методов УКМ на перспективу не существует. Наиболее часто используемые для этой цели климатические модели плохо описывают даже современный климат Каспийского моря, что указывает их непригодность для прогноза уровня моря на длительную перспективу (конец столетия). В предположении стационарности (неизменности) воспроизводимых ими климатических условий выполняется интегрирование моделей на длительный срок, что приводит к накоплению ошибок, вследствие чего полученные результаты становятся крайне ненадежными.

Существует высокая вероятность того, что стабилизация колебаний УКМ может произойти при достижении уровня отметки $-30,6$ м БС, поскольку в этом случае оголяется дно пролива КБГ и прекращается сток в залив. Дополнительно действие морфометрического фактора (сокращение испарения за счет уменьшения площади моря), возможно, компенсирует тренд в испарении при росте глобального потепления. Поэтому маловероятно, что УКМ понизится ниже -31 м БС, и Каспий повторит судьбу Аральского моря.

Список источников

1. Варущенко С. И., Варущенко А. Н., Клиге Р. К. Изменения режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремени. М., Наука, 1987. 240 с.
2. Малинин В. Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб.: Изд. РГТМИ, 1994. 160 с.
3. Малинин В. Н. Долгосрочное прогнозирование уровня Каспийского моря // Изв. РАН. Серия географическая. 2009. № 6. С. 7—16.
4. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. М.: Триада Лтд, 2016. 378 с.
5. Малинин В. Н., Радикович В. М., Гордеева С. М., Куликова Л. А. Изменчивость индексов вихревой активности атмосферы над Северной Атлантикой. СПб., Гидрометеиздат, 2003, 171 с.
6. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Уровень Каспийского моря как индикатор крупномасштабного влагообмена в системе «океан—атмосфера—суша» // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 4. С. 5—20. doi: 10.17076/lim1156.
7. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980—2020) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 5. С. 277—291. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.
8. Гинзбург А. И., Костяной А. Г. Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-е — 2017 гг.) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 7. С. 195—207. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-195-207.
9. Chen J. L., Pekker T., Wilson C. R., Tapley B. D., Kostianoy A. G., Cretaux J.-F., Safarov E. S. Longterm Caspian Sea level change // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44. P. 6993—7001. doi: 10.1002/2017GL073958.
10. Лобанов В. А., Наурызбаева Ж. К. О возможных изменениях толщины морского льда в Каспийском море в текущем столетии // Гидрометеорология и экология. 2021. № 62. С. 75—95. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-75-95.
11. Kazmin A. S. Multidecadal variability of the hydrometeorological parameters in the Caspian Sea // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2021. V. 250. doi: 10.1016/j.ecss.2020.107150.
12. Saha S., et al. The NCEP Climate Forecast System version 2 // J. Clim. 2014. V. 27. P. 2185—2208. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.

13. Фролов А. В. Особенности механизма многолетних колебаний уровня Каспийского моря // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 55. С. 120—128.
14. Nandini-Weiss S. D., Prange M., Arpe K., Merkel U., Schulz M. Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area // Intern. J. Climatology. 2020. V. 40. P. 2717—2731. doi: 10.1002/joc.6362.
15. Elguindi N., Giorgi F. Simulating multi-decadal variability of Caspian Sea level changes using regional climate model outputs // Climate Dynamics. 2006. V. 26. P. 167—181.
16. Renssen H., Longhead B. C., Aerts J. C., de Moel H., Ward P. J., Kwadijk J.C.J. Simulating long-term Caspian Sea level changes; the impact of Holocene and future climate conditions // Earth and Planetary Science Letters. 2007. V. 261. P. 685—693.
17. Kislov A. V., Panin A., Toropov P. A. Current status and palaeostages of the Caspian Sea as a potential evaluation tool for climate model simulations // Quaternary International. 2014. V. 345. P. 48—55. doi: 10.1016/j.quaint.2014.05.014.
18. Arpe K., Leroy S. The Caspian Sea level forced by the atmospheric circulation, as observed and modeled // Quaternary International. 2007. V. 173—174. P. 144—152.

References

1. Varushchenko S. I., Varushchenko A. N., Klige R. K. *Izmeneniya rezhima Kaspiiskogo morya i bestochnykh vodoemov v paleovremeni = Changes in the regime of the Caspian Sea and inland reservoirs in paleotime*. Moscow: Nauka, 1987: 240 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. Malinin V. N. Long-term forecasting of the Caspian Sea level. *Izv. RAN. Ser. Geogr = Izv. RAN. Geographical ser.* 2009;(6):(7—16). (In Russ.).
4. *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.).
5. Malinin V. N., Radikevich V. M., Gordeeva S. M., Kulikova L. A. *Izmenchivost' vikhrevoi aktivnosti atmosfery nad Severnoi Atlantikoi = The variability of atmosphere vortex activity over the North Atlantic*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003: 171 p. (In Russ.).
6. 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.).
7. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Serykh I. V., Lebedev S. A. Climatic changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980—2020). *Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2021;18;(5):277—291. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291. (In Russ.).
8. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G. Tendencies of changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea in the modern period (1990s — 2017). *Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2018;15;(7):195—207. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-195-207. (In Russ.).
9. Chen J. L., Pekker T., Wilson C. R., Tapley B. D., Kostianoy A. G., Cretaux J.-F., Safarov E. S. Longterm Caspian Sea level change. *Geophysical Research Letters*. 2017;(44):6993—7001. doi: 10.1002/2017GL073958.
10. Lobanov V. A., Naurozbayeva Zh. K. Caspian seas ice thickness possible changes in the current century. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2021;(62):75—95. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-75-95. (In Russ.).
11. Kazmin A. S. Multidecadal variability of the hydrometeorological parameters in the Caspian Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2021;(250):107—150. doi: 10.1016/j.ecss.2020.107150.
12. Saha S., et al. The NCEP Climate Forecast System version 2. *J. Clim.* 2014;(27):2185—2208. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.
13. 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.).

14. Nandini-Weiss S. D., Prange M., Arpe K., Merkel U., Schulz M. Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area. *Intern. J. Climatology*. 2020;(40):2717—2731. doi: 10.1002/joc.6362.
15. Elguindi N. Giorgi F. Simulating multi-decadal variability of Caspian Sea level changes using regional climate model outputs. *Climate Dynamics*. 2006;(26):167—181.
16. Renssen H., Longhead B. C., Aerts J. C., de Moel H., Ward P. J. Kwadijk J. C. J. Simulating long-term Caspian Sea level changes; the impact of Holocene and future climate conditions. *Earth and Planetary Science Letters*. 2007;(261):685—693.
17. Kislov A. V., Panin A. Toropov P. A. Current status and palaeostages of the Caspian Sea as a potential evaluation tool for climate model simulations. *Quaternary International*. 2014;(345):48—55. doi: 10.1016/j.quaint.2014.05.014.
18. Arpe K. Leroy S. The Caspian Sea level forced by the atmospheric circulation, as observed and modeled. *Quaternary International*. 2007;(173—174):144—152.

Информация об авторе

Валерий Николаевич Малинин, д-р геогр. наук, профессор, профессор кафедры прикладной океанографии ЮНЕСКО—МОК и комплексного управления прибрежными зонами Института гидрологии и океанологии Российского государственного гидрометеорологического университета, malinin@rshu.ru.

Information about author

Valery N. Malinin, Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Russian State Hydrometeorological University, Institute of Hydrology and Oceanology, UNESCO—IOC Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Professor.

Статья поступила 02.10.2022

Принята в печать 17.11.2022

The article was received on 02.10.2022

The article was accepted 17.11.2022