

## Основные причины изменения уровня Каспийского моря

*А.Г. Костяной<sup>1,2,3)\*</sup>, В.Н. Малинин<sup>4)</sup>, А.В. Фролов<sup>5)</sup>*

<sup>1)</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
Россия, 117997, Москва, Нахимовский пр., 36

<sup>2)</sup> Московский университет им. С.Ю. Витте,  
Россия, 115432, Москва, 2-й Кожуховский пр-д, 12, строение 1

<sup>3)</sup> Майкопский государственный технологический университет,  
Россия, Республика Адыгея, 385000, Майкоп, ул. Первомайская, 191

<sup>4)</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет,  
Россия, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98

<sup>5)</sup> Институт водных проблем РАН,  
Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, 3

\*Адрес для переписки: *Kostianoy@gmail.com*

**Реферат.** В работе представлен краткий обзор современных представлений об основных причинах изменений уровня Каспийского моря, которые происходят в результате нарушения водного баланса моря. Основной причиной изменения водного баланса моря является изменение регионального климата в регионе Каспийского моря и на обширном водосборном бассейне моря. Оно включает изменение режима осадков, испарения, речного стока, а также стока в залив Кара-Богаз-Гол. Рассмотрены и другие причины, обсуждаемые в литературе: космогеофизические, геолого-геодинамические и антропогенные. Хронология изменения уровня Каспия показывает, что его уровень трудно прогнозируется на длительную перспективу, несмотря на достаточно простой водный баланс. В связи с огромным эколого-экономическим значением длительных изменений уровня Каспия его прогноз на предстоящие десятилетия остается стратегической задачей в условиях продолжающегося снижения уровня моря, начавшегося в 1995-1996 гг. Падение уровня на ~2.7 м за 1995-2024 год уже привело к ощутимым экологическим и социально-экономическим последствиям для всех прикаспийских стран.

**Ключевые слова.** Каспийское море, Кара-Богаз-Гол, водный баланс, региональное изменение климата, осадки, испарение, речной сток, уровень моря.

## Main causes of changes in the Caspian Sea level

*A.G. Kostianoy<sup>1,2,3)\*</sup>, V.N. Malinin<sup>4)</sup>, A.V. Frolov<sup>5)</sup>*

<sup>1)</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovsky Pr., 117997, Moscow, Russian Federation

<sup>2)</sup> S.Yu. Witte Moscow University,  
12, Build. 1, 2<sup>nd</sup> Kozhukhovskiy Pr., 115432, Moscow, Russian Federation

<sup>3)</sup> Maykop State Technological University,  
191, Pervomayskaya Str., 385000, Maykop, Republic of Adygea, Russian Federation

<sup>4)</sup> Russian State Hydrometeorological University,  
98, Malo-Okhtinsky Prospekt, 195196, Saint Petersburg, Russian Federation

<sup>5)</sup> Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences,  
3, Gubkina Str., 119333, Moscow, Russian Federation

\* Correspondence address: *Kostianoy@gmail.com*

**Abstract.** The paper presents a brief overview of current understanding of the main causes of Caspian Sea level changes that occur as a result of disruption of the sea's water balance. The main cause of changes in the sea's water balance is regional climate change in the Caspian Sea region and in the vast catchment area of the sea. It includes changes in precipitation, evaporation, river runoff, and runoff into the Kara-Bogaz-Gol Bay. Other causes discussed in the literature are also considered: cosmogeophysical, geological-geodynamic, and anthropogenic. The chronology of Caspian Sea level changes shows that its level is difficult to predict for the long term, despite its fairly simple water balance. Due to the enormous ecological and economic significance of long-term changes in the Caspian Sea level, its forecast for the coming decades remains a strategic task in the context of the ongoing sea level decline that began in 1995-1996. The drop in the sea level by about 2.7 m has already led to tangible environmental and socio-economic consequences for all Caspian countries.

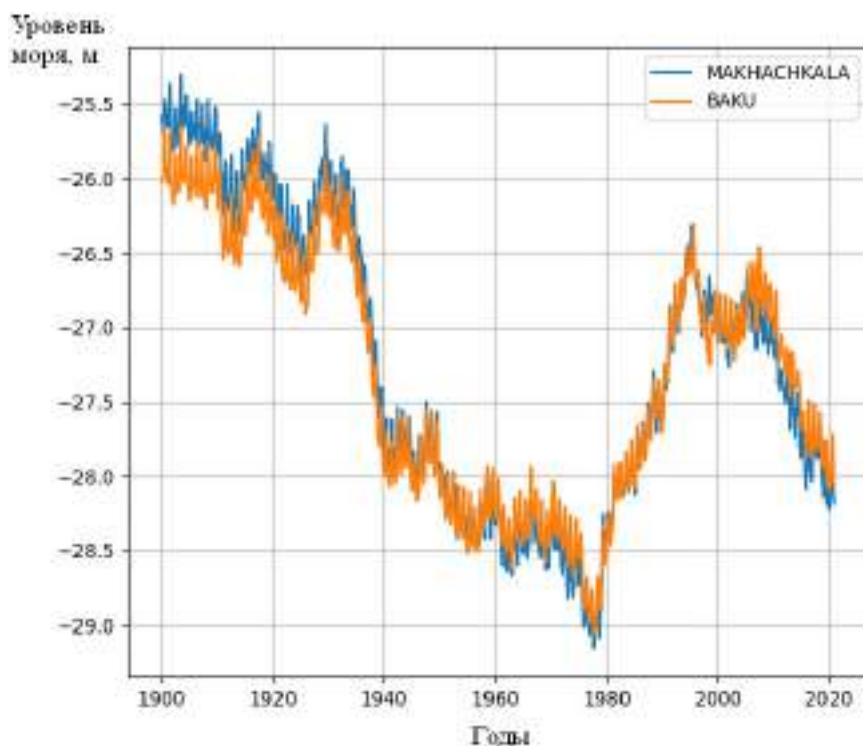
**Keywords.** Caspian Sea, Kara-Bogaz-Gol, water balance, regional climate change, precipitation, evaporation, river runoff, sea level.

## Введение

В настоящее время Каспийское море привлекает к себе повышенное внимание ученых, власти, бизнеса и общественности всех прикаспийских стран в связи с продолжающимся с 1995 г. снижением уровня моря, которое в настоящее время достигло 2.7 метра, и уровень преодолел исторический минимум -29.0 м в Балтийской системе высот, он был достигнут в 1977 году (рис. 1) и являлся минимумом за последние 400 лет (Варущенко и др., 1987). Зимой 2023/2024 года уровень моря по спутниковым альтиметрическим данным преодолел отметку в -29.0 м, и в феврале 2024 г. достиг -29.1 м, что подтверждается данными Бакинского поста в Азербайджане, где зимой 2024 г. уровень моря опустился до -29.4 м, и данными Махачкалинского поста в России (-29.3 м в марте 2024 г.) (Костяной, 2024; Kostianoy, Pesic, 2024). Зимой 2024/2025 гг. уровень Каспийского моря, по спутниковым альтиметрическим данным, опустился до -29.4 м (рис. 2). Обмеление Каспийского моря существенным образом сказалось на изменении береговой линии и привело к появлению или слиянию островов, увеличению площади островов, выдвиганию дельты Волги, обмелению Волго-Каспийского морского судоходного

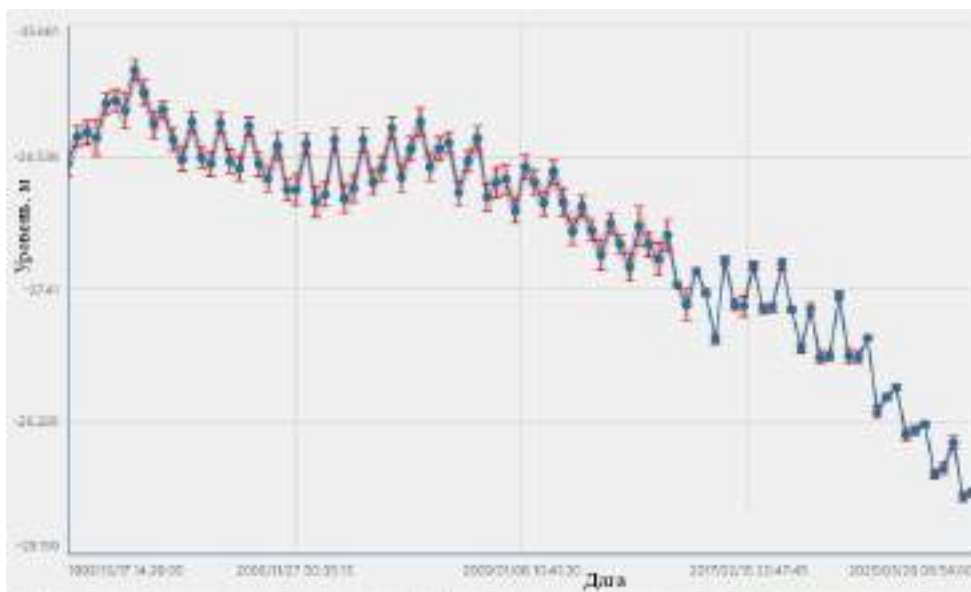
---

канала и исчезновению крупных заливов в мелководном Северном Каспии. Так, например, залив Мертвый Култук и его продолжение залив Кайдак в северо-восточной части моря вновь пересохли, превратившись в обширный сор (солончак) (Ginzburg et al., 2024). В меньшей степени это коснулось глубоководных частей моря – Среднего и Южного Каспия, однако, и здесь наблюдаемое снижение уровня моря привело к существенным переменам. К 2021 году площадь лагуны Энзели (Иран) сократилась примерно на 55% по сравнению с ее значением в 1995 году, лагуны Гомишан (Иран) – примерно на 98%, залива Горган (Иран) – на 40%, залива Кызыл-Агач (Гызыл-Агадж, Азербайджан) – на 41% и залива Туркменбаши (Туркменистан) – на 30% (Ginzburg et al., 2024). Увеличился в размерах остров Огурчинский (Туркменистан) у восточного побережья Южного Каспия. Происходит обмеление всех портов на Каспии.



**Рисунок 1.** Изменения среднемесячного уровня Каспийского моря на уровневых постах в Махачкале и Баку с 1900 по 2020 год

**Figure 1.** Interannual variability of the average monthly level of the Caspian Sea at gauge stations in Makhachkala and Baku from 1900 to 2020



**Рисунок 2.** Сезонная и межгодовая изменчивость уровня Каспийского моря с 27 сентября 1992 г. по 28 марта 2025 г., по данным спутниковой альтиметрии (база данных HYDROWEB, <https://hydroweb.next.theia-land.fr/?lang=fr>)

*Альтиметрические данные завышены примерно на 0.5 м относительно уровня моря на постах*

**Figure 2.** Seasonal and interannual variability of the Caspian Sea level from 27 September 1992 to 28 March 2025, according to the satellite altimetry data (HYDROWEB, <https://hydroweb.next.theia-land.fr/?lang=fr>)

*Altimetry data is overestimated by approximately 0.5 m relative to sea level at the gauge stations*

Прогрессивное снижение уровня Каспия со средней скоростью порядка 10 см в год (максимальная скорость достигала 35 см в год) привело к многочисленным негативным экологическим и социально-экономическим последствиям, которые широко обсуждаются на межправительственном уровне, международных научных форумах, на региональном и федеральном уровне в различных министерствах и ведомствах. Ситуация усугубляется пессимистическими прогнозами, которые показывают, что к концу XXI века уровень Каспия может снизиться еще на 2-21 м в зависимости от различных сценариев климатического развития в регионе (Nandini-Weiss et al., 2020; Prange et al., 2020; Samant, Prange, 2023; Lahijani et al., 2023; Hoseini et al., 2025 и др.). По оценке различных специалистов, это приведет к частичному или полному обмелению всего Северного Каспия, залива Кара-Богаз-Гол и лагун на Южном Каспии. Произойдет отступление береговой линии от нескольких до десятков километров, а в казахстанской части Северного Каспия уже при падении уровня на 10 м – до 200 км от современного берега, портов и городов с катастрофическими социально-экономическими и экологическими последствиями для всех прикаспийских стран (Court et al., 2025).

Целью данной работы является краткий обзор современных представлений об основных причинах изменения уровня Каспийского моря, которые происходят в результате нарушения водного баланса моря.

## Водный баланс Каспийского моря

На первый взгляд водный баланс Каспийского моря достаточно простой: приходная часть водного баланса состоит из речного стока и атмосферных осадков, выпадающих на акватории моря, а расходная часть – из испарения с зеркала моря и естественного стока в залив Кара-Богаз-Гол. Разница уровней воды в Каспии и заливе может составлять от 0.2-0.3 м до нескольких метров. Среднегодовые уровни Каспия всегда превышают уровни воды в заливе, что обеспечивает односторонний годовой сток воды из моря в залив. Если приходная часть водного баланса компенсируется расходной, то уровень моря не изменяется. Если приходная часть превышает расходную, то уровень моря повышается или, наоборот, понижается, если расходная часть превосходит приходную. Таким образом, в уравнении водного баланса необходимо также учитывать изменения объема воды Каспия во времени (т.е. внутригодовое изменение уровня моря), на который он увеличился или уменьшился, например, за год. Однако, точный расчет всех компонент водного баланса представляет большую сложность, а их прогноз на долгосрочную перспективу – практически невыполнимую задачу. Именно по этой причине никто не смог спрогнозировать ни минимум уровня 1977 года, ни резкое повышение уровня на 2.5 м до 1995 г., ни очередное снижение уровня на ~2.7 м в последующие 30 лет, включая стабилизацию уровня в 2015-2018 гг. (рис. 1, 2).

По своей значимости проблема прогноза уровня Каспия на перспективу является центральной. Известно, что уровню Каспийского моря (УКМ) свойственны серии длительных односторонних колебаний большой амплитуды. В результате имеем 3 фазы относительно однородных колебаний уровня (стояние, падение, рост), которые были названы (Малинин, 1994) естественными климатическими периодами (ЕКП). В естественных условиях минимальная продолжительность всех ЕКП за прошедшие 2000 лет составляет 40 лет.

Внутри ЕКП прогноз уровня на 1-3 года не представляет сложности, принципиальное значение имеет установление сроков длительности ЕКП или прогноз реперных (переломных) лет ЕКП, свидетельствующих о формировании новых длительных тенденций в колебаниях УКМ. Именно переломные годы (1978-1979 и 1995-1996 гг.) в колебаниях уровня современная наука оказалась не в состоянии предсказать. Почему? Еще в 1994 г. главной причиной неудачных прогнозов названо «отсутствие адекватных физических представлений о природе формирования межгодовой изменчивости уровня моря» (Малинин, 1994). В 2016 г. в монографии (Нестеров, 2016) был выполнен обзор нескольких десятков методов прогноза УКМ с длительной заблаговременностью, который свидетельствует о плачевном состоянии проблемы прогноза уровня. Это связано с тем, что до настоящего времени «...отсутствует ясное понимание механизмов, управляющих изменчивостью уровня...» в междекадном (междесятилетнем) масштабе времени. Прошло еще 10 лет, но по-прежнему ясного понимания этих механизмов нет.

---

В данной работе не рассматриваются локальные изменения уровня, которые происходят в результате сгонно-нагонных явлений (до 4 м), приливы (до 12 см), сейши (до 40 см), цунами (до 2 м), половодья (до 50 см), которые не связаны с изменением водного баланса всего моря (Lahijani et al., 2023).

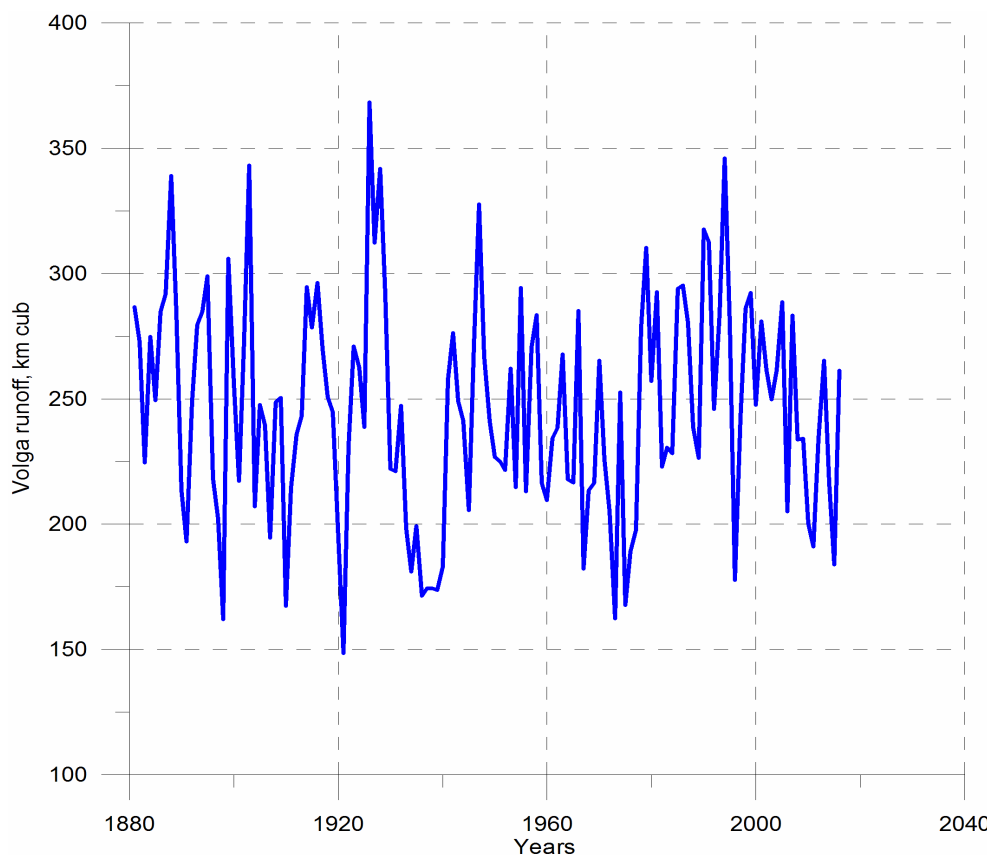
**Речной сток.** В Каспийское море впадает более 130 рек, которые поставляют в море около  $300 \text{ км}^3/\text{год}$  (от  $240 \text{ км}^3/\text{год}$  в 1970-1977 гг. до  $336 \text{ км}^3/\text{год}$  в 1900-1929 гг.), из которых одна только Волга дает примерно  $250 \text{ км}^3/\text{год}$  (рис. 3). Водосборный бассейн Каспийского моря составляет примерно  $3.5 \text{ млн км}^2$ , что почти в 10 раз превышает площадь его зеркала ( $380 \text{ тыс. км}^2$ ) (Байдин, Косарев, 1986; Терзиев и др., 1992; Kosarev, 2005; Zonn et al., 2010; Нестеров, 2016). Крайние точки водосборного бассейна расположены между  $61^\circ 14'$  и  $34^\circ 49'$  с.ш., и  $31^\circ 59'$  и  $60^\circ 59'$  в.д., что определяет значительную межгодовую изменчивость как атмосферных осадков над водосборным бассейном, так суммарного речного стока всех рек. Водосборный бассейн Волги составляет  $1.4 \text{ млн км}^2$  или 40% от всего водосборного бассейна Каспия. Кроме того, сток Волги в Каспий дает  $2/3$  от всей приходной части водного баланса Каспия, поэтому значительные изменения стока Волги естественно должны отражаться на уровне моря, хотя это и не всегда очевидно, поскольку есть другие составляющие водного баланса, участвующие в формировании уровня колебаний.

Сток Волги с 1881 по 2016 год варьировался в очень широком диапазоне – от  $149 \text{ км}^3/\text{год}$  в 1921 г. до  $368 \text{ км}^3/\text{год}$  в 1926 г. (рис. 3). В 1900-1930 гг. колебания стока Волги с размахом в  $200 \text{ км}^3/\text{год}$  приводили к изменению уровня всего порядка 1 м (рис. 1), в то время как последующие изменения такого же порядка, например, уменьшение стока до 1973 года ( $162 \text{ км}^3/\text{год}$ ) и увеличение стока до 1994 года ( $346 \text{ км}^3/\text{год}$ ) приводили к соответствующим изменениям уровня значительно большего масштаба – 2.5-3 м.

Межгодовая изменчивость уровня Каспия в значительной степени должна определяться стоком Волги, что подтверждалось в различные годы. Например, увеличение стока Волги примерно на  $100 \text{ км}^3$  с 1992 по 1994 г. привело к росту уровня моря в 1993-1995 гг. на 28 см, а падение уровня моря с 1995 по 1997 гг. примерно на 40 см соответствовало уменьшению стока Волги на  $168 \text{ км}^3$  с 1994 по 1996 гг., что эквивалентно уменьшению слоя воды на 43 см (Гинзбург, Костяной, 2018). Однако после 1996 г. такой четкой корреляции не наблюдается, особенно в 1996-1999 и 2005-2016 гг., когда падение уровня Каспия продолжалось даже при увеличении стока между некоторыми годами на 80 и даже  $120 \text{ км}^3$ , что должно было бы вызвать повышение уровня на 20-30 см. Таким образом, с 1996 г. дополнительным фактором падения уровня моря при уменьшении в среднем речного стока является, по-видимому, увеличившееся испарение с поверхности моря, что было продемонстрировано в работах (Chen et al., 2017; Серых, Костяной, 2020).

В работе (Chen et al., 2017) сделан вывод, что увеличение объема испарения с 1996 г. сыграло доминирующую роль в изменении тенденций уровня Каспийского моря и привело к его современному снижению. Но при этом не был учтен сток каспийских вод в залив Кара-Богаз-Гол, который авторы поме-

стили в разряд «неопределенностей» расчетов. Однако в работе (Малинин, 2022) было выявлено, что главным фактором снижения УКМ за период 1996-2015 гг. является именно разрушение дамбы в 1992 г. через пролив Кара-Богаз-Гол, вследствие чего вклад стока в залив Кара-Богаз-Гол в падение УКМ достигает 72%. И только 14% приходится на долю испарения. Впрочем, данный вопрос еще требует уточнения.



**Рисунок 3.** Межгодовая изменчивость стока Волги (км<sup>3</sup>/год) с 1881 по 2016 г.

**Figure 3.** Interannual variability of the Volga River runoff (km<sup>3</sup>/year) from 1881 to 2016

С 1994 г. (346 км<sup>3</sup>/год) сток Волги постоянно падает, причем с колебаниями, достигающими 80 км<sup>3</sup>/год (рис. 3). В 2010, 2011 и 2015 гг. сток Волги опускался ниже 200 км<sup>3</sup>/год. Это сопровождается и уменьшением стока других рек Каспийского бассейна – Урала, Терека, Куры, Сефидруд, Полруд и др. с 54 км<sup>3</sup>/год в 1993 г. до 22-24 км<sup>3</sup>/год в 2015-2018 гг. (Lahijani et al., 2023). Значительное снижение стока всех рек является следствием регионального изменения климата на водосборном бассейне Каспийского моря. Оно уменьшает приходную часть водного баланса, что приводит к уменьшению уровня моря.

Точный расчет суммарного речного стока является непростой задачей, поскольку рек, впадающих в Каспийское море много, а современные измери-

тельные системы расхода воды отсутствуют (акустические доплеровские измерители скорости течений, с помощью которых делаются разрезы поперек русла реки). В качестве измерительных систем, в основном, используют гидрометрические вертушки, измеряющие скорость течения в точке и определение площади поперечного сечения русла реки путём промеров глубины. Для расчета расхода воды в реках по-прежнему применяются эмпирические формулы – «кривые расходов», связывающие уровень воды в реке и ее расход. Кроме того, на реках расходы воды обычно измеряют не чаще нескольких раз в году. Точность таких измерений оставляет желать лучшего.

Кроме того, сток Волги определяется по уровненным постам, расположенным выше дельты Волги, площадь которой составляет более 20 тыс. км<sup>2</sup>. Дельта насчитывает до 500 рукавов, протоков и мелких речек, заросших тростником, рогозом, камышом, осокой и многими водными растениями. Поскольку суммарное испарение (включая эвапотранспирацию) с этой территории/акватории неизвестно, то фактически мы не знаем реальную величину стока Волги, которая доходит до Каспийского моря. В книге «Устья рек Каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления» под редакцией проф. В.Н. Михайлова (2013) приводится оценка эффективного испарения с поверхности дельты Волги, близкая к максимальной величине эффективного испарения – 5.23 км<sup>3</sup> для экстремально многоводного 1991 года. Из 130 рек, впадающих в Каспийское море, 9 рек имеют дельты. С падением уровня Каспия все дельты увеличиваются в размерах и расход в них неизвестен.

**Атмосферные осадки.** Атмосферные осадки над акваторией моря распределены весьма неравномерно: наибольшее количество осадков до 1700 мм/год выпадает во влажных субтропиках Ленкоранской низменности в Азербайджане, а наименьшее – до 95 мм/год – на восточном берегу моря, к которому подходят пустыни Центральной Азии (Байдин, Косарев, 1986; Терзиев и др., 1992; Kosarev, 2005; Zonn et al., 2010; Нестеров, 2016). Средняя оценка атмосферных осадков у разных авторов – 180 мм/год, что соответствует примерно 68.4 км<sup>3</sup>/год. В XX веке минимальный объем осадков 69.8 км<sup>3</sup>/год наблюдался в 1900-1929 гг., а максимальный 93.1 км<sup>3</sup>/год в 1978-1982 гг. (Байдин, Косарев, 1986). Уже здесь мы находим противоречие, поскольку средняя оценка осадков 68.4 км<sup>3</sup>/год (180 мм/год) меньше, чем весь диапазон изменения с 1900 по 1982 г. и средней величины 73.7 км<sup>3</sup>/год (191 мм/год) (Байдин, Косарев, 1986).

На основе данных архива CDAS (Climate Data Assimilation System) в (Малинин, Рашад, 2008) получен отрицательный тренд количества осадков над Каспийским морем -0.9 мм/год для периода 1949-2005 гг. Среднегодовое количество осадков уменьшалось в этот период с примерно 280 мм/год до 200 мм/год. Согласно (Малинин, Рашад, 2008), максимальное количество осадков (423 мм) выпало в 1969 г., минимальное (138 мм) – в 1989 г. Средний за период с января 1979 г. по декабрь 2010 г. тренд количества осадков над Каспием практически отсутствовал, однако, по данным GPCP Version 2.2 Combined Precipitation Data, количество осадков сохранялось на уровне 360



мм/год (Костяной и др., 2014), что в два раза выше, чем значения, приведенные в работах (Байдин, Косарев, 1986; Терзиев и др., 1992; Kosarev, 2005; Zonn et al., 2010; Нестеров, 2016).

Расхождения в оценках величины осадков неувидительны, поскольку до появления спутниковых данных было чрезвычайно сложно сделать правильные оценки величины осадков, по данным на нескольких десятках метеостанций, расположенных фактически только на берегах обширного водоема. В настоящее время спутниковые данные и атмосферные реанализы значительно улучшают данные оценки, однако их точность оставляет желать лучшего, а вопросы их валидации не были решены для каспийского региона (Lockhoff et al., 2014; 2019; Золина, 2018).

**Испарение.** Средняя оценка испарения с зеркала Каспийского моря – 910 мм/год, что соответствует примерно  $345.8 \text{ км}^3/\text{год}$  (Байдин, Косарев, 1986). И здесь мы находим расхождение, поскольку в той же книге среднее значение для 1900-1982 гг. –  $375.5 \text{ км}^3/\text{год}$  или 973 мм/год, при этом максимум  $394.8 \text{ км}^3/\text{год}$  наблюдался в 1930-1941 гг., а минимум  $354.8 \text{ км}^3/\text{год}$  – в 1978-1982 гг. По данным Нестерова (Нестеров, 2016), ежегодная величина испарения с поверхности Каспийского моря в XX-XXI вв. изменялась от 920 до 1040 мм слоя, а в среднем море теряло около 970 мм слоя воды (около  $375 \text{ км}^3$ ) в год. Близкая оценка нормы испарения за период 1900-1996 гг. (961 мм/год) получена в работе (Георгиевский, Голубев, 2003).

Правильный расчет испарения с зеркала Каспийского моря также представляет сложную задачу, особенно до появления спутниковых данных и атмосферных реанализов, поскольку фактически все параметры, необходимые для расчета, не измеряются на акватории моря и над ним. Только различные методы дистанционного зондирования Земли из космоса позволили получать данные о температуре поверхности моря, температуре и влажности воздуха, скорости ветра по всей акватории моря. Оценка испарения, выполненная по спутниковым данным, дала 700 мм/год, а межгодовые вариации достигали  $\pm 27\%$  (Лебедев и др., 2008). Что касается атмосферных реанализов, то их точность для Каспийского региона не соответствует необходимым требованиям (Малинин, 2022).

**Сток в залив Кара-Богаз-Гол.** Залив Кара-Богаз-Гол – это мелководное понижение в рельефе, с плоским дном и непостоянной береговой линией, самая обширная на Каспии лагуна размером около  $18.000 \text{ км}^2$ , отделенная от моря двумя песчаными косами, между которыми находится пролив длиной 7-9 км, шириной от 120 до 800 м и глубиной 3-6 м. Морфометрические характеристики Кара-Богаз-Гола существенно изменяются в зависимости от положения уровня моря и залива. Из-за разницы уровней Каспия и залива и в зависимости от ее величины морская вода со скоростью 50-100 см/с устремляется по проливу в залив, где полностью испаряется (в среднем 800-1000 мм/год). Таким образом, при среднегодовой сумме осадков в этом районе не более 110 мм, Кара-Богаз-Гол представляет собой огромный естественный испаритель морской воды. По данным Байдина и Косарева (1986), среднегодовой сток в залив Кара-Богаз-Гол

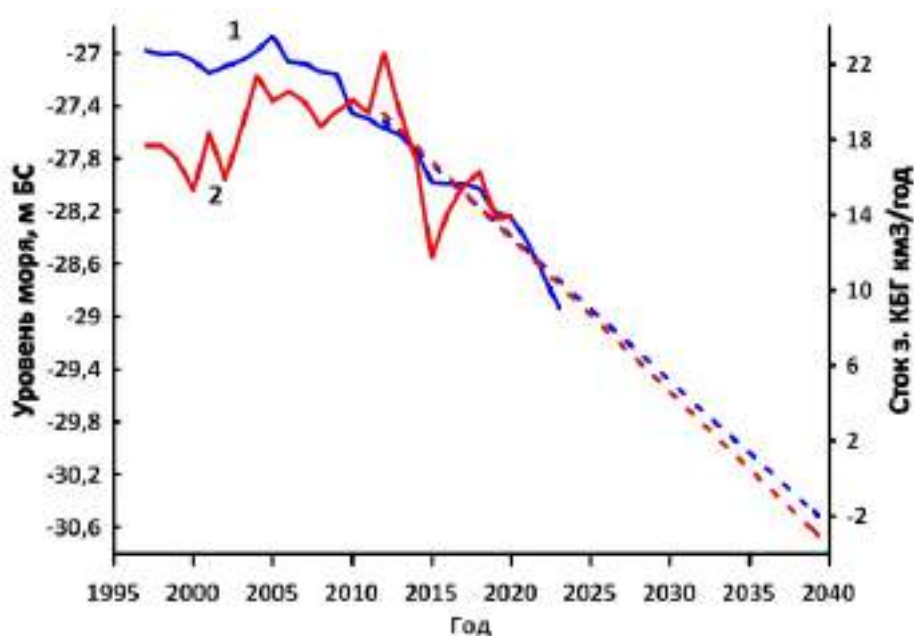
в 1900-1929 гг. составлял  $21.8 \text{ км}^3$ , в 1930-1941 гг. –  $12.4 \text{ км}^3$ , в 1942-1969 гг. –  $10.6 \text{ км}^3$ , в 1970-1977 гг. –  $7.1 \text{ км}^3$ .

С целью сокращения расхода каспийской воды и замедления снижения уровня Каспия, который в 1977 г. достиг абсолютного минимума за последние 400 лет ( $-29 \text{ м}$ ), в марте 1980 г. пролив был перекрыт глухой песчаной дамбой, и поступление морской воды в залив прекратилось. После отделения залива началось его быстрое усыхание. На 1 декабря 1982 г. абсолютная отметка уровня лагуны составила  $-33.5 \text{ м}$ . К концу 1983 г. площадь залива составляла всего  $1000 \text{ км}^2$ , объем –  $0.2 \text{ км}^3$ , а глубины –  $0.1-0.3 \text{ м}$ . Соленость рапы достигла величины  $330-380 \text{ ‰}$ . К середине 1984 г. залив практически полностью высох и превратился в «сухое» соляное озеро (Kosarev, Kostianoy, 2005; Kosarev et al., 2009). В условиях начавшегося быстрого роста уровня моря и в целях сохранения и развития уникального соляного месторождения на Каспии было принято решение восстановить сток в Кара-Богаз-Гол. В сентябре 1984 г. началась подача каспийской воды в залив в объеме  $1.5-1.6 \text{ км}^3/\text{год}$ , что не привело к активному восстановлению гидрологической и гидрохимической обстановки в заливе. В июне 1992 г. дамба была разрушена, и возобновился естественный сток морской воды в залив (Kosarev, Kostianoy, 2005; Kosarev et al., 2009).

Следует отметить роль зависимости оттока воды из Каспия от уровня моря как стабилизирующего фактора при колебаниях уровня в диапазоне  $-29.0 \dots -26.5 \text{ м БС}$ . Отсечение залива Кара-Богаз-Гол привело к изменению режима многолетних колебаний уровня моря, в частности, к увеличению дисперсии уровня примерно на  $40\%$  и, следовательно, к изменению плотности распределения вероятности уровня (Фролов, 1998, 2003, 2016).

С 1880 г. по 1980 г. сток в залив уменьшался примерно с  $38 \text{ км}^3$  до нуля из-за перекрытия дамбой пролива. После разрушения дамбы поперечное сечение пролива увеличилось примерно в два раза (Лавров, 2000), вследствие чего произошло изменение режима оттока воды из моря в залив (Фролов, 1998, 2003, 2016). Вследствие начального большого перепада между уровнями воды в Каспии и заливе (около  $7 \text{ м}$ ) и высоких скоростей течения в проливе, максимальный отток в залив достиг  $52.2 \text{ км}^3$  в 1995 г., затем он снизился и не превышал  $20 \text{ км}^3$  в год (Kosarev et al., 2009). По данным Д.А. Лаврова (2000) и Е.С. Нестерова (2016), сток за период 1996-2012 гг. составил  $19.5 \text{ км}^3/\text{год}$ , а по данным Малинина (2022) –  $18.9 \text{ км}^3/\text{год}$  за период 1996-2015 гг. Установившийся новый режим оттока из моря в залив заметно влияет на колебания уровня моря в примерном диапазоне  $-29 \dots -27 \text{ м БС}$  (Фролов, 2019а, б). В настоящее время в связи с продолжающимся снижением уровня Каспия сток в залив сокращается, однако точных данных о величине стока в залив нет. Дело в том, что морфометрия пролива сильно менялась в последние 150 лет как по естественным причинам (изменение уровня Каспия и скорости течений в проливе), так и в результате перекрытия пролива дамбой и ее последующего разрушения. Кроме того, отсутствуют современные приборы и методы измерения расхода воды в проливе.

Отметим, что согласно (Нестеров, 2016) отметка дна пролива Кара-Богаз-Гол (КБГ) составляет -30.6 м БС, поэтому при таком уровне Каспия сток в залив должен прекратиться, что сохранит Каспию до 20 км<sup>3</sup> в год. На рис. 4 приводится график связи колебаний уровня Каспия и стока в КБГ. Приняв за начало отсчета 2012 г., когда начала формироваться устойчивая тенденция уменьшения стока в залив, путем экстраполяции можно получить год соответствия полного прекращения стока в залив КБГ. При условии стационарности современных климатических условий сток в залив может прекратиться в 2038 г. Дополнительно принимая во внимание морфометрический фактор, который формирует отрицательную обратную связь уровня с испарением на его поверхности, нетрудно предположить, что это может стать основой перехода уровня из фазы падения в фазу стабилизации, состоящую из незначительных колебаний без значимого тренда. Отметим, что вследствие бессточности водоема роль морфометрического фактора в стабилизации уровня, тем более из-за прекращения стока в залив КБГ, становится решающей.



**Рисунок 4.** Межгодовая изменчивость уровня Каспия (1) и стока в залив КБГ (2) за 1993-2023 гг.

*Пунктирные линии – тренды уровня моря и стока в залив КБГ с 2012 г.*

**Figure 4.** Interannual variability of the Caspian Sea level (1) and runoff into the Kara-Bogaz-Gol Bay (2) from 1993 to 2023

*Dashed lines show trends in the Caspian Sea level and runoff into the Kara-Bogaz-Gol Bay since 2012*

Это сценарный прогноз снижения уровня Каспия в предположении сохранения современных трендов в составляющих водного баланса моря (автор – В.Н. Малинин). Сценарный характер этого прогноза означает, что он рассматривается только как один из возможных вариантов поведения уровня моря в ближайшие годы. Отсюда следует, что существует и вероятности реа-

лизации других сценариев (например, подъема уровня моря), однако, не имеющих, в отличие от приведенного на рис. 4, хотя бы приблизительного обоснования. Более того, абсолютное большинство климатических моделей ориентируют именно на снижение уровня Каспийского моря (см., например, Nandini-Weiss et al., 2020; Prange et al., 2020; Samant, Prange, 2023; Hoseini et al., 2025; и др.).

**Уровень моря.** Как это ни звучит парадоксально, но мы даже не можем точно определить уровень Каспийского моря. На Каспии отсутствуют современные измерительные системы уровня моря. Практически все уровенные посты расположены на берегах Каспия, а мы не знаем пространственного распределения уровня моря. Измерения на уровенных постах не учитывают вертикальное движение земной коры, которое разнонаправлено на разных берегах Каспия и достигает 1 см в год. Уровенные посты не оснащены высокоточными трехмерными GPS-приемниками, которые позволяют измерять вертикальные и горизонтальные скорости движения земной коры, т.е. перемещение нулей водомерных постов. Последние калибровки «нулей» постов выполнялись в 1975-1980 годах (только на западном побережье), кроме того, многие посты переставлялись и менялись системы измерения (Нестеров, 2016). Интеркалибровки всех постов на Каспии с тех пор также не проводились. Непонятно, как определить средний уровень Каспия по береговым постам и по каким именно. Обычно используется средняя величина уровня по постам в Махачкале, Баку, Форт-Шевченко и Туркменбаши (Красноводск). Однако измерения на них не интеркалиброваны и не приведены к единому нулю.

Часть этих проблем на Каспии можно решить с помощью спутниковой альтиметрии, поскольку этот метод дистанционного зондирования позволяет примерно с той же точностью, что и на постах, регулярно (раз в 10 дней – вдоль спутниковых треков и раз в 5 дней – в точках пересечения треков) получать информацию об уровне моря не только в прибрежной зоне, но и вдоль треков в центре моря и рассчитывать пространственное распределение уровня моря (Лебедев, Костяной, 2005; Lebedev, Kostianoy, 2008). Эти данные позволяют более точно рассчитать средний уровень Каспия, они не испытывают проблем с вертикальным движением земной коры, однако, их нужно откалибровать по уровенным постам (которые сами не калиброваны), чтобы получить точный абсолютный уровень в Балтийской системе высот. С другой стороны, относительные изменения уровня рассчитываются достаточно точно: и сезонные, и межгодовые вариации аномалий уровня (относительно некоторой величины) Каспия и залива Кара-Богаз-Гол с сентября 1992 г. по настоящее время хорошо известны (рис. 2).

**Что мы не учитываем в расчетах водного баланса?** Кроме всех проблем, связанных с точностью определения всех четырех основных компонент водного баланса и уровня моря, мы не учитываем ряд дополнительных факторов, которые могут сказываться на водном балансе моря. Рассмотрим некоторые из них.

(1) Во-первых, это подземный сток в море, который на Каспии не измеряется, однако, при длине береговой линии порядка 6.5-7.0 тыс. км он может

иметь значение, особенно вдоль западного и южного берега, где на некотором расстоянии от моря находятся горные системы Кавказа (Азербайджан, Россия) и Эльбурса (Иран). В научной литературе встречаются оценки до 5% от приходной части водного баланса (т.е. до  $20 \text{ км}^3/\text{год}$ ), однако они основаны на «невязке» водного баланса с изменением уровня моря. Lahijani et al. (2023) приводят оценку современного подземного стока в  $4 \text{ км}^3/\text{год}$ . Кроме того, питание подземных вод происходит в результате инфильтрации атмосферных осадков, поступления воды из Каспия на отдельных участках его береговой линии, а также потери речного стока в паводок. Поэтому при определённых условиях возможна инфильтрация воды из Каспия «наоборот» в подземные горизонты береговой зоны, объем которой также неизвестен.

(2) Другим важным, но не достаточно учитывающим фактором, который может существенно изменить оценки испарения в сторону его увеличения, является разная глубина моря в Северном, Среднем и Южном Каспии и особенно в периоды уменьшения глубины моря на несколько метров. Еще в 1987 году Г.Н. Панин установил значительную зависимость испарения от уровня Каспия (Панин, 1987). А именно, в теплый период года (апрель-август) испарение с мелководного Северного Каспия (средняя глубина 4.4 м) намного больше испарения со Среднего (192 м) и Южного Каспия (345 м). Например, в мае слой испарения с Северного Каспия в 2-3 раза больше, чем соответствующие величины для Среднего и Южного Каспия: 100, 35 и 42 мм/месяц соответственно (Панин, 1987). Такие существенные различия в испарении по акватории моря не отражаются в атмосферных реанализах.

(3) Северный Каспий зимой представляет собой наиболее энергоактивную зону, которая с наблюдаемым уменьшением площади ледяного покрова и его сплоченности (в результате регионального потепления) должна приводить к значительному увеличению испарения. Дело в том, что при температуре воды около 0 градусов, температура воздуха над Северным Каспием ежегодно опускается ниже 10-15 градусов мороза, а иногда и до  $-25^\circ\text{C}$  (Lavrova et al., 2022). Максимальная ледовитость за последние 25 лет наблюдалась зимой 2011/2012 г. ( $103.5 \text{ тыс. км}^2$ ), а минимальная – зимой 2019/2020 г. и составила всего 36 тыс.  $\text{км}^2$ . Такие значительные межгодовые вариации ледяного покрова, точнее, площади открытой воды в зимний период, могут значительно увеличивать потоки влаги в атмосферу, что не учитывается в современных атмосферных реанализах.

(4) Межгодовые стерические изменения уровня за счет увеличения температуры Каспийского моря не могут оказывать существенного влияния на уровень моря, однако сезонные стерические изменения уровня могут достигать до 8 см (Lahijani et al., 2023). За последние 20 лет стерические изменения уровня Мирового океана оцениваются в 1.3 мм в год (<https://sealevel.nasa.gov/understanding-sea-level/key-indicators/steric-height/>). Термостерическое повышение уровня моря составляет примерно от трети до половины наблюдаемого глобального повышения среднего уровня моря (3.7 мм в год за 2006-2018 гг.), в то время как массовый вклад таяния ледников и наземного льда составляет остальную часть (Fox-Kemper et al., 2021). При этом температура поверхно-

сти Мирового океана (между 60° с.ш. и 60° ю.ш.) с 1980 по 2023 год выросла примерно на 0.6-0.8°C, т.е. со скоростью 0.014-0.018°C/год (<https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/sea-surface-temperature>). Примерно в тот же период (в 1982-2020 гг.) тренд среднегодовой температуры поверхности Каспийского моря составил +0.035°C/год (Гинзбург и др., 2021). Этот фактор также не учитывается в расчетах водного баланса, поскольку для этого надо знать не только объем Каспийского моря, который меняется ежегодно, но и температуру воды во всей толще моря, что в Мировом океане делается с помощью поплавков «Апро» (<https://sealevel.nasa.gov/understanding-sea-level/key-indicators/steric-height/>). В Каспийском море таких измерительных систем нет, а регулярные гидрологические измерения по вековым разрезам не проводятся со времени распада СССР.

(5) Площадь Каспийского моря присутствует в расчетах испарения и в оценках атмосферных осадков, которые выпадают на его зеркало, а также в изменениях объема вод. Батиграфические кривые, связывающие уровень моря и его площадь, для Каспийского моря известны по публикациям ряда авторов (Крицкий и др., 1975; Музылев и др., 1982; Байдин, Косарев, 1986; Фролов, 2003; Нестеров, 2016). Они несколько отличаются друг от друга, и они все были получены во времена, когда еще отсутствовали спутниковые оптические изображения высокого пространственного разрешения, а также спутниковые альтиметрические данные. Важность построения точных батиграфических кривых для диапазона глубин Каспия от -26 до -30 м и ниже до -50 м очевидна, поскольку для многих задач необходимо знать точную площадь моря. Например, насколько происходящее сокращение площади моря влияет на водный баланс Каспия, неизвестно. Кроме того, это важнейший параметр для прогнозов изменения климата и уровня Каспийского моря до 2100 по моделям CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), поскольку большинство из них не учитывают существенное сокращение зеркала моря в процессе его обмеления (Hoseini et al., 2025).

(6) Загрязнение акватории моря нефтепродуктами: добыча и транспортировка нефти и газа в водах России, Казахстана, Азербайджана, Ирана и Туркменистана; поступление загрязняющих веществ из Волги и других рек, впадающих в море; утечки с прибрежных нефтяных разработок; аварии на буровых платформах; сбросы нефтесодержащих вод с судов, сипажи нефти со дна моря (Mityagina, Kostianoy, 2024). С точки зрения водного баланса моря наибольший интерес представляет нефтяная пленка, образующаяся во время разливов нефти. Так, при достаточно толстой ( $\geq 3.6$  мкм) пленке даже на десятилетие испарение с чистой поверхности превышает испарение над пленкой еще почти в 2 раза (Панин, 1985). В зимнее время этот период может быть еще длиннее. Однако степень влияния разливов нефти на испарение в настоящее время неизвестна. В работе (Островская и др. 2016) за период 2010-2013 гг. было обработано 734 спутниковых снимков, на 192 из них (26%) были обнаружены пленочные загрязнения. Это позволило приблизительно оценить ежегодное поступление нефтепродуктов в морскую среду в северо-западном районе Каспия в несколько тысяч тонн только от судовых сбросов. Для

оценки влияния нефтяных пленок на испарение нужно осуществлять детальный мониторинг нефтяного загрязнения по всей акватории Каспийского моря.

### **Основные причины изменения уровня Каспийского моря**

В общем случае большое число различных по своей природе факторов, действующих на формирование уровня, целесообразно объединить в четыре большие группы (Малинин, 2012): космогеофизические силы, геолого-геодинамические процессы, антропогенные факторы и гидрометеорологические процессы (климатические факторы).

**Космогеофизические силы.** К космогеофизическим силам относится солнечная активность, приливообразующие силы Луны и Солнца, свободные и вынужденные колебания полюсов Земли и др. Довольно подробно космогеофизические связи с выходом на долгосрочный прогноз стока рек и уровня озер, в том числе Каспия, рассмотрены в работе Е.А. Леонова (Леонов, 2010). По его мнению, долговременную динамику глобальных и региональных гидроклиматических процессов определяет электромагнитное взаимодействие Космоса, Солнца и Земли, позволяющее устанавливать прямые связи отдельных космогеофизических характеристик с природными процессами. Однако из-за отсутствия понимания физических механизмов воздействия, «прямые» связи ограничиваются в основном регрессионными зависимостями. Особую популярность получили исследования по изучению воздействия процессов солнечной активности на межгодовую изменчивость уровня Каспийского моря. При этом в качестве индекса солнечной активности чаще всего используются числа Вольфа, которые удачно отражают вклад в солнечную активность не только самих пятен, но и всей активной области, занятой в основном факелами. Использование характеристик солнечной активности в прогнозах уровня проводилось в работах В.А. Рутковской (1960), М.И. Соскина (1960), Б.А. Шлямина (1962), М.С. Эйгенсона (1963), А.Н. Афанасьева (1967) и других ученых. В дальнейшем анализ солнечно-земных связей проводился в работах (Смирнова, 1972; Шикломанов, 1976; Георгиевский, 1978; Малинин, 1994; Голицын и др., 1998; Фролов, 2003, Соловьева, 2004 и многих других исследованиях). Естественно, гипотетическая зависимость колебаний уровня Каспия от чисел Вольфа должна иметь однозначный характер. В действительности, при одной и той же интенсивности солнечной активности, режимы колебаний уровня Каспия могут существенно различаться. Неоднозначность реакции уровня Каспия на солнечную активность показывает на недостаточную обоснованность представления о прямой зависимости названных процессов. Например, в работе (Соловьева, 2004, с. 94) дается долгосрочный прогноз УКМ, в соответствии с которым «наиболее высокие стоки Волги и приращения уровня моря следует ожидать в первые два десятилетия XXI в. (до 2015 г.)». В действительности УКМ понизился с начала века примерно на 2 м. Если в регрессионных зависимостях отсутствует физическая основа связи, то они разрушаются при переходе к независимым данным. Регрессионные зависимости, по сути, представляют собой

---

модель «черного ящика», когда к сигналу на выходе (колебания уровня) подбирается тем или иным образом сигнал на входе, т.е. характеристики солнечной активности или другие внешние параметры. Неустойчивость связей уровня с космогеофизическими факторами есть не что иное, как свидетельство отсутствия между ними непосредственных причинно-следственных связей. Поэтому достаточно очевидным является полная бесперспективность лобовых попыток составления прогноза уровня моря по внешним космогеофизическими параметрам (Малинин, 1994).

**Геолого-геодинамические процессы**, приводящие, с одной стороны, к изменению объема самой котловины, а с другой – влияющие на водный баланс моря (Малинин, 1994). В первом случае к таким процессам относятся тектонические движения (вертикальные и горизонтальные), накопление донных осадков и сейсмодетформация. Во втором случае это субмаринная разгрузка вод или, наоборот, их поглощение поддонными слоями горных пород при чередовании тектонических фаз сжатия или растяжения в этих породах, т.е. водообмен через дно моря. При этом на фазу сжатия приходится повышение уровня, а на фазу растяжения – его понижение. Именно такая гипотеза была предложена академиком Н.А. Шилов (Шилов, 1989). По его мнению, колебание уровня Каспия не связано со стоком впадающих в него рек, а имеет иную природу и объясняется фазами сжатия и растяжения горных пород под дном моря. Однако характерный период фаз сжатия и растяжения составляет многие тысячи лет, поэтому не может объяснить межгодовые изменения уровня.

Характерная скорость вертикальных тектонических движений побережья моря составляет около 1 мм/год. Средняя скорость поднятия наиболее деформированного западного побережья Среднего и Южного Каспия за последние 700 тыс. лет была менее 0.5 мм/год. При этом на различных побережьях моря вертикальные скорости носят разнонаправленный характер. В результате при осреднении по контуру моря их величина становится пренебрежимо малой.

Заполнение котловины Каспия донными отложениями приводит к повышению уровня моря в среднем со скоростью 0.25-0.50 мм/год. При этом основной вклад в накопление осадков вносят твердый речной сток, размыв берегов и эоловые процессы. Естественно, их роль в изменениях уровня вряд ли может быть существенной.

Отметим, что в 80-90-е годы на фоне резкого роста уровня был подлинный бум среди исследователей, особенно геологов, предлагавших различные «гипотезы» причин повышения уровня. В статье Хаустова (Хаустов, 2006) перечисляется 9 геологических «концепций», а в работе Бутаева (Бутаев, 1998) 15 «гипотез», среди которых много весьма экстравагантных. Очевидно, обсуждать их нет смысла. Лишь подчеркнем, что геолого-геодинамические факторы являются малыми, могут иметь определенное значение в колебаниях уровня в других временных масштабах (тысячи и более лет), поэтому ими можно пренебречь при изучении его межгодовой изменчивости.

М.П. Антипов и др. (1996) рассматривают зависимость изменения уровня Каспия от цикличности седиментационных процессов в Каспийской



впадине, обусловленных периодичностью и скоростями изостатических автоколебаний. Н.А. Шило и М.И. Кривошей (1989) рассмотрели возможность выжимания и поглощения воды осадочной толщей Каспия, обусловленные процессами сжатия и растяжения в земной коре, что может также повлиять на колебания уровня моря. Интересно, что в качестве индикатора напряжений в земной коре они выбрали силу землетрясений и подсчитали коэффициент корреляции с невязками водного баланса, который оказался равным 0.97. Авторы утверждают, что подъем уровня Каспия, начавшийся в 1978 г., в среднем на 50% был обусловлен разгрузкой в море подземных вод, происходящей преимущественно по тектоническим нарушениям.

И.А. Костикова (2002) пришла к заключению, что мощный осадочный чехол Каспийской впадины содержит значительные количества химически и физически связанных и свободных подземных вод, общая масса которых практически на порядок превышает массу воды Каспийского моря. Большая часть этих вод сосредоточена во впадине Южного Каспия, а их разгрузка вносит свой вклад в подъем уровня Каспия. Утверждается, что, скорее всего, она имеет периодический пульсационный характер и приурочена к периодам тектонической активности и вызывает кратковременный подъем уровня моря.

Вместе с тем, большинство исследователей полагают, что скорость геологических процессов крайне мала по сравнению с параметрами, отражающими колебания уровня Каспийского моря, и геологические факторы не могут служить объяснением происходящих достаточно быстрых разнонаправленных колебаний уровня моря.

Южный и Средний Каспий являются сейсмически активными районами, где ежедневно фиксируются землетрясения различной магнитуды. Например, в 2024 году в Каспийском море и на его побережье произошло 99 землетрясений с магнитудой от 2.0 до 4.9 баллов (<https://www.volcanodiscovery.com/ru/zemletryaseniya/kaspiyskoe-more/archive/2024.html>). Некоторые исследователи считают, что землетрясения могут непосредственно влиять на изменения уровня Каспия (Родкин, Костэйн, 1995). Однако, сейсмореформации морского дна отмечаются только вблизи эпицентров землетрясений и имеют локальный характер, практически не влияющий на объем чаши моря. В масштабах всего Каспия пренебрежимо мал и эффект от деятельности морских грязевых вулканов.

Наиболее подробно гипотеза о существовании подземного водообмена между Каспийским и Аральским морями представлена в статьях Б.Н. Голубова (Голубов, 1995, 2018). По мнению автора этих публикаций, колебания уровней Каспия и Арала происходят в противоположных фазах: повышение уровня Каспия вызывает снижение уровня воды в Аральском море, и наоборот. В рамках гипотезы о подземном перетоке между Каспием и Аралом, наличие связи между морями вызвано техногенными воздействиями на режим подземных вод региона. Предполагалось, что вода может перетекать по карстовым пустотам и проницаемым водоносным горизонтам под плато Устюрт. В качестве триггера процесса перетока предлагалось рассматривать серию подземных ядерных взрывов. Подтверждения этой гипотезы данными

о перетоке – изотопными, гидрохимическими – например, в местах поступления аральской воды в Каспий – до сих пор не было получено. Нет и никаких данных, подтверждающих переток воды из Каспия в остатки Аральского моря в связи со современным снижением уровня Каспия. Кроме того, отметим, что уровень Аральского моря (до высыхания) был выше уровня Каспийского моря примерно на 80 м, что делает невозможным переток из Каспия в Арал.

**Антропогенные (техногенные) факторы**, обусловленные хозяйственной деятельностью в бассейне Каспийского моря, на его побережье и акватории, определенным образом влияют на компоненты водного баланса и, следовательно, на колебания уровня. Наибольшую антропогенную нагрузку из составляющих водного баланса испытывает приток речных вод. В 1845 г. в самом верховье Волги было построено первое Верхневолжское водохранилище площадью 183 км<sup>2</sup>. С 1937 по 1980 г. на Волге, Каме и Шексне было создано еще 12 гидроузлов с водохранилищами, общая площадь зеркала которых составляет 26.6 тыс. км<sup>2</sup>, что в полтора раза превышает площадь залива Кара-Богаз-Гол. Кроме Волги, к началу 1970-х годов все крупные реки Каспийского бассейна были зарегулированы и безвозвратные потери воды достигали 50 км<sup>3</sup> (Байдин, Косарев, 1986). Отметим, что в бассейне Волги также расположено 15 других водохранилищ и гидроэлектростанций (Павловская ГЭС, Юмагузинская ГЭС, Широковская ГЭС и др.), которые организационно не считаются частью Волжско-Камского каскада ГЭС. Предположим, что в среднем в год с зеркала всех водохранилищ испаряется 500 мм, тогда потери на испарение составят примерно 13.3 км<sup>3</sup>/год.

Не следует сбрасывать со счетов и влияние хозяйственной деятельности человека, в результате которой сократился сток рек, впадающих в Каспийское море. В 1980-е годы суммарный объем безвозвратного водопотребления составил 45 км<sup>3</sup>/год, а к 1988 г. он сократился до 24.0 км<sup>3</sup>/год (Хубларян, 2000). В течение нескольких десятилетий исследования комплексного влияния антропогенной деятельности на водный режим в бассейне Каспия выполнялись в ГГИ. В результате были получены оценки безвозвратного водопотребления за период 1936-1990 гг., которые изложены в многочисленных публикациях, в частности в работах (Шикломанов, 1979, Шикломанов, Георгиевский, 2003). По данным И.А. Шикломанова, на 1990 г. безвозвратные потери в бассейне Каспия достигли 40 км<sup>3</sup>/год, что составило примерно 13% от нормы притока речных вод. Однако в 90-е годы безвозвратные потери стока заметно снизились. Современная оценка водопотребления в бассейне Волги составляет примерно 24 км<sup>3</sup>/год (Нестеров, 2016, стр.142).

Водохранилища Волжского-Камского каскада обеспечивают водоснабжение городов, промышленных узлов и сельскохозяйственных предприятий 27 субъектов Российской Федерации. На 2023 г. в бассейне Волги проживало 61.3 млн человек (Демин, 2023). С 1990 по 2021 г. забор пресной воды в бассейне Волги сократился в 2.3 раза с 37 до 16 км<sup>3</sup>/год, главным образом, за счет внедрения оборотного водоснабжения. В 2021 г. на долю промышленности приходилось 54% общего водопотребления. С 1970 по 1990 г. площадь орошаемых земель возросла с 0.32 до 2.13 млн га, но после сокращения в кризисные

1990-е годы стабилизировалась на уровне 1.4-1.5 млн га. Из-за неисправности оросительных систем, отсутствия поливной техники, дороговизны услуг водохозяйственных организаций площадь фактически политых земель в бассейне Волги снизилась с 1.53 млн га в 1990 до 0.717 млн га в 2000 и 0.467 млн га в 2021 г. (Демин, 2023). Таким образом, с 1990 г. водопотребление в жилищно-коммунальном, сельском хозяйстве и промышленности значительно сократилось, что благоприятно сказывается на сохранении волжского стока.

Главным антропогенным (техногенным) фактором воздействия непосредственно на акваторию моря является строительство и особенно разрушение дамбы через пролив, соединяющий залив КБГ с морем, которое оказало серьезное влияние на изменчивость УКМ. В 1980 г. залив Кара-Богаз-Гол был отчленен от Каспийского моря плотиной с целью сохранения каспийских вод и уменьшения скорости падения уровня Каспия. Следует отметить, что к этому времени уровень Каспия уже три года повышался, поэтому строительство плотины не являлось доминирующим фактором, который остановил падение уровня и привел к его росту. Тем не менее, порядка  $80 \text{ км}^3$  в расходной части водного баланса удалось сохранить в период с 1980 по 1992 год, когда плотина была разрушена. Поэтому, несмотря на разрушение плотины и восстановление естественного стока в залив в 1992 г., с учетом повышенного речного стока в этот период, уровень моря продолжал повышаться до 1995 года (рис. 1 и 2).

Каспийское море является районом интенсивной добычи нефти и газа (Zonn et al., 2010). Некоторые исследователи полагают, что бурение морских скважин и откачка нефти и газа могут также, в какой-то степени, влиять на снижение уровня Каспийского моря. Однако, если современная добыча нефти на Каспии оценивается в 300 млн т в год, то даже гипотетическая замена откаченной нефти водой приведет к увеличению расходной части водного баланса всего на  $0.3 \text{ км}^3$  в год.

Другая гипотеза связывала повышение уровня Каспия в 1978-1995 гг. с развитием орошения в Аральском регионе (Кадукин, Клиге, 1990). Авторы этой работы рассмотрели возможность увеличения приходной части водного баланса Каспия за счет речной воды, потраченной на орошение. Предполагалось, что испарившаяся вода с орошаемых полей в Аральском регионе воздушными потоками переносится на Каспий, увеличивая приходную составляющую водного баланса и, соответственно, повышая уровень моря. По мнению авторов обсуждаемой статьи, эффект от воздействия на уровень Каспия к 2005-2010 гг. оценивается подъемом уровня Каспия на 1.8 м по отношению к отметке уровня в 1986 г. В действительности уровень Каспия повысился к 2010 г. на 0.6 м, т.е. на величину, в 3 раза меньшую по сравнению с прогнозом. Не в пользу этой гипотезы говорит и то, что, несмотря на предполагаемый непрерывный перенос воздушным путем влаги из Аральского бассейна с орошаемых полей, уровень Каспия понизился за 1986-2024 гг. на 1.1 м. Данная гипотеза изначально не могла быть успешной из-за неверных предположений: только небольшая часть испарившейся влаги переносится на Каспий,

осадки в основном формируются из влаги другого происхождения, а их величина в несколько раз меньше суммарного притока речных вод, поэтому они не могут оказывать существенного влияния на УКМ.

Хотя антропогенные факторы вносят определенный вклад в трендовую компоненту уровня, но их межгодовая изменчивость значительно меньше межгодовой изменчивости суммы компонент водного баланса моря, которые играют доминирующую роль в колебаниях УКМ и обусловлены климатическими процессами.

**Климатические факторы.** По-видимому, большинство исследователей в XX веке и в настоящее время сходятся во мнении, что основными причинами нарушения водного баланса моря и межгодовой изменчивости уровня являются климатические. Это означает, что увеличение/уменьшение одного или двух (основных – речной сток и испарение) или всех четырех компонентов водного баланса может привести к нарушению водного баланса и соответствующему изменению уровня моря. Речной сток, испарение и атмосферные осадки можно считать независимыми параметрами, которые могут влиять на водный баланс в ту или иную сторону, так и компенсировать изменения друг друга. Сток в залив Кара-Богаз-Гол нельзя считать независимым параметром, поскольку он зависит от уровня Каспия, т.е. от самого водного баланса. Исторические данные позволяют установить, какие факторы доминировали при значительных изменениях уровня моря в XX и XXI веках.

В 1930-х годах уменьшение увлажненности в водосборном бассейне Каспия привело к сокращению стока рек и падению уровня на 1.8 м. В это время заметно сократился сток рек – с 335.7 км<sup>3</sup>/год в 1900-1929 гг. до 268.6 км<sup>3</sup>/год в 1930-1941 гг., в 1942-1969 гг. сток рек увеличился примерно на 17 км<sup>3</sup>/год, но в 1970-1977 гг. средний сток упал до 240.5 км<sup>3</sup>/год. Приходная часть водного баланса в среднем за 1900-1982 гг. была ежегодно меньше расходной части примерно на 14 км<sup>3</sup> (главным образом, за счет уменьшения стока рек), что приводило к постоянному снижению уровня моря вплоть до 1977 г., когда уровень достиг отметки -29.0 м (Байдин, Косарев, 1986). В то же время испарение объемом 389.4 км<sup>3</sup>/год в 1900-1929 гг. незначительно увеличилось до 394.8 км<sup>3</sup>/год в 1930-1941 гг., что не могло существенно повлиять на изменение уровня, а затем даже снизилось до 356.3 км<sup>3</sup>/год в 1942-1969 и 374.9 км<sup>3</sup>/год в 1970-1977 гг., что, наоборот, должно было способствовать повышению уровня Каспия. Таким образом, можно с уверенностью сказать, что падение уровня моря с 1930-х годов до 1977 года было обусловлено снижением стока рек на 30%.

С 1978 по 1995 год произошло резкое повышение уровня на 2.5 м (рис. 1), которое было обусловлено также значительным увеличением стока с 240.5 км<sup>3</sup>/год в 1970-1977 гг. до 310.9 км<sup>3</sup>/год в 1978-1982 гг., т.е. на 30%. В это же время испарение уменьшилось с 374.9 км<sup>3</sup>/год до 354.8 км<sup>3</sup>/год (Байдин, Косарев, 1986), т.е. на 5%, что в значительно меньшей степени способствовало повышению уровня.

С 1995 года и по настоящее время происходит снижение уровня моря со средней скоростью 10 см/год (рис. 1), что объясняется снижением стока всех

рек в Каспий, увеличением испарения с его поверхности и стоком морских вод в залив КБГ, т.е. климатическими факторами. В работах (Малинин, 1994; Малинин, Гордеева, 2020) 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). 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) зональный перенос атмосферы в умеренных широтах. Это будет усиливать зональный перенос водяного пара на европейскую территорию России и повышать количество осадков на территории бассейна Волги, что приводит к росту стока Волги. При повышении годового стока Волги происходит увеличение внутригодовых приращений объема моря, а значит рост УКМ. При ослаблении процессов синоптической активности происходит разворот в противоположную сторону.

Данная концепция соответствует климатическим условиям XX столетия, когда главной причиной изменений УКМ являлся годовой сток Волги, описывающий две трети его изменчивости. Доля эффективного испарения составляла одну треть, причем вклад его в изменения уровня в основном носил случайный характер, поэтому при описании межгодовых колебаний уровня в XX столетии им можно было пренебречь. Однако климатическая ситуация в Каспийском регионе начала быстро меняться вследствие интенсивного глобального потепления с конца XX века. Происходит повышение температуры воздуха и воды на поверхности моря, уменьшение площади ледяного покрова, увеличение испарения, уменьшается приток речных вод и количество осадков, выпадающих на акваторию моря (Гинзбург и др., 2021). В результате меняется соотношение между приходной и расходной частями уравнения водного баланса, УКМ стал снижаться.

## **Заключение**

В данной работе выполнен обзор современных представлений об основных причинах изменения уровня Каспийского моря, которые происходят в результате нарушения водного баланса моря. Как и большинство авторов, мы поддерживаем роль климатических факторов в изменении уровня Каспийского моря. Рассмотрены основные проблемы, связанные с точным расчетом всех компонент водного баланса, а также влиянием антропогенных, геологи-

ческих и других факторов, которые также могут влиять на изменение уровня моря. В этой работе мы сознательно не рассматривали различные методы прогнозирования уровня Каспийского моря и полученные результаты, поскольку это тема отдельной публикации (Голицын и др., 1998; Фролов, 2003, 2019б; Малинин, 2009, 2022).

В соответствии с различными климатическими моделями (см. работы Панин и др., 2015; Nandini-Weiss et al., 2020; Prange et al., 2020; Samant, Prange, 2023; Hoseini et al., 2025; и др.) в текущем столетии можно ожидать как снижения уровня Каспийского моря, так и его повышения или стабилизации. По прогнозу Г.Н. Панина и др. (2015), понижение уровня Каспийского моря продолжится в ближайшие 10-15 лет, что подтверждается современными наблюдениями. Малинин (2022) указывает, что маловероятно снижение уровня Каспия ниже -31 м БС, поскольку произойдет обмеление пролива Кара-Богаз-Гол, вода поступать в залив не будет и расходная часть водного баланса сократится на сток в залив Кара-Богаз-Гол. Однако, с другой стороны, маловероятно, что власти Туркменистана будут бездействовать в этой ситуации, которая очевидно приведет к полному высыханию залива, экологической катастрофе на огромной территории и значительным потерям в химической добывающей промышленности республики. Напомним, что в 1980 г., с целью повышения уровня Каспия, пролив был полностью перекрыт дамбой, что за 4 года привело к полному высыханию залива (Kosarev, Kostianoy, 2005; Kosarev et al., 2009). В 1980 г. уровень Каспия был -28.5 м и воды в заливе было значительно больше, чем останется при отметке -31 м, поэтому полное высыхание залива произойдет гораздо быстрее.

Наибольшее понижение уровня Каспийского моря с 2020 года до конца столетия дают результаты моделирования, представленные в работах Nandini-Weiss et al. (2020), Prange et al. (2020) и ряда других: на 9 и 18 м или 8 и 16 м (в зависимости от корректного учета испарения с поверхности) для сценариев антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу в будущем RCP4.5 (наиболее вероятного) и RCP8.5 (наихудшего) IPCC (Межправительственной группы экспертов по изменению климата) соответственно. При падении уровня на 9-18 м поверхность Каспия уменьшится на 23-34%, главным образом, за счет обмеления всего Северного Каспия, что приведет к катастрофическим социально-экономическим и экологическим последствиям для всех прикаспийских стран (Prange et al., 2020). На наш взгляд, столь пессимистические сценарии вызывают серьезные сомнения, поскольку основой моделей являются физически плохо обоснованные предположения относительно межгодовой изменчивости компонент водного баланса.

Hoseini et al. (2025) в своем исследовании приводят следующие вероятностные медианные оценки (25-75 процентиль) изменений уровня Каспия в 2100 г. относительно 2021 г.: +0.3 м (-12.2 ... +10.2 м) для сценария с низким уровнем выбросов парниковых газов, -1.8 м (-6.7... +3.1 м) для сценария со средним уровнем выбросов, -3.3 м (-9.3...+2 м) для сценария со средним и высоким уровнем выбросов и -4.4 м (-11...+1.6 м) для сценария с высоким уровнем выбросов. Высокая вероятность значительного снижения уровня

моря подвергает мелководную северную часть и залив Кара-Богаз-Гол серьезному риску высыхания. В частности, авторы отмечают, что при снижении уровня уже на 5.0-7.5 м обмелеют все порты на Каспии (Hoseini et al., 2025), что приведет к коллапсу всей транспортной системы на Каспии.

Весьма пессимистические прогнозы изменения уровня Каспийского моря требуют консолидации усилий климатологов, гидрологов, специалистов по дистанционному зондированию, экологов, а также лиц, принимающих решения всех прикаспийских стран для изучения водного баланса Каспийского моря, изменения его уровня, составления вероятностных прогнозов изменения уровня на ближайшие десятилетия и разработки планов адаптации к этим изменениям.

### Благодарности

*А.Г. Костяной выполнил исследование при поддержке гранта РНФ № 23-77-00027 «Исследование климатической изменчивости термогидродинамического режима Каспийского моря по данным дистанционного зондирования» (2023-2026), <https://rscf.ru/project/23-77-00027/>. А.В. Фролов – при финансовой поддержке темы № FMWZ-2025-0001 Государственного задания ИВП РАН.*

### Список литературы

Антипов, М.П., Волож, Ю.А., Лаврушин, Ю.А., Леонов, Ю.Г. (1996) Геологические события и изменения уровня Каспийского моря, *Геоэкология*, № 3, с. 38-50.

Афанасьев, М.А. (1967) *Колебания гидрометеорологического режима на территории СССР*, М., Наука, 230 с.

Байдин, С.С., Косарев, А.Н. (1986) *Каспийское море: Гидрология и гидрохимия*, Москва, Наука, 261 с.

Бутаев, А.М. (1998) *Каспий: загадки уровня*, Махачкала, 72 с.

Варущенко, С.И., Варущенко, А.Н., Клиге, Р.К. (1987) *Изменения режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремени*, М., Наука, 240 с.

Георгиевский, В.Ю. (1978) Расчеты и прогнозы изменения уровня Каспийского моря под влиянием естественных климатических факторов и хозяйственной деятельности, *Труды ГГИ*, вып. 255, с. 94-112.

Георгиевский, В.Ю., Голубев, В.С. (2003) Испарение с поверхности Каспийского моря и его многолетняя изменчивость, в кн.: *Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна*, СПб., Гидрометеоиздат, с. 230-238.

Гинзбург, А.И., Костяной, А.Г. (2018) Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-е –

2017 гг.), *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, т. 15, № 7, с. 195-207.

Гинзбург, А.И., Костяной, А.Г., Серых, И.В., Лебедев, С.А. (2021) Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980-2020 гг.), *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, т. 18, № 5, с. 277-291, doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.

Голицын, Г.С., Раткович, Д.Я., Фортус, М.И., Фролов, А.В. (1998) О современном подъеме уровня Каспийского моря, *Водные ресурсы*, т. 25, № 2, с. 133-139.

Голубов, Б.Н. (1995) Аномальный подъем уровня Каспийского моря как результат многолетней эксплуатации недр региона, *Межд. конф. «Каспийский регион: экономика, экология, минеральные ресурсы»*, Сб. рефератов, М., с. 9-10.

Голубов, Б.Н. (2018) Аномальный подъём уровня Каспийского моря и катастрофическое обмеление Аральского моря как результат дренирования Арала под плато Устюрт и в Каспий вследствие техногенных возмущений недр, *Электронное научное издание Альманах Пространство и Время*, т. 16, вып. 1-2, doi 10.24411/2227-9490-2018-11072.

Демин, А.П. (2023) Водопотребление и водоотведение в бассейне реки Волги, их влияние на качество воды, *Изв. РАН, Сер. Географическая*, т. 87, № 6, с. 847-861, doi: 10.31857/S2587556623060055.

Золина, О.Г. (2018) *Статистическое моделирование экстремальных осадков и региональный атмосферный цикл влаги*, дисс. .... д-ра ф.-м. наук, Москва, ИО РАН, 349 с.

Костикова, И.А. (2002) *Седиментационные воды Каспийского осадочного бассейна и колебания уровня Каспия*, дисс. ...канд. геол.-мин. наук, Москва, Институт геоэкологии РАН им. Е.М. Сергеева, 111 с.

Костяной, А.Г. (2024) Исследования Каспийского моря в рамках международного проекта «The Caspian Sea Digital Twin», *Океанологические исследования*, т. 52, № 2, с. 234-255, URL: [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(2\).12](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).12).

Костяной, А.Г., Гинзбург, А.И., Лебедев, С.А., Шерemet, Н.А. (2014) Южные моря России, в кн.: *Второй оценочный доклад Росгидромета об изменении климата и его последствиях на территории Российской Федерации*, под ред. В.М. Катцова и С.М. Семенова, М., Институт глобального климата и экологии, с. 644-683.

Крицкий, С.Н., Коренистов, Д.В., Раткович, Д.Я. (1975) *Каспийское море*, М., Наука, 158 с.

Лавров, Д.А. (2000) Гидрологический режим залива Кара-Богаз-Гол в условиях свободного доступа морской вод, в кн.: *Экологические проблемы Каспия*, Москва, Киров, с. 19-21.



Лебедев, С.А., Костяной, А.Г. (2005) *Спутниковая альтиметрия Каспийского моря*, М., Море, 366 с.

Лебедев, С.А., Сирота, А.М., Остроумова, Л.П., Костяной, А.Г. (2008) Расчет испарения с акватории Каспийского моря по данным дистанционного зондирования, *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, т. 5, № 2, с. 141-147.

Леонов, Е.А. (2010) *Космос и долгосрочный гидрологический прогноз*, Санкт-Петербург, Изд. Алетея и др., 348 с.

Малинин, В.Н. (1994) *Проблема прогноза уровня Каспийского моря*, СПб., Изд-во РГМИ, 160 с.

Малинин, В.Н. (2009) Долгосрочное прогнозирование уровня Каспийского моря, *Известия РАН, Серия географическая*, № 6, с. 7-16.

Малинин, В.Н. (2012) *Уровень океана: настоящее и будущее*, СПб., РГГМУ, 260 с.

Малинин, В.Н. (2022) Грозит ли Каспию судьба Арала? *Гидрометеорология и экология*, № 69, с. 746-760, doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-746-760.

Малинин, В.Н., Гордеева С.М. (2020) Уровень Каспийского моря как индикатор крупномасштабного влагообмена в системе «океан–атмосфера–суша», *Труды Карельского научного центра РАН*, № 4, с. 5-20, doi: 10.17076/lim1156.

Малинин, В.Н., Рашад, С.Т. (2008) Изменчивость полей испарения и осадков в Каспийском море, *Вопросы промысловой океанологии*, вып. 5, № 1, ВНИРО, с. 201-212.

Михайлов, В.Н. (2013) *Устья рек Каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления*, М., Геос, 702 с.

Музылев, С.В., Привальский, В.Е., Раткович, Д.Я. (1982) *Стохастические модели в инженерной гидрологии*, М., Наука, 184 с.

Нестеров, Е.С. (2016) *Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз*, Москва, Гидрометцентр России, 374 с.

Островская, Е.В., Колмыков, Е.В., Холина, О.И., Пронина, Т.С., Войнова, М.В. (2016) Углеводородное загрязнение северо-западной части Каспийского моря, *Юг России: экология, развитие*, т. 11, № 1, с.137-148, doi: 10.18470/1992-1098-2016-1-137-148.

Панин, Г.Н. (1985) *Тепло- и массообмен между водоемом и атмосферой в естественных условиях*, М., Наука, 206 с.

Панин, Г.Н. (1987) *Испарение и теплообмен Каспийского моря*, М., Наука, 86 с.

---

Панин, Г.Н., Выручалкина, Т.Ю., Соломонова, И.В. (2015) Климатические изменения в Арктике, Северной Атлантике, районе Каспия и их взаимосвязь, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 1, с. 183-210.

Рутковская, В.А. (1960) К вопросу о сверхдолгосрочном прогнозировании уровня Каспийского моря с учетом солнечного фактора, *Труды ИО АН СССР*, т. 37, с. 65-72.

Серых, И.В., Костяной, А.Г. (2020) О влиянии Атлантического и Тихого океанов на изменение климатических параметров Каспийского моря, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 96-107, doi: 10.3103/S1068373920060060.

Соскин, М.И. (1960) Многолетние колебания гидрологических характеристик Балтийского, Баренцева и Каспийского морей, *Труды океаногр. комиссии*, Изд. АН СССР, т. VII, с. 3-32.

Терзиев, Ф.С., Косарев, А.Н., Керимов, А.А. (1992) Проект «Моря». *Гидрометеорология и гидрохимия морей*, т. VI, Каспийское море, вып. 1, Гидрометеорологические условия, СПб., Гидрометеиздат, 358 с.

Фролов, А.В. (1998) Влияние возобновления оттока в Кара-Богаз-Гол на многолетние колебания уровня Каспийского моря, *Метеорология и гидрология*, № 7, с. 87-97.

Фролов, А.В. (2003) *Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения*, М., Геос, 170 с.

Фролов, А.В. (2016) Моделирование влияния оттока в залив Кара-Богаз-Гол на плотность распределения вероятности уровня Каспийского моря, *Математическое моделирование и численные методы*, № 3 (11), с. 79-92.

Фролов, А.В. (2019а) Особенности механизма многолетних колебаний уровня Каспийского моря, *Ученые записки РГГМУ*, № 55, с. 120-128.

Фролов, А.В. (2019б) Сценарные прогнозы колебаний уровня Каспия с учетом климатических и техногенных воздействий на водный баланс моря, *Океанологические исследования*, № 5, с. 130-148.

Хаустов, В.В. (2006) Анализ современных взглядов на причины колебаний уровня Каспийского моря, *Изменения природной среды на рубеже тысячелетий. Труды электронной международной конф. Тбилиси-Москва*, с. 197-201.

Хубларян, М.Г. (2000) Колебание уровня Каспийского моря и его эколого-экономические последствия, в кн.: *Экологические проблемы Каспия*, Москва, Киров, с. 5-12.

Шикломанов, И.А. (1976) *Гидрологические аспекты проблемы Каспийского моря*, Л., Гидрометеиздат, 80 с.

Шикломанов, И.А. (1979) *Антропогенные изменения водности рек*, Л., Гидрометеиздат, 300 с.

Шикломанов, И.А. Георгиевский В.Ю. (2003) Влияние хозяйственной деятельности на водный баланс и изменения уровня Каспийского моря, в кн.: *Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна*, СПб., Гидрометеиздат, с. 267-277.

Шило, Н.А. (1989) Природа колебаний уровня Каспия, *Докл. АН СССР*, т. 305, № 2, с. 412-416.

Шило, Н.А., Кривошей, М.И. (1989) Взаимосвязь колебаний уровня Каспийского моря с напряжениями в земной коре, *Вестник АН СССР*, № 6, с. 83-90.

Шлямин, Б.А. (1962) Сверхдолгосрочный прогноз уровня Каспийского моря, *Изв. ВГО*, вып. 1, с. 26-33.

Эйгенсон, М.С. (1963) Будущее Каспийского моря, *Проблемы Каспийского моря*, Всесоюзное совещание по проблеме Каспийского моря, Баку, с. 24-28.

Chen, J.L., Pekker, T., Wilson, C.R., Tapley, B.D., Kostianoy, A.G., Cretaux, J.-F., Safarov, E.S. (2017) Long-term Caspian Sea level change, *Geophysical Research Letters*, vol. 44, pp. 6993-7001, doi:10.1002/2017GL073958.

Court, R., Lattuada, M., Shumeyko, N., Baimukanov, M., Eybatov, T., Kaidarova, A., Mamedov, E.V., Rustamov, E., Tasmagambetova, A., Prange, M., Wilke, T., Hassall, C., Goodman, S.J. (2025) Rapid decline of Caspian Sea level threatens ecosystem integrity, biodiversity protection, and human infrastructure, *Communications Earth & Environment*, vol. 6 (1), no. 261, URL: <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02212-5>.

Fox-Kemper, B. et al. (2021) *Ocean, cryosphere and sea level change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, in V. Masson-Delmotte et al. (eds.), Cambridge University Press, pp. 1211-1362, URL: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>.

Ginzburg, A.I., Kostianoy, A.G., Gholamalifard, M., Koibakova, S.E., Syrlybekkyzy, S. (2024) Ecologically and biologically significant marine protected areas in the Caspian Sea: A Review, *Ecologica Montenegrina*, vol. 76, pp. 85-115, URL: <https://doi.org/10.37828/em.2024.76.6>.

Hoseini, S.M., Soltanpour, M., Zolfaghari, M.R. (2025) Projected changes in Caspian Sea level under CMIP6 climate change scenarios: probabilistic and deterministic approaches, *Climate Dynamics*, vol. 63, no. 1, pp. 1-18, doi: 10.1007/s00382-024-07548-w.

Kosarev, A.N. (2005) Physico-geographical conditions of the Caspian Sea, “*The Caspian Sea Environment*”, in A.G. Kostianoy and A.N. Kosarev (eds.), Springer, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 5-31, URL: [https://doi.org/10.1007/698\\_5\\_002](https://doi.org/10.1007/698_5_002).

Kosarev, A.N., Kostianoy, A.G. (2005) Kara-Bogaz-Gol Bay, “*The Caspian Sea Environment*”, in A.G. Kostianoy and A.N. Kosarev (eds.), Springer, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 211-221.

---

Kosarev, A.N., Kostianoy, A.G., Zonn, I.S. (2009) Kara-Bogaz-Gol Bay: Physical and Chemical Evolution, *Aquatic Geochemistry*, vol. 15, no. 1-2, Special Issue: Saline Lakes and Global Change, pp. 223-236, doi: 10.1007/s10498-008-9054-z.

Kostianoy, A.G., Pesic, V. (2024) Advances in environmental monitoring of the Caspian Sea, *Ecologica Montenegrina*, vol. 76, pp. 201-210, URL: <https://doi.org/10.37828/em.2024.76.12>.

Lahijani, H., Leroy, S.A.G., Arpe, K., Cretaux, J.-F. (2023) Caspian Sea level changes during instrumental period, its impact and forecast: A review, *Earth-Science Reviews*, vol. 241, no. 104428, URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104428>.

Lavrova, O.Yu., Ginzburg, A.I., Kostianoy, A.G., Bocharova, T.Yu. (2022) Interannual variability of ice cover in the Caspian Sea, *Journal of Hydrology X*, vol. 17, 1 December 2022, 100145, URL: <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2022.100145>.

Lebedev, S.A., Kostianoy, A.G. (2008) Integrated using of satellite altimetry in investigation of meteorological, hydrological and hydrodynamic regime of the Caspian Sea, *Journal of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, vol. 19, issue 1-2, pp. 71-82.

Lockhoff, M., Zolina, O., Simmer, C., Schulz, J. (2014.) Evaluation of satellite-retrieved extreme precipitation over Europe using gauge observations, *Journal of Climate*, vol. 27, pp. 607-623, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00194.1.

Lockhoff, M., Zolina, O., Simmer, C., Schulz, J. (2019) Representation of precipitation characteristics and extremes in regional reanalyses, satellite- and gauge-based estimates over western and central Europe, *Journal of Hydrometeorology*, vol. 20, issue 6, pp. 1123-1145, URL: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0200.1>.

Mityagina, M.I., Kostianoy, A.G. (2024) Areas of heavy permanent oil pollution of the Caspian Sea surface identified by use of satellite remote sensing, *Ecologica Montenegrina*, vol. 76, pp. 49-62, URL: <https://doi.org/10.37828/em.2024.76.3>.

Nandini-Weiss, S.D., Prange, M., Arpe, K., Merkel, U., Schulz, M. (2020) Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area, *Int. J. Climatol.*, vol. 40, pp. 2717-2731, URL: <https://doi.org/10.1002/joc.6362>.

Prange, M., Wilke, T., Wesselingh, F.P. (2020) The other side of sea level change, *Communications Earth & Environment*, vol. 1, no. 69, URL: <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>.

Samant, R., Prange, M. (2023) Climate-driven 21<sup>st</sup> century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections, *Communications Earth & Environment*, vol. 4, no. 357, URL: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01017-8>.

Zonn, I.S., Kostianoy, A.G., Kosarev, A.N., Glantz, M. (2010) *The Caspian Sea Encyclopedia*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 527 p., URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11524-0>.

## References

- Antipov, M.P., Volozh, Yu.A., Lavrushin, Yu.A., Leonov, Yu.G. (1996) *Geologicheskie soby`tiya i izmeneniya urovnya Kaspijskogo morya* [Geological events and changes in the level of the Caspian Sea], *Geoecology*, no. 3, pp. 38-50.
- Afanasyev, M.A. (1967) *Kolebaniya gidrometeorologicheskogo rezhima na territorii SSSR* [Fluctuations in the hydrometeorological regime on the territory of the USSR], Nauka, Moscow, Russia, 230 p.
- Baidin, S.S., Kosarev, A.N. (1986) *Kaspijskoe more: Gidrologiya i gidroximiya* [Caspian Sea: Hydrology and Hydrochemistry], Nauka, Moscow, Russia, 261 p.
- Butaev, A.M. (1998) *Kaspij: zagadki urovnya* [Caspian: mysteries of the level], Makhachkala, Russia, 72 p.
- Varushchenko, S.I., Varushchenko, A.N., Klige, R.K. (1987) *Izmeneniya rezhima Kaspiyskogo morya i besсточnykh vodoyemov v paleovremeni* [Changes in the regime of the Caspian Sea and endorheic water bodies in paleotime], Nauka, Moscow, Russia, 240 p.
- Georgievskii, V.Yu. (1978) *Raschety i prognozy izmeneniya urovnya Kaspiyskogo morya pod vliyaniem yestestvennykh klimaticheskikh faktorov i khozyaystvennoy deyatel'nosti* [Calculations and forecasts of changes in the Caspian Sea level under the influence of natural climatic factors and economic activity], *Trudy GGI* [Proceedings of the State Hydrometeorological Institute], issue 255, pp. 94-112.
- Georgievskii, V.Yu., Golubev, V.S. (2003) *Ispareniye s poverkhnosti Kaspiyskogo morya i yego mnogoletnyaya izmenchivost'* [Evaporation from the surface of the Caspian Sea and its long-term variability], *Gidrometeorologicheskiye aspekty problemy Kaspiyskogo morya i yego basseyna* [Hydrometeorological aspects of the problem of the Caspian Sea and its basin], Gidrometeoizdat, St. Petersburg, Russia, pp. 230-238.
- Ginzburg, A.I., Kostianoy, A.G. (2018) *Tendentsii izmeneniy gidrometeorologicheskikh parametrov Kaspiyskogo morya v sovremennyy period (1990-2017 gg.)* [Trends in changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea in the modern period (1990-2017)], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 15, no. 7, pp. 195-207.
- Ginzburg, A.I., Kostianoy, A.G., Serykh, I.V., Lebedev, S.A. (2021) *Klimaticheskiye izmeneniya gidrometeorologicheskikh parametrov Kaspiyskogo morya (1980-2020 gg.)* [Climatic changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980-2020)], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 18, no. 5, pp. 277-291, doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.
- Golitsyn, G.S., Ratkovich, D.Ya., Fortus, M.I., Frolov, A.V. (1998) *O sovremennom pod"yeme urovnya Kaspiyskogo morya* [On the modern rise in the Caspian Sea level], *Vodnyye resursy*, vol. 25, no. 2, pp. 133-139.
-

Golubov, B.N. (1995) Anomal'nyy pod'yem urovnya Kaspiyskogo morya kak rezul'tat mnogoletney ekspluatatsii neдр региона [Anomalous rise in the Caspian Sea level as a result of long-term exploitation of the region's subsoil], *Mezhd. konf. «Kaspiyskiy region: ekonomika, ekologiya, mineral'nyye resursy»*, Sb. referatov [Int. Conf. "Caspian region: economy, ecology, mineral resources", Collection of abstracts], Moscow, Russia, pp. 9-10.

Golubov, B.N. (2018) Anomal'nyy pod'yom urovnya Kaspiyskogo morya i katastroficheskoye obmeleniye Aral'skogo morya kak rezul'tat drenirovaniya Arala pod plato Ustyurt i v Kaspiy vsledstviye tekhnogennykh vozmushcheniy neдр [Anomalous rise in the Caspian Sea level and catastrophic shallowing of the Aral Sea as a result of drainage of the Aral Sea under the Ustyurt plateau and into the Caspian due to man-made disturbances of the subsoil], *Elektronnoye nauchnoye izdaniye Al'manakh Prostranstvo i Vremya*, vol. 16, issue. 1-2, doi:10.24411/2227-9490-2018-11072.

Demin, A.P. (2023) Vodopotrebleniye i vodootvedeniye v bassejne reki Volgi, ikh vliyaniye na kachestvo vody [Water consumption and water disposal in the Volga River basin, their impact on water quality], *Izv. RAN, Ser. Geograficheskaya*, vol. 87, no. 6, pp. 847-861, doi: 10.31857/S2587556623060055.

Zolina, O.G. (2018) *Statisticheskoye modelirovaniye ekstremal'nykh osadkov i regional'nyy atmosfernyy tsikl vlagi* [Statistical modeling of extreme precipitation and regional atmospheric moisture cycle], Doctor's thesis, IO RAS, Moscow, Russia, 349 p.

Kostikova, I.A. (2002) *Sedimentatsionnyye vody Kaspiyskogo osadochnogo basseyna i kolebaniya urovnya Kaspiya* [Sedimentary waters of the Caspian sedimentary basin and Caspian Sea level fluctuations], Candidate's thesis, E.M. Sergeev Institute of Geoecology RAS, Moscow, Russia, 111 p.

Kostianoy, A.G. (2024) Issledovaniya Kaspiyskogo morya v ramkakh mezhdunarodnogo proyekta «The Caspian Sea Digital Twin» [Research of the Caspian Sea within the framework of the international project "The Caspian Sea Digital Twin"], *Okeanologicheskiye issledovaniya*, vol. 52, no. 2, pp. 234-255, URL: [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(2\).12](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).12).

Kostianoy, A.G., Ginzburg, A.I., Lebedev, S.A., Sheremet, N.A. (2014) Yuzhnyye morya Rossii [Southern Seas of Russia], *Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmenenii klimata i yego posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* [Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and Its Consequences in the Territory of the Russian Federation], in V.M. Kattsov and S.M. Semenov (eds.), Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia, pp. 644-683.

Kritsky, S.N., Korenistov, D.V., Ratkovich, D.Ya. (1975) *Kaspiyskoye more* [Caspian Sea], Nauka, Moscow, Russia, 158 p.

Lavrov, D.A. (2000) *Gidrologicheskiy rezhim zaliva Kara-Bogaz-Gol v usloviyakh svobodnogo dostupa morskoy vod* [Hydrological regime of the Kara-Bogaz-Gol Gulf under conditions of free access of sea waters], *Ekologicheskiye problemy Kaspiya* [Environmental problems of the Caspian, Moscow], Kirov, Russia, pp. 19-21.

Lebedev, S.A., Kostianoy, A.G. (2005) *Sputnikovaya al'timetriya Kaspiyskogo morya* [Satellite altimetry of the Caspian Sea], More, Moscow, Russia, 366 p.

Lebedev, S.A., Sirota, A.M., Ostroumova, L.P., Kostianoy, A.G. (2008) *Raschet ispareniya s akvatorii Kaspiyskogo morya po dannym distantsionnogo zondirovaniya* [Calculation of evaporation from the Caspian Sea using remote sensing data], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 5, no. 2, pp. 141-147.

Leonov, E.A. (2010) *Kosmos i dolgosrochnyy gidrologicheskiy prognoz* [Space and long-term hydrological forecast], Izd. Aleteya et al., St. Petersburg, Russia, 348 p.

Malinin, V.N. (1994) *Problema prognoza urovnya Kaspiyskogo morya* [The problem of forecasting the level of the Caspian Sea], RGMI Publishing House, St. Petersburg, Russia, 160 p.

Malinin, V.N. (2009) *Dolgosrochnoye prognozirovaniye urovnya Kaspiyskogo morya* [Long-term forecasting of the level of the Caspian Sea], *Izvestiya RAN, Seriya geograficheskaya*, no. 6, pp. 7-16.

Malinin, V.N. (2012) *Uroven' okeana: nastoyashcheye i budushcheye* [Ocean level: present and future], RSHU, St. Petersburg, Russia, 260 p.

Malinin, V.N. (2022) *Grozit li Kaspiyu sud'ba Arala?* [Is the Caspian Sea Threatened with the Fate of the Aral Sea?], *Gidrometeorologiya i ekologiya*, no. 69, pp. 746-760, doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-746-760.

Malinin, V.N., Gordeeva S.M. (2020) *Uroven' Kaspiyskogo morya kak indikator krupnomasshtabnogo vlogoobmena v sisteme «okean–atmosfera–susha»* [Caspian Sea Level as an Indicator of Large-Scale Moisture Exchange in the Ocean-Atmosphere-Land System], *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences], no. 4, pp. 5-20, doi: 10.17076/lim1156.

Malinin, V.N., Rashad, S.T. (2008) *Izmenchivost' poley ispareniya i osadkov v Kaspiyskom more* [Variability of evaporation and precipitation fields in the Caspian Sea], *Voprosy promyslovoy okeanologii* [Issues of Commercial Oceanology], VNIRO, issue 5, no. 1, pp. 201-212.

Mikhailov, V.N. (2013) *Ust'ya rek Kaspiyskogo regiona: istoriya formirovaniya, sovremennyye gidrologo-morfologicheskiye protsessy i opasnyye gilrologicheskiye yavleniya* [River mouths of the Caspian region: history of formation, modern hydrological and morphological processes and dangerous hydrological phenomena], Geos, Moscow, Russia, 702 p.

---

Muzylev, S.V., Privalsky, V.E., Ratkovich, D.Ya. (1982) *Stokhasticheskiye modeli v inzhenernoy gidrologii* [Stochastic models in engineering hydrology], Nauka, Moscow, Russia, 184 p.

Nesterov, E.S. (2016) *Vodnyy balans i kolebaniya urovnya Kaspiyskogo morya. Modelirovaniye i prognoz* [Water balance and fluctuations in the Caspian Sea level. Modeling and forecast], Hydrometeorological Center of Russia, Moscow, Russia, 374 p.

Ostrovskaya, E.V., Kolmykov, E.V., Kholina, O.I., Pronina, T.S., Voinova, M.V. (2016) *Uglevodorodnoye zagryazneniye severo-zapadnoy chasti Kaspiyskogo morya* [Hydrocarbon Pollution of the Northwestern Caspian Sea], *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye*, vol. 11, no. 1, pp. 137-148, doi: 10.18470/1992-1098-2016-1-137-148.

Panin, G.N. (1985) *Teplo- i massoobmen mezhdv vodoyemom i atmosferoy v yestestvennykh usloviyakh* [Heat and Mass Transfer between a Reservoir and the Atmosphere under Natural Conditions], Nauka, Moscow, Russia, 206 p.

Panin, G.N. (1987) *Ispareniye i teploobmen Kaspiyskogo morya* [Evaporation and Heat Transfer of the Caspian Sea], Nauka, Moscow, Russia, 86 p.

Panin, G.N., Vyruchalkina, T.Yu., Solomonova, I.V. (2015) *Klimaticheskiye izmeneniya v Arktike, Severnoy Atlantike, rayone Kaspiya i ikh vzaimosvyaz'* [Climate changes in the Arctic, North Atlantic, Caspian region and their interrelation], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 1, pp. 183-210.

Rutkovskaya, V.A. (1960) *K voprosu o sverkhdolgosrochnom prognozirovanii urovnya Kaspiyskogo morya s uchetom solnechnogo faktora* [On the issue of super-long-term forecasting of the Caspian Sea level taking into account the solar factor], *Trudy IO AN SSSR*, vol. 37, pp. 65-72.

Serykh, I.V., Kostianoy, A.G. (2020) *O vliyaniy Atlanticheskogo i Tikhogo okeanov na izmeneniye klimaticheskikh parametrov Kaspiyskogo morya* [On the influence of the Atlantic and Pacific oceans on changes in the climatic parameters of the Caspian Sea], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 96-107, doi: 10.3103/S1068373920060060.

Soskin, M.I. (1960) *Mnogoletniye kolebaniya gidrologicheskikh kharakteristik Baltiyskogo, Barentseva i Kaspiyskogo morey* [Long-term variations in hydrological characteristics of the Baltic, Barents and Caspian Seas], *Trudy okeanogr. komissii, Izd. AN SSSR*, vol. VII, pp. 3-32.

Terziev, F.S., Kosarev, A.N., Kerimov, A.A. (1992) *Proyekt «Morya». Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey, t. VI, Kaspiyskoye more, Vyp. 1, Gidrometeorologicheskiye usloviya* [Project "Seas". Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas, vol. VI, Caspian Sea, issue 1, Hydrometeorological conditions], Gidrometeoizdat, St. Petersburg, Russia, 358 p.

Frolov, A.V. (1998) *Vliyaniye vozobnovleniya ottoka v Kara-Bogaz-Gol na mnogoletniye kolebaniya urovnya Kaspiyskogo morya* [The impact of the



resumption of outflow into Kara-Bogaz-Gol on long-term fluctuations in the Caspian Sea level], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 7, pp. 87-97.

Frolov, A.V. (2003) *Modelirovaniye mnogoletnikh kolebaniy urovnya Kaspiyskogo morya: teoriya i prilozheniya* [Modeling Long-Term Fluctuations in the Caspian Sea Level: Theory and Applications], Geos, Moscow, Russia, 170 pp.

Frolov, A.V. (2016) Modelirovaniye vliyaniya ottoka v zaliv Kara-Bogaz-Gol na plotnost' raspredeleniya veroyatnosti urovnya Kaspiyskogo morya [Modeling the impact of outflow into Kara-Bogaz-Gol Bay on the probability density distribution of the Caspian Sea level], *Matematicheskoye modelirovaniye i chislennyye metody* [Mathematical Modeling and Numerical Methods], no. 3 (11), pp. 79-92.

Frolov, A.V. (2019a) Osobennosti mekhanizma mnogoletnikh kolebaniy urovnya Kaspiyskogo morya [Features of the mechanism of long-term fluctuations in the Caspian Sea level], *Uchenyye zapiski RGGMU* [Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University], no. 55, pp. 120-128.

Frolov, A.V. (2019b) Stsenarnyye prognozy kolebaniy urovnya Kaspiya s uchetom klimaticheskikh i tekhnogennykh vozdeystviy na vodnyy balans morya [Scenario forecasts of Caspian Sea level fluctuations taking into account climatic and anthropogenic impacts on the water balance of the sea], *Okeanologicheskoye issledovaniya*, no. 5, pp. 130-148.

Khaustov, V.V. (2006) Analiz sovremennykh vzglyadov na prichiny kolebaniy urovnya Kaspiyskogo morya, Izmeneniya prirodnoy sredy na rubezhe tysyacheletiy. [Analysis of modern views on the causes of Caspian Sea level fluctuations, Changes in the natural environment at the turn of the millennium], *Trudy elektronnoy mezhdunarodnoy konf.* [Proceedings of the electronic international conf.], Tbilisi-Moscow, Georgia, Russia, pp. 197-201.

Khublaryan, M.G. (2000) Kolebaniye urovnya Kaspiyskogo morya i yego ekologo-ekonomicheskoye posledstviya [Caspian Sea level fluctuations and their ecological and economic consequences], *Ekologicheskoye problemy Kaspiya* [Environmental problems of the Caspian], Moscow, Kirov, Russia, pp. 5-12.

Shiklomanov, I.A. (1976) *Gidrologicheskoye aspekty problemy Kaspiyskogo morya* [Hydrological aspects of the Caspian Sea problem], Leningrad, Gidrometeoizdat, 80 p.

Shiklomanov, I.A. (1979) *Antropogennyye izmeneniya vodnosti rek* [Anthropogenic changes in river water content], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 300 p.

Shiklomanov, I.A. Georgievskiy, V.Yu. (2003) Vliyaniye khozyaystvennoy deyatel'nosti na vodnyy balans i izmeneniya urovnya Kaspiyskogo morya [The impact of economic activity on the water balance and changes in the level of the Caspian Sea], *Gidrometeorologicheskoye aspekty problemy Kaspiyskogo morya i yego basseyna* [Hydrometeorological aspects of the problem of the Caspian Sea and its basin], Gidrometeoizdat, St. Petersburg, Russia, pp. 267-277.

Shilo, N.A. (1989) Priroda kolebaniy urovnya Kaspiya [The nature of fluctuations in the Caspian Sea level], *Dokl. AN SSSR*, vol. 305, no. 2, pp. 412-416.

Shilo, N.A., Krivoshey, M.I. (1989) Vzaimosvyaz' kolebaniy urovnya Kaspiyskogo morya s napryazheniyami v zemnoy kore [The relationship between fluctuations in the Caspian Sea level and stresses in the earth's crust], *Vestnik AN SSSR*, no. 6, pp. 83-90.

Shlyamin, B.A. (1962) Sverkhdolgosrochnyy prognoz urovnya Kaspiyskogo morya [Super-long-term forecast of the Caspian Sea level], *Izv. VGO [Izvestiya VGO]*, issue 1, pp. 26-33.

Eigenson, M.S. (1963) Budushcheye Kaspiyskogo morya [The future of the Caspian Sea], in *Problemy Kaspiyskogo morya, Vsesoyuznoye soveshchaniye po probleme Kaspiyskogo morya* [Problems of the Caspian Sea, All-Union Conference on the Problem of the Caspian Sea], Baku, Azerbaijan, pp. 24-28.

Chen, J.L., Pekker, T., Wilson, C.R., Tapley, B.D., Kostianoy, A.G., Cretaux, J.-F., Safarov, E.S. (2017) Long-term Caspian Sea level change, *Geophysical Research Letters*, vol. 44, pp. 6993-7001, doi:10.1002/2017GL073958.

Court, R., Lattuada, M., Shumeyko, N., Baimukanov, M., Eybatov, T., Kaidarova, A., Mamedov, E.V., Rustamov, E., Tasmagambetova, A., Prange, M., Wilke, T., Hassall, C., Goodman, S.J. (2025) Rapid decline of Caspian Sea level threatens ecosystem integrity, biodiversity protection, and human infrastructure, *Communications Earth & Environment*, vol. 6 (1), no. 261, URL: <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02212-5>.

Fox-Kemper, B. et al. (2021) *Ocean, cryosphere and sea level change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, in V. Masson-Delmotte et al. (eds.), Cambridge University Press, pp. 1211-1362, URL: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>.

Ginzburg, A.I., Kostianoy, A.G., Gholamalifard, M., Koibakova, S.E., Syrlybekkyzy, S. (2024) Ecologically and biologically significant marine protected areas in the Caspian Sea: A Review, *Ecologica Montenegrina*, vol. 76, pp. 85-115, URL: <https://doi.org/10.37828/em.2024.76.6>.

Hoseini, S.M., Soltanpour, M., Zolfaghari, M.R. (2025) Projected changes in Caspian Sea level under CMIP6 climate change scenarios: probabilistic and deterministic approaches, *Climate Dynamics*, vol. 63, no. 1, pp. 1-18, doi: 10.1007/s00382-024-07548-w.

Kosarev, A.N. (2005) Physico-geographical conditions of the Caspian Sea, "The Caspian Sea Environment", in A.G. Kostianoy and A.N. Kosarev (eds.), Springer, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 5-31, URL: [https://doi.org/10.1007/698\\_5\\_002](https://doi.org/10.1007/698_5_002).

Kosarev, A.N., Kostianoy, A.G. (2005) Kara-Bogaz-Gol Bay, "The Caspian Sea Environment", in A.G. Kostianoy and A.N. Kosarev (eds.), Springer, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 211-221.

Kosarev, A.N., Kostianoy, A.G., Zonn, I.S. (2009) Kara-Bogaz-Gol Bay: Physical and Chemical Evolution, *Aquatic Geochemistry*, vol. 15, no. 1-2, Special Issue: Saline Lakes and Global Change, pp. 223-236, doi: 10.1007/s10498-008-9054-z.

Kostianoy, A.G., Pesic, V. (2024) Advances in environmental monitoring of the Caspian Sea, *Ecologica Montenegrina*, vol. 76, pp. 201-210, URL: <https://doi.org/10.37828/em.2024.76.12>.

Lahijani, H., Leroy, S.A.G., Arpe, K., Cretaux, J.-F. (2023) Caspian Sea level changes during instrumental period, its impact and forecast: A review, *Earth-Science Reviews*, vol. 241, no. 104428, URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104428>.

Lavrova, O.Yu., Ginzburg, A.I., Kostianoy, A.G., Bocharova, T.Yu. (2022) Interannual variability of ice cover in the Caspian Sea, *Journal of Hydrology X*, vol. 17, 1 December 2022, 100145, URL: <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2022.100145>.

Lebedev, S.A., Kostianoy, A.G. (2008) Integrated using of satellite altimetry in investigation of meteorological, hydrological and hydrodynamic regime of the Caspian Sea, *Journal of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, vol. 19, issue 1-2, pp. 71-82.

Lockhoff, M., Zolina, O., Simmer, C., Schulz, J. (2014.) Evaluation of satellite-retrieved extreme precipitation over Europe using gauge observations, *Journal of Climate*, vol. 27, pp. 607-623, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00194.1.

Lockhoff, M., Zolina, O., Simmer, C., Schulz, J. (2019) Representation of precipitation characteristics and extremes in regional reanalyses, satellite- and gauge-based estimates over western and central Europe, *Journal of Hydrometeorology*, vol. 20, issue 6, pp. 1123-1145, URL: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0200.1>.

Mityagina, M.I., Kostianoy, A.G. (2024) Areas of heavy permanent oil pollution of the Caspian Sea surface identified by use of satellite remote sensing, *Ecologica Montenegrina*, vol. 76, pp. 49-62, URL: <https://doi.org/10.37828/em.2024.76.3>.

Nandini-Weiss, S.D., Prange, M., Arpe, K., Merkel, U., Schulz, M. (2020) Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area, *Int. J. Climatol.*, vol. 40, pp. 2717-2731, URL: <https://doi.org/10.1002/joc.6362>.

Prange, M., Wilke, T., Wesselingh, F.P. (2020) The other side of sea level change, *Communications Earth & Environment*, vol. 1, no. 69, URL: <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>.

Samant, R., Prange, M. (2023) Climate-driven 21<sup>st</sup> century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections, *Communications Earth & Environment*, vol. 4, no. 357, URL: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01017-8>.

---

Zonn, I.S., Kostianoy, A.G., Kosarev, A.N., Glantz, M. (2010) *The Caspian Sea Encyclopedia*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 527 p., URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11524-0>.

*Статья поступила в редакцию (Received): 11.07.2025.*

*Статья доработана после рецензирования (Revised): 30.07.2025.*

*Принята к публикации (Accepted): 04.08.2025.*

### **Для цитирования / For citation:**

Костяной, А.Г., Малинин, В.Н., Фролов, А.В. (2025) Основные причины изменения уровня Каспийского моря, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 11, № 3, с. 338-373, doi:10.21513/2410-8758-2025-3-338-373.

Kostianoy, A.G., Malinin, V.N., Frolov, A.V. (2025) Main causes for changes in the Caspian Sea level, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 11, no. 3, pp. 338-373, doi:10.21513/2410-8758-2025-3-338-373.