

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

УДК 551.461.2

МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАНТЫ ИХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

© 2023 г. В. Б. Ермаков*

Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, Россия

*e-mail: vitalerm@mail.ru

Поступила в редакцию 05.05.2023 г.

После доработки 05.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

Рассмотрены различные подходы к исследованию и прогнозу многолетних изменений среднегодового уровня Каспийского моря. В рамках наиболее распространенных методик принято считать, что такого рода оценки возможны только в вероятностном смысле, поскольку главные компоненты водного баланса моря ведут себя случайным образом. Однако для большинства потребителей важна конкретно обозначенная перспектива изменения уровня и обоснование ответа на вопрос: если происходит очередное значительное изменение, то как долго и до какого экстремального значения оно продолжится? По мере накопления данных о динамике параметров атмосферы и океана, в том числе и по результатам космического мониторинга, появляется все больше сообщений о выявлении в их временных рядах мультидекадной повторяемости. На протяжении последних лет неоднократно предпринимались попытки на основе изучения динамики уровня моря выявить внутри его временного ряда циклические компоненты с целью использования их как для описания произошедших ранее резких спадов и подъемов, так и для прогноза подобных изменений в будущем. Анализ данных при этом заключается в поиске таких периодов изменчивости, в рамках которых выполнялись бы требования ограниченности периодического состава и устойчивости компонент, формирующих временной ряд. С помощью специально созданной программной среды проведено исследование ряда, состоящего из исторических и современных данных по наблюдениям за уровнем Каспийского моря в течение последних 230 лет с целью выявления устойчивых периодичностей и построения с их помощью аппроксимирующего полинома. Показано, что на данном временном интервале кроме многовекового тренда присутствуют две явно выраженные квазициклические компоненты. Аппроксимация, сделанная с их использованием, позволяет описать всю предшествующую динамику уровня вплоть до 2021 г. и может быть использована в качестве основы для построения прогнозных оценок.

Ключевые слова: Каспийское море, изменение уровня, анализ временных рядов, мультидекадная осцилляция, аппроксимация многолетнего хода уровня набором гармоник

DOI: 10.31857/S2587556623060067, **EDN:** EGCZBH

ВВЕДЕНИЕ

Вопросу изучения изменения уровня Каспийского моря (УКМ) уделяется большое внимание как с научной точки зрения, так и с целью планирования хозяйственной деятельности. В силу обособленного расположения моря сам ход УКМ является уникальным инструментом, реагирующим на глобальные изменения климата и дающим возможность их длительного отслеживания.

На сегодняшний момент общепринято, что положение уровня моря определяется главным образом изменением параметров его водного баланса: объема стока рек, испарения с поверхности и суммы атмосферных осадков. При этом на долю водосборного бассейна р. Волги приходится не менее

80% суммарного речного стока и около 70% приходной части водного баланса (Рычагов, 2011).

В течение трех последних десятилетий, наряду с традиционными наземными исследованиями уровня, развитие получили спутниковые альтиметрические наблюдения за УКМ (Гинзбург и др., 2021; Chen et al., 2017, 2023). На рис. 1, полученном по данным спутниковых наблюдений, показано, как менялся уровень Каспийского моря в последние годы.

Существующие методы описания и прогнозирования многолетних изменений УКМ можно условно разделить (Водный ..., 2016) на следующие группы: использующие простые формы аппроксимации кривой уровня, например, линейную или степенную зависимость, с целью про-

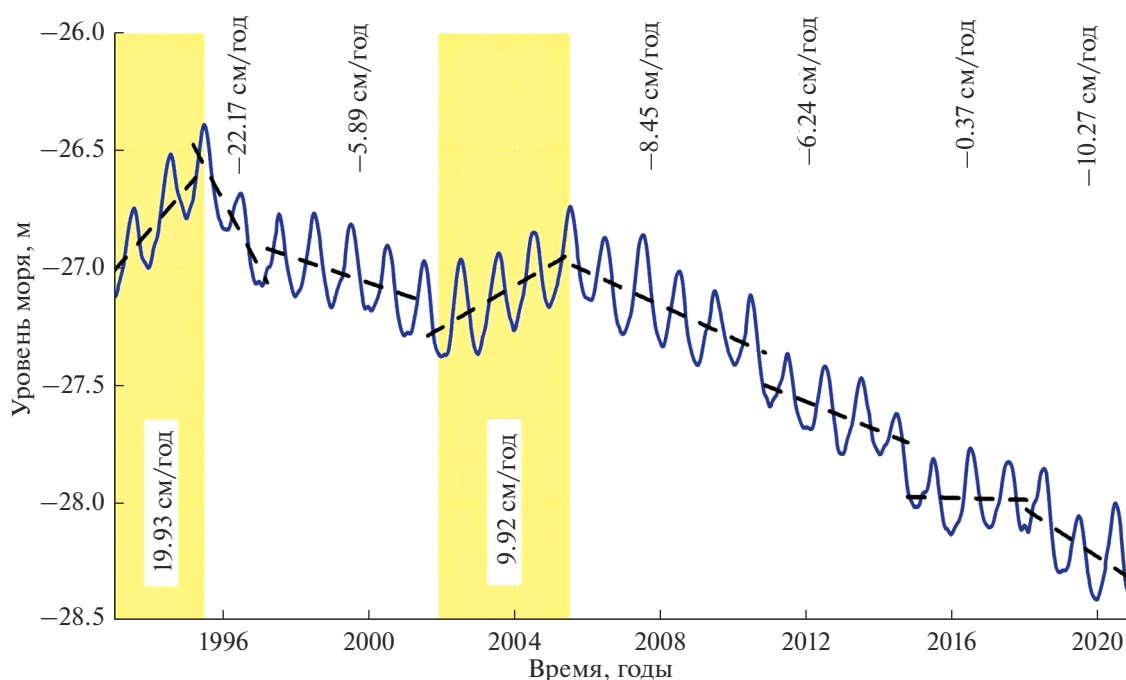


Рис. 1. Динамика уровня Каспийского моря.

Источник: (Гинзбург и др., 2021).

должения ее вперед на некоторый интервал; базирующиеся на поиске и анализе устойчивых периодических компонент во временных рядах УКМ; основанные на вероятностных моделях и применяющие для этого стохастическое уравнение водного баланса; предлагающие разнообразные схемы предикторов, рассматривающие не прямое, запаздывающее влияние различных природных процессов на уровень моря (Малинин, Гордеева, 2020; Никонова, 2008; Тужилкин и др., 2011; Фролов, 2019; Elguindi and Giorgi, 2006).

Два последних подхода, к сожалению, сами требуют прогнозных оценок для входных параметров. Например, могут использоваться наборы сценариев, когда просчитываются отдельно прогнозы для маловодной, средней и многоводной ситуации с водным балансом. Вопрос, какой при этом будет реальная ситуация и сколько она продлится, остается открытым. Кроме того, вероятностные модели дают лишь оценку попадания уровня в некоторый диапазон значений, который с увеличением заблаговременности прогноза на десятилетия вперед может достигать в размахе нескольких метров. Для стратегических оценок катастрофических рисков такие прогнозы вполне оправданы и необходимы. Но для большинства потребителей важна конкретно обозначенная перспектива изменения УКМ и научное обоснование ответа на вопрос — если происходит очередное значительное изменение уровня моря, то

как долго и до какого экстремального значения оно продолжится.

Хотя авторы ряда работ (Болгов, Филимонова, 2005; Болгов и др., 2007) считают, что прогноз многолетних изменений УКМ возможен только в вероятностном смысле, поскольку поведение главных составляющих водного баланса моря на длительных временных масштабах носит, по их мнению, чисто случайный характер, следует отметить, что по мере накопления данных о динамике параметров атмосферы и океана, в том числе и по результатам космического мониторинга, появляется все больше сообщений, например, о выявлении во временных рядах мультideкадной (шестидесятилетней) повторяемости. Подобное отмечалось как в процессе транспорта влаги из Атлантики (Федоров, Фролов, 2019), так и в результирующем эффекте от периодического усиления восточных пустынных ветров в прикаспийском регионе (Выручалкина и др., 2020) (рис. 2). Два последних фактора оказывают существенное влияние на изменение водного баланса в бассейне Каспийского моря.

Нельзя не согласиться с мнением авторов работы (Гусейнова, Абдусаматов, 2015, с. 124) в том, что “в настоящее время нет и, видимо, на современном уровне развития науки не может быть надежных прогнозов, по которым можно предугадать амплитуду и направление изменений уровня Каспия. С учетом этого оправданной может стать рабочая гипотеза о поиске на некотором времен-

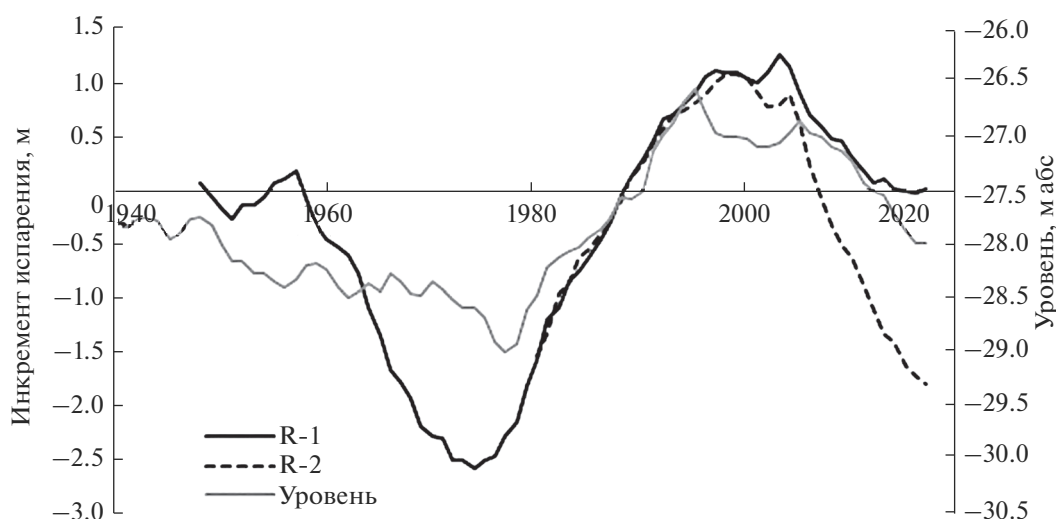


Рис. 2. Эволюция среднегодового испарения в период с 1948 по 2017 г., взятая с обратным знаком вместе с ходом уровня Каспийского моря. В ходе кривых хорошо выражена изменчивость, близкая к шестидесятилетней.

Источник: (Выручалкина и др., 2020).

ном интервале квазициклических компонент в многолетних изменениях уровня моря, основанная на анализе сочетаний различных данных об УКМ (геоморфологических, исторических, наблюдаемых)».

На протяжении последних десятилетий авторами ряда работ неоднократно предпринимались попытки на основе изучения динамики УКМ выявить внутри соответствующего временного ряда циклические компоненты с целью использования их как для описания произошедших ранее резких спадов и подъемов уровня моря, так и для прогноза подобных изменений в будущем (Бабкин, 2005; Борисов и др., 2019; Лаппо, Рева, 1997; Соловьёва, 2004; Шлямин, 1962). Анализ данных при этом заключался в поиске внутри них таких периодов изменчивости, в которых выполнялись бы требования ограниченности периодического состава и устойчивости компонент, формирующих временной ряд. В качестве примера на рис. 3 показан образец вейвлет-спектра, полученный в (Борисов и др., 2019) для исторических данных по УКМ (Берг, 1949), дополненных современными значениями уровня от Государственного океанографического института имени Н.Н. Зубова — ГОИН (Никонова, 2008).

В целом, результат таких попыток нельзя назвать удовлетворительным (Хаустов, Костенко, 2018; Гинзбург и др., 2021). Одной из причин этого, на наш взгляд, было вынужденное использование авторами слишком коротких на момент проведения исследований временных рядов наблюдений за уровнем. Другой причиной, возможно, было включение ими в область анализа не части, а всего массива не совсем точных, так называемых исторических, данных 1506—1836 гг.

(кривая Берга) об уровне моря (Берг, 1949; Варущенко и др., 1987; Рычагов, 2019; Шлямин, 1962), полученных по старинным лоциям, раскопкам и геологическим изысканиям.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

На основе обзора ранее выполненных исследований по анализу динамики среднегодовых значений УКМ рассмотреть возможность дополнения их новыми данными, полученными за последние годы, и провести исследование закономерностей хода уровня. Взяв за основу опубликованные в литературных источниках данные о сделанных в 1837—2021 гг. инструментальных наблюдениях за уровнем моря, рассмотреть одновременно с ними и более ранние, так называемые исторические, данные из диапазона 1506—1836 гг., но не все, а только ту часть, которая примыкает с отдалением не более чем на 50 лет. Выяснить, насколько такой комбинированный 1790—2021 гг. ряд, позволяет провести его аппроксимацию тригонометрическим полиномом с минимальным (не более четырех) количеством гармоник.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведен анализ временных рядов среднегодовых значений УКМ на наличие в них периодических компонент. При этом за условный ноль бралось среднее значение уровня на исследуемом интервале и методом наименьших квадратов осуществлялся поиск оптимальных значений амплитуд, частот и фаз аппроксимирующего тригонометрического полинома по алгоритму, описанно-

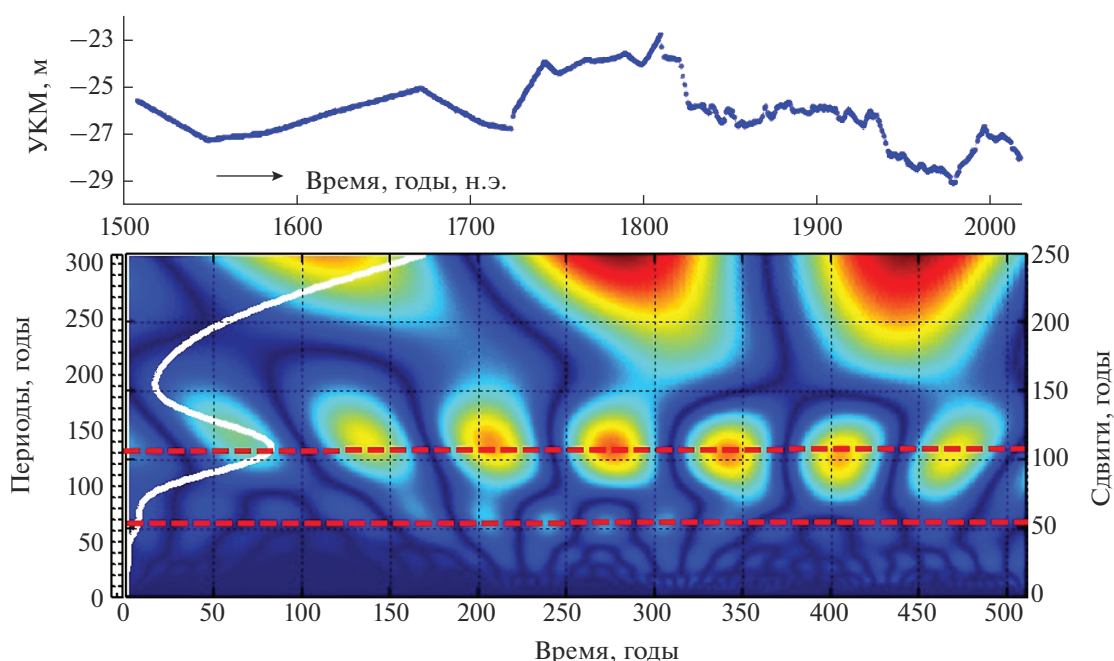


Рис. 3. Кривая многолетних изменений уровня Каспийского моря и результат ее вейвлет анализа.
 Источник: (Борисов и др., 2019).

му в (Бабкин, 2005). Для обработки данных была применена специальная программная среда (Борисов и др., 2019), которая позволяет в реальном масштабе времени, наблюдая за результатом в виде готовых формул и графиков, интерактивно менять параметры моделирования: задавать начало и конец исследуемого интервала, применять различные методы сглаживания, добавлять шум, варьировать параметры вспомогательного анализатора спектра, вести покомпонентный контроль модельного и разностного сигналов.

На рис. 4 показан вид интерфейса программы. Слева от вертикальной оси зеленым цветом показаны исторические и современные данные для УКМ (1506–2021 гг.), соответствующие кривой Берга с дополнениями от ГОИН. Справа показана тем же цветом, но уже только часть данных на выбранном для анализа интервале 1790–2021 гг. Пунктиром красного цвета вдоль хода кривой УКМ обозначена ее аппроксимация в виде суммы двух главных периодичностей и тренда. Аналитическая запись получающейся модели дана справа вверху. Желтой линией обозначен вспомогательный Фурье-спектр, представленный периодограммой. Штриховой синей линией помечен уровень -28 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По итогам анализа временного ряда УКМ в интервале 1790–2021 гг. найдено, что характер его изменения в данной области, помимо тренда,

главным образом (рис. 5) определяется двумя гармониками, имеющими периоды близкие к 67 и 98 годам с соответствующими амплитудами 0.4 и 0.9 м.

На границах анализируемого временного интервала они практически синфазны, а в центре — противофазны, чем определяется характерный, симметричный вид кривых, показанных на рис. 5 справа от вертикальной оси. Эффект от такого сложения двух близких по частоте гармоник проиллюстрирован на рис. 6.

Если принять во внимание разность частот рассматриваемых здесь гармоник, то можно видеть, что интервал биений такого рода составляет величину порядка 200 лет. Это значение, в частности, определяет длину временного отрезка, который необходим для надежного распознавания таких относительно близких по частоте компонент.

Две указанные периодичности, на наш взгляд, играют существенную роль в динамике среднегодового УКМ, по крайней мере в диапазоне последних 230 лет. Возможно, что такое длительное проявление упорядоченности в многолетней динамике УКМ является случайным совпадением и говорить о том, продолжится ли такое поведение уровня в ближайшие или более отдаленные годы, следует с известной осторожностью. Тем не менее факт выявленной закономерности не следует игнорировать, в том числе и в части его возможного физического обоснования. Подобная квазипериодичность в районе 60 лет отмечалась как в связи с мультидекадной повторяемостью транспорта влаги из Атлантики (Федоров, Фролов, 2019), так и в яв-

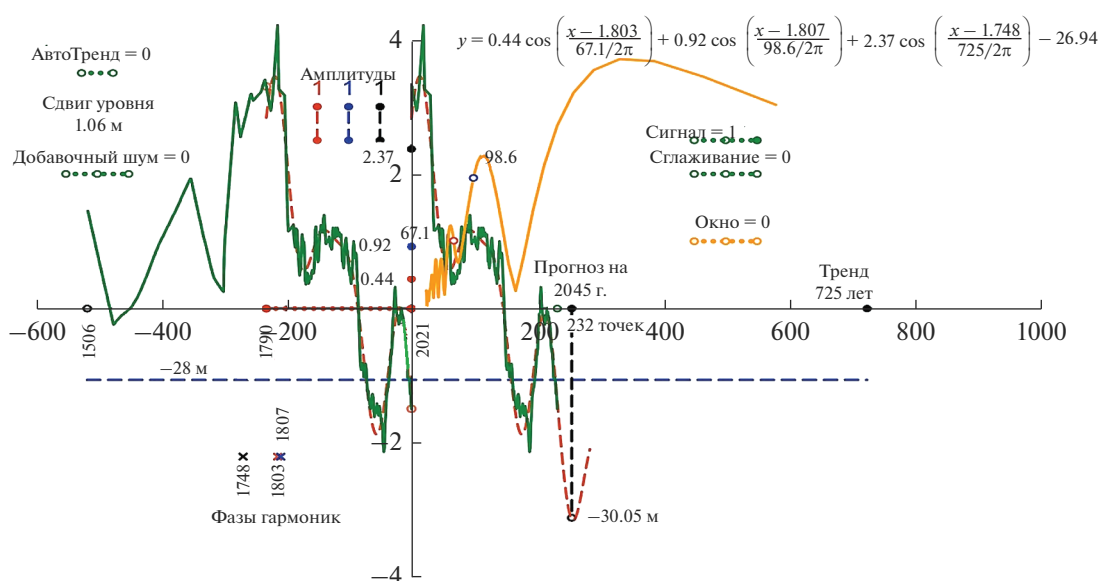


Рис. 4. Элементы управления и вид результатов работы среды моделирования.

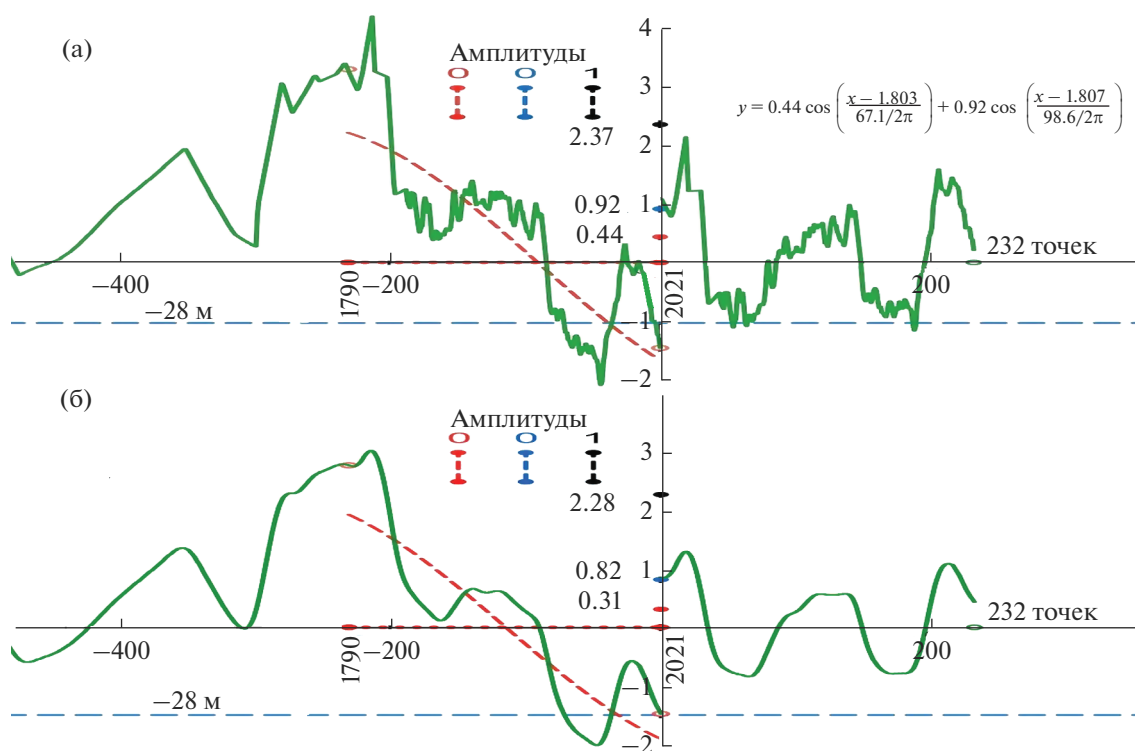


Рис. 5. Эффект от вычитания тренда (красная штриховая линия) для кривой Берга на участке 1790–2021 гг.: (а) без сглаживания и (б) с 16-летним сглаживанием.

лении периодического усиления восточных пустынных ветров (Выручалкина и др., 2020). Что касается компоненты близкой к 90 годам, то она,

в частности, обсуждалась в работе (Соловьёва, 2004) в связи с соответствующим по длительности циклом солнечной активности и климатиче-

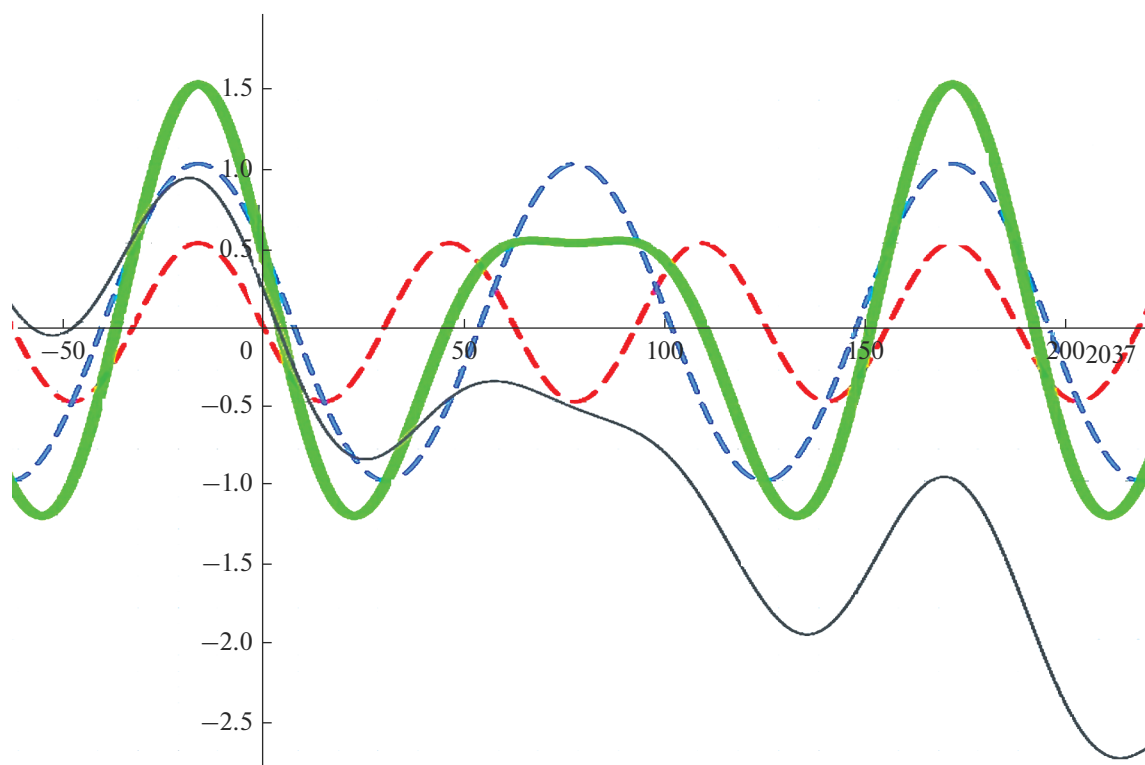


Рис. 6. Суммирование двух гармоник, одна из которых вдвое больше другой по амплитуде, но в полтора раза меньше по частоте.

Примечание: синим и красным пунктиром показаны гармоники, зеленой линией — их сумма, тонкая черная линия — результат добавления линейного тренда.

ским откликом на него. Последнее обстоятельство не означает, однако, и то, что данный, так называемый вековой, цикл не может быть обусловлен совсем другими причинами, например, проявлением автоколебательного процесса в системе океан—атмосфера (Хромов, 1973).

Аналитическая запись модельного описания кривой УКМ для участка 1790–2021 гг. (в метрах):

$$\begin{aligned} \text{УКМ}(t) = & 0.44 \cos\left(\frac{2\pi(t-1803)}{67}\right) + \\ & + 0.92 \cos\left(\frac{2\pi(t-1807)}{98}\right) + \\ & + 2.37 \cos\left(\frac{2\pi(t-1748)}{725}\right) - 27, \end{aligned} \quad (1)$$

где t — текущее время в годах.

Третье слагаемое в формуле (1) введено нами искусственно, со специально подобранным периодом изменения равным 725 годам. Это сделано в качестве попытки учета трудно вычисляемого многовекового тренда, который, в свою очередь, на рассматриваемом участке без потери точности аппроксимации вполне можно заменить линейной зависимостью, но тогда за границами рассматриваемого диапазона получались бы

нереально большие значения изменения уровня. С этой целью амплитуда и фаза тренда автоматически подбирались программой для указанного периода с учетом амплитуд других гармоник так, чтобы общий размах модельного уровня был не более 7.5 м. Последнее слагаемое в формуле характеризует среднее значение УКМ.

При исследовании более высокочастотных составляющих временного ряда изменений уровня моря следует отметить появление в спектре последнего двух отчетливых максимумов, соответствующих периодам около 30 и 38 лет, имеющих малые амплитуды (менее 0.2 м) и характер поведения в виде биений. Данное явление упоминается в исследованиях УКМ (Шлямин, 1962) как некие то обнаруживаемые, то полностью исчезающие квазитридцатилетние “брикнеровские частоты”.

Добавив в модель эти две компоненты, можно повысить точность аппроксимации:

$$\begin{aligned} \text{УКМ}_4(t) = & \text{УКМ}(t) + \\ & + 0.19 \cos\left(\frac{2\pi(t-1814)}{30}\right) + \\ & + 0.16 \cos\left(\frac{2\pi(t-1810)}{38}\right). \end{aligned} \quad (2)$$

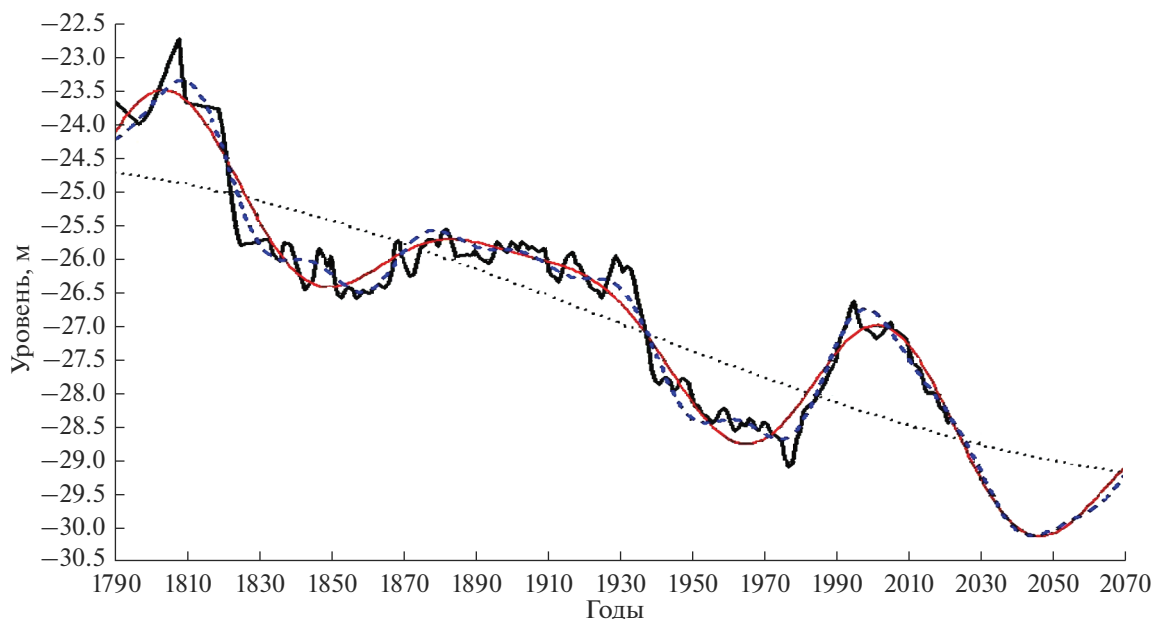


Рис. 7. Результат моделирования для участка 1790–2021 гг.

Примечание: сплошной линией показана кривая многолетних изменений уровня Каспийского моря (УКМ), точками обозначен тренд. Тонкая красная линия — результат расчета $УКМ(t)$ с учетом двух главных гармоник, синий пунктир — $УКМ_4(t)$ с учетом четырех гармоник.

Хотя их учет, как видно из рис. 7, несколько улучшает общую аппроксимацию, однако вклад этих двух дополнительных гармоник в общую картину поведения УКМ для временного интервала 2021–2060 гг. незначителен и мало изменяет общую картину, так как эти две гармоники на данном участке противофазны.

Расчет по формулам (1) и (2) показан на рис. 7 в виде кривых, которые аппроксимируют ход уровня моря в области 1790–2021 гг., а также в качестве примера экстраполируют его на некоторый временной отрезок вперед. Видно, что, если принять такую модель изменения УКМ, то после 2021 г. ожидается продолжение снижения уровня вплоть до 2045 г. с достижением минимальной отметки в районе -30 м, после чего начнется относительно плавное увеличение уровня моря.

Следует отметить, что положение момента смены знака изменения уровня определяется здесь значениями частот двух найденных главных гармоник и оно гораздо менее чувствительно по отношению к выбору параметров многовекового тренда, чем величина прогнозируемого минимального снижения уровня. Поэтому к последней нужно относиться в большей степени как к примерной оценке, которая при изменении периода тренда на 200 лет в большую или меньшую сторону может менять свою величину в пределах 0.5 м.

Что касается общей точности получающейся аппроксимации, то из рис. 7 и 8 хорошо видно, что разброс значений уровня относительно нее не

превышают 10% полной величины изменения УКМ для участка 1790–2021 гг. Среднеквадратичное отклонение при этом уменьшается с 1.4 до 0.2 м, а гистограмма меняет вид от многомодального распределения, характеризующего помимо прочего возможность наличия колебательных процессов внутри временного ряда, до одномодального близкого к случайному. Это, на наш взгляд, также свидетельствует в пользу вывода о существовании периодических компонент, главным образом определяющих многолетнюю динамику уровня моря.

Для оценки устойчивости результатов аппроксимации к положению границ интервала анализа можно сделать тестовый расчет, например, смоделировав ситуацию, предшествующую известному проекту переброски части стока северных рек и взяв для анализа участок 1790–1977 гг., рассчитать динамику уровня моря далее для временного отрезка 1978–2021 гг. В результате, как это видно на рис. 9, наблюдается вполне хорошее соответствие между восстановленными и реальными значениями УКМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании обзора результатов исследования колебаний уровня Каспийского моря и совместного использования современных и исторических данных проведен анализ временного ряда с целью выявления периодических компонент и построения с их помощью аппроксимирующего

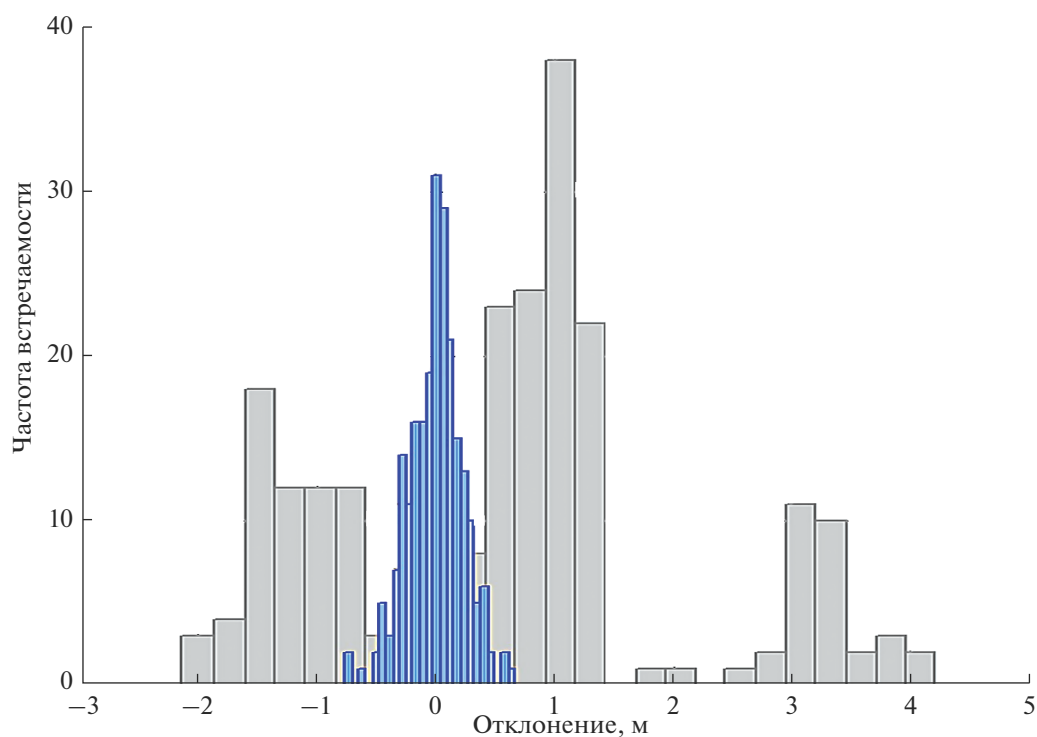


Рис. 8. Гистограмма разброса значений уровня Каспийского моря.

Примечание: серым цветом показаны отклонения уровня от среднего значения (–27 м) на интервале 1790–2021 гг., голубым — его отклонения от аппроксимирующей кривой.

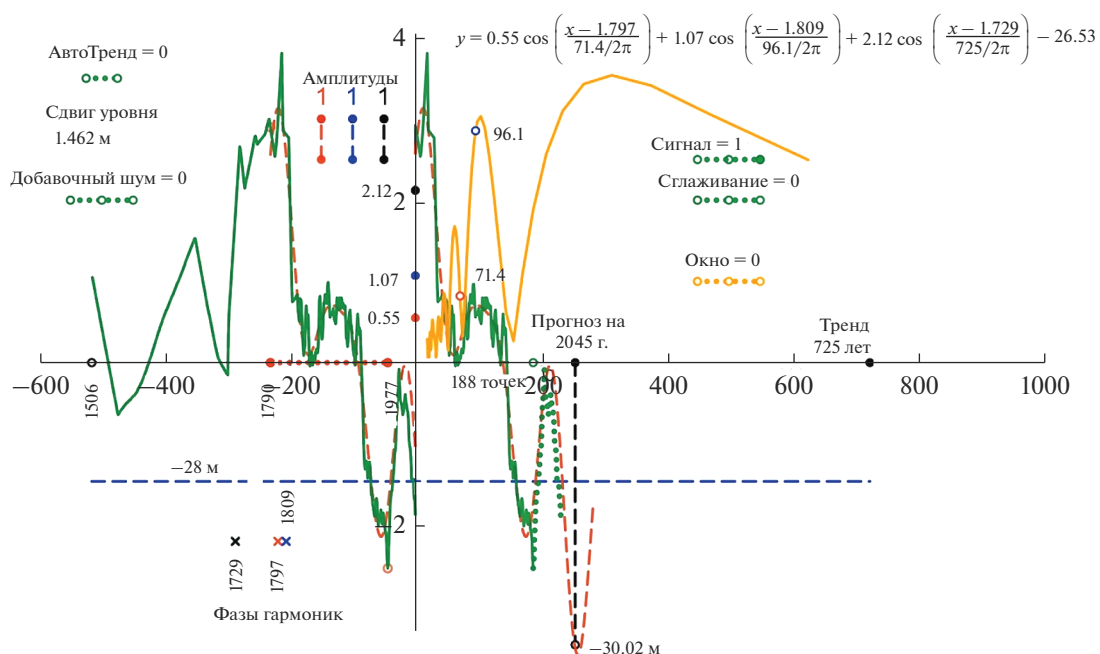


Рис. 9. Тестовый расчет уровня моря для 1978–2021 гг. по данным 1790–1977 гг.

Примечание: красная штриховая линия — результат моделирования. Зелеными точками справа показаны “условно неизвестные”, но по факту наблюдавшиеся в реальности значения уровня Каспийского моря.

полинома. В результате получено, что при условии компенсации многовекового тренда такие колебания уровня в диапазоне 1790–2021 гг. можно успешно описать моделью на основе двух выявленных главных гармоник с периодами 67 и 98 лет и в качестве гипотезы оценить дальнейший ход уровня моря. Найденные две квазициклические компоненты, как и пара других более слабых с периодами 30 и 38 лет, соответствуют климатическим временным масштабам и относительно устойчивы внутри рассмотренного интервала, в то время как более мелкомасштабная динамика среднегодового уровня, по нашим оценкам, носит практически случайный характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабкин А.В.* Усовершенствованная модель оценки периодичности изменений уровня и элементов водного баланса Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2005. № 11. С. 63–73.
- Берг Л.С.* Уровень Каспийского моря за историческое время // Очерки по физической географии. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1949. С. 205–272.
- Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А.* Каспийское море: экстремальные гидрологические события / ред. М.Г. Хубларян. М.: Наука, 2007. 381 с.
- Болгов М.В., Филимонова М.К.* Об источниках неопределенности при прогнозировании уровня Каспийского моря и оценке риска затопления прибрежных территорий // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 6. С. 664–669.
- Борисов Е.В., Ермаков В.Б., Мельников В.А.* Анализ периодической структуры климатических колебаний уровня Каспийского моря // Процессы в геосредах. 2019. № 2. С. 146–152.
- Варущенко С.И., Варущенко А.Н., Клиге Р.К.* Изменения режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремени. М.: Наука, 1987. 240 с.
- Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / ред. Е.С. Нестеров. М.: Триада, 2016. 374 с.
- Выручалкина Т.Ю., Дианский Н.А., Фомин В.В.* Влияние на эволюцию уровня Каспийского моря многолетних изменений режима ветра над его регионом в 1948–2017 гг. // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С. 230–240.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Серых И.В., Лебедев С.А.* Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980–2020) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 277–291.
- Гусейнова С.А., Абдусаматов А.С.* Прогноз динамики уровня Каспийского моря и ее последствия для прибрежных территорий // Юг России: экология, развитие. 2015. Т. 10. № 4. С. 119–126.
- Ланно С.С., Рева Ю.А.* Сравнительный анализ долготермической изменчивости уровней Черного и Каспийского морей // Метеорология и гидрология. 1997. № 12. С. 63–75.
- Малинин В.Н., Гордеева С.М.* Уровень Каспийского моря как индикатор крупномасштабного влагообмена в системе “океан–атмосфера–суша” // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 4. С. 5–20.
- Никонова Р.Е.* О причинах и последствиях колебаний уровня Каспийского моря в 20–21 столетиях // Труды ГОИН. 2008. Вып. 211. С. 127–151.
- Рычагов Г.И.* Колебания уровня Каспийского моря: причины, последствия, прогноз // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2011. № 2. С. 4–11.
- Рычагов Г.И.* К методике геоморфологических исследований (геоморфологические уроки Каспия) // Геоморфология. 2019. № 4. С. 27–39.
- Соловьёва Н.Н.* Исследование зависимости колебаний уровня Каспийского моря от солнечной активности. СПб.: Изд. РГГМУ, 2004. 70 с.
- Тужилкин В.С., Косарев А.Н., Архипкин В.С., Никонова Р.Е.* Многолетняя изменчивость гидрологического режима Каспийского моря в связи с вариациями климата // Вестн. Моск. ун-та. Серия. 5. География. 2011. № 2. С. 62–71.
- Федоров В.М., Фролов Д.М.* О возможной физической природе мультидекадного колебания в климатической системе Земли // Сложные системы. 2019. № 1 (30). С. 26–40.
- Фролов А.В.* Сценарные прогнозы колебаний уровня Каспия с учетом климатических и техногенных воздействий на водный баланс моря // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 5. С. 130–148.
- Хаустов В.В., Костенко В.Д.* К прогнозированию колебаний уровня Каспийского моря // Научные ведомости. Серия Естественные науки. 2018. Т. 42. № 2. С. 162–171.
- Хромов С.П.* Солнечные циклы и климат // Метеорология и гидрология. 1973. № 9. С. 93–110.
- Шлямин Б.А.* Сверхдолгосрочный прогноз уровня Каспийского моря // Изв. ВГО. 1962. Т. 94. Вып. 1. С. 26–33.
- Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B.D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., Safarov E.S.* Long-term Caspian Sea level change // Geophys. Res. Lett. 2017. Vol. 44. № 13. P. 6993–7001. <https://doi.org/10.1002/2017GL073958>
- Chen J., Cazenave A., Wang S.-Y., Li J.* Caspian Sea Level Change Observed by Satellite // Altimetry. Remote Sens. 2023. Vol. 15. № 3. Article 703. P. 1–12. <https://doi.org/10.3390/rs15030703>
- Elguindi N., Giorgi F.* Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations // Geophys. Res. Lett. 2006. Vol. 33. № 8. L08706. <https://doi.org/10.1029/2006GL025943>

Long-Term Changes in the Level of the Caspian Sea and Modern Options for Their Forecasting

V. B. Ermakov*

Zubov State Oceanographic Institute (FSBI "SOI"), Moscow, Russia

*e-mail: vitalerm@mail.ru

Various approaches to the study and forecast of long-term changes in the average annual level of the Caspian Sea are considered. Within the framework of the most common methods, it is considered that such estimates are possible only in a probabilistic sense since the main components of the seawater balance behave randomly. However, for the majority of consumers, a specifically designated perspective of a level change and a justification for the answer to the question are important: if there is another significant change, then how long and to what extreme value does it continue? With the accumulation of data on the dynamics of the atmosphere and ocean parameters, including the results of space monitoring, there are more and more reports on the identification of multidecadal recurrence in their time series. Over the past years, attempts have been repeatedly made, based on the study of sea level dynamics, to identify cyclical components within its time series in order to use them both to describe sharp declines and rises that occurred earlier and to predict similar changes in the future. Data analysis in this case consists of searching for such periods of variability within which the requirements of limited periodic composition and stability of the components that form the time series would be met. With the help of a specially created software environment, a study of a series consisting of historical and modern data on observations of the level of the Caspian Sea over the past 230 years was carried out in order to identify stable periodicities and build an approximating polynomial with their help. It is shown that in this time interval, in addition to the centuries-old trend, there are two clearly expressed quasi-cyclical components. The approximation made using them well describes the entire previous dynamics of the level up to 2021 and can be used as a basis for constructing forecast estimates.

Keywords: Caspian Sea, level change, time series analysis, multidecadal oscillation, approximation of the long-term level course by a set of harmonics

REFERENCES

- Babkin A.V. An improved model for assessing the frequency of changes in the level and elements of the water balance of the Caspian Sea. *Meteor. Hydrol.*, 2005, no. 11, pp. 63–73. (In Russ.).
- Berg L.S. The level of the Caspian Sea in historical time. In *Ocherki po fizicheskoi geografii* [Essays on Physical Geography]. Moscow; Leningrad: Akad. Nauk SSSR Publ., 1949, pp. 205–272. (In Russ.).
- Bolgov M.V., Krasnozhon G.F., Lyubushin A.A. *Kaspiiskoe more: ekstremal'nye gidrologicheskie sobytiya* [Caspian Sea: Extreme Hydrological Events]. Khablaryan M.G., Ed. Moscow: Nauka Publ., 2007. 381 p.
- Bolgov M.V., Filimonova M.K. The Sources of Uncertainty in Forecasting Caspian Sea Level and Estimating the Inundation Risk of Coastal Areas. *Water Resour.*, 2005, vol. 32, pp. 605–610.
<https://doi.org/10.1007/s11268-005-0078-0>
- Borisov E.V., Ermakov V.B., Melnikov V.A. Analysis of the Periodic Structure of Climatic Fluctuations in the Level of the Caspian Sea. *Prots. Geosredakh*, 2019, no. 2, pp. 146–152. (In Russ.).
- Chen J., Cazenave A., Wang S.-Y., Li J. Caspian Sea Level Change Observed by Satellite Altimetry. *Remote Sens.*, 2023, vol. 15, no. 3, article 703.
<https://doi.org/10.3390/rs15030703>
- Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B.D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., Safarov E.S. Long-term Caspian Sea level change. *Geophys. Res. Lett.*, 2017, vol. 44, no. 13, pp. 6993–7001.
<https://doi.org/10.1002/2017GL073958>
- Elguindi N., Giorgi F. Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, vol. 33, no. 8, article L08706.
<https://doi.org/10.1029/2006GL025943>
- Fedorov V.M., Frolov D.M. On the possible physical nature of the multidecadal oscillation in the Earth's climate system. *Compl. Syst.*, 2019, vol. 30, no. 1, pp. 26–40. (In Russ.).
- Frolov A.V. Scenario forecasts of Caspian level fluctuations taking into account climatic and technogenic impacts on the water balance of the sea. *Okeanol. Issled.*, 2019, vol. 47, no. 5, pp. 130–148. (In Russ.).
- Ginzburg A.I., Kostyanoy A.G., Serykh I.V., Lebedev S.A. Climatic changes in the hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980–2020). *Sovrem. Probl. Dist. Zond. Zemli Kosmos.*, 2021, vol. 18, no. 5, pp. 277–291. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291>
- Huseinova S.A., Abdusamadov A.S. Forecast of the dynamics of the level of the Caspian Sea and its consequences for coastal areas. *Yug Ross. Ekol. Razvit.*, 2015, vol. 10, no. 4, pp. 119–126. (In Russ.).
- Khaustov V.V., Kostenko V.D. To forecast fluctuations in the level of the Caspian Sea. *Nauch. Vedom., Ser. Est. Nauki*, 2018, vol. 42, no. 2, pp. 162–171. (In Russ.).
- Khromov S.P. Solar cycles and climate. *Meteor. Hydrol.*, 1973, no. 9, pp. 93–110. (In Russ.).
- Lappo S.S., Reva Yu.A. Comparative analysis of the long-term variability of the levels of the Black and Caspian

- Seas. *Meteor. Hydrol.*, 1997, no. 12, pp. 63–75. (In Russ.).
- Malinin V.N., Gordeeva S.M. Caspian Sea level as an indicator of large-scale moisture exchange in the ocean-atmosphere-land system. *Tr. Karel. Nauch. Ts. RAN*, 2020, no. 4, pp. 5–20. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17076/lim1156>
- Nikonova R.E. On the causes and consequences of fluctuations in the level of the Caspian Sea in the 20th–21st century. *Tr. GOIN*, 2008, no. 211, pp. 127–151. (In Russ.).
- Rychagov G.I. Fluctuations in the level of the Caspian Sea: causes, consequences, forecast. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2011, no. 2, pp. 4–11. (In Russ.).
- Rychagov G.I. To the methodology of geomorphological research (geomorphological lessons of the Caspian Sea). *Geomorph.*, 2019, no. 4, pp. 27–39. (In Russ.).
- Shlyamin B.A. Super-long-term forecast of the level of the Caspian Sea. *Izv. VGO*, 1962, vol. 94, no. 1, pp. 26–33. (In Russ.).
- Solov'eva N.N. *Issledovanie zavisimosti kolebaniy urovnya Kaspiiskogo morya ot solnechnoi aktivnosti* [Investigation of the Dependence of Fluctuations in the Level of the Caspian Sea on Solar Activity]. St. Petersburg: RGG-MU Publ., 2004. 70 p.
- Tuzhilkin V.S., Kosarev A.N., Arkhipkin V.S., Nikonova R.E. Long-term variability of the hydrological regime of the Caspian Sea due to climate variations. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2011, no. 2, pp. 62–71. (In Russ.).
- Varushchenko S.I., Varushchenko A.N., Klige R.K. *Izmeneniya rezhima Kaspiiskogo morya i besstochnykh vodоеmov v paleovremeni* [Changes in the Regime of the Caspian Sea and Inland Reservoirs in Paleotime]. Moscow: Nauka Publ., 1987. 240 p.
- Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovanie i prognoz* [Water Balance and Fluctuations in the Level of the Caspian Sea. Modeling and Forecast]. Nesterov E.S., Ed. Moscow: Triada Publ., 2016. 374 p.
- Vyruchalkina T.Yu., Dianskii N.A., Fomin V.V. Effect of Long-Term Variations in Wind Regime over Caspian Sea Region on the Evolution of Its Level in 1948–2017. *Water Resour.*, 2020, vol. 47, pp. 348–357.
<https://doi.org/10.1134/S0097807820020190>