

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-3-21-36.23>

MPHTI 37.27.17; 37.23.29

УДК 551.583, 504.45

А. В. Холопцев¹, Ж. К. Наурузбаева*²

¹ Д. г. н. (ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова», Севастополь, Российская Федерация; kholoptsev@mail.ru)

^{2*} PhD, руководитель лаборатории региональных климатических изменений (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; naurozbaeva.zhanar@mail.ru)

СВЯЗИ МЕЖГОДОВЫХ ВАРИАЦИЙ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ УРОВНЕЙ КАСПИЯ, СУММ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В ЕГО БАССЕЙНЕ И ИХ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ СОВРЕМЕННОМ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА

Аннотация. В современном периоде уровень водной поверхности Каспия стремительно снижается, что создает существенные проблемы для населения и экономики всех стран Прикаспийского региона. Поэтому совершенствование методик прогнозирования дальнейших его изменений – актуальная проблема гидрологии, метеорологии и экологии. Принято считать, что главными причинами современного снижения уровня Каспия являются влияние на динамику компонентов его водного баланса антропогенных факторов и климатических изменений. Значимым компонентом приходной части этого баланса является количество атмосферных осадков, выпадающих в бассейне Каспия. Одним из методов, применяемых для прогнозирования уровня Каспия, является множественно-регрессионный анализ. Оправданность получаемых с его помощью прогнозов зависит от значимости связей между изучаемым процессом в будущем и учитываемыми при их разработке факторами, мониторинг которых осуществляется в настоящем и прошлом. Оценены значимость статистических связей межгодовых вариаций среднемесячных фоновых уровней Каспия с опережающей их по времени динамикой сумм атмосферных осадков в его бассейне, а также ее изменения за период современного потепления климата. Как фактический материал об осадках использована информация реанализа ERA 5. Сведения об уровнях получены из литературных источников. Установлено, что в 1979–2021 гг. вывод о значимости рассматриваемых связей характеризовался достоверностью не менее 0,95 лишь при условии, что изменения сумм осадков соответствовали маю. По мере увеличения временного сдвига между изучаемым процессом и этим фактором от 0 до 36 месяцев их корреляция остается положительной и значимой, но несколько ослабевает. За период современного потепления климата выявленная связь также становилась слабее, что позволяет сомневаться в ее значимости даже в ближайшем будущем. Выявлены также участки бассейна Каспия, для которых за тот же период рассматриваемые связи, напротив, усиливались. Из этого следует, что вероятность осуществления в будущем сценария, при котором они останутся значимыми, выше, чем вероятность других сценариев. Поэтому выявленные связи целесообразно учитывать при прогнозировании изменений среднего уровня Каспия.

Ключевые слова: Каспийское море, уровень водной поверхности, сумма атмосферных осадков, изменение климата, прогнозирование, значимость, тенденция.

Введение. Изменения уровней водных объектов существенно влияют на динамику их вод, экологические условия, переформирование их берегов, а также способны порождать чрезвычайные ситуации (ЧС) на прибрежных территориях. Поэтому совершенствование методик их долгосрочного прогнозирования – актуальная проблема гидрологии, экологии, гидрометеорологии и безопасности при ЧС [1–3].

Каспийское море отличается быстрыми и значительными физическими, химическими и биологическими изменениями уровня, которые возникают под влиянием внешних факторов и могут привести к серьезным последствиям. Море характеризуется не только уникальным расположением, объемом, фауной и флорой, но и высокой значимостью в экономическом, политическом и социальном секторах. Каспий на протяжении многих столетий является транспортной магистралью между окружающими его странами, богат природными ресурсами. В Прикаспийском регионе развиты нефтегазодобывающая и химическая промышленность, гидроэнергетика, рыбное хозяйство и пр. [4, 5].

Согласно представлениям о причинах изменений уровня Каспийского моря (УКМ) [6-10] все их разнообразие можно разделить на два класса. К первому можно отнести геолого-геоморфологические процессы, а ко второму – гидроклиматические [5, 6].

Многие геолого-геоморфологические процессы (трансгрессии и регрессии) влияют на изменения УКМ сотни лет и более, а его кратковременные колебания вызваны гидроклиматическими факторами (к которым относятся и климатические изменения) [6-10].

Гидроклиматические факторы изменений УКМ могут быть периодическими и непериодическими. К первым относятся его эвстатические (или водно-балансовые) изменения, вековые, многолетние, межгодовые и сезонные, вызванные вариациями объема вод моря. Ко вторым принадлежат непериодические изменения уровня в тех или иных районах моря, обусловленные сгонно-нагонными явлениями (которые могут быть названы также деформационными) [5, 6, 11].

Любые изменения УКМ приводят к значимым последствиям для всех стран, которым принадлежат побережья Каспия.

Последний подъем УКМ, происходивший с 1977 по 1995 г., привел к затоплению сотен квадратных километров прибрежных территорий, что вызвало миграцию населения. Во всех странах Прикаспийского региона появились «экологических» беженцы. Снижение УКМ, которое началось с середины 90-х годов XX века и ускорилось за последние 10 лет, нанесло не менее значимый ущерб. Средний уровень в Среднем Каспии за это время снизился, достигнув в 2022 году отметки в минус 28,67 м БС [12, 13].

По данным береговых и островных станций, в 2022 г. УКМ в Северном Каспии составлял в среднем минус 28,49 м, изменяясь от минус 27,57 до минус 29,44 м БС [12, 13].

В глубоководной казахстанской части Каспийского моря по данным МГ Форт-Шевченко, МГ Актау и МГП Фетисово средний уровень моря был минус 28,64 м БС с максимальным значением при подъеме до отметки минус 28,05 м БС и минимальным при спаде до отметки минус 29,38 м БС [12, 14].

Летом 2023 года УКМ в районе МГП Актау составлял минус 29,58 м БС [13, 14].

В работе [15] отображена цикличность вариаций УКМ, которая связана с колебаниями термического режима Каспия. Продолжительность периода цикла оценена в 90 лет.

Еще Берг Л. С. проводил восстановление временного хода уровня за более ранние годы [16]. Ныне установлены средние значения УКМ для каждого года, начиная с середины XIX века. Наиболее достоверной подобная информация является за период с 1900 года [6, 17].

Работы [6, 18] показывают связь УКМ с циркуляционными процессами в земной атмосфере.

Причинам изменений УКМ посвящены работы многих российских [4, 9, 10, 17] и казахстанских [7, 19-22] ученых. Эта проблема привлекает внимание также ученых других стран [23-26]. Ими рассмотрены не только исторические данные, но и осуществлены попытки прогнозирования будущих изменений УКМ [24].

Согласно представлениям о гидроклиматических факторах изменений уровня водной поверхности любого водоема основными являются вариации сумм атмосферных осадков, которые выпадают на территории его водосборного бассейна и являются одним из компонентов приходной части его водного баланса [6, 27]. Факторы, вызывающие эти вариации, весьма многочисленны, а многие из них не наблюдаемы. Поэтому такой процесс принято рассматривать как случайный.

При прогнозировании этих процессов может быть применен метод множественной регрессии [28]. В соответствии с ним прогноз Y изучаемого процесса u , обладающий заблаговременностью τ , определяется соотношением

$$Y(k+\tau) = c_0 + c_1 * X_1(k) + c_2 * X_2(k) + \dots + c_n * X_n(k) ,$$

где $X_1(k)$, $X_2(k)$, ..., $X_n(k)$ – предикторы модели, соответствующие моменту времени k ($k=1,2,\dots,K$), для которого разрабатывается прогноз, могут быть значимо статистически связаны с u , запаздывающим по отношению к ним на время τ . Длина этих рядов K превышает n (наилучший результат получается, если $K = 2 * n$), а сами они не являются линейно зависимыми. $c_0, c_1, c_2, \dots, c_n$ – действительные константы, минимизирующие среднеквадратическую ошибку $z(k+\tau) = u(k+\tau) - Y(k+\tau)$, которая вычислена с учетом всех k от 1 до K .

Будущее не предопределено, но его сценарий, при котором связи между процессами $y(k+\tau)$ и $X_i(k)$ останутся значимыми, если они были значимыми на всей доступной изучению их предыстории и при этом усиливались, является одним из наиболее вероятных [28, 29].

Учитывая причинную связь между изменениями УКМ и вариациями месячных сумм осадков (МСО) в его бассейне, допустимо предположить, что существуют участки его территории, где связи между этими процессами при некоторых τ являются значимыми и в прошлом усиливались.

Мониторинг атмосферных осадков, выпадающих в различных пунктах водосборного бассейна Каспия, уже многие десятилетия осуществляют многочисленные гидрометеорологические станции всех стран Прикаспийского региона. Результаты, полученные на многих из них, представлены на сайте [13].

Информация о часовых суммах атмосферных осадков, выпадавших с 0 ч 01.01.1959 г. по 23 ч 31.12.2023 г. во многих пунктах территории бассейна, представлена также в [30]. Упомянутые пункты соответствуют всем узлам координатной сетки реанализа ERA-5 [31-33], поддерживаемого сервисом Copernicus [30].

Тем не менее ранее справедливость выдвинутой гипотезы не проверялась, а участки бассейна Каспия, для которых связи МСО и УКМ за период современного потепления климата обладают указанными свойствами, не выявлены. Последнее не позволяет определить наиболее эффективные предикторы прогностической модели изменений УКМ и с ее помощью осуществить прогнозирование этой характеристики.

С учетом изложенного проверка выдвинутой гипотезы, а также поиск участков бассейна Каспия, для которых временные ряды МСО обладают требуемыми свойствами, представляют теоретический и практический интерес.

Цель данной работы – подобная проверка и выявление участков бассейна Каспия, для которых за период современного потепления климата временные ряды МСО значимо связаны с запаздывающими по времени рядами УКМ, и эти связи усиливались.

Для ее достижения решены следующие задачи:

1. Выявление условий, при которых статистические связи межгодовых вариаций МСО, выпадавших на всей территории водосборного бассейна Каспия за период современного потепления климата, а также изменений УКМ, запаздывающих на то или иное время, являлись значимыми.
2. Для условий, когда изучаемые связи были значимы, оценились тенденции изменений их силы, происходивших за период современного потепления климата.
3. Определение участков водосборного бассейна Каспийского моря, для которых рассматриваемые связи за период современного потепления климата были значимы и усиливались.

Материалы и методы. При выборе фактического материала об изменениях сумм атмосферных осадков проведено тестирование подобной информации, представленной в реанализе ERA-5 [30-33]. Тестирование осуществлено путем сопоставления вычисленных оценок МСО на участках бассейна Каспия, для которых информация о фактических значениях этих показателей, определенных по результатам мониторинга на территории России, Казахстана, Туркменистана, Ирана и Азербайджана, представлена в работе [13].

Тестирование показало, что упомянутая информация из реанализа ERA-5 наиболее точно соответствует оценкам, основанным на результатах мониторинга, для отрезка времени с 1.04.1975 г. по 31.10.2023 г., который включает основную часть периода современного потепления климата [12, 34, 35].

Как фактический материал о значениях МСО на различных участках бассейна Каспия использована информация реанализа ERA-5, соответствующая указанному отрезку времени [36, 37]. При этом учитывалось расположение границ бассейна, показанное согласно [38] на рисунке 1.

Как видно из рисунка 1, наибольшая часть бассейна Каспия принадлежит России и образует водосборный бассейн реки Волги. Также бассейн состоит из бассейнов рек Урал (Жайык), Эмба, Кума, Терек, Кура, Кызыл Узен и Атрек.

Из упомянутого фактического материала для каждого месяца и каждого пункта бассейна Каспия сформирован временной ряд МСО.

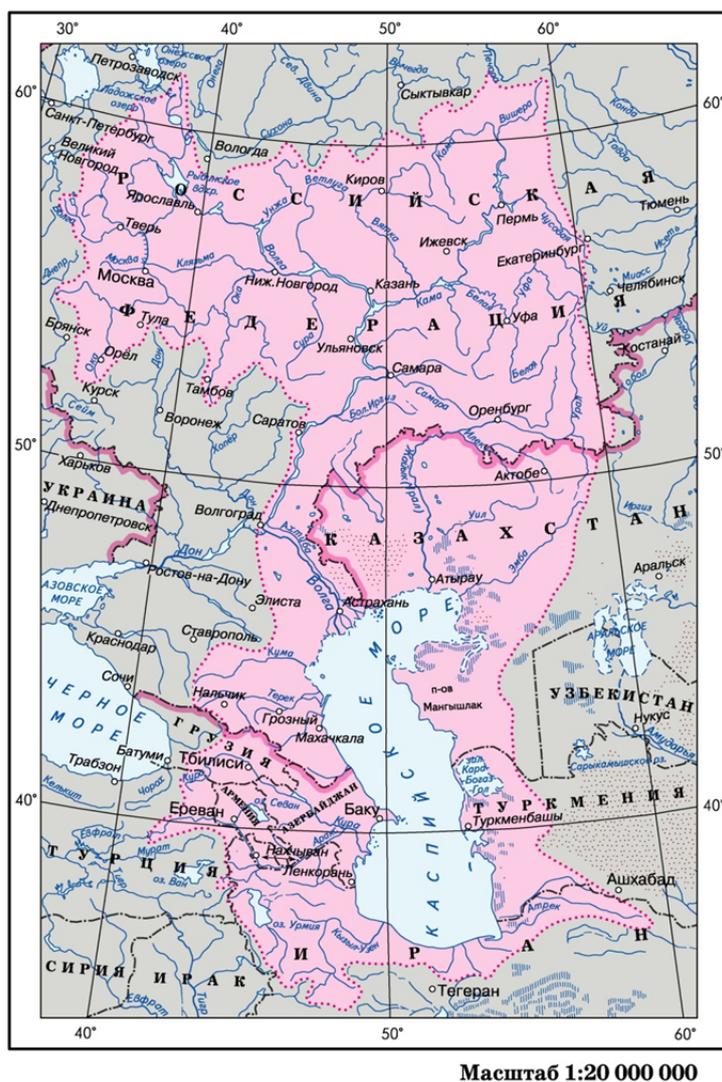


Рисунок 1 – Бассейн Каспийского моря [38]
 Figure 1 – Caspian Sea basin [38]

Как фактический материал об изменениях среднемесячных значений УКМ использована информация, которую предоставляет Координационный комитет по гидрометеорологии и мониторингу загрязнения Каспийского моря (КаспКОМ) [13]. КаспКОМ был организован гидрометеорологическими организациями прикаспийских государств при поддержке Всемирной метеорологической организации в 1994 году. По времени этот каталог охватывает весь период наблюдений, а по пространству – все побережье Каспийского моря. В каталог включены таблицы максимальных, минимальных и средних месячных значений уровня моря по данным наблюдений на 22 постах и полное описание базы данных. Сведения об уровнях моря предоставляются гидрометслужбами.

Согласно Наставлению к наблюдательным пунктам [14], на репрезентативных станциях и постах наблюдения осуществляются с дискретностью 6 ч. Измерения производятся с помощью рейки.

Средние значения УКМ вычисляются путем осреднения результатов измерений на МГП Махачкала, Форт-Шевченко, Туркменбаши, Баку как репрезентативных.

Сведения по станциям Казахстана также предоставляются в Ежегодных данных о режиме Каспийского моря на официальном сайте РГП «Казгидромет» [14]. Информация по станциям России представлена на сайте Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане, а также в ежегодниках [39].

При решении первой задачи из временных рядов МСО для различных пунктов бассейна Каспия, путем их поочередного суммирования, сформированы временные ряды МСО для всей территории бассейна, соответствующие тем или иным месяцам. Члены этих рядов пропорциональны объему воды, поступившей за тот или иной месяц каждого года на всю изучаемую территорию.

Как пример на рисунке 2 показана зависимость от времени МСО на всей территории бассейна Каспия, которая соответствует маю.

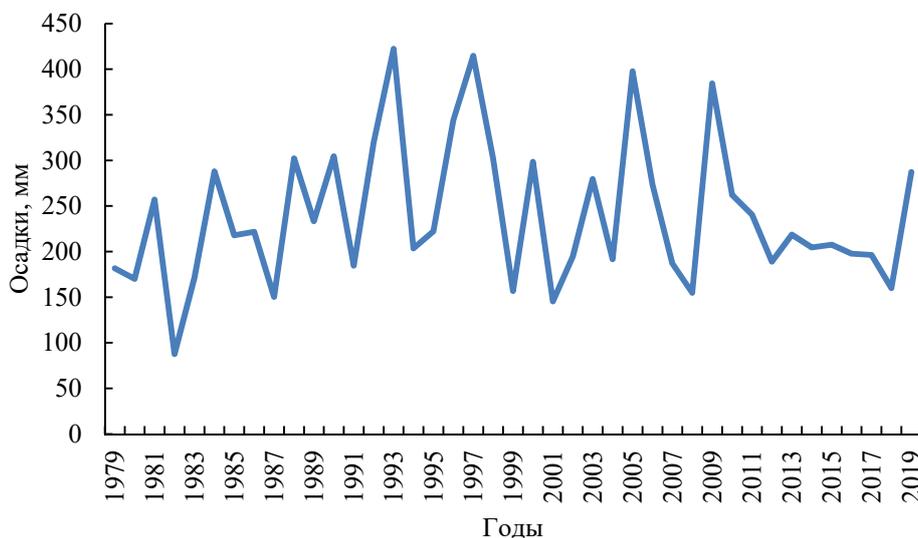


Рисунок 2 – Межгодовые изменения МСО для мая в бассейне Каспия

Figure 2 – Interannual changes in monthly precipitation amounts for May in the Caspian Sea basin

Из рисунка 2 следует, что межгодовые изменения МСО для мая в бассейне Каспия представляют собой сложные колебания. Высокочастотная мода спектра этих колебаний, которая может быть выделена по такому ряду, обладает периодом, близким к 3 годам. Его долгопериодная мода, вероятно, может иметь период около 100 лет, а на рассматриваемом отрезке времени ее максимум соответствует приблизительно 2000 году. Определить его не позволяет недостаточная длина изучаемых временных рядов.

Аналогичными особенностями обладают рассматриваемые процессы и для других месяцев, однако периоды и фазы мод спектров соответствующих зависимостей от времени МСО иные.

Для сравнения на рисунке 3 показаны зависимости от времени среднего УКМ для некоторых месяцев.

Из рисунка 3 следует, что в целом за период 1900-2021 гг. изменения УКМ носили убывающий характер. При этом в период 1935-1995 гг. эти изменения происходили на заметно более низком среднем уровне.

В современном климатическом периоде (1991-2020 гг.) средняя скорость снижения УВП составила 0,046 м/год, что значительно выше, чем для периода 1900-1929 гг. (0,020 м/год). Последнее может быть следствием повышения климатических норм температур воздуха и снижения климатических норм МСО в бассейне Каспия, что существенно повысило среднюю интенсивность испарения воды, а также строительства равнинных гидроэлектростанций на Волге.

Из рисунка 3 понятно, что межгодовые изменения УКМ значительно более выражены, чем внутригодовые вариации. При этом, как видно из рисунка 2, в период 1979-2019 гг. характер этих изменений подобен зависимости от времени предполагаемой долгопериодной моды межгодовых вариаций МСО для мая, поступающих в бассейн Каспия.

Такое подобие может приводить к наличию статистических связей временных рядов МСО для мая с рядами УКМ для любых месяцев. Так как для других месяцев периоды и фазы долгопериодной моды спектров рядов МСО иные, связи этих рядов с рядами УВП значимыми могут и не быть.

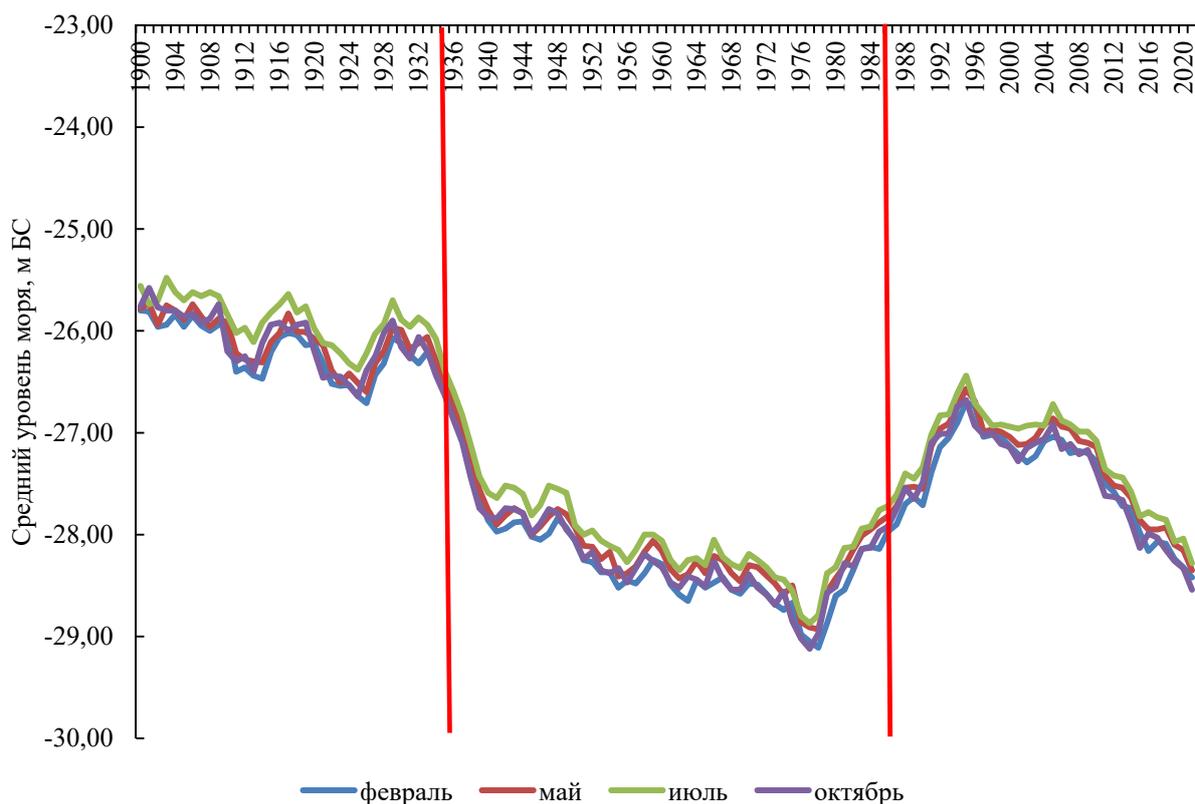


Рисунок 3 – Зависимости от времени среднемесячных значений среднего УКМ для некоторых месяцев

Figure 3 – Depending on the time of the average monthly values of the average level of the Caspian Sea for some months

Как характеристика силы связи между изучаемыми временными рядами рассматривалось значение коэффициента их корреляции, поэтому при решении первой задачи применен метод корреляционного анализа.

Исследовались связи между сформированными временными рядами МСО для каждого месяца для периода 1979-2019 гг., а также между рядами среднемесячных УКМ, которые совпадают с ними по времени либо запаздывают на 1-36 мес. При оценке значимости рассматриваемых связей применен критерий Стьюдента.

В результате определения порогового уровня коэффициента корреляции учитывалось наименьшее количество степеней свободы сопоставляемых временных рядов. Упомянутое количество находилось для каждого ряда по его автокорреляционной функции. Его наименьшее значение для всей совокупности изучаемых рядов составило 39.

Перед вычислением коэффициента корреляции рассматриваемых временных рядов в каждом из них скомпенсирован линейный тренд, коэффициенты которого определены по методу наименьших квадратов.

Решение о значимости связей принималось, если достоверность этого статистического вывода превосходила 0,95 (величина модуля соответствующего порога корреляции составляет 0,33). Результаты корреляционного анализа сравнивались также с пороговым уровнем 0,42, который соответствует достоверности вывода о значимости связей 0,99.

При решении второй задачи из рассматриваемых временных рядов МСО для всех месяцев сформированы отрезки длиной 36 лет, окончание которых запаздывало по отношению к 2021 году на время $\tau = 0-10$ лет. Также сформированы отрезки ряда УКМ, запаздывающие по отношению к ним на 0-36 мес.

Для отрезков временных рядов УКМ, соответствующих каждому рассматриваемому месяцу и каждому τ , вычислены коэффициенты их корреляции (К) с отрезками рядов МСО, опережающих их на то или иное время.

Из вычисленных значений K для каждого пункта, месяца и τ сформирован временной ряд, содержащий 11 членов, который отражает зависимость силы связи между изучаемыми процессами от года начала соответствующего «скользящего окна» (отрезка времени, на котором она оценивалась).

По этому ряду установлен угловой коэффициент его линейного тренда, который признавался значимым, если достоверность такого вывода составляла не менее 0,95. Это решение выносилось, если выполнялось условие

$$39 * \text{УКЛТ } K > 1,65 * \text{СКО} ,$$

где УКЛТ K – угловой коэффициент линейного тренда ряда K ; СКО – среднеквадратическое отклонение этого ряда. При этом использовано допущение о том, что отклонения членов ряда от соответствующего тренда подчиняются нормальному закону, которое не проверялось ввиду малой длины этого ряда.

Решение о том, что для рассматриваемого ряда УМК его связи с изучаемыми вариациями МСО являлись значимыми и усиливались, принималось, если вычисленное значение УКЛТ K являлось отрицательным, а соответствующий коэффициент синхронной корреляции сопоставляемых рядов по модулю превышал 0,33.

Как следует из рассмотренной методики, проверка допущения о том, что отклонения членов ряда K от соответствующего тренда подчиняются нормальному закону, не была осуществлена, так как каждый ряд содержит всего 11 членов. Поэтому выводы, которые могут быть получены с ее применением, следует рассматривать как носящие лишь качественный характер.

Результаты исследования и их анализ. При решении первой задачи для каждого месяца, которому соответствует ряд МСО на всей территории бассейна Каспия за 1979-2019 гг., определены значения его взаимно корреляционной функции с рядами УМК, для их запаздываний τ , не превышающих 36 мес. Вычисленные значения сопоставлены с уровнем 0,33, при превышении которого вывод о значимости корреляции характеризуется достоверностью не менее 0,95.

Установлено, что вывод о значимости связей между рассматриваемыми рядами может быть сделан лишь при условии, что ряды МСО соответствуют мая (что свидетельствует о справедливости представленного вывода из анализа рисунков 2 и 3).

Как подтверждение на рисунке 4 приведена полученная таким образом зависимость от времени запаздывания τ рядов УМК, значений коэффициента их корреляции с рядами МСО для мая.

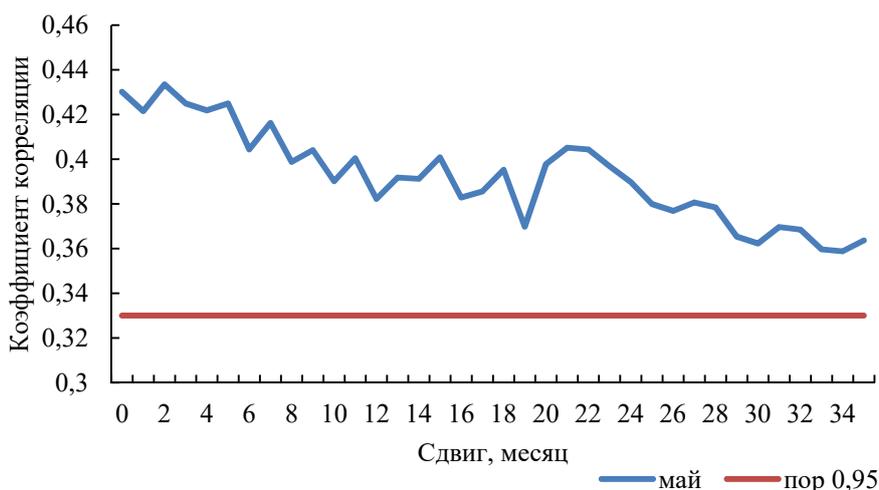


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента корреляции межгодовых изменений МСО для мая в бассейне Каспия и вариаций УМК от месяца, которому соответствуют эти вариации

Figure 4 – Dependence of the correlation coefficient of interannual changes in monthly precipitation amounts for May in the Caspian basin and variations in the Caspian Sea level on the month with these variations correspond

Из рисунка 4 видно, что при любом сдвиге (времени запаздывания τ) между рядом УКМ и рядом МСО для мая коэффициент корреляции K существенно превышает выбранный пороговый уровень.

Для рядов МСО, которые соответствуют прочим месяцам, их корреляция с запаздывающими по времени рядами УКМ, как и следовало ожидать, значимой не является.

При решении второй задачи из временных рядов МСО для мая, а также запаздывающих рядов УКМ сформированы отрезки длиной 39 лет, начала которых соответствуют 1975-1985 гг. Из рядов УКМ вырезаны части, запаздывающие по отношению к этим отрезкам на $\tau = 0-36$ лет. Для каждого τ вычислены их коэффициенты корреляции (K).

Из значений K , соответствующих некоторому τ , сформированы временные ряды. Сдвиг τ отсчитывается от начала ряда УКМ в прошлое. Поэтому усилению той или иной рассматриваемой связи соответствует отрицательное значение УКЛТ K .

Полученная таким образом зависимость УКЛТ K от τ для случая, когда ряд МСО (для территории всего бассейна Каспия) соответствует маю, представлена на рисунке 5.

Из рисунка 5 видно, что величины УКЛТ K , которые соответствуют любым $\tau < 35$, являются положительными, хотя значимы они лишь для $17 < \tau < 21$.

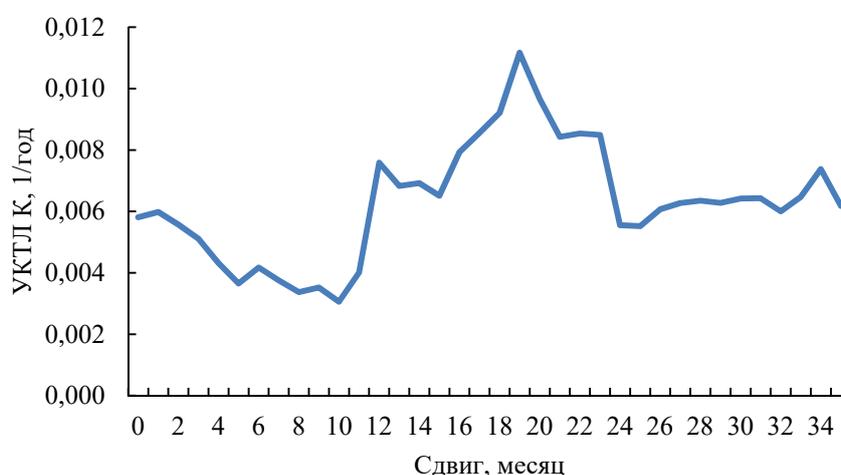


Рисунок 5 – Зависимость УКЛТ к ряду, сформированного из значений коэффициента корреляции отрезков рядов МСО для мая, а также рядов УКМ, от величины τ

Figure 5 – The trends dependence on the series formed from the values of the correlation coefficient of the series of monthly precipitation for May, as well as the series of the Caspian Sea level, on the value of τ

Следовательно, имеются веские основания для сомнений в том, что связи рядов УКМ и опережающих их рядов МСО для всего бассейна, соответствующих маю, в будущем (как и в прошлом) останутся значимыми. Поэтому весьма актуальным является решение задачи 3. В соответствии с изложенной методикой значимость связи и наличие ее усиления за период современного потепления климата проверялись для каждого участка бассейна Каспия.

Установлено, что, как и в рассмотренном случае, связи рядов УКМ с опережающими их по времени рядами МСО для некоторых участков его бассейна, соответствовавшими маю, являлись значимыми. Кроме того, значимыми они были и в некоторых других случаях.

Как пример в таблице приведено количество участков бассейна Каспия, для которых корреляция соответствующих им МСО за 1979-2021 гг., а также запаздывающих по отношению к ним рядов его УКМ для июня, июля и августа являлась значимой.

Из таблицы видно, что на упомянутой территории присутствуют и участки, где связи рядов УКМ для тех же месяцев и рядов МСО для декабря, февраля и других месяцев также значимы.

Расположения участков бассейна Каспия, для которых временные ряды МСО за 1979-2019 гг., соответствующие маю, значимо коррелированы с рядами УКМ для июня и июля, запаздывающих по отношению к ним на то или иное время, показаны на рисунке 6.

Количество участков бассейна Каспия, для которых корреляция соответствующих им МСО для всех месяцев, а также запаздывающих по отношению к ним рядов его УКМ (за 1979-2021 гг.) для июня, июля и августа являлась значимой

Number of Caspian Sea basin sites for which the correlation of their corresponding MSOs for all months, as well as the lagged series of its level (for 1979-2021) for June, July and August was significant

Год МСО	Месяц МСО	УВП июнь	УВП июль	УВП август	Год МСО	Месяц МСО	УВП июнь	УВП июль	УВП август
1979	Июн.	88	90	60	1977	Дек.	298	295	330
1979	Май.	693	700	473	1977	Ноя.	0	0	3
1979	Апр.	36	36	9	1977	Окт.	0	0	0
1979	Мар.	0	0	0	1977	Сен.	0	0	0
1979	Фев.	6	6	15	1977	Авг.	26	24	4
1979	Янв.	46	47	40	1977	Июл.	48	43	24
1978	Дек.	186	185	177	1977	Июн.	0	0	0
1978	Ноя.	15	15	10	1977	Май.	910	912	1036
1978	Окт.	0	0	0	1977	Апр.	41	37	57
1978	Сен.	0	0	0	1977	Мар.	75	75	90
1978	Авг.	48	44	74	1977	Фев.	69	69	53
1978	Июл.	13	13	7	1977	Янв.	3	3	3
1978	Июн.	1	1	0	1976	Дек.	50	48	15
1978	Май	584	583	764	1976	Ноя.	4	4	2
1978	Апр.	0	0	0	1976	Окт.	0	0	0
1978	Мар.	0	0	0	1976	Сен.	0	0	0
1978	Фев.	234	234	235	1976	Авг.	3	3	12
1978	Янв.	4	4	6	1976	Июл.	36	30	15

Рисунок 6 свидетельствует о том, что расположения участков территории бассейна Каспия, для которых временные ряды МСО за 1979-2019 гг., соответствующие маю, значительно коррелированы с рядами УКМ для июня и июля, запаздывающих по отношению к ним на 1-2, 13-14 и 25-26 мес., практически подобны. Последнее объясняется тем, что внутригодовая изменчивость УКМ значительно менее интенсивна, чем межгодовая изменчивость [7] (и это видно из рисунка 3).

Участки, где корреляция изучаемых процессов значима, многочисленны и при рассматриваемых τ расположены в бассейне либо Волги (Россия), либо рек Жайык (Урал) и Эмба (Россия и Казахстан).

Суммарная площадь таких участков при увеличении значения τ несколько возрастает.

Достоверность выводов о значимости корреляции между рассматриваемыми процессами для некоторых участков превышает не только 0,95, но и 0,99.

Установлено, что межгодовые изменения МСО для мая на всех таких участках не являются линейно зависимыми, поэтому соответствующие временные ряды МСО могут быть применены при моделировании вариаций УКМ для рассматриваемых месяцев. Вследствие существенного подобия зависимостей от времени УКМ для различных месяцев данный вывод справедлив и для прочих месяцев.

Для определения среди обнаруженных участков тех, для которых вероятность того, что корреляция между рядами МСО для мая и рядами УКМ окажется значима в будущем, является повышенной, осуществлен поиск участков, где за период современного потепления климата она значительно усиливалась. Как уже упоминалось, на таких участках значения УКЛТ К значимы и отрицательны.

Расположение участков территории бассейна Каспия, для которых связь между рядами МСО на них для мая, а также рядами УКМ для июня, июля и августа, запаздывающими на 13-15 мес., за период современного потепления климата значительно усиливалась, показано на рисунке 7, а, в и д.

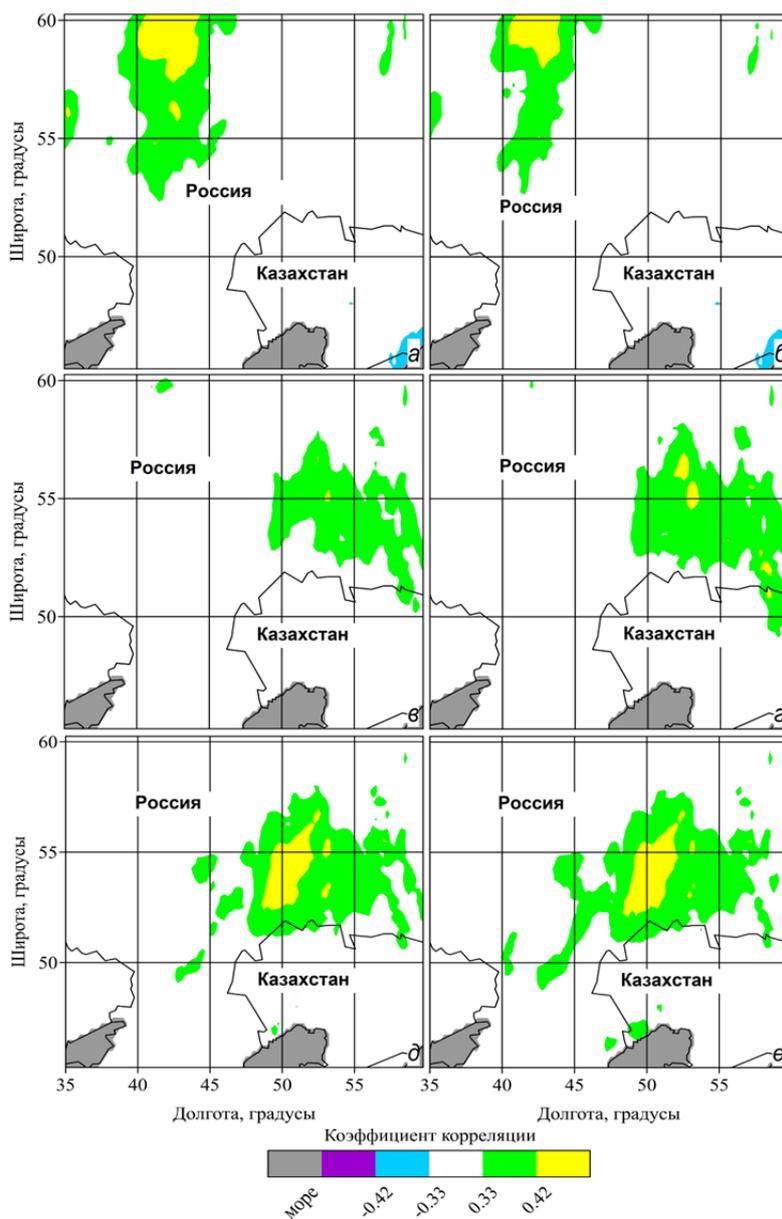


Рисунок 6 – Участки бассейна Каспия, где корреляция рядов МСО для мая и рядов УКМ для июня и июля, а также значимые значения при сдвигах по времени между ними: а – июнь 2 мес.; б – июль 2 мес.; в – июнь 14 мес.; г – июль 14 мес.; д – июнь 26 мес.; е – июль 26 мес.

Figure 6 – Sections of the Caspian Sea basin, where the correlation of the precipitation series for May and the water level series for June and July, as well as significant values with time shifts between them: а – June 2 months; б – July 2 months; в – June 14 months; г – July 14 months; д – June 26 months; е – July 26 months

Расположение участков, где корреляция между рассматриваемыми рядами усиливалась, являлась значимой и положительной, а также за период современного потепления климата усиливалась, представлено на рисунке 7, б, г и е.

Из рисунка 7, а, в и д следует, что корреляция между рядами МСО для мая, а также рядами УКМ для июня, июля и августа, которые запаздывают по отношению к ним на 13-15 мес., за период современного потепления климата значимо усиливалась (УКЛТ <0,003) на многих участках территории его бассейна. Такие участки преобладают во многих районах России и Казахстана.

На рисунке 7, где корреляция за 2, 14 и 26 месяцев для рассматриваемых рядов является значимой находятся в России, в бассейне реки Волги.

Таким образом, цель данной работы достигнута, а все ее задачи успешно решены.

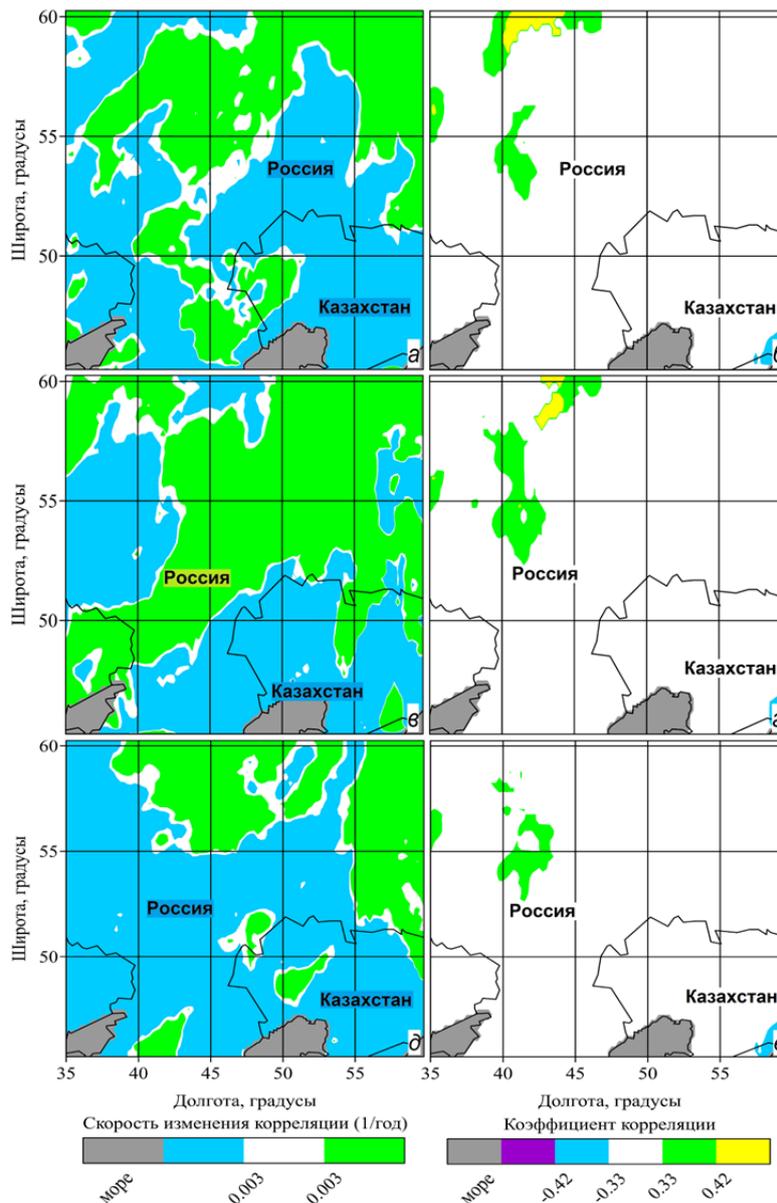


Рисунок 7 – Участки бассейна Каспия, где тренды корреляции МСО для мая и УКМ отрицательны, а их корреляция для 1979-2021 гг. значима и положительна: *a* – тренд 2 мес.; *б* – корреляция 2 мес.; *в* – тренд 14 мес.; *г* – корреляция 14 мес.; *д* – тренд 26 мес.; *е* – корреляция 26 мес.

Figure 7 – Sections of the Caspian basin territory where the trends of the correlation of the precipitation for May and water level are negative, and their correlation for 1979-2021 is significant and positive: *a* – trend 2 months; *b* – correlation 2 months; *c* – trend 14 months; *d* – correlation 14 months; *e* – trend 26 months; *f* – correlation 26 months

Обсуждение результатов. Полученные результаты качественно соответствуют представлениям о закономерностях изменения УКМ, проявляющихся в период современного потепления климата [7, 12, 34], а также об особенностях изменений МСО в бассейне, которые происходили в период 1979-2021 гг. [40-42].

При этом новыми установленными фактами являются:

1. Статистические связи межгодовых изменений МСО для всего бассейна Каспия за период современного потепления климата с совпадающими с ними по времени или запаздывающими на 1-36 месяцев вариациями [6, 43-44] являются значимыми лишь при условии, что МСО соответствуют маю.

2. Значимого усиления корреляции между этими процессами за период современного потепления климата не выявлено (более того, зафиксировано ее незначимое ослабление).

3. В бассейне Каспия выявлены многочисленные участки, расположенные в Поволжье, для которых статистические связи соответствующих им временных рядов МСО для мая, а также запаздывающих по времени рядов [40-42] в период современного потепления климата являлись значимыми и значимо усиливались.

Причины существенного снижения среднего уровня воды Каспийского моря [6, 7], произошедшего в середине XX века, нуждаются в выяснении. Вследствие значительной продолжительности периода, в котором произошло это явление (около 60 лет), связывать его с изменениями одного лишь гидротермического режима бассейна Каспия проблематично (периоды усиления засушливости климата на его территории были менее продолжительными). Невозможно объяснить резкое снижение УКМ также строительством на Волге и Каме равнинных гидроэлектростанций, поскольку в середине 30-х годов, когда это снижение произошло, упомянутые сооружения еще только проектировались, а их строительство состоялось лишь в 50-е годы.

Установленные закономерности свидетельствуют о целесообразности учета связей между вариациями МСО на выявленных участках бассейна Каспия при долгосрочном прогнозировании изменений его УКМ.

Выводы:

1. Корреляция временных рядов, отражающих межгодовые изменения месячных сумм атмосферных осадков на всей территории бассейна Каспия, а также рядов среднемесячных значений его среднего уровня, запаздывающих по отношению к ним на 0-36 мес., за период 1979-2021 гг. и различные его части была значимой лишь при условии, что ряды МСО соответствовали маю.

2. За период современного потепления климата значимого усиления их корреляции не выявлено (более того, зафиксировано ее незначимое ослабление), что снижает вероятность того, что она останется значимой в ближайшем будущем.

3. Выявлены многочисленные участки бассейна Каспия, расположенные преимущественно в России, где корреляции между соответствующими временными рядами месячных сумм местных атмосферных осадков для мая, а также запаздывающими по отношению к ним рядами Каспия в период современного потепления климата являлись значимыми и значимо усиливались.

4. Актуальной проблемой безопасности при ЧС на побережьях Каспия, вызванных изменениями среднего уровня его водной поверхности, является развитие на выявленных территориях Поволжья сети гидрометеорологических станций, где осуществляется мониторинг атмосферных осадков.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Стеблев И. В., Пивоварова Ж. Ф., Смоляков Б. С., Неделькина С. В. Биogeосистемы лесов и вод России. – М.: Наука, 1993. – 344 с.
- [2] Страхов В. В., Писаренко А. И., Борисов В. А. Леса мира и России // Использование и охрана природных ресурсов России. – М., 2001. – № 9. – С. 49-63.
- [3] Тишков А. А. Биосферные функции природных экосистем России. – М.: Наука, 2005. – 309 с.
- [4] Бухарицин П. И., Болдырев Б. Ю., Новиков В. И. Комплексная система гидрометеорологического обеспечения безопасности мореплавания, портов и транспортных комплексов на Каспийском море. – Астрахань, 2014. – 319 с.
- [5] Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. VI. Каспийское море. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеороиздат, 1992. – Вып. 1. – 359 с.
- [6] Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / Под ред. Е. С. Нестерова. – М.: Триада ЛТД, 2016. – 378 с.
- [7] Ивкина Н. И., Терехов А. Г., Наурузбаева Ж. К. Колебания уровня Каспийского моря и диагностика современных изменений положения береговой линии по спутниковым данным LANDSAT периода 2005-2015 годов // Гидрометеорология и экология. – 2015. – № 2. – С. 89-99.
- [8] Каплин П. А., Селиванов А. О. Изменения уровня морей России и развитие берегов: прошлое, настоящее, будущее. – Москва: ГЕОС, 1999. – 299 с.
- [9] Малинин В. Н., Гордеева С. М. Уровень Каспийского моря как индикатор крупномасштабного влагообмена в системе «океан—атмосфера—суша» // Труды Карельского научного центра РАН. – 2020. – № 4. – С. 5-20. doi: 10.17076/lim1156
- [10] Малинин В. Н. Грозит ли Каспию судьба Арала? // Гидрометеорология и экология, – 2022. – № 69. – С. 746-760. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-746-760
- [11] Холощев А. В., Никифорова М. П. Солнечная активность и прогнозы физико-географических процессов // LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 333 p.

- [12] Восьмое национальное сообщение и Пятый оценочный доклад Республики Казахстан Рамочной конвенции ООН об изменении климата. – Астана, 2022. – 493 с.
- [13] Официальный сайт Координационного комитета по гидрометеорологии и мониторингу загрязнения Каспийского моря (КаспКОМ) <http://www.caspc.com/index.php?razd=main&lang=1>
- [14] Официальный сайт РГП «Казгидромет» <https://www.kazhydromet.kz/ru/kaspiyskoe-more/kaspiyskoe-more>
- [15] Шлямин Б. А. Каспийское море. – М.: Географгиз, 1954. – 128 с.
- [16] Берг Л. С. Географические зоны Советского Союза. Изд. 3. – М., 1947. – Т. 1; М., 1952. – Т. 2. – 397 с.
- [17] Ермаков В. Б. Многолетние изменения уровня Каспийского моря и современные варианты их прогнозирования // Известия РАН. Серия географическая. – 2023. – Т. 87, № 6. – С. 930-940. DOI: 10.31857/S2587556623060067
- [18] Тужилкин В. С., Косарев А. Н., Архипкин В. С., Никонова Р. Е. Многолетняя изменчивость гидрологического режима Каспийского моря в связи с вариациями климата // Вестник МГУ. Серия 5. География. – 2011. – № 2. – С. 62-71.
- [19] Лобанов В. А., Наурызбаева Ж. К. Влияние изменения климата на ледовый режим Северного Каспия. – СПб.: РГТМУ, 2021. – 140 с. http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_f9fc95690a374fa38903ed7cdd3be28b.pdf
- [20] Медеу А. Р., Мальковский И. М., Толеубаев Л. С., Алимкулов С. К. Водная безопасность Республики Казахстан: проблемы устойчивого водообеспечения. – Алматы, 2015. – 582 с.
- [21] Kholoptsev A. V., Naurozbayeva Zh. K. (2022). The Northern Caspian Levels and Its Ice Regime Changing During Current Climate Warming. In: Karev, V.I. (eds). Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99504-1_15 1st ed. 2022. – 337 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-99504-1>
- [22] Zhanar Naurozbayeva, Aziza Baubekova, Anastasia Kvasha, Vladimir Lobanov, Bjorn Kløve & Ali Torabi Haghighi (2023) Determining factors for changes in the ice regime of the Caspian Sea, International Journal of Water Resources Development. DOI: 10.1080/07900627.2023.2231099 <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07900627.2023.2231099?tab=permissions&scroll=top&role=tab>
- [23] Arpe K. Leroy S. The Caspian Sea level forced by the atmospheric circulation, as observed and modeled // Quaternary International. – 2007. – Vol. 173-174. – P. 144-152.
- [24] Roshan G., Moghbel M., Grab S. Modeling Caspian Sea water level oscillations under different scenarios of increasing atmospheric carbon dioxide concentrations // Journal of Environmental Health Science and Engineering. – 2012. – Vol. 9.
- [25] Prange, M., Wilke, T. & Wesselingh, F.P. The other side of sea level change // Commun Earth Environ 1, 69 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>
- [26] Renssen H., Longhead B. C., Aerts J. C., de Moel H., Ward P. J. Kwadijk J.C.J. Simulating long-term Caspian Sea level changes; the impact of Holocene and future climate conditions // Earth and Planetary Science Letters. – 2007. – Vol. 261. – P. 685-693.
- [27] Добровольский С. Г. Изменения климата и составляющих водного баланса // Актуальные проблемы водообеспечения. – Москва: Наука, 2003. – С. 119-130.
- [28] Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Диалектика, 2017. – 912 с.
- [29] Клиге Р. К. Современные изменения уровня Мирового океана // Уровень берега и дно океана. – М.: Наука, 1978. – С. 136-180.
- [30] Copernicus Climate Change Service [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://climate.copernicus.eu/>
- [31] Hersbach H., Dee D. ERA5 reanalysis is in production // ECMWF Newsletter. – 2016. – Vol. 147. – P. 7.
- [32] Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater Дж., Николас Дж., Пьюби К., Радур Р., Шеперс Д., Симмонс А., Соци К., Абдалла С., Абеллан Х., Бальзамо Г., Бехтольд П., Биавати Г., Бидло Дж., Бонавита М., Де Кьяра Г., Дальгрэн П., Ди Д., Диамантакис М., Драгани Р., Флемминг Дж., Форбс Р., Фуэнтес М., Гир А., Хаймбергер Л., Хили С., Хоган Р.Дж., Холм Е.А., Янискова М., Кили С., Лалоо П., Лопес П., Радноти Г., Росней П.Д., Розум И., Вамборг Ф., Вильом С., Тело Ж.-Н., 2020: The ERA5 глобальный реанализ. QJR Meteorol Soc. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- [33] Hoffmann L., Günther G., Li D., Stein O. et al. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations // Atm. Chem. Phys. – 2019. – Vol. 19. – P. 3097-3124.
- [34] Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Изд-во Росгидромета, 2014. – 1009 с.
- [35] Climate Change: The Physical Science Basis. (2013) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/lncs>, last accessed 2016/11/21.
- [36] Банк данных об изменениях метеословий в различных регионах мира [Электронный ресурс]. Режим доступа: tutiempo.net/climate/.
- [37] База данных Результаты реанализа ERA5 hourly data on pressure levels from 1979 to present. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=form> DOI: 10.24381/cds.bd0915c6
- [38] Карта бассейна Каспийского моря [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://in.pinterest.com/pin/496944140130137104/?amp_client_id=CLIENT_ID%28_%29&mweb_unauth_id=&from_amp_pin_page=true
- [39] Официальный сайт Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. <http://portal.esimo.ru/portal/portal/esimo-user/opermodule;jsessionid=60B449834441F8F87F2C3327E8DCBECC>
- [40] Анисимов О. А., Жильцова Е. Л. Об оценках изменений климата регионов России в XX и начале XXI веков по данным наблюдений // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 6. – С. 95-107.
- [41] Григорьев А. А. Закономерности строения и развития географической среды: Избранные теоретические работы. – М., 1966. – 382 с.

[42] Опасные природные явления юга России / Под ред. проф. Л. Н. Карлина. – СПб.: Изд-во ВВМ, 2006. – 216 с.

[43] Elguindi N., Giorgi F. Simulating multi-decadal variability of Caspian Sea level changes using regional climate model outputs // *Climate Dynamics*. – 2006. – Vol. 26. – P. 167-181.

[44] Kislov A. V., Panin A., Toropov P. A. Current status and palaeostages of the Caspian Sea as a potential evaluation tool for climate model simulations // *Quaternary International*. – 2014. – Vol. 345. – P. 48-55. doi: 10.1016/j.quaint.2014.05.014

REFERENCES

[1] Steblev I. V., Pivovarova Zh. F., Smolyakov B. S., Nedelkina S. V. Biogeosystems of forests and waters of Russia. M.: Nauka, 1993. 344 p. (in Russ.).

[2] Strakhov V. V., Pisarenko A. I., Borisov V. A. Forests of the World and Russia // *Use and Protection of Natural Resources of Russia*. M., 2001. No. 9. P. 49-63 (in Russ.).

[3] Tishkov A. A. Biosphere functions of natural ecosystems of Russia. M.: Nauka, 2005. 309 p. (in Russ.).

[4] Bukharitsin P. I., Boldyrev B. Y., Novikov V. I. Integrated system of hydrometeorological support of navigation safety, ports and transport complexes on the Caspian Sea. Astrakhan, 2014. 319 p. (in Russ.).

[5] Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Vol. VI. Caspian Sea. Hydrometeorological conditions. SPb.: *Gidrometeoizdat*, 1992. Vol. 1. 359 p. (in Russ.).

[6] Water balance and level fluctuations of the Caspian Sea. Modelling and Forecasting / Ed. E. S. Nesterov. M.: Triada Ltd, 2016. 378 p. (in Russ.).

[7] Ivkina N. I., Terekhov A. G., Naurozbayeva Zh. K. Caspian Sea level fluctuations and diagnostics of modern changes in the position of the coastline from LANDSAT satellite data of the period 2005-2015 // *Hydrometeorology and Ecology*. 2015. No. 2. P. 89-99 (in Russ.).

[8] Kaplin P. A. Selivanov A. O. Changes in the sea level of Russia and coastal development: past, present, future. Moscow: GEOS, 1999. 299 p. (in Russ.).

[9] Malinin V. N., Gordeeva S. M. Caspian Sea level as an indicator of large-scale moisture exchange in the system «ocean-atmosphere-land» // *Proceedings of the Karelian Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2020. No. 4. P. 5-20. doi: 10.17076/lim1156 (in Russ.).

[10] Malinin V. N. Does the fate of the Aral Sea threaten the Caspian Sea? // *Hydrometeorology and Ecology*. 2022. No. 69. P. 746-760. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-746-760 (in Russ.).

[11] Kholoptsev A. V., Nikiforova M. P. Solar activity and forecasts of physiographic processes // LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. 333 p. (in Russ.).

[12] Eighth National Communication and Fifth Assessment Report of the Republic of Kazakhstan to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Astana, 2022. 493 p. (in Russ.).

[13] Official website of the Coordination Committee on Hydrometeorology and Pollution Monitoring of the Caspian Sea (CASPCOM) <http://www.caspcom.com/index.php?razd=main&lang=1> (in Russ.).

[14] Official website of RSE Kazhydromet <https://www.kazhydromet.kz/ru/kaspiyskoe-more/kaspiyskoe-more> (in Russ.).

[15] Shlyamin B. A. Caspian Sea. Moscow: Geografiz, 1954. 128 p. (in Russ.).

[16] Berg L. S. Geographical zones of the Soviet Union. Ed. 3 M., 1947. Vol. 1.; M., 1952. Vol. 2. 397 p. (in Russ.).

[17] Ermakov V. B. Long-term changes in the Caspian Sea level and modern options for their forecasting. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences, geographical series*, 2023. Vol. 87, No. 6. P. 930-940. DOI: 10.31857/S2587556623060067 (in Russ.).

[18] Tuzhilkin V. S., Kosarev A. N., Arkhipkin V. S., Nikonova R. E. Multiyear variability of the hydrological regime of the Caspian Sea in connection with climate variations // *MSU Bulletin. Series 5. Geography*. 2011. No. 2. P. 62-71 (in Russ.).

[19] Lobanov V. A., Naurozbayeva Zh. K. Impact of climate change on the ice regime of the Northern Caspian Sea. St. Petersburg, 2021. 140 p. http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_f9fc95690a374fa38903ed7cdd3be28b.pdf (in Russ.).

[20] Medeu A. R., Malkovskiy I. M., Toleubaev L. S., Alimkulov S. K. Water security of the Republic of Kazakhstan: problems of sustainable water supply. Almaty, 2015. 582 p. (in Russ.).

[21] Kholoptsev A. V., Naurozbayeva Z. K. (2022). The Northern Caspian Levels and Its Ice Regime Changing During Current Climate Warming. In: Karev, V.I. (eds). *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99504-1_15 1st ed. 2022. 337 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-99504-1>

[22] Zhanar Naurozbayeva, Aziza Baubekova, Anastasia Kvasha, Vladimir Lobanov, Bjorn Kløve & Ali Torabi Haghighi (2023). Determining factors for changes in the ice regime of the Caspian Sea, *International Journal of Water Resources Development*. DOI: 10.1080/07900627.2023.2231099

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07900627.2023.2231099?tab=permissions&scroll=top&role=tab>

[23] Arpe K. Leroy S. The Caspian Sea level forced by the atmospheric circulation, as observed and modeled // *Quaternary International*. 2007. Vol. 173-174. P. 144-152.

[24] Roshan G., Moghbel M., Grab S. Modeling Caspian Sea water level oscillations under different scenarios of increasing atmospheric carbon dioxide concentrations // *Journal of Environmental Health Science and Engineering* (2012). Vol. 9.

[25] Prange M., Wilke T. & Wesselingh, F.P. The other side of sea level change // *Commun Earth Environ* 1, 69 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>

[26] Renssen H., Longhead B. C., Aerts J. C., de Moel H., Ward P. J. Kwadijk J.C.J. Simulating long-term Caspian Sea level changes; the impact of Holocene and future climate conditions // *Earth and Planetary Science Letters*. 2007. Vol. 261. P. 685-693.

[27] Dobrovolsky S.G. Changes in climate and water balance components. // *Actual problems of water supply*. Moscow: Nauka, 2003. P. 119-130 (in Russ.).

- [28] Draper N., Smith G. Applied regression analysis. Moscow: Dialectics, 2017. 912 p. (in Russ.).
- [29] Klige R. K. Modern changes in the level of the World Ocean // Coastal level and the ocean floor. Moscow: Nauka, 1978. P. 136-180 (in Russ.).
- [30] Copernicus Climate Change Service [Electronic resource]. Access mode: <https://climate.copernicus.eu/>
- [31] Hersbach H., Dee D. ERA5 reanalysis is in production // ECMWF Newsletter. 2016. Vol. 147. P. 7.
- [32] Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicholas J., Puby K., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci K., Abdallah S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biawati G., Bidlo J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Heimberger L., Healy S., Hogan R.J., Holm E.A., Janiskova M., Keely S., Laloo P., Lopez P., Radnoti G., Rosney P.D., Rozum I., Wamborg F., Villaume S., Thépault J.-N., 2020: The ERA5 global reanalysis. QJR Meteorol Soc. [Electronic resource]. Access mode: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- [33] Hoffmann L., Günther G., Li D., Stein O. et al. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations // Atm. Chem. Phys. 2019. Vol. 19. P. 3097-3124.
- [34] Second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Moscow: Roshydromet Publishing House, 2014. 1009 p. (in Russ.).
- [35] Climate Change: The Physical Science Basis. (2013) [Electronic resource]. Access mode: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/lncs>, last accessed 2016/11/21.
- [36] Data Bank on changes in meteorological conditions in different regions of the world [Electronic resource]. Access mode: tutiempo.net/climate/. (in Russ.).
- [37] Database Results of ERA5 reanalysis hourly data on pressure levels from 1979 to present. [Electronic resource]. Access mode: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=form> DOI: 10.24381/cds.bd0915c6 (in Russ.).
- [38] Map of the Caspian Sea Basin [Electronic resource]. Access mode: https://in.pinterest.com/pin/496944140130137104/?amp_client_id=CLIENT_ID%28_%29&mweb_unauth_id=&from_amp_pin_page=true (in Russ.).
- [39] Official site Unified State System of Information on the Situation in the World Ocean. <http://portal.esimo.ru/portal/portal/esimo-user/opermodule;jsessionid=60B449834441F8F87F2C3327E8DCBECC> (in Russ.).
- [40] Anisimov O. A., Zhiltsova E. L. On estimates of climate changes in Russian regions in the 20th and early 21st centuries based on observational data // Meteorology and Hydrology. 2012. No. 6. P. 95-107 (in Russ.).
- [41] Grigoriev A. A. Zakonerosti stroeniya i razvitiya geograficheskoy obrazovaniya geograficheskoy obrazovaniya: Izbraniye teoreticheskie zarubezhdeniya [Laws of structure and development of geographical environment: Selected theoretical works]. M., 1966. 382 p. (in Russ.).
- [42] Dangerous Natural Phenomena in the South of Russia / Ed. by prof. L. N. Karlin. SPb.: IzD-VO VVM, 2006. 216 p. (in Russ.).
- [43] Elguindi N., Giorgi F. Simulating multi-decadal variability of Caspian Sea level changes using regional climate model outputs // Climate Dynamics. 2006. Vol. 26. P. 167-181.
- [44] Kislov A. V., Panin A., Toropov P. A. Current status and palaeostages of the Caspian Sea as a potential evaluation tool for climate model simulations // Quaternary International. 2014. Vol. 345. P. 48-55. doi: 10.1016/j.quaint.2014.05.014.

А. В. Холопцев¹, Ж. К. Наурызбаева^{*2}

¹ Г. ф. д. (Н. Н. Зубов атындағы Мемлекеттік океанография институты, Севастополь, Ресей Федерациясы; kholoptsev@mail.ru)

^{*2} PhD, аймақтық климаттың өзгеруі зертханасының меңгерушісі
(АҚ «География және су қауіпсіздігі институты», Алматы, Қазақстан; naurozbaeva.zhanar@mail.ru)

КАСПИЙДІҢ ОРТАША АЙЛЫҚ ДЕҢГЕЙЛЕРІНІҢ ЖЫЛ АРАЛЫҚ ВАРИАЦИЯЛАРЫНЫҢ, СОНДАЙ-АҚ ОНЫҢ БАССЕЙНІНДЕГІ АТМОСФЕРАЛЫҚ ЖАУЫН-ШАШЫННЫҢ ҚОСЫНДЫЛАРЫНЫҢ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ҚАЗІРГІ КЛИМАТТЫҢ ЖЫЛЫНУЫНДАҒЫ ӨЗГЕРУІНІҢ БАЙЛАНЫСЫ

Аннотация. Қазіргі кезеңде Каспий теңізінің су бетінің деңгейі тез төмендейді, бұл Каспий өңірінің барлық елдерінің халқы мен экономикасы үшін елеулі проблемалар туғызады. Сондықтан оның одан әрі өзгеруін болжау әдістерін жетілдіру гидрология, метеорология және экологияның өзекті мәселесі болып табылады. Каспий деңгейінің қазіргі төмендеуінің негізгі себептері оның су балансының құрамдас бөліктерінің антропогендік факторлар мен климаттық өзгерістерге әсері болып табылады. Бұл тепе-теңдіктің кіріс бөлігінің маңызды құрамдас бөлігі Каспий бассейніне түсетін жауын-шашын мөлшері болып табылады. Каспий деңгейін болжау үшін қолданылатын әдістердің бірі-бірнеше регрессиялық талдау. Оның көмегімен алынған болжамдардың негізділігі болашақта зерттелетін процесс пен олардың дамуы кезінде ескерілетін факторлар арасындағы байланыстардың маңыздылығына байланысты, олардың мониторингі қазіргі және өткен кезеңдерде жүзеге асырылды. Каспийдің орташа айлық фондық деңгейлерінің жыларалық вариацияларының статистикалық байланыстарының маңыздылығы оның бассейніндегі жауын-шашын сомаларының

уақыт бойынша озық динамикасымен, сондай-ақ оның қазіргі климаттың жылыну кезеңіндегі өзгерістерімен бағаланды. Жауын-шашынның нақты деректер ретінде ERA 5 реанализі туралы ақпарат пайдаланылды. Деңгейлер туралы мәліметтер әдеби дереккөздерден алынған. 1979-2021 жылдары қарастырылып отырған байланыстардың маңыздылығы туралы қорытынды жауын-шашын мөлшерінің өзгеруі мамыр айына сәйкес келген жағдайда ғана 0,95-тен кем емес сенімділікпен сипатталғаны анықталды. Зерттелетін процесс пен осы фактор арасындағы уақыт ауысуы 0-ден 36 айға дейін ұлғайған сайын олардың корреляциясы оң және маңызды болып қалады, бірақ біршама төмендеді. Қазіргі климаттың жылыну кезеңінде анықталған байланыс төмендеді, бұл оның жақын болашақта да маңыздылығына күмәндануға мүмкіндік береді. Сондай-ақ, Каспий бассейнінің учаскелері анықталды, олар үшін сол кезеңде қаралатын байланыстар, керісінше, жоғарлады. Бұдан шығатыны, болашақта олар маңызды болып қалатын сценарийді орындау ықтималдығы басқа сценарийлердің ықтималдығынан жоғары. Сондықтан анықталған байланыстарды Каспийдің орта деңгейінің өзгеруін болжау кезінде ескерген жөн.

Түйінді сөздер: Каспий теңізі, су бетінің деңгейі, жауын-шашын мөлшері, климаттың өзгеруі, болжау, маңыздылығы, тренд.

A. V. Kholoptsev¹, Zh. K. Naurozbayeva^{*2}

¹ Doctor of Geographical Sciences (N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russian Federation; kholoptsev@mail.ru)

^{*2} PhD, Head of the Regional Climate Changes Laboratory («Institute of Geography and Water Security» JSC, Almaty, Kazakhstan; naurozbaeva.zhanar@mail.ru)

**CORRELATIONS OF INTERANNUAL VARIATIONS
IN AVERAGE MONTHLY LEVELS OF THE CASPIAN SEA,
AS WELL AS THE TOTAL PRECIPITATION IN ITS BASIN,
AND THEIR CHANGES UNDER MODERN CLIMATE WARMING**

Abstract. In the modern period, the level of the Caspian Sea water surface is rapidly decreasing, which creates significant problems for the population and economy of all countries of the Caspian region. Therefore, improvement of the methods for forecasting its further changes is an urgent problem of hydrology, meteorology and ecology. It is generally accepted that the main reasons for the current decline in the Caspian Sea level are the influence of anthropogenic factors and climatic changes on the dynamics of its water balance components. A significant component of the incoming part of this balance is the amount of precipitation falling in the territory of the Caspian basin. One of the methods used for forecasting the Caspian Sea level is multiple regression analysis. The validity of the forecasts obtained with its help depends on the significance of the relationships between the studied process in the future and the factors monitored in the present and in the past that are taken into account in their development. The article assesses the significance of statistical correlations between interannual variations in the average monthly background levels of the Caspian Sea and the dynamics of precipitation amounts in its basin, as well as its changes during the period of modern climate warming. The ERA 5 reanalysis information was used as factual material on precipitation. Information on the levels was obtained from literary sources. It was found that in the period of 1979-2021 the conclusion on the significance of the relationships under consideration was characterized by the reliability of at least 0.95 only if the changes in precipitation amounts corresponded to May. As the time shift between the analyzed process and this factor increases from 0 to 36 months, their correlation remains positive and significant, but slightly weakens. During the period of modern climate warming, the revealed correlation also became weaker, which allows us to doubt its significance even in the near future. There were also identified the Caspian basin areas for which, on the contrary, the considered relationship strengthened during the same period. It implies that the probability of the scenario in which they remain significant in the future is higher than that of other scenarios. Therefore, it is reasonable to take the identified relationships into account when forecasting changes in the average level of the Caspian Sea.

Keywords: Caspian Sea, water surface level, precipitation amount, climate change, forecasting, significance, trend.