



Оценка воздействия атмосферной циркуляции на ледовый режим и уровень Каспийского моря

Наурызбаева Ж. К. ^{a,b} 

^a АО "Институт географии и водной безопасности", ул. Пушкина 99, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан

^b Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, 050040, Республика Казахстан

АННОТАЦИЯ

В данной работе проведена оценка воздействия атмосферных процессов в Атлантико-Европейском секторе Северного полушария на уровень Каспийского моря на основании данных дней с формами общей циркуляции атмосферы Вангенгейма-Гирса. Исходные данные охватили временной промежуток с 1900 по 2022 г. Были использованы значения уровня моря, атмосферных осадков и ледовые явления с 22 пунктов наблюдений Казахстана и России. Проведен статистический и сравнительный анализ данных, оценка климатического изменения. В ходе исследования отмечена устойчивая зависимость между уровнем моря и циркуляцией атмосферы, выявлены закономерности, которые нашли отражение и в распределении осадков, повторяемости лет с дефицитом и избытком увлажнения. Климатические изменения повлекли за собой и изменения ледового режима моря. Максимальная толщина льда уменьшилась на 13-28 см, в зависимости от акватории. В последние десятилетия наблюдается уменьшение максимальной толщины льда, увеличение повторяемости умеренных и мягких зим. Основные даты ледового периода сместились: устойчивый ледовый покров формируется позже, дата фиксирования максимальной толщины льда наблюдается уже в середине февраля, а дата полного очищения моря ото льда сместилась на начало - середину марта. Период самого ледостава сокращается.

Подана в редакцию:
10 июля 2023

Принята к публикации:
18 декабря 2023

Доступ онлайн:
20 февраля 2024

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Каспийское море,
уровень моря,
общая циркуляция
атмосферы, осадки,
ледовый режим,
характерные даты
ледового периода

1. Введение

Колебания уровня Каспийского моря могут быть различных периодов: как краткопериодные, которые включают в себя сгонно-нагонные явления, так и длиннопериодные - трансгрессии и регрессии береговой линии, длящиеся десятилетиями. Процесс колебания уровня, вне зависимости от периода и продолжительности, оказывает влияние на деятельность человека и экологическую обстановку региона. Порой при значительных изменениях такие воздействия носят катастрофический характер. Так, только в минувшем столетии уровень Каспийского моря претерпел два длительных экстремальных изменения: понижение на 3 м в период с 1930 по 1977 г. и повышение на 2,5 м с 1978 по 1995 г., что, безусловно, повлекло массу исследовательских работ в данной области, затронувших не только причины изменения, но и вопросы прогнозирования дальнейшего изменения уровня моря (Абузьяров, Нестеров, 2011; Фролов, 2019; Яготинцев, Поставик, 2013; Kholoptsev, Naurozbayeva, 2022). На сегодняшний день прослеживается устойчивая тенденция падения уровня моря, что определяет актуальность работы (Генеральный каталог уровня Каспийского моря, 2020; Koriche et al., 2022).

На колебание уровня моря оказывают влияние прежде всего климатические изменения, антропогенные факторы, в большей степени зарегулированность стока рек, и тектонические процессы (Гидрометеорология и гидрохимия морей, 1992; Buber et al, 2023). Более того, данные факторы непрерывно изменяются в пространстве и во времени и вступают в сложные взаимодействия друг с другом. Безусловно, определить, какой фактор влияет в большей или в меньшей степени, крайне сложно. Таким образом, рассмотрение факторов, оказывающих влияние на колебание уровня моря, должно быть разносторонним и должно обновляться с некоторой периодичностью.

Длительное понижение уровня моря способствует существенному изменению береговой линии, а учитывая особенности рельефа, может привести к опустыниванию значительной части прибрежных территорий. Колебания уровня в целом очень сильно затрудняют хозяйственную деятельность, в частности в прибрежной и мелководной зонах. Особенно уязвимыми являются хозяйствующие субъекты, связанные с работой портовых сооружений и морскими перевозками.

Так как Северный Каспий весьма мелководен, изменения его уровня существенно влияли не только на расположение его береговой линии, но и на характеристики его водообмена с глубоководной частью Каспийского моря. Последнее могло оказывать некоторое влияние на существующие ледовые процессы.



Цель данной работы: оценка изменений уровня Каспийского моря в зависимости от количества дней разных форм циркуляции атмосферы по Вангенгейму-Гирсу, распределения осадков и особенности ледового режима в связи с климатическими изменениями.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выявление современных тенденций временного хода уровня Каспийского моря и оценка их устойчивости;
- анализ изменений климатических параметров во временном интервале 1900-2021 гг.;
- оценка значимости статистической связи между изменениями уровня моря и общей циркуляции атмосферы за весь период исследования и за отдельные промежутки;
- оценка влияния этих изменений на распределение атмосферных осадков.

2. Методы и материалы

Исходными данными послужили значения станций и постов Северного и Среднего Каспия:

- фоновый уровень Каспийского моря;
- среднемесячный уровень моря по морским станциям и постам Казахстана и России;
- количество дней с формами общей циркуляции атмосферы Вангенгейма-Гирса;
- атмосферные осадки станций Прикаспийского региона;
- максимальная толщина льда на морских станциях Северного Каспия;
- характерные даты ледового режима.

Временной период охватил 1900-2021 гг.

При проведении исследования были использованы методы статистического анализа, основанные на выявлении взаимосвязи колебаний фонового уровня Каспийского моря и его сезонных флуктуаций с климатическими факторами, выполнялась статистическая обработка гидрологических характеристик, проведен сравнительный анализ (Статистические методы в гидрологии, 1970). При решении задач, в соответствии с рекомендациями ВМО, как показатель тенденции динамики той или иной характеристики климата рассматривалось значение разности ее климатической нормы, вычисленной на том или ином отрезке времени длиной 30 лет, по отношению к ее значению для периода 1961-1990 гг. Указанный показатель описывает междесятилетнюю изменчивость рассматриваемой характеристики. Как современная тенденция рассматривалась разность климатических норм для периодов 1991-2020 гг. и 1961-1990 гг.

Методика решения первой и второй задач предполагала оценку средних скоростей межгодовой изменчивости среднегодовых уровней Каспия, форм Общей циркуляции атмосферы (ОЦА). При этом как средняя скорость подобного процесса рассматривалось значение углового коэффициента линейного тренда соответствующего временного ряда, которое вычислено в «скользящем окне» длиной 30 и 10 лет. Сопоставлялись зависимости средней скорости каждого изучаемого показателя от года начала «скользящего окна», для которого она вычислена.

При решении третьей задачи применен метод корреляционного анализа и критерий Стьюдента (Закс, 1976; Лобанов и др., 2011; Статистические методы в гидрологии, 1970).

В сопоставляемых отрезках изучаемых временных рядов длиной 30 лет скомпенсированы присутствующие в них линейные тренды. Изучаемая связь признавалась значимой, если достоверность такого статистического вывода превышала 0,9, а если она превышала уровень 0,95, связь рассматривалась как сильная. Значения пороговых уровней коэффициента корреляции вычислены с учетом числа степеней свободы сопоставляемых временных рядов. При достоверности 0,9 они составляют 0,32, а при 0,95 составляют 0,37 (Закс, 1976; Лобанов и др., 2011; Статистические методы в гидрологии, 1970).

3. Результаты

Каспийское море - это крупнейший в мире замкнутый водоем, расположенный на Евразийском континенте. Протяженность береговой линии составляет 5970 км, из которых 2320 км имеет Казахстан. Площадь водосбора равняется 3,1 млн км², из которой 29,4 % приходится на бессточные области. Одной из важных характерных особенностей Каспийского моря, помимо ледового покрова, являются значительные колебания его уровня. С начала проведения инструментальных наблюдений до настоящего времени выделяются три характерных периода в многолетнем ходе уровня, что отражено на рисунке 1: аномально продолжительное падение уровня (1930-1977 гг.), аномально продолжительный подъем (1978-1995 гг.) и медленное снижение (2005 г. - по настоящее время) (Болгов и др., 2007; Бухарицин, 2019; Бухарицин и др., 2015; Гидрометеорология и гидрохимия морей, 1992; Нестеров, 2013).

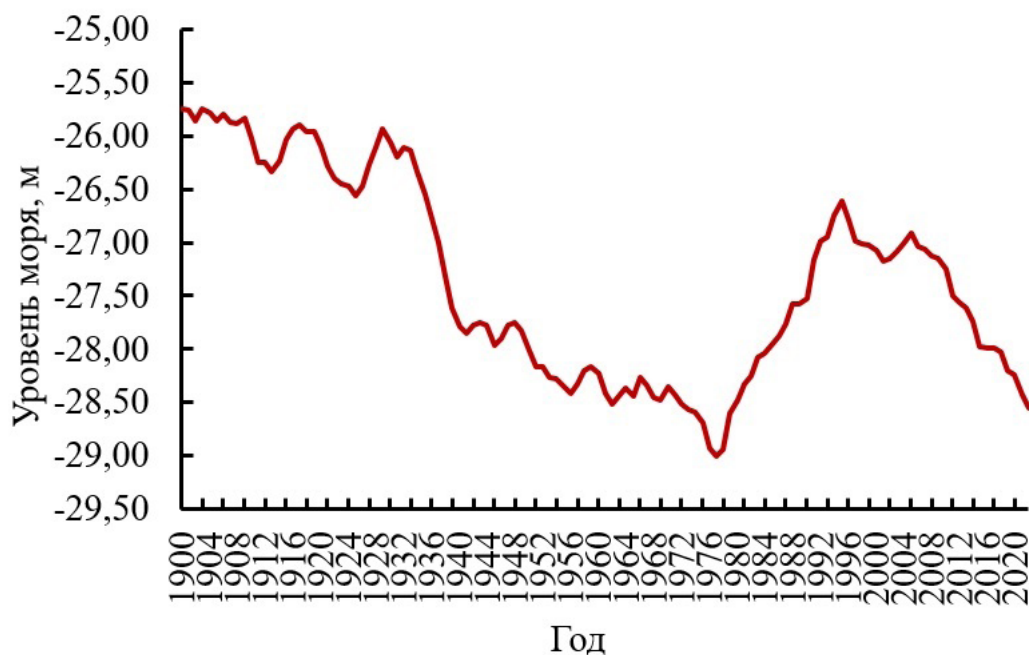


Рисунок 1. Многолетние колебания уровня Каспийского моря.

Общее непрерывное понижение уровня, наблюдавшееся в 1930-1977 гг., составило 3,2 м со средней интенсивностью падения около 4 см в год. В 1977 г. уровень моря достиг самой низкой отметки за период наблюдений - минус 29,01 м БС. Падение уровня было связано с тем, что с середины 30-х годов на реках Каспийского бассейна началось интенсивное водохозяйственное строительство, влияние которого стало наиболее ощутимо в 50-е годы. К началу 70-х годов практически все крупные реки бассейна были зарегулированы. В результате этого уменьшился объем речного стока и изменилось его внутригодовое распределение (Нестеров, 2013), что привело к тому, что площадь водной поверхности моря сократилась. По данным Никоновой (2008; 2011), величина сокращения площади составила около 50 тыс. км². С 1978 г. началось современное интенсивное повышение уровня Каспийского моря, которое продолжалось в течение 18 лет (1978-1995 гг.). За это время уровень моря повысился на 2,5 м и к 1995 г. достиг отметки минус 26,62 м. Средняя интенсивность подъема уровня за этот период составила около 14 см в год, а в отдельные годы - до 36 см.

Повышение уровня моря привело к возникновению новых проблем, связанных с подтоплением и затоплением прибрежных территорий. В результате подъема уровня площадь затопленных территорий составила 35-40 тыс. км². В некоторых районах береговая черта выдвинулась на 25-50 км (Никонова, 2008; 2011). В результате подъема фонового уровня воды и затопления большой территории побережья изменились гидрологические условия и в прибрежной зоне казахстанской части Северного Каспия.

Начиная с 2006 г., уровень Каспийского моря имеет тенденцию к снижению. В 2022 г. средний уровень моря по Северному Каспию составил минус 28,49 м БС, максимальное значение было минус 27,57 м БС, минимальное - минус 29,44 м БС. Для акватории Среднего Каспия средний уровень составил минус 28,64 м БС, максимум - минус 28,05 м БС, минимум - минус 29,38 м БС.

В 2023 г. за 5 месяцев (январь - май) средний уровень моря по Северному Каспию составил минус 28,54 м БС, максимальное значение было минус 27,67 м БС, а минимальное минус 29,31 м БС. Для акватории Среднего Каспия средний уровень составил минус 28,90 м БС, максимум был минус 28,45 м БС, минимум - минус 29,42 м БС.

В период с 2006 по 2022 г. на акваторию Каспийского моря выпало наименьшее количество осадков, а процессы испарения были более интенсивные, к тому же из-за серии маловодных лет в бассейне р. Волга средний приток воды также был наименьшим.

В казахстанском северо-восточном секторе диапазон колебаний уровня в 2021 г. находился в пределах от минус 29,10 до минус 27,79 м БС, а средний уровень составил минус 28,43 м БС.

Изменились морфометрические характеристики: образовались новые островки, заливы. В некоторых районах море отступило на 25 км.

Снижение уровня моря более чем на 1 м способствовало изменению положения береговой линии Каспийского моря, особенно в казахстанском секторе. Это объясняется тем, что данный район моря имеет малые уклоны дна и прилегающей к нему суши и даже небольшие изменения уровня моря приводят к значительным затоплениям или осушениям побережья (Водный баланс..., 2016; Гидрометеорология и гидрохимия морей, 1992; Тужилкин и др., 2011).

На взаимосвязь уровня моря и атмосферных процессов обратили внимание очень давно. Так, еще в 1829 г. немецкий путешественник А. Гумбольдт выдвинул гипотезу о взаимосвязи уровня моря и повторяемости сухих и влажных лет (Нестеров, 2013). В дальнейшем были выявлены основные факторы, влияющие на флуктуацию уровня: температура воздуха, ветер, атмосферные осадки и количество приносимой реками воды. Вопросами выявления причин изменения уровня воды занимались многие известные гидрологи, климатологи, геофизики, океанологи и др. В работах (Водный баланс..., 2016; Справочно-аналитический обзор..., 2016; Тужилкин и др., 2011) рассмотрены показатели внешнего водного баланса, такие как речной сток, количество осадков, испарение, сток в залив Кара-Богаз-гол, а также ветровые условия. В выводах отмечено, что за последние 15 лет половодные максимумы и меженные минимумы стока установились на промежуточных значениях, что выразилось в стабилизации среднего уровня Каспия и его режима солёности. Режимный сдвиг природных

процессов в глобальной системе океан - атмосфера в конце 1970-х гг. проявился в значительном изменении внешних воздействий на Каспийское море - в увеличении притока пресной воды, повороте зонального компонента ветра над Северным Каспием на восток и усилении апвеллинговых ветров над восточным шельфом Среднего Каспия.

Выше уже было сказано о влиянии климатических факторов как основополагающих. Так, Гирс (1971), основываясь на типизации ОЦА Г.Я. Вангенгейма, изучал сток волжских вод и колебания уровня моря в зависимости от западной (W), восточной (E) и меридиональной (C) форм циркуляции. При преобладании формы E наблюдается низкий уровень, при форме C - высокий. Форма W способствует стабилизации уровня или его повышению. Имеются и последователи в данном направлении: в работах Абузьярова, Нестерова (2011), Панина, Выручалкиной, Соломоновой (2015), Думанской (2014), Яготинцева, Поставик (2013) и др. рассматриваются не только формы циркуляции Вангенгейма-Гирса, но и Североатлантическое колебание, Эль-Ниньо и Южное колебание. Известны также труды Мещерской и др. (2002) по установке связи ОЦА с уровнем моря за прошлое столетие, где не только рассматривается роль ОЦА в формировании температурно-влажностного режима, но и дается попытка сверхдолгосрочного прогнозирования уровня воды.

В данной работе проведен статистический анализ временного хода числа дней общей циркуляции атмосферы форм E, C, W с 1900 по 2021 г., рассмотрены зависимости с колебаниями уровня моря.

В ходе исследования выявлено, что в последние десятилетия наблюдается увеличение повторяемости типа циркуляции E, доля вклада типа W также имеет вес. И нередко наблюдаются смешанные типы: W + E, E + W.

Изменения в интенсивности типов W и E существенно влияют на температурный фон, ветровой режим и впоследствии на толщину льда и распределение ледового покрова. Как уже было отмечено в ранее выполненных работах (Ивкина и др., 2015; Наурызбаева, Лобанов, 2020), ветровой режим сменил основные сектора, среднемесячная температура воздуха претерпела существенные изменения, в особенности в марте, сумма отрицательных температур уменьшилась и зимы перешли в разряд умеренных и мягких. Все это привело к уменьшению толщины льда, кромка льда смещена в более высокие широты. Эти изменения нашли отражение в изменениях циркуляции атмосферы. Западный перенос способствует притоку теплого воздуха с Атлантики, Черного моря. Меридиональная циркуляция способствует частым выходам южных теплых воздушных масс. А заливы с Арктики, Сибири и Монголии ослабли.

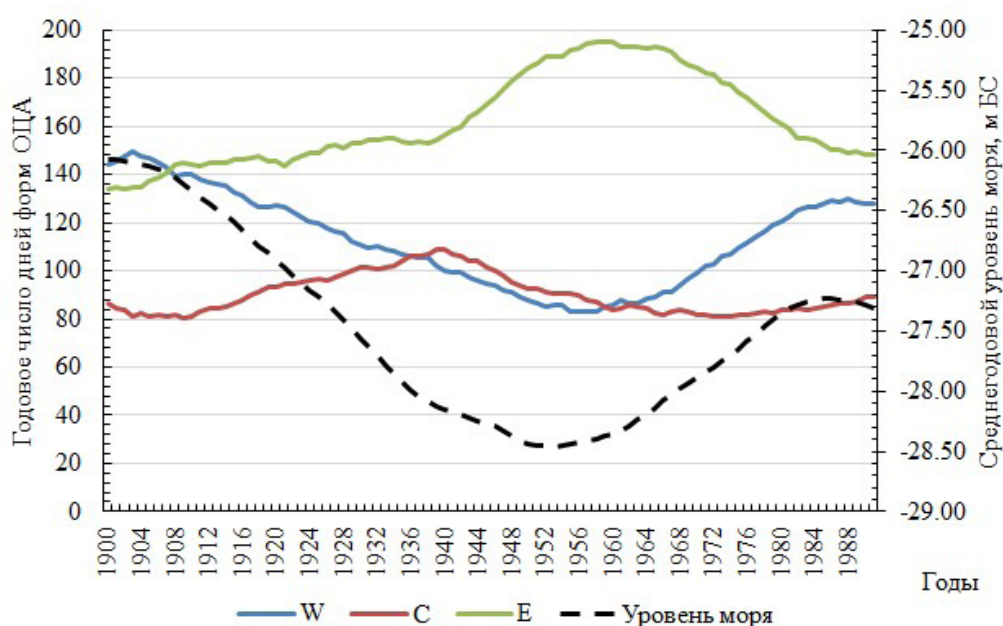
В соответствии с исследованиями А.А. Гирса в период с 1891 по 1928 г. форма E способствовала понижению уровня, а в 1929-1948 гг. аномально

интенсивная форма Е привела к резкому понижению уровня. В период с 1940 по 1948 г. меридиональная циркуляции внесла некоторые колебания уровня, затем до 1955 г. повторная активизация формы Е привела к снижению на 45 см фонового уровня моря. К концу 50-х годов наблюдалось незначительное повышение уровня, а в 60-е годы уровень снизился на 94 см с усилением формы Е (Гирс, 1971; Думанская, 2014).

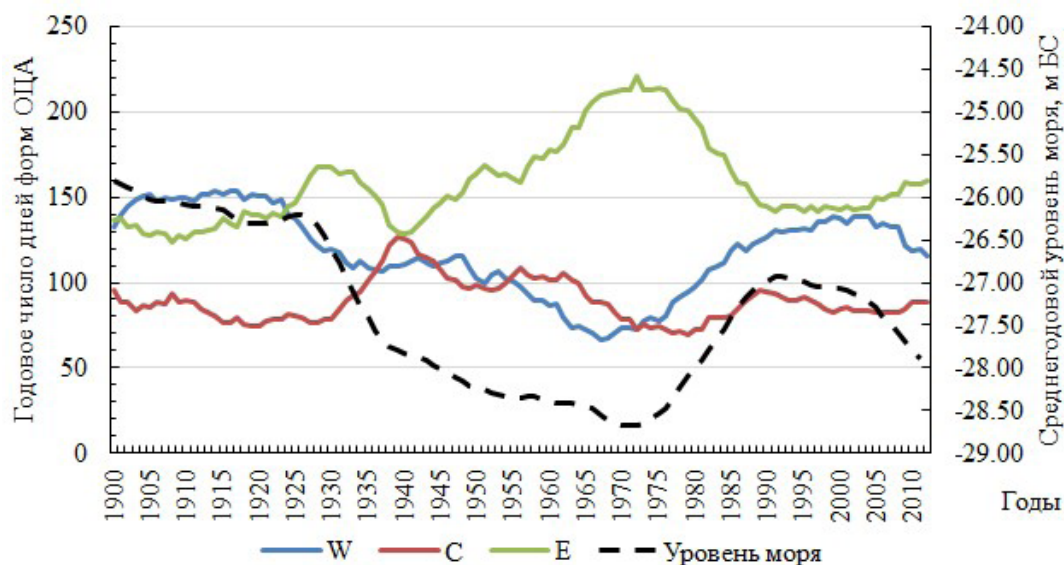
При рассмотрении периода 1970-2021 гг. как современного, можно заметить, что повышение уровня моря в период с конца 70-х до конца 90-х годов совпадает с тенденцией увеличения количества дней с формами циркуляции W и С. При интенсивном проявлении формы W циклоническая деятельность с Атлантики смещается на восток, также смещается и Азорский максимум. При такой ситуации в северных частях водосбора р. Волга количество осадков превышает норму. Увеличение выпадения атмосферных осадков приводит к росту стока, уменьшению испарения - соответственно увеличению уровня моря.

Ситуация от начала 2000 по 2021 г. совсем другая, наблюдается сочетание господства форм Е и С. При этом чаще наблюдается антициклональная погода, значительный дефицит осадков и, как следствие, уменьшение стока и уровня воды. Некоторые колебания уровня вносит форма С при выходах средиземноморских циклонов, богатых осадками.

На рисунке 2 представлен временной ход годового числа дней форм ОЦА и среднегодового фонового уровня моря по скользящим тридцатилетиям и десятилетиям.



а)



b)

Рисунок 2. Временной ход годового числа дней форм ОЦА и среднегодового уровня моря по скользящим тридцатилетиям (а) и десятилетиям (б) за период 1900-2022 гг.

Графики наглядно показывают синхронность хода формы W и уровня моря, увеличение числа дней данной формы соответствует росту уровня воды, а с линией формы циркуляции E наблюдается асинхронность, то есть увеличение числа дней с E приводит к понижению уровня моря. При рассмотрении скользящих десятилетий данный факт более детальный. При этом коэффициент корреляции между зависимостями уровня с формой W равна 0,97, а с формой E - 0,84, что говорит о хорошей устойчивой связи. Это согласуется с ранее полученными выводами (Мещерская и др., 2002; Наурозбаева, Лобанов, 2020).

Ввиду сложного рельефа поверхности уровень моря не представляет собой горизонтальную плоскость. Поэтому для объективного анализа данных необходимо иметь достаточное количество уровенных постов, которые равномерно расположены по периметру акватории или равноудалены друг от друга. В связи с этим были привлечены данные среднемесячных уровней моря по станциям Северного (Пешной, о. Тюлений и о. Кулалы) и Среднего (Актау, Форт-Шевченко и Махачкала) Каспия, а также количество дней форм циркуляции по месяцам за тот же период.

Важно было рассмотреть в отдельности холодный и теплый период времени года ввиду того, что в зимний период вся северная акватория моря покрывается устойчивым ледовым покровом. На рисунке 3 представлены зависимости числа

дней W и среднемесячного уровня моря по Северному Каспию за период 1970-2021 гг. Более детальный анализ еще раз подтверждает тесноту связи между месячными данными в пунктах наблюдения.

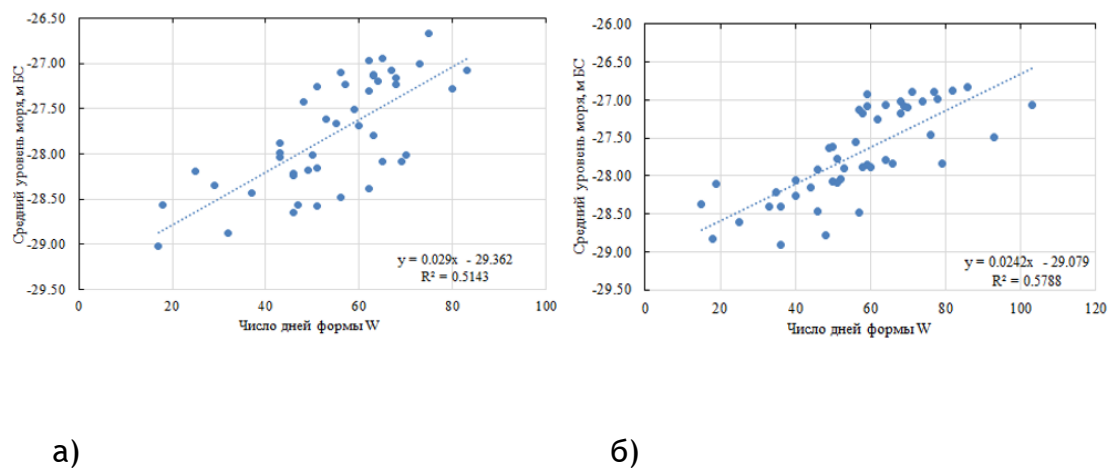


Рисунок 3. Зависимости месячного числа дней формы W и среднемесячного уровня Северного Каспия в холодный (а) и теплый период (б) с 1970 по 2022 г.

Также были проанализированы и данные по Среднему Каспию. В результате, за период с 1970 по 2022 г., средний уровень Северного и Среднего Каспия в холодный и теплый период в стадии увеличения соответствует росту числа дней с формой циркуляции W и падению числа дней с E, а в стадии падения - наоборот. В то же время форма циркуляции C способствует некоторым колебаниям уровня.

При этом коэффициент корреляции при зависимости уровня от числа дней с W равен:

$R = 0,75$ для Северного Каспия, $R = 0,74$ для Среднего Каспия (холодный период);

$R = 0,77$ для Северного Каспия, $R = 0,76$ для Среднего Каспия (теплый период).

Зависимость от формы E характеризовалась коэффициентом корреляции в пределах 0,70-0,75.

Режим атмосферных осадков в большей степени зависит от взаимодействия различных по происхождению воздушных масс с рельефом побережья Каспийского моря.

Для восточного побережья Каспия, которое характеризуется засушливостью, свойственно незначительное количество выпадения атмосферных осадков. В холодный период года происходит вторжение холодных и относительно бедных



влажностью арктических масс и воздушных масс умеренных широт континентального происхождения. В теплое полугодие большой приток солнечной радиации способствует высушиванию континентального воздуха (Гидрометеорология и гидрохимия морей, 1992). В среднем годовая сумма осадков не превышает 95-125 мм (наибольшие суммы отмечаются в районе поселка Ганюшкино и Форт-Шевченко, 173 мм и 172 мм соответственно). Для казахстанского побережья Северного Каспия характерен континентальный тип годового хода осадков - преобладание их в теплый период года. Для северной части побережья это в основном конвективные осадки, выпадение которых связано с вторжением холодного воздуха (обычно с северо-запада).

Максимальное выпадение осадков отмечается дважды в год: в апреле - июне и октябре - ноябре (15-20 мм в месяц). Минимальное количество осадков выпадает в виде снега в феврале (около 10 мм в месяц), когда на Северный Каспий активно распространяется отрог азиатского антициклона. Для побережья Среднего Каспия характерен среднеазиатский (пустынный) тип годового хода осадков - выпадение их в холодный период и практически отсутствие летом (Гидрометеорология и гидрохимия морей, 1992; Панин и др., 2015).

В выполненном исследовании собраны данные по осадкам 15 станций России и Казахстана с 1960 по 2022 г. Дополнительно были проанализированы еще 7 станций, но с короткими рядами данных, лишь до 1993 г.

Согласно результатам, месячные осадки на большинстве станций не имеют четко выраженного тренда уменьшения или увеличения. Поэтому были рассмотрены суммы осадков за холодный и теплый периоды, где выявлены периоды уменьшения и увеличения, которые, в свою очередь, совпадают с ходом уровня моря и количеством дней форм циркуляции.

Климатические изменения осадков оценивались по эффективности двух моделей нестационарного среднего (линейный тренд и ступенчатые изменения среднего значения при переходе от одного стационарного периода к другому) по отношению к модели стационарной выборки. В качестве показателя эффективности нестационарной модели (Δ) принята относительная разность стандартных отклонений остатков модели стационарной выборки (σ_0) и нестационарной модели ($\sigma_{нест}$) в % (Лобанов и др., 2011). В результате был выявлен ступенчатый переход в начале 90-х годов на большинстве станций, для каждого периода были рассчитаны средние значения. Например, амплитуда изменения количества осадков на станции о. Кулалы достигает 22 мм за холодный период и 76 мм за теплый. А на станции Форт-Шевченко уменьшение не столь значительное: на 3 мм за холодный и 20 мм за теплый период (рисунок 4).

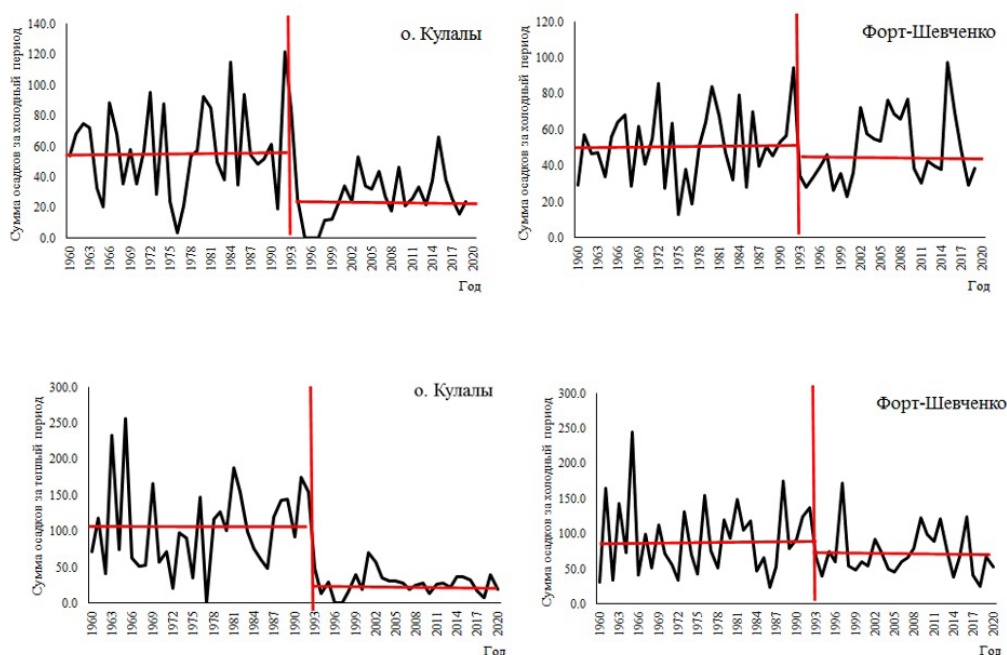


Рисунок 4. Многолетние временные ряды осадков за холодный (а) и теплый (б) периоды и их аппроксимация моделью ступенчатых изменений для станции о. Кулалы и Форт-Шевченко.

Так как Каспийское море среди южных морей отличается ледовыми явлениями, то особое внимание было уделено осадкам зимнего периода. Станции северных, северо-восточных и восточных регионов отличились большим количеством выпадения осадков в декабре, январе и марте. В январе количество осадков увеличилось на станциях Атырау, Тущибек и Форт-Шевченко; в марте на станциях Атырау, Новый Уштоган, Пешной и Бейнеу; в декабре - на станциях Атырау и Сам. Увеличение выпадения осадков в марте замечено на 4-х станциях из 15; осадки, вероятнее всего, жидкие в виде дождя и мокрого снега. В феврале тенденции к уменьшению выявлены лишь на двух станциях (Ганюшкино и Новый Уштоган).

На морских и прибрежных станциях осадки не имеют тенденции ни к уменьшению, ни к увеличению. По итогам можно заключить, что выпадение осадков, в частности твердых, не оказывает влияния на климатические изменения толщины льда.

Для выделения месяцев с избытком и дефицитом осадков было использовано отношение количества выпавших осадков к среднему многолетнему значению за данный месяц, умноженное на 100 %.

Значения менее 80 % оценивались как месяцы с дефицитом осадков (Д), значения в пределах 80-120 % - норма, а более 120 % - месяцы с избыточным



количеством осадков (И). В таблице I приведены случаи с дефицитом и избытком осадков на репрезентативных станциях Северного и Среднего Каспия по месяцам с 1960 по 2022 г.

Таблица I. Число случаев с дефицитом и избытком осадков на станциях по месяцам с 1960 по 2022 г.

Станция	Холодный период									
	Ноябрь		Декабрь		Январь		Февраль		Март	
	Д	И	Д	И	Д	И	Д	И	Д	И
Атырау	26	19	22	26	19	27	23	21	29	22
Ганюшкино	30	14	31	14	31	14	30	16	29	19
Пешной	30	19	22	29	24	26	32	20	31	21
Кулалы	40	12	37	13	33	15	48	9	45	12
Форт-Шевченко	25	19	30	19	27	27	30	30	36	24
Актау	29	23	33	23	26	26	31	18	36	18
Тушибек	29	17	26	24	19	26	30	19	34	18

Станция	Теплый период													
	Апрель		Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь	
	Д	И	Д	И	Д	И	Д	И	Д	И	Д	И	Д	И
Атырау	23	28	20	32	34	21	33	19	35	19	34	14	28	24
Ганюшкино	30	20	29	18	26	21	36	17	40	14	30	17	30	16
Пешной	23	25	18	29	34	17	36	19	35	16	33	16	28	23
Кулалы	41	10	46	10	43	14	44	8	45	9	45	8	44	9
Форт-Шевченко	33	18	40	12	41	14	39	15	37	15	37	18	31	19
Актау	33	18	33	18	38	20	31	22	40	17	43	14	35	14
Тушибек	30	16	29	22	33	21	34	18	36	19	41	14	32	20

Отмечено, что количество случаев с дефицитом осадков во все месяцы больше, чем с избытком. Также были рассмотрены годы, когда дефицит или избыток был на всех станциях.

Наиболее засушливый период наблюдался с 1968 по 1978 г.; 90-е годы были с чрезмерным избытком осадков; начало 2000 г., 2005-2006 гг., 2015-2016 гг. были с избыточным увлажнением. Практически каждый год с 1990 по 1999 г. был богат осадками, выпадало больше нормы в 2-3 раза. Как уже было отмечено ранее, именно в эти годы и были существенные изменения уровня моря, более интенсивное влияние той или иной формы циркуляции.

В условиях быстрого климатического изменения процессы формирования ледового покрова, продолжительность фаз ледового периода претерпевают изменения (Maznev et al, 2021).

Основным фактором, который влияет на интенсивность ледо-экзарационного процесса, является уровень моря на данный момент (Огородов и др., 2014, Ogorodov et al, 2020). Таким образом, флуктуации уровня более чем на 1 м могут способствовать существенному перераспределению глубин и перестройке рельефа дна, что в свою очередь способствует изменению условия формирования ледяных торосистых образований и экзарации ими дна и берегов.

Интересно было исследовать, как изменился ледовый режим в связи с выявленными изменениями уровня моря, циркуляции и осадками. Для решения данной задачи были привлечены сведения по ледовой обстановке с морских и прибрежных станций.

Данные включали в себя сведения:

- дату появления первых ледовых явлений;
- дату становления устойчивого ледового покрова;
- дату фиксирования максимальной толщины льда;
- дату полного очищения моря ото льда;
- продолжительность ледового периода;
- виды морского льда в зимнее время, сплоченность льда, дрейф льда и его направления, торосы и их сплоченность;
- толщину льда;
- среднемесячную температуру воздуха.

Проведен статистический анализ данных, согласно классификации суровости зим по сумме градусо-дней, определены типы зим и даны сравнительные характеристики параметров ледового режима.

В ранее выполненных работах (Ивкина и др., 2015; Наурызбаева, Лобанов, 2020; Naurozbayeva et al, 2023) уже было отмечено, что максимальная толщина льда уменьшилась. В 40-50-х гг. толщина нередко превышала 1 м, а в последние десятилетия на северо-востоке Каспийского моря не превышает даже 50 см. Таким образом, толщина уменьшилась на северо-востоке на 20-28 см; на северо-западе Северного Каспия на 20-25 см; в Среднем Каспии - на 13-17 см. Толщина льда на Среднем Каспии уже достигла критических значений, участились годы безледного зимнего периода.

Соответственно изменились и характерные даты: период ледостава уменьшился на 18 дней в Северном Каспии и на 27 дней в Среднем. Уменьшение периода ледостава обусловлено тем, что дата начала ледостава стала позже на 13 дней для Пешного и на 5 дней для о. Кулалы, а дата окончания наступает раньше на 6 дней для Пешного и на 22 дня для о. Кулалы. Дата появления

первого льда в Пешном стала позже всего на 4 дня, а на о. Кулалы - на 24 дня и даже переходит на январь следующего года. Дата максимальной толщины льда в Пешном сместилась на 13 дней к началу года, а на о. Кулалы не изменилась.

На северо-западных станциях первые ледовые явления стали фиксироваться в конце декабря - начале января, а в Актау и Форт-Шевченко период ледостава сократился до нескольких дней в общей сложности в умеренные и суровые зимы. Учитывая, что суровые зимы повторяются в последние десятилетия крайне редко (зима 2011-2012 гг. - последняя суровая зима), лед в Среднем Каспии преимущественно приносной с севера.

В таблице II приведены абсолютные даты (самые ранние и самые поздние) появления первого льда, установления устойчивого покрова и полного очищения моря ото льда за период с 1980 по 2021 г.

Таблица II. Абсолютные даты появления первого льда, установления устойчивого ледового покрова и полного очищения моря ото льда за период с 1980 по 2021 г.

Первый лёд		Устойчивое ледообразование		Полное очищение	
ранняя дата	поздняя дата	ранняя дата	поздняя дата	ранняя дата	поздняя дата
Пешной					
6.11.1988	14.12.1989	14.11.1993	30.12.2015	01.03.2002	10.04.1998
Кулалы, остров					
14.11.1993	25.02.2007	1.12.1993	08.02.2005	09.01.2018	02.04.1985
Форт-Шевченко					
3.12.1993	6.03.1983	8.12.1993	17.02.1993	10.01.2017	26.03.2003
Актау					
28.11.1993	15.02.1984	Не наблюдалось		16.12.2003	26.02.2021

Стоит отметить, что в последние годы полное очищение в Среднем Каспии наступает раньше, уже к концу первой декады января льда нет. Кроме того, в 2021 г. обновилась дата очищения в Актау. Ранее была дата 20 февраля 1994 года, а в 2021 г. лед продержался еще 6 дней.

Причина данных изменений заключена в глобальных процессах, в изменениях циркуляции атмосферы. Как показали результаты исследований изменений общей циркуляции атмосферы, представленные в работах Закс (1976); Лобанова и др., (2011), отмечается увеличение западного переноса до 20 дней за зимний период индекса W по классификации Вангенгейма-Гирса и уменьшение циркуляции формы E. Подобный процесс приводит к ослаблению влияния отростков Сибирского антициклона, влиянию западного переноса, притока теплых воздушных масс.

Заключение

В соответствии с поставленными задачами сформированы некоторые выводы. По изучению временного хода уровня моря, который претерпевал значительные колебания, о чем свидетельствуют исторические данные, снижение уровня более чем на 1 м способствует изменению положения береговой линии Каспийского моря, особенно в казахстанском секторе. В некоторых районах море отступило на 25 км и более.

Начиная с 2006 г., уровень Каспийского моря имеет тенденцию к снижению. В 2022 г. средний уровень моря по Северному Каспию составил минус 28,49 м БС, а для акватории Среднего Каспия минус 28,64 м БС. В 2023 г. за 5 месяцев (январь - май) средний уровень моря по Северному Каспию понизился еще на 0,05 м и составил минус 28,54 м БС, а в акватории Среднего наблюдается более значительное падение - до минус 28,90 м БС.

Понижение уровня моря приводит к коренному переформированию берегов, опустыниванию части прибрежных территорий. Снижение уровня существенно осложняет хозяйственную деятельность в прибрежной и мелководной зонах. Особенно уязвимыми являются хозяйствующие субъекты, связанные с работой портовых сооружений и морскими перевозками.

Колебания уровня Каспийского моря происходят под воздействием ряда факторов, основными из которых являются климатические изменения и антропогенная деятельность, которые оказывают существенное влияние на изменение характеристик водного баланса.

Так, при изучении воздействия общей циркуляции атмосферы было выявлено, что в последние десятилетия наблюдается увеличение повторяемости типа циркуляции Е, доля вклада типа W также имеет вес. И нередко наблюдаются смешанные типы: W + E, E + W.

Изменения в интенсивности типов W и E существенно влияют на температурный фон, ветровой режим и впоследствии на толщину льда и распределение ледового покрова. В последние десятилетия отмечается сочетание интенсивного воздействия форм Е и С. При этом чаще наблюдается антициклональная погода, значительный дефицит осадков и, как следствие, уменьшение стока и уровня воды.

По итогам привлечения данных уровня моря по станциям за период с 1970 по 2022 г. средний уровень Северного и Среднего Каспия в холодный и теплый период в стадии увеличения соответствовал росту числа дней с формой циркуляции W и падению числа дней с Е, а в стадии падения - наоборот.

Учитывая роль осадков в гидрологическом режиме, были привлечены данные по 15 станциям Прикаспийского региона. Выявлены засушливый период и периоды с чрезмерным избытком осадков. Практически каждый год - с 1990 по

1999 - был богат осадками, которых выпадало больше нормы в 2-3 раза. Именно в эти годы и были существенные изменения уровня моря, более интенсивное влияние той или иной формы циркуляции.

Климатические изменения повлекли за собой и изменения ледового режима моря: сокращение площади ледового покрова, толщины льда, смещение основных дат ледового периода.

Максимальные толщины льда уменьшились на 13-28 см, в зависимости от акватории, характерные даты смещены, ледовый период сократился в среднем на 10-14 дней.

При дальнейшем снижении уровня Северного Каспия ледовые условия на его акватории усложнятся вне зависимости от происходящего потепления регионального климата.

Существенной составляющей приходной части этого баланса являются изменения среднемесячных объемов вод, приносимых в Каспийское море р. Волгой, которые зависят от перемен климата в области ее питания и потребления ее вод сельским хозяйством соответствующих регионов России (Второй оценочный доклад Росгидромета..., 2014).

При дальнейшем потеплении климата указанных территорий средняя интенсивность испарения влаги с поверхности области питания р. Волга будет увеличиваться, как и объемы изъятия ее вод для нужд сельского хозяйства. В итоге объемы ее вод, поступающие в Каспийское море, будут уменьшаться, приводя к уменьшению значений его водного баланса.

Следовательно, сценарий, при котором в будущем произойдет дальнейшее снижение уровня Каспийского моря, действительно может быть отнесен к наиболее реалистичным.

Практическая значимость исследования состоит в обосновании целесообразности учета при планировании судоходства и рыболовства в Северном Каспии, фактора изменений климата в области питания р. Волга, который влияет на изменения как его уровня, так и ледовых условий. Указанный фактор в дальнейшем способен вызвать существенное усложнение ледовых условий в Северном Каспии и повлиять на безопасность жизнедеятельности населения прибрежных территорий России и Казахстана.

Перспективы дальнейших исследований в заявленном направлении обусловлены необходимостью учета полученных результатов при уточнении планов развития морехозяйственного комплекса Северного Каспия, а также при планировании мероприятий, направленных на профилактику чрезвычайных ситуаций в этом регионе.

Список литературы

- Абузяров, З.К., Нестеров, Е.С. (2011). Некоторые особенности пространственно-временной изменчивости уровня Каспийского моря. *Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*, 345, 5-22.
- Болгов, М.В., Красножон, Г.Ф., Любушин, А.А. (2007). Каспийское море экстремальные гидрологические события. Москва: Наука.
- Бухарицин, П.И., Болдырев, Б.Ю., Новиков, В.И. (2015). Комплексная система гидрометеорологического обеспечения безопасности мореплавания, портов и транспортных комплексов на Каспийском море (2015). *Международный журнал экспериментального образования*, 8 (ч. 2), 190-192..
- Бухарицин, П.И. Исследования Каспийских льдов (2019). Palmarium Academic Publishing. Дата обращения 17.04.2020, <https://www.iwp.ru/upload/iblock/93e/93e144fb1f853fa9fc339411e0ac7b6c.pdf>
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2014). Москва: Росгидромет.
- Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз (2016). М.: Триада ЛТД.
- Генеральный каталог уровня Каспийского моря. Официальный сайт КАСПКОМ (2020). Дата обращения 25.05.2021. <http://www.caspcom.com/index.php?razd=sest&lang=1&sess=17&podsess=61>
- Гидрометеорология и гидрохимия морей (1992). Каспийское море. Гидрометеорологические условия. Т. VI, вып. 1. СПб.: Гидрометеоиздат.
- Гирс, А.А. (1971). Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеоиздат, С. 7-31.
- Думанская, И.О. (2014). Ледовые условия морей европейской части России. Москва: ФГБУ «Гидрометцентр России».
- Закс, Л. (1976). Статистическое оценивание. Москва: Статистика.
- Ивкина, Н.И., Терехов, А.Г., Наурузбаева, Ж.К. (2015). Колебания уровня Каспийского моря и диагностика современных изменений положения береговой линии по спутниковым данным landsat периода 2005-2015 годов. *Гидрометеорология и экология*, 2, 89-99.
- Лобанов, В.А., Смирнов, И.А., Шадурский, А.Е. (2011). Практикум по климатологии. Ч. 1. Санкт-Петербург: РГГМУ.
- Мещерская, А.В., Голод, М.П., Белянкина, И.Г. (2002). Колебания уровня Каспийского моря в связи с особенностями общей циркуляции атмосферы в XX веке. *Материалы специальной сессии Ученого совета Центра международного сотрудничества по проблемам окружающей среды, посвященной 80-летию академика М.И. Будыко*. Санкт-Петербург: Наука, С. 180-194.
- Наурузбаева, Ж.К., Лобанов, В.А. (2020). Изменение ветрового режима Северного и Среднего Каспия в холодное полугодие. *Гидрометеорология и экология*, 4, 36-45.
- Нестеров, Е.С. (2013). Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада ЛДТ.
- Никонова, Р.Е. (2008). О причинах и последствиях многолетних колебаний уровня Каспийского моря в XX-XXI столетиях. *Труды ГОИН: Исследования океанов и морей*, вып. 211, 127-151.
- Никонова, Р.Е. (2011). О колебаниях уровня Каспийского моря и современное состояние сети наблюдений. *Вестник Каспия*, 2, 72-81.
- Огородов, С.А., Архипов, В.В., Землянов, И.В., Цвечинский, А.С. (2014). Воздействие ледяного покрова на дно Северного Каспия в условиях колебания уровня и ледовитости. *Труды государственного океанографического института*, 215, 170-182.
- 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*, 1, 183-210.

Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевых областей рек Волги, Терека, Сулака (2016). М.: ФГБУ «ГОИН».

Статистические методы в гидрологии (1970). Под ред. Алексеева Г.А. Л.: Гидрометеиздат.

Тужилкин, В.С., Косарев, А.Н., Архипкин, В.С., Никонова, Р.Е. (2011). Многолетняя изменчивость гидрологического режима Каспийского моря в связи с вариациями климата. *Вестник Московского университета*, серия 5: география, 2, 62-71.

Фролов, А.В. (2019). Особенности механизма многолетних колебаний уровня Каспийского моря. *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*, 55, 120-128.

Яготинцев, В.Н., Поставик, П.В. (2013). Уровень Каспийского моря в прошлом и настоящем. *Труды географического общества Республики Дагестан*, 41, 26-40.

Buber, A., Bolgov, M., Buber, V. (2023). Statistical and Water Management Assessment of the Impact of Climate Change in the Reservoir Basin of the Volga-Kama Cascade on the Environmental Safety of the Lower Volga Ecosystem. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(8), 4768. DOI: 10.3390/app13084768

Koriche, S.A., Singarayer, J.S., Cloke, H.L., Valdes, P.J., Wesselingh, F., Kroonenberg, S.B., Wickert, A.D., Yanina, T.A. (2022). What are the drivers of Caspian Sea level variation during the late Quaternary? *Quaternary Science Reviews*, 283(9), 107457. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107457>

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. (133-146 p). <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-99504-1>

Maznev, S.V., Ogorodov, S.A., Vergun, A.P. (2021). Tyuleny Archipelago of the Northern Caspian: A testing ground for the study of ice-gouging processes. *Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, POAC, 1-8.

Naurozbayeva, Zh., Baubekova, A., Kvasha, A., Lobanov, V., Kløve, B., & Haghighi, A.T. (2023). Determining factors for changes in the ice regime of the Caspian Sea. *International Journal of Water Resources Development*. <https://doi.org/10.1080/07900627.2023.2231099>

Ogorodov, S.A., Magaeva, A.A., Maznev, S.V., Yaitskaya, N.A., Vernyayev, S., Sigitov, A., Kadranov, Y. (2020). Ice Features Of The Northern Caspian Under Sea Level Fluctuations And Ice Coverage Variations. *Geography, Environment, Sustainability*, 13(3)3, 129-138. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2020-77>



Assessment of atmospheric circulation impacts on the Caspian Sea level and ice regime

Zhanar Naurozbayeva ^{a,b} 

^a JSC «Institute of geography and water security», Pushkin st. 67/99, Almaty, 050010, Kazakhstan

^b Al-Farabi Kazakh National University, Al Farabi Av. 77, Almaty, 050040, Kazakhstan

Email: naurozbaeva.zhanar@mail.ru

<https://doi.org/10.29258/CAJWR/2024-R1.v10-1/68-90.rus>

ABSTRACT

The research aimed to assess the influence of atmospheric processes in the Northern Hemisphere's Atlantic-European Sector on the Caspian Sea level based on the data for the days with Wengenheim-Girs atmospheric general circulation forms. The inputs covered the time period from 1900 to 2022. The information on the sea level, precipitation and ice events were harvested from 22 observation points in Kazakhstan and Russia. The statistical and comparative analysis as well as the climate change assessment within the framework of the study pointed to a stable correlation between the sea level and atmospheric circulation; re-vealed certain patterns reflected in precipitation distribution and frequency of moisture deficient and excessive years. The research also identified that the climatic changes have altered the sea's ice regime, with the maximum ice thickness decreasing by 13-28 cm depending on a specific water area. In addition to ice thickness variation, the recent decades show an increased frequency of moderate and mild winters, and the shift of the main glaciation dates, i.e. a stable ice cover forming later, the date of fixed maximum ice thickness observed in mid-February, the date of complete ice clearing observed in early-mid March, and the freezing period being shorter.

ARTICLE HISTORY

Received: June 10, 2023

Accepted: December 18, 2023

Published: February 20, 2024

KEYWORDS

Caspian Sea, sea level, general atmospheric circulation, precipitation, ice regime, ice period characteristic dates



References

- Abuzjarov Z.K., Nesterov E.S. Nekotorye osobennosti prostranstvenno-vremennoj izmenchivosti urovnja Kaspijskogo morja. [Some features of the spatio-temporal variability of the level of the Caspian Sea] // *Trudy gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossijskoj Federacii*. No 345. 2011. p. 5-22 (in Russian).
- Bolgov M.V., Krasnozhon G.F., Ljubushin A.A. Kaspijskoe more jekstremal'nye gidrologicheskie sobytija. [Caspian Sea extreme hydrological events]. M.: Nauka, 2007. 381 p. (in Russian).
- Buharicin P.I. Issledovaniya Kaspijskih l'dov. [Exploration of the Caspian ice]. *Palmarium Academic Publishing*. 2019. 122 p. (in Russian).
- Buharicin P.I., Boldyrev B.Ju., Novikov V.I. Kompleksnaja sistema gidrometeorologicheskogo obespechenija bezopasnosti moreplavanija, portov i transportnyh kompleksov na Kaspijskom more. [Integrated system of hydrometeorological safety of navigation, ports and transport complexes in the Caspian Sea]. Astrahan', 2014. 319 p. (in Russian).
- Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmenenijah klimata i ih posledstvijah na territorii Rossijskoj Federacii. [The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation]. M. Rosgidromet. 2014. 1009 p. (in Russian).
- Vodnyj balans i kolebanija urovnja Kaspijskogo morja. Modelirovanie i prognoz. [Water balance and fluctuations in the level of the Caspian Sea. Modeling and forecast]. Pod red. Nesterova E.S. M.: Triada LTD, 2016. 378 p. (in Russian).
- General'nyj katalog urovnja Kaspijskogo morja. Oficial'nyj sajt KASPKOM. - [General catalog of the level of the Caspian Sea. Official site of CASPKOM]. 2020. Rezhim dostupa, <http://www.caspcom.com/index.php?razd=sest&lang=1&sess=17&podsess=61>
- Gidrometeorologija i gidrohimija morej [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas]. T.VI. Kaspijskoe more. *Gidrometeorologicheskie uslovija*. SPb.: Gidrometeoizdat, 1992. V. 1. 359 p. (in Russian).
- Girs A.A. Mnogoletnie kolebanija atmosfernoj cirkuljacii i dolgosrochnye gidrometeorologicheskie prognozy. [Long-term fluctuations in atmospheric circulation and long-term hydrometeorological forecasts]. L.: Gidrometeoizdat, 1971. P. 7-31. (in Russian).
- Dumanskaja I.O. Ledovye uslovija morej Evropejskoj chasti Rossii. [Ice conditions of the seas of the European part of Russia]. M.: FGBU «Gidrometcentr Rossii», 2014. 608 p. (in Russian).
- Zaks L. Statisticheskoe ocenivanie. [Statistical estimation]. M.: Statistika, 1976. 598 p. (in Russian).
- Ivkina N.I., Terehov A.G., Naurozbaeva Zh.K. Kolebanija urovnja Kaspijskogo morja i diagnostika sovremennyh izmenenij polozhenija beregovoj linii po sputnikovym dannym landsat perioda 2005-2015 godov [Fluctuations in the level of the Caspian Sea and diagnostics of modern changes in the position of the coastline according to satellite data from the landsat period 2005-2015]. // *Gidrometeorologija i jekologija*. 2015. No 2. p. 89-99. (in Russian).
- Lobanov V.A., Smirnov I.A., Shadurskij A.E. Praktikum po klimatologii. Chast' 1. [Workshop on climatology. Part 1]. Sankt-Peterburg, 2011. 144p. (in Russian).
- Meshhorskaja A.V., Golod M.P., Beljankina I.G. Kolebanija urovnja Kaspijskogo morja v svjazi s osobennostjami obshhej cirkuljacii atmosfery v XX veke. [Fluctuations in the level of the Caspian Sea due to the peculiarities of the general circulation of the atmosphere in the XX century]. *Materialy special'noj sessii Uchenogo soveta Centra mezhdunarodnogo sotrudnichestva po problemam okružhajushhej sredy, posvjashhennoj 80-letiju akademika M.I. Budyko*. Sankt-Peterburg. Nauka, 2002. p. 180-194 (in Russian).
- Naurozbaeva Zh.K., Lobanov V.A. Izmenenie vetrovogo rezhima severnogo i srednego Kaspija v holodnoe polugodie. [Changes in the wind regime of the northern and middle Caspian in the cold half-year]. // *Ezhekvartal'nyj nauchno-tehnicheskij zhurnal «Gidrometeorologija i jekologija»* 2020. No 4. p. 36-45. (in Russian).

- Nesterov E.S. Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean. [North Atlantic Oscillation: Atmosphere and Ocean]. M.: TRIADA LDT, 2013. 144 p. (in Russian).
- Nikonova R.E. O prichinah i posledstviyah mnogoletnih kolebanij urovnja Kaspijskogo morja v XX-XXI stoletijah [On the causes and consequences of long-term fluctuations in the level of the Caspian Sea in the XX-XXI centuries]. // *Trudy GOIN*. 2008. V. 211. p.127-151 (in Russian).
- Nikonova R.E. O kolebanijah urovnja Kaspijskogo morja i sovremennoe sostojanie seti nabljudenij [On fluctuations in the level of the Caspian Sea and the current state of the observation network]. // *Vestnik Kaspija*. 2011. No 2. p. 72-81. (in Russian).
- Ogorodov S.A., Arhipov V.V., Zemljanov I.V., Cvecinskij A.S. Vozdejstvie ledjanogo pokrova na dno severnogo Kaspija v uslovijah kolebanija urovnja i ledovitosti [The impact of the ice cover on the bottom of the northern Caspian under conditions of fluctuations in level and ice cover]. // *Trudy gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta*. No 215. 2014. p. 170-182. (in Russian).
- Panin G.N., Vyruchalkina T.Ju., Solomonova I.V. Klimaticheskie izmenenija v Arktike, Severnoj Atlantike, rajone Kaspija i ih vzaimosvjaz'. [Climatic changes in the Arctic, North Atlantic, the Caspian region and their relationship]. // *Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija*. 2015. T.1. p. 183-210. (in Russian).
- Spravochno-analiticheskij obzor gidrologicheskogo rezhima ust'evyh oblastej rek Volgi, Tereka, Sulaka. [Reference and analytical review of the hydrological regime of the mouth areas of the Volga, Terek, Sulak rivers]. M.: FGBU «GOIN», 2016. 74 p. (in Russian).
- Statisticheskie metody v gidrologii. [Statistical methods in hydrology]. Pod red. Alekseeva G.A. L.: Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo. 1970. 271 p. (in Russian).
- Tuzhilkin V.S., Kosarev A.N., Arhipkin V.S., Nikonova R.E. Mnogoletnjaja izmenchivost' gidrologicheskogo rezhima Kaspijskogo morja v svjazi s variacijami klimata. [Long-term variability of the hydrological regime of the Caspian Sea due to climate variations]. // *Vestnik Moskovskogo universiteta*. serija 5: geografija No 2. 2011. p. 62-71. (in Russian).
- Frolov A.V. Osobennosti mehanizma mnogoletnih kolebanij urovnja Kaspijskogo morja. [Features of the mechanism of long-term fluctuations in the level of the Caspian Sea]. // *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. No 55. 2019. p. 120-128. (in Russian).
- Jagotincev V.N., Postavik P.V. Uroven' Kaspijskogo morja v proshlom i nastojashhem. [The level of the Caspian Sea in the past and present]. // *Trudy geograficheskogo obshhestva Respubliki Dagestan*. No 41. 2013. p. 26-40
- Buber, A., Bolgov, M., Buber, V. (2023). Statistical and Water Management Assessment of the Impact of Climate Change in the Reservoir Basin of the Volga-Kama Cascade on the Environmental Safety of the Lower Volga Ecosystem. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(8), 4768
- Koriche, S.A., Singaray, J.S., Cloke, H.L., ...Wickert, A.D., Yanina, T.A. (2022). What are the drivers of Caspian Sea level variation during the late Quaternary? *Quaternary Science Reviews* 283, 107457 <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107457>
- 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. (133-146 p) <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-99504-1>
- Maznev, S.V., Ogorodov, S.A., Vergun, A.P. (2021). Tyuleny Archipelago of the Northern Caspian: A testing ground for the study of ice-gouging processes. Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC
- Ogorodov S. A., Magaeva A.A., Maznev S.V., Yaitskaya N.A., Vernyayev Sergey, Sigitov Anton, Kadranov Y. (2020) Ice Features Of The Northern Caspian Under Sea Level Fluctuations And Ice Coverage Variations. *Geography, Environment, Sustainability*, T 13, № 3, c. 129-138 <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2020-77>



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