

ОЦЕНКА ПОВТОРЯЕМОСТИ АТМОСФЕРНЫХ БЛОКИНГОВ НАД ПРИКАСПИЙСКИМ РЕГИОНОМ В ЗИМНИЕ МЕСЯЦЫ 1959–2022 ГГ. И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ СЕВЕРНОГО КАСПИЯ

© 2024 г. А. В. Холопцев¹, Ж. К. Наурузбаева^{2*}

¹Севастопольское отделение Государственного океанографического института имени Н. Н. Зубова, Севастополь, Россия

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

*e-mail: naurozbaeva.zhanar@mail.ru

Поступила в редакцию 13.07.2023 г.

После доработки 19.10.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2024 г.

Оценены повторяемости атмосферных блокингов в зимы 1959–2022 гг., их влияние на ледовый покров Северного Каспия. Применён реанализ ERA5 с использованием данных гидрометеорологических станций Прикаспия. Установлено, что при блокингах температуры воздуха ниже, чем в период их отсутствия. Для Прикаспийского региона имеет место значимая связь между уменьшением повторяемости блокингов, сумм отрицательных температур воздуха и толщиной льда.

Ключевые слова: Каспийское море, атмосферные блокинги, атмосферное давление, реанализ, температура воздуха, сумма отрицательных температур воздуха, толщина льда, ледовый режим

DOI: 10.31857/S2076673424010094

ВВЕДЕНИЕ

Каспийское море — южное море, которое в настоящее время разделяют пять государств: Азербайджан, Казахстан, Россия, Иран и Туркменистан. Устойчивый ледовый покров формируется на акватории Северного Каспия у побережья России и Казахстана. Условия формирования льда определяются в первую очередь термическим режимом, водным балансом и изменениями уровня моря, который в последние десятилетия значительно падает. Некоторые вопросы воздействия перечисленных факторов на ледовый покров рассмотрены в предыдущих работах (Лобанов, Наурузбаева, 2021; Kholoptsev, Naurozbaeva, 2022; Naurozbaeva и др., 2023). Термический режим формируется в соответствии с барико-циркуляционными процессами. Атмосферные блокинги (далее — АБ), которые образуются над Прикаспийский регионом, представляют особый интерес в зимние месяцы из-за своего воздействия на снижение температуры воздуха (Kholoptsev, Naurozbaeva, 2022).

Современные представления о причинах возникновения АБ и их последствиях изложены в работах многих отечественных (Шакина, Иванова, 2010; Мохов и др., 2013; Мохов, 2021; Мохов, Тимажев, 2022) и зарубежных авторов (Barriopedro et al., 2006; Drouard, Woollings, 2018; Davini, D’Andrea,

2020; Vacer et al., 2021). Причинами возникновения блокингов могут быть процессы двух типов: во-первых, блокирование меридионального типа, т.е. обтекание потоками земного рельефа, чаще всего происходящее над территориями Урала и Казахстана (Luo, 2016; Antokhina et al., 2018), и крупномасштабная неустойчивость зонального потока. Она способствует образованию мощной системы взаимодействующих антициклонов и циклонов (блокирование расщепляющегося типа) или мощного гребня и двух циклонов (омега-блокирование).

Б. Л. Дзердзеевский ещё в первой половине XX века при анализе расположения систем Северного полушария описал меридиональные атмосферные блокинги (Дзердзеевский и др., 1946; Дзердзеевский, 1968). Они представляют собой высокие малоподвижные антициклоны, которые способствуют приостановке западного переноса воздушных масс, а своё месторасположение, как правило, сохраняют в течение длительного времени.

Атмосферные блокинги могут занимать территорию больше 20° по долготе и больше 40° по широте (от Арктики и до периферий соответствующих субтропических антициклонов) (Дзердзеевский, 1968). Чем длительнее период существования атмосферного блокинга, тем существеннее его воздействие на термический режим региона. Поэтому

целесообразно изучать АБ продолжительностью не менее 5 суток.

Поскольку возникновение над Прикаспийским регионом в зимние месяцы таких АБ приводит к усилению морозов, допустимо предположить, что увеличение их повторяемости способно приводить к значимому увеличению максимальной толщины льда Северного Каспия, а также площади ледяного покрова. Такая гипотеза не является единственной, поскольку изменения упомянутых характеристик ледяного покрова этого региона Каспия могут быть вызваны и иными причинами. Проверку этой гипотезы ранее не проводили, несмотря на систематический мониторинг гидрометеорологических процессов всего региона, проводимый национальными гидрометеослужбами прибрежных стран. Подтверждение справедливости выдвинутой гипотезы позволило бы применить результаты моделирования и прогнозирования изменений АБ над Прикаспийским регионом при оценке вероятных изменений ледового режима Северного Каспия. Поэтому её проверка представляет теоретический и практический интерес.

Цель работы заключается в проверке справедливости выдвинутой гипотезы, а также в оценке для зимних месяцев тенденций изменений повторяемости над Прикаспийским регионом АБ продолжительностью более 5 суток. Для выполнения этой цели решены такие задачи: выявлены особенности межгодовых изменений средних значений повторяемости атмосферных блокингов за зимний сезон в Прикаспийском регионе, произошедших за период 1959–2022 гг., и выполнена проверка выдвинутой гипотезы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленных задач в качестве исходного материала использовались данные по температуре воздуха пятнадцати станций Прикаспийского региона; на шести из них производились систематические измерения толщины льда. Кроме того, рассмотрены данные по трём станциям России — о. Тюлений, о. Искусственный и Лагань. Расположение пунктов мониторинга показано на рис. 1.

Для выявления АБ использована информация о среднечасовых значениях атмосферного давления над уровнем моря, а также на высотах, которые представлены в реанализе ERA5 (Hersbach, 2016; Hoffmann, 2019). Этот реанализ создан Европейским центром среднесрочных прогнозов и представляет собой пятое поколение реанализа глобальных атмосферных наблюдений ECMWF. Его основные преимущества, по сравнению с другими подобными реанализами, представляют непрерывные ряды данных за период с 1959 г. по настоящее время, а также высокое пространственное

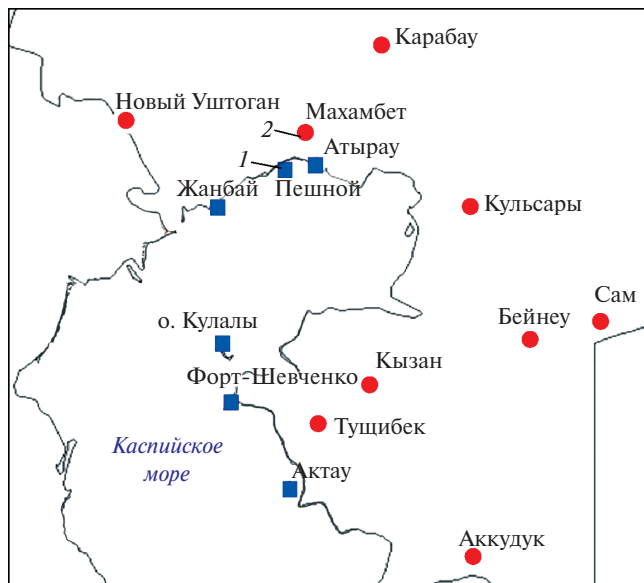


Рис. 1. Расположение гидрометеорологических станций Казгидромета: 1 — наблюдения за температурой воздуха и толщиной льда; 2 — наблюдения за температурой воздуха.
Fig. 1. Location of hydrometeorological stations of Kazhydromet: 1 — observations of air temperature and ice thickness; 2 — observation of air temperature.

($0.25^\circ \times 0.25^\circ$ по долготе и широте) и временное (1 час) разрешение данных (IMERG: Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM).

Для верификации моделей применяются непосредственные наблюдения наземной сети, а также данные спутникового мониторинга. Сведения ассимилируются и обрабатываются с использованием цикла 41r2 Интегрированной системы прогнозирования (IFS) (данные и информация, предоставляемые Copernicus). При выполнении реанализа изменений среднечасовых температур воздуха в узлах координатной сетки реанализа ERA5 применены математические модели IMERG (IMERG: Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM). При решении задачи для обнаружения АБ над Прикаспийским регионом применена предложенная авторами методика (Kholoptsev, Naurozbayeva, 2022).

Атмосферный блокинг, продолжающийся 5 суток и более во всех узлах координатной сетки реанализа, расположенных между параллелями 40° с.ш. и 47° с.ш. на заданном меридиане, соответствовал следующим условиям: во-первых, приведённое к уровню моря атмосферное давление превышало 1015 гПа на заданную величину L , а значения геопотенциала, соответствующие изобарическим поверхностям $P = 300$, $P = 500$ и $P = 850$ гПа, в рассматриваемые даты превышали среднемесячные значения этих показателей не менее чем на $200 \text{ м}^2/\text{с}^2$; во-вторых, критерий Лежёнаса — Окленда $\Phi(P)$ был отрицателен: $\Phi(P) = [I(1 - 10) + I(1) + I(1 + 10)] < 0$, где $I(1) = H(1, 40^\circ \text{ с.ш.}) -$

$H(1.60^\circ \text{с.ш.})$ — индекс Лежёнаса — Окленда; H — высота изобарической поверхности P дам, l — долгота; выполняется для указанных изобарических поверхностей не только 500 гПа, но также 300 и 850 гПа.

Как характеристика повторяемости АБ над Прикаспийским регионом (далее $P_{\text{АБ}}$) в зимнем сезоне года рассматривалось среднее количество суток из периода с 1 декабря по 28 (29) февраля, в течение которых АБ был обнаружен. Указанный показатель был оценен для двух диапазонов долгот: $47\text{--}54^\circ$ в.д. (западная часть Прикаспийского региона) и $54\text{--}60^\circ$ в.д. (его восточная часть). Изучались зависимости от времени $P_{\text{АБ}}$ для каждого месяца зимнего сезона, а также для всего сезона в целом, соответствующие периоду 1960–2020 гг. Кроме того, рассматривались зависимости средних значений P , которые вычислены в скользящем окне продолжительностью 5 лет от года начала этого окна.

Как характеристика тенденций изменения повторяемости АБ ($P_{\text{АБ}}$) оценивались значения углового коэффициента линейного тренда временных рядов этого показателя для периодов 1991–2020, 2000–2020, а также 2010–2020 гг. Значение указанного коэффициента признавалось значимым, если вероятность адекватности такого статистического вывода превышала 0.9. При оценке этой вероятности предполагалось, что временной ряд значений рассматриваемого показателя Y_k ($k = 1, 2, \dots, K$) сформирован из выборок G_k нормального случайного процесса с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением (СКО), которые наложены на соответствующий линейный тренд: $Y_k = G_k + z_k$.

Значения A и СКО вычислялись для каждого изучаемого сектора и каждого зимнего месяца за указанные периоды времени. Решение о значимости вычисленного показателя A принималось, если вероятность события, при котором $A \cdot K > \text{СКО}$, превышала 0.9. Поскольку G_k подчиняется нормальному закону, такое решение принималось в случаях, когда $A \cdot K > 1.3 \cdot \text{СКО}$.

При решении второй задачи применялась методы статистического анализа. Данные, поступающие с пунктов наблюдения, должны проходить не только контроль на качество, но и проверку на однородность ввиду вероятности ошибок как технических, так и человеческих факторов. Для оценки качества и однородности указанных данных используются критерии Диксона и Смирнова — Граббса (Закс, 1976). Оценка однородности средних температур воздуха выполняется по критериям Фишера (F) и Стьюдента (St). Оценка однородности эмпирического распределения температур воздуха на изучаемых метеостанциях производится по критериям Диксона и Смирнова — Граббса. При проверке экстремумов установлено, что уровень значимости составляет более 10%. Поэтому рассматриваемые данные могут быть признаны однородными с высокой степенью достоверности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

При решении первой задачи с использованием изложенной методики выявлены все АБ, которые наблюдались над Прикаспийским регионом в зимние месяцы 1959–2022 гг., а также оценены значения $P_{\text{АБ}}$ для западной и восточной его частей для каждого зимнего месяца и в среднем за сезон. Межгодовые изменения средних значений $P_{\text{АБ}}$ за зиму, которые вычислены для западной ($47\text{--}54^\circ$ в.д.) и восточной ($54\text{--}60^\circ$ в.д.) половин Прикаспийского региона, представляют собой сложные колебания с периодом 3–5 лет, вследствие чего значимые тренды этих процессов для XXI в. выявить с применением описанной методики невозможно. Как показали расчёты, усреднение межгодовых изменений $P_{\text{АБ}}$ в скользящем окне длиной 5 лет позволяет эту составляющую отчасти подавить. Это подтверждает зависимость от времени средних значений $P_{\text{АБ}}$ ($P_{\text{АБср}}$) для каждого месяца и всего сезона в целом, показанная на рис. 2.

Зависимости средних значений $P_{\text{АБ}}$ в обеих половинах Прикаспийского региона для декабря от года начала скользящего окна длиной 5 (для которого вычислен этот показатель) показывают тенденцию к их увеличению (см. рис. 2, а). Для января рассматриваемые зависимости также описываются подобными функциями (вид которых существенно отличается) (см. рис. 2, б). Для современного климатического периода зависимости средних значений $P_{\text{АБ}}$ от времени также свойственны тенденции к увеличению этих показателей. Зависимости для февраля показывают тенденцию к уменьшению (см. рис. 2, в). Межгодовые изменения средних значений $P_{\text{АБ}}$ в целом за сезон для современного климатического периода носят возрастающий характер, но указанная тенденция для восточной части Прикаспийского региона (Казахстан) выражена более явно (см. рис. 2, г). Вычисленные для всех указанных процессов значения углового коэффициента линейного тренда, значимые для современного климатического периода, приведены в табл. 1.

Оценены изменения климатической нормы, тенденции изменений $P_{\text{АБ}}$ за 1991–2020, 2000–2020 и 2010–2020 гг., значения современных КН их $P_{\text{АБ}}$, а также средних $P_{\text{АБ}}$ за 2010–2020 гг. На рис. 3 представлены зависимости средних $P_{\text{АБ}}$ (1) для декабря, января и февраля. Повторяемость $P_{\text{АБ}}$ (1) для зимних месяцев тем больше, чем меньше минимальная продолжительность АБ. В декабре наибольшая повторяемость наблюдается от 5 до 8 дней в регионе $51^\circ 50'\text{--}52^\circ 50'$ в.д., а повторяемость длительных АБ более 10 дней — в регионе $54^\circ\text{--}58^\circ$ в.д. В январе и феврале наибольшая повторяемость периодов с блокинами приходится на территорию от $55^\circ 50'$ до $60^\circ 00'$ в.д. Ближе всего к данному региону

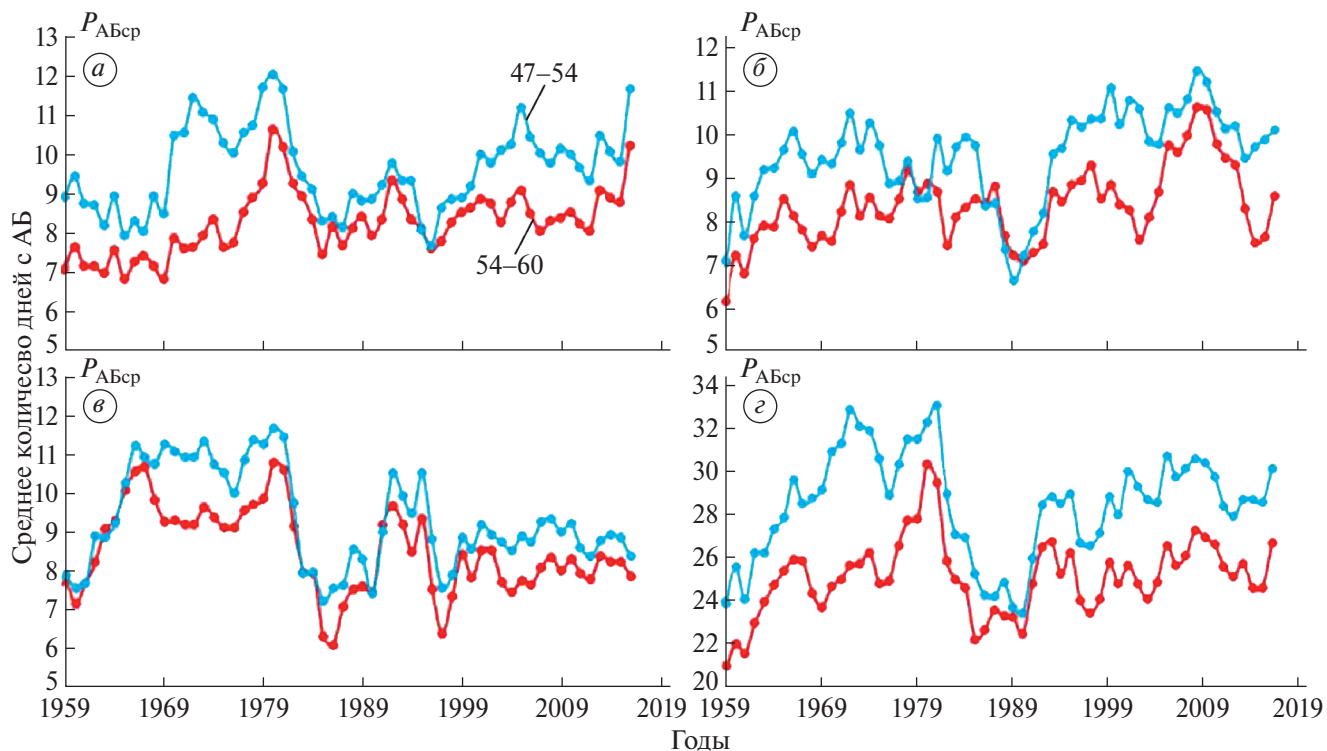


Рис. 2. Зависимости от года начала скользящего окна длиной 5 лет вычисленных для него средних значений P_{AB} (дни) для западной (47–54° в.д.) и восточной (54–60° в.д.) половины Прикаспийского региона: декабрь (а); январь (б); февраль (в); зима (г).

Fig. 2. Dependences on the year of the beginning of the 5-year sliding window of the average values of P_{AB} (days) calculated for it for the western (47–54°) and for the eastern (54–60°) half of the Caspian region: December (a); January (б); February (в); winter (г).

Таблица 1. Значения углового коэффициента линейного тренда временных рядов P_{ABcp} (суток за пятилетие) для западной и восточной частей Прикаспийского региона для зимних условий, которые значимы с вероятностью не менее 0.9

Месяц/регион	Западная часть (47–54° в.д.)	Восточная часть (54–60° в.д.)
Декабрь	0.032	0.038
Январь	0.021	0.070
Февраль	–0.028	–0.030
Весь зимний сезон	0.026	0.077

расположены станции Аккудук, Кульсары, Бейнеу и Сам.

Тенденции перемен каких-либо характеристик климата (в том числе и повторяемости АБ) Всемирная метеорологическая организация рекомендует оценивать как значения разности их климатических норм, соответствующих современному климатическому периоду (с 1991 по 2020 г.), по отношению к базовому (с 1961 по 1990 г.).

Анализ результатов исследований показал, что повторяемость блокирующих ситуаций в современный период меньше, чем в базовый период. Существенные отличия наблюдаются в феврале, что может оказывать значительное влияние на температурный фон региона, а соответственно и на нарастание толщины льда на море. Так, по результатам ранее выполненных работ (Лобанов, Наурузбаева, 2021) за многолетний период по рядам наблюдений эмпирические зависимости при статистически значимых коэффициентах уравнения регрессии и коэффициентах множественной корреляции (R) равны: для Атырау — 0.70, Лагани — 0.83, о. Кулалы — 0.60 и т.д. Кроме того, из оценки вклада каждого месяца ледового периода следует, что наибольший вклад вносит предзимний период. Как правило, в феврале толщина льда Северного Каспия достигает максимальных значений. Станции Пешной, Жанбай, Атырау располагаются вблизи 51° в.д. В декабре не отмечается увеличения повторяемости блокингов, а в январе — феврале наблюдается наименьшая повторяемость за современный период. Значительное снижение повторяемости атмосферных блокингов в феврале отмечается на территории западной акватории моря, в Астраханской области, Калмыкии, дельте р. Волга.

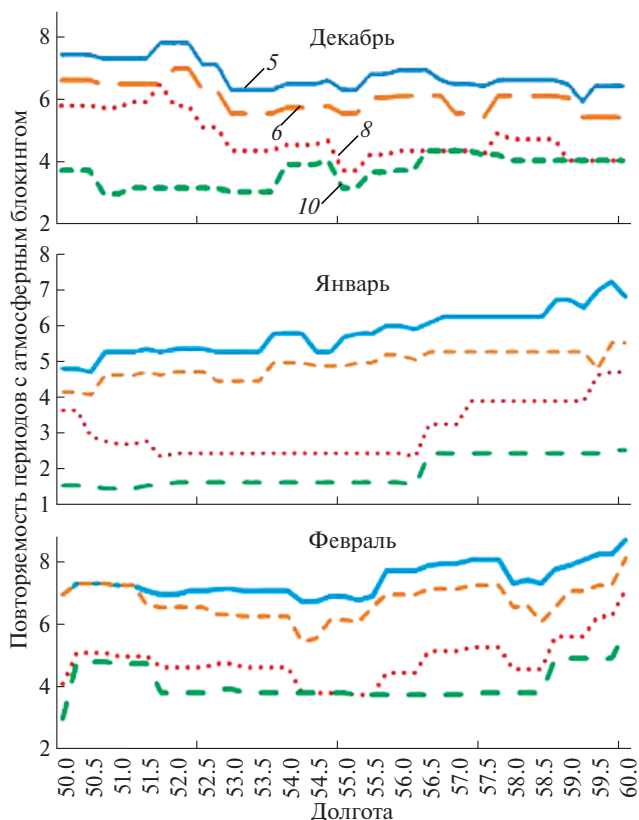


Рис. 3. Повторяемость периодов в днях (5, 6, 8 и 10) с атмосферными блокингами для параллели 45° с.ш. в зависимости от долготы P_{AB} (l): декабрь (а); январь (б); февраль (в).
Fig. 3. Frequency of periods in days (5, 6, 8 and 10) with atmospheric blockings for the 45° north latitude depending on longitude P_{AB} (l): December (a); January (b); February (v).

Как известно (Masato и др., 2014; Mokhov, Timazhev, 2019; Kononova, Lupo, 2020), следствием продолжительных АБ зимой оказывается понижение температур воздуха. В регионах западного Казахстана вклады процессов в изменения термического режима в зимние месяцы могут быть различны. Для выявления регионов, где влияние на термический режим, оказываемое АБ, является преобладающим, решена вторая задача (табл. 2).

В наше время климатическая норма в декабре практически такая же, как и в базовый период. В январе она по значениям меньше, т.е. температура воздуха в среднем выше. А в феврале её значения отличаются от первого периода в среднем на 1.5–2.0 °С, с наибольшими значениями на западном побережье Северного Каспия (см. табл. 2). Для 1959–2022 гг. характерна тенденция увеличения средней температуры воздуха за три зимних месяца: суровые зимы в 1968/69, 1976/77, 2002/03 и 2011/12 гг.; тёплые зимы — в 1965/66, 2015/16 и 2019/20 гг. Из ранее полученных выводов об изменении температуры воздуха именно в феврале было интересно рассмотреть их аномалии. Существенно низкие среднемесячные температуры были в суровые зимы (на 8 °С ниже климатической нормы). Для оценки толщины ледяного покрова привлечены данные по морским станциям Каспия (рис. 4).

За период исследований толщина льда значительно уменьшилась, особенно в западной акватории, — до 17 см. Особое внимание привлекает ст. Пешной, где толщина льда за последние 10 лет не превышает 40 см, а количество суровых зим

Таблица 2. Значения климатической нормы (°С) за периоды 1961–1990 и 1991–2020 гг.

Метеостанция		Декабрь		Январь		Февраль	
Название	Долгота	1961–1990	1991–2020	1961–1990	1991–2020	1961–1990	1991–2020
Атырау	51.53	–4.3	–4.2	–8.3	–6.4	–7.9	–5.6
Пешной	51.41	–4.1	–3.9	–8.2	–6.3	–8.1	–5.7
О. Кулалы	50.02	–0.5	0.0	–3.8	–1.9	–4.0	–1.3
Актау	51.10	1.2	1.4	–1.8	–0.3	–1.1	0.6
Форт-Шевченко	50.15	1.2	0.7	–2.0	–1.3	–1.8	–0.8
Ганюшкино	49.27	–2.8	–3.0	–6.7	–5.0	–6.4	–4.4
Уштаган	52.72	–4.6	–4.4	–8.7	–6.5	–8.2	–5.7
Карабау	52.92	–6.4	–6.5	–11.1	–8.8	–11.0	–8.1
Сагиз	54.88	–6.9	–7.5	–11.7	–10.0	–11.7	–9.4
Кульсары	54.10	–5.0	–5.6	–9.6	–7.9	–9.9	–7.0
Махамбет	51.35	–5.1	–5.2	–9.6	–7.5	–9.8	–6.7
Бейнеу	55.12	–3.5	–4.2	–7.9	–6.2	–7.7	–6.2
Кызан	52.67	–2.1	–2.1	–5.9	–3.9	–5.3	–3.1
Сам		–4.0	–5.1	–8.6	–7.3	–8.6	–6.2
Тушибек	51.94	–1.1	–1.2	–4.3	–2.9	–3.4	–1.9

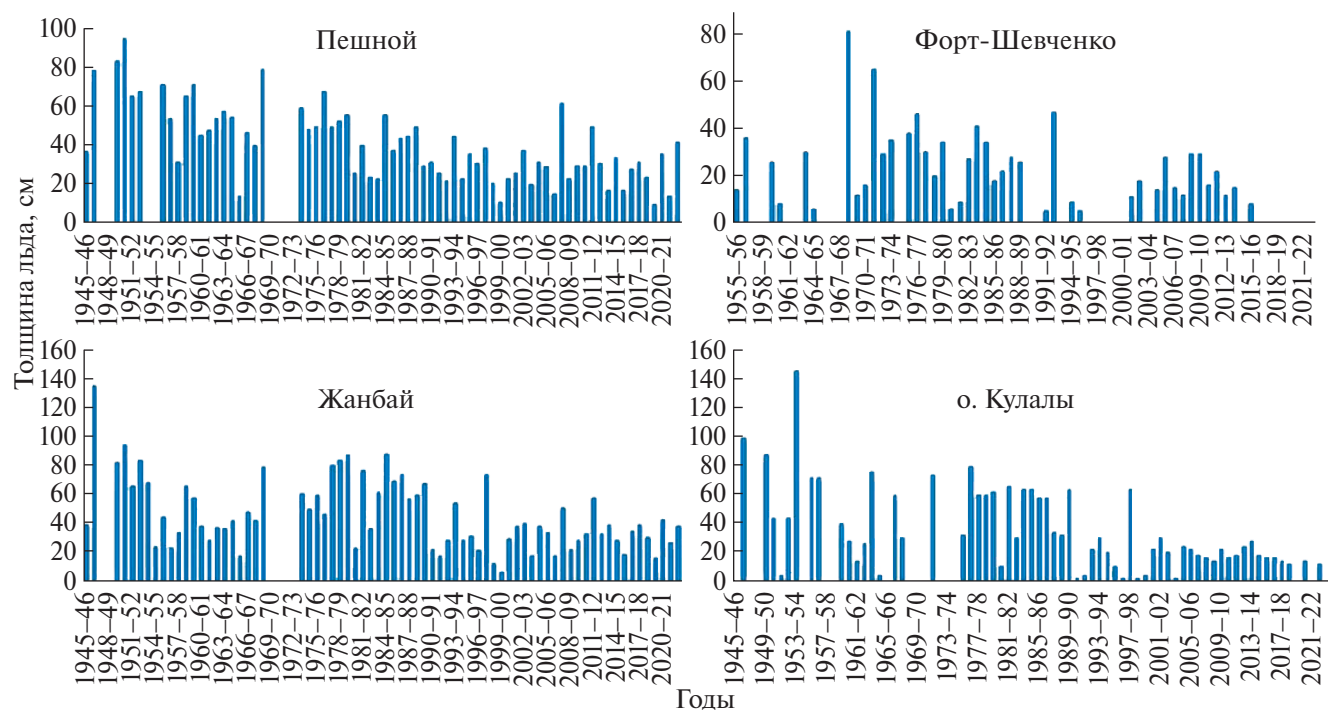


Рис. 4. Максимальная толщина льда за зимний период: Пешной (а); Жанбай (б); Форт-Шевченко (в); о. Кулалы (г).
Fig. 4. Maximum ice thickness in winter: Peshnoy (a); Zhanbay (b); Fort-Shevchenko (v); Kulaly Island (z).

значительно сократилось. На станциях Среднего Каспия практически не фиксируется ледяной покров, только приносной лёд, дрейфующий с акватории Северного Каспия.

Необходим также анализ сумм отрицательных температур воздуха как одного из главных факторов нарастания толщины льда. Для этого были посчитаны суммы по морским станциям за исследуемый период. На рис. 5 для примера приведены три станции: Пешной как репрезентативная станция Северного Каспия, где устойчивый ледовый покров образуется каждый год; станция на острове Кулалы, которая находится на границе Северного Среднего Каспия, где лёд устанавливается только в умеренные и суровые (очень суровые) зимы; Актау, расположенный в Среднем Каспии. Суммы отрицательных температур воздуха за зимний период уменьшаются повсеместно. Суммы менее 400°C относятся к мягким зимам, более 900°C — к суровым (по классификации суровости зим Бухарицина).

На рис. 6 показаны значения среднемесячной температуры воздуха в феврале 1969 и 2016 гг. (суровая и мягкая зимы). В 1969 г. такие значения значительно ниже. При рассмотрении количества дней с блокингом отмечено, что в феврале 1969 г. АБ были с 3-го по 10-е число и с 21-го по 25-е число, а в 2016 г. — с 12 по 19 февраля. Во время периода с блокингом температура воздуха опустилась до -33.7°C в Атырау (10 февраля), в течение 4 ночей

температура была ниже -29°C . В Форт-Шевченко 9 февраля температура опускалась до -25°C . В течение 4 ночей температура была ниже -20°C . В 2016 г. 13 февраля температуры были не столь значительны: в Атырау опустилась до -3.9°C , в Форт-Шевченко до -0.9°C . В 2003 г. в Атырау 20 февраля температура понизилась до -17.3°C , а в 2012 г. — до -27.3°C . На станции Форт-Шевченко в 2003 г. понижение было также значительным: до -14.5°C , в 2012 г. до -18.6°C .

При рассмотрении срочных данных (дискретностью 6 часов) замечено, что в периоды длительных блокингов понижается не только среднесуточная температура воздуха, но и минимальная. Кроме того, нарастание льда в эти периоды происходит интенсивнее. По данным о площади ледяного покрова, предоставляемым Научно-исследовательским центром «Планета», динамика изменения площади в суровый зимний период 2011/12 г. и в мягкий 2015/16 г. значительно отличается. В суровую зиму 2011/12 г. площадь ледяного покрова достигала 92 тыс. км² в феврале, что на 16 тыс. км² больше, чем в мягкую зиму. Важно обратить внимание на первую декаду февраля 2012 г., когда установился длительный блокинг и площадь стремительно увеличилась с 75 до 92 тыс. км². Толщина льда на станции Пешной достигла 50 см, о. Искусственный и в Лагани — 46 см, даже на о. Тюлений 24 см и о. Кулалы 9 см. А в 2016 г. блокинга более

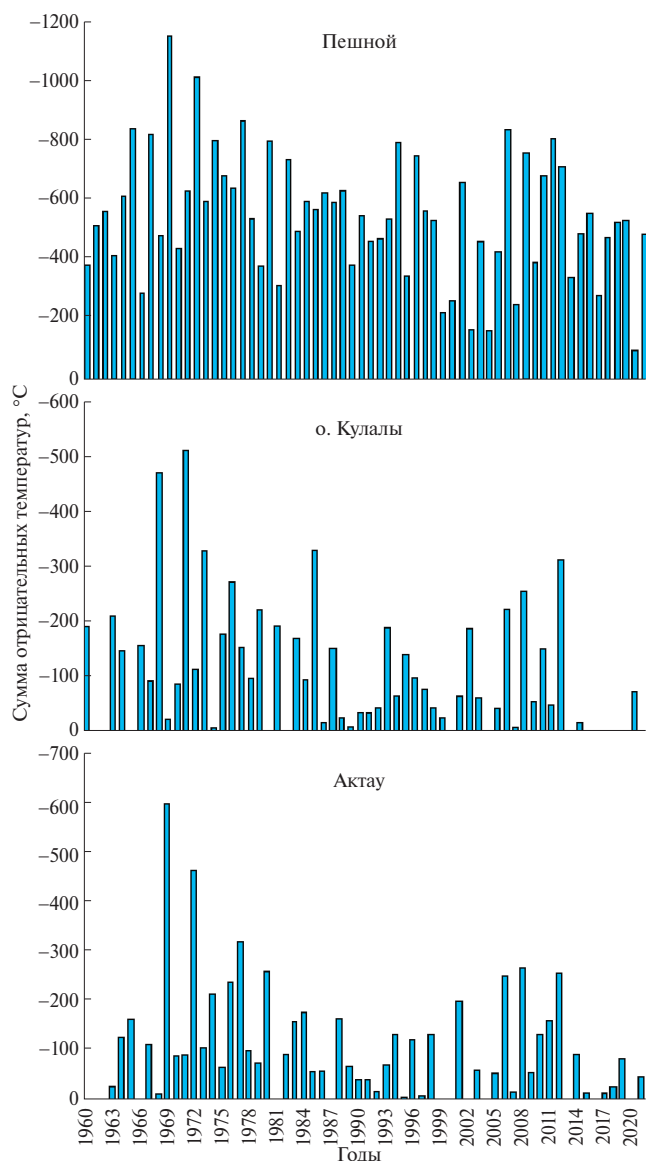


Рис. 5. Значения сумм отрицательных температур воздуха за зимний период: Пешной (а); о. Кулалы (б); Актау (в).

Fig. 5. The values of the sums of negative air temperatures for the winter period: Peshnoy (a); Kulaly Island (b); Aktau (c).

5 дней в третьей декаде января и в феврале не было, соответственно, и прирост льда составил 4 тыс. км².

В последние десятилетия в регионе сокращается количество суток с заморозками и с сильными морозами ниже -20°C . Существенно сокращается количество таких суток (на 2–3 суток за 10 лет) в западных регионах (Кожаметовы, 2016). Снижение среднесуточных температур при блокингах обусловлено синоптическими процессами, барико-циркуляционным полем. Влияние Сибирского антициклона проявляется слабее, активнее воздействует циклоническая деятельность с юга и запада, более ощутимо проявляется влияние самого Каспийского моря и выходов южно-каспийских циклонов, что воздействует на ледовый режим Северного Каспия.

Учитывая изложенный выше анализ распределения атмосферных блокингов продолжительностью более 5 суток, можно заметить, что значительные суммы отрицательных температур совпадают с периодами длительных блокингов. В годы продолжительных блокингов можно отметить увеличение толщины ледяного покрова. Мы предполагаем, что уменьшение продолжительности блокинга способствует увеличению среднемесячной температуры воздуха, незначительному накоплению сумм отрицательных температур и, соответственно, небольшому росту толщины льда. Затoki воздушных масс с запада и северо-запада могут приносить насыщенные влагой воздушные массы, что в свою очередь приводит к выпадению осадков смешанного типа в феврале. Из анализа продолжительности блокингов следует, что затoki воздушных масс с приходом стационарных антициклонов из районов Атлантики, Европы и Западной Сибири способствуют более благоприятным погодным условиям в сравнении с затоками с севера и востока в виде отрога Сибирского антициклона.

Установлено, что в Прикаспийском регионе в наше время уменьшаются суммы отрицательных температур, что согласуется с выводами (Бухарицин и др., 2014; Бухарицин, 2019) о потеплении здешнего климата; эти выводы согласуются и с выявленным уменьшением толщины льда. Чем

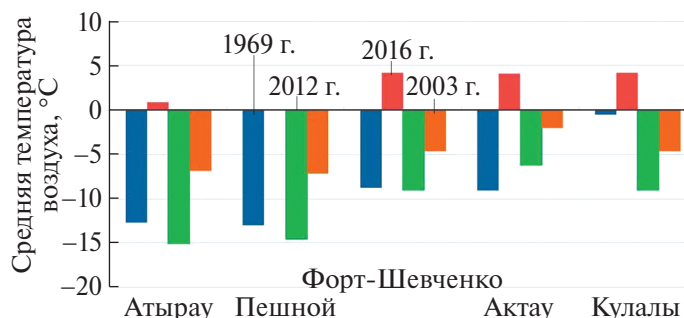


Рис. 6. Среднемесячная температура воздуха в феврале 1969, 2003, 2012 и 2016 гг.

Fig. 6. Average monthly air temperature in February 1969, 2003, 2012, and 2016.

больше длительность АБ, тем температурный фон ниже, а толщина льда больше.

Результаты решения второй задачи подтверждают применимость предложенной методики выявления АБ. Они свидетельствуют о том, что в зимние месяцы АБ оказывают наибольшее влияние на температурный режим Прикаспийского региона (где влияние Сибирского антициклона проявляется слабее). Последнее свидетельствует об адекватности для территории Казахстана не только полученных выводов и применённой методики, но также результатов реанализа ERA5, которые используются как фактический материал.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведённого исследования соответствуют существующим представлениям о влиянии АБ на метеосостояние в континентальных регионах северного умеренного климатического пояса (Бухарицин и др., 2014; Мохов, 2016; Копопова, Луро, 2020; Гинзбург и др., 2021). В работах (Luo, 2016; Antokhina et al., 2018; Tyrlis et al., 2019) представлены корреляционные карты между частотой блокирования и температурой воздуха в узлах сетки и сообщается, что корреляционное поле имеет дипольную диаграмму. Над территорией, соответствующей Казахстану, отмечается уменьшение температуры с увеличением частоты блокингов, что соответствует полученным выводам. В зимние месяцы влияние АБ на температурный режим различных частей территории Казахстана сильнее проявляется в её западном (Прикаспийском) регионе.

Как и следовало ожидать, влияние АБ на термический режим регионов Казахстана в зимние месяцы проявляется тем более ощутимо, чем дальше их территории расположены от центра Сибирского антициклона, который становится зависимым от структуры блокирования. Слабее всего это влияние проявляется на востоке и севере, а наиболее сильно — в Прикаспийском регионе. Степень соответствия между изменениями средних температур воздуха, оценённых за период АБ, а также $P_{\text{АБ}}$ тем выше, чем больше продолжительность АБ.

В настоящем исследовании впервые получены оценки повторяемости АБ разной продолжительности в зимние месяцы 1959–2022 гг. над всеми регионами Казахстана, что позволяет сопоставить риски возникновения сильных морозов и ряда других опасных метеорологических явлений, связанных с АБ. Для Прикаспийского региона установлено, что в настоящее время уменьшается повторяемость длительных атмосферных блокингов, которые возникают в зимние месяцы, что может служить существенной причиной быстрого потепления здешнего климата.

В суровые зимы суммы отрицательных температур на побережье Северного Каспия в периоды АБ могут достигать (и даже превышать) 70–90 °С,

что благоприятствует быстрому увеличению толщины ледяного покрова. Эти процессы могут быть наиболее опасны в ноябре — декабре, когда они способны приводить к образованию такой разновидности льда, как “резун”, опасного для лодок и маломерных судов. В мягкие (тёплые) зимы повторяемость АБ заметно меньше, чем в суровые, а суммы отрицательных температур воздуха в регионе по модулю значительно меньше. При этом ледяной покров Северного Каспия не образуется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием реанализа ERA5 оценена повторяемость атмосферных блокингов над Прикаспийским регионом в зимние месяцы 1959–2022 гг. Установлено, что при АБ температуры ниже, чем в период их отсутствия. Показано, что для Прикаспийского региона существует связь между уменьшением повторяемости атмосферных блокингов, сумм отрицательных температур воздуха на его побережьях и толщиной ледяного покрова соответствующих участков прибрежных акваторий. Чем больше суммарная длительность АБ за зимние месяцы, тем температурный фон в регионе ниже, а толщины льда в феврале больше.

Перспективные направления дальнейших исследований в рассматриваемом научном направлении связаны с выявлением на основе использования реанализа ERA5 тенденций изменения суммарных длительностей АБ в разных регионах территории Казахстана, характерных для зимних месяцев, которые проявились за весь период современного потепления климата. Результаты таких исследований могут применяться в транспортной логистике, сельскохозяйственной отрасли, а также коммунальном хозяйстве.

ЛИТЕРАТУРА

- Бухарицин П. И. Исследования каспийских льдов: ледовый режим Каспия, процессы льдообразования, характеристики ледяного покрова, методы расчёта и прогноза ледовых явлений // *Palmarium Academic Publishing*. 2019. 132 с.
- Бухарицин П. И., Болдырев Б. Ю., Новиков В. И. Комплексная система гидрометеорологического обеспечения безопасности мореплавания, портов и транспортных комплексов на Каспийском море. Комплекс мероприятий по гидрометеорологическому обеспечению безопасности мореплавания и работы портов // *Международный журнал экспериментального образования*. 2015. № 8—2. С. 190–192.
- Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — мировой центр данных // *Электронный ресурс*. <http://meteo.ru/> (Дата обращения: 28.01.2022).

- Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980–2020) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 277–291. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291>
- Данные и информация, предоставляемые службой Copernicus // Электронный ресурс. <https://www.copernicus.eu/en/access-data> (Дата обращения: 30.03.2023).
- Дзердзеевский Б. Л. Циркуляционные механизмы в атмосфере северного полушария в XX столетии // Материалы метеоролог. исследований. М.: АН СССР и Межвед. геофиз. комитет при Президиуме АН СССР, 1968. 240 с.
- Дзердзеевский Б. Л., Курганская В. М., Витвицкая З. М. Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов // Тр. н.-и. учреждений Глав. упр. гидрометеослужбы при Совете Министров СССР. Сер. 2. Синоптическая метеорология. Вып. 21. Л.: Гидрометиздат, 1946. 80 с.
- Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана // Электронный ресурс. <https://www.kazhydromet.kz/ru/klimat/ezhegodnyu-byulleten-monitoringa-sostoyaniya-i-izmeneniya-klimata-kazahstana> (Дата обращения: 30.03.2023).
- Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
- Кожухметов П. Ж., Кожухметова Э. П. Экстремальные метеорологические явления в Казахстане в условиях глобального потепления климата // Гидрометеорология и экология. 2016. № 2 (81). С. 7–19.
- Лобанов В. А., Наурызбаева Ж. К. Влияние изменения климата на ледовый режим Северного Каспия. СПб.: РГГМУ, 2021. 140 с. http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_f9fc95690a374fa38903ed7cdd3be28b.pdf
- Мохов И. И. Экстремальные атмосферные и гидрологические явления в российских регионах: связь с тихоокеанской десятилетней осцилляцией // Доклады Академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 2. С. 183–188.
- Мохов И. И., Акперов М. Г., Прокофьева М. А., Тимажеев А. В., Лупо А. Р., Ле Трет Э. Блокинг в северном полушарии и евроатлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам // Доклады Академии наук. 2013. Т. 449. № 5. С. 1–5.
- Мохов И. И., Тимажеев А. В. Интегральный индекс активности атмосферных блокирований в северном полушарии в последние десятилетия // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 6. С. 638–647.
- Шакина Н. П., Иванова А. Р. Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирования // Метеорология и гидрология. 2010. № 11. С. 5–18.
- Antokhina O., Antokhin P., Devyatova E., Martynova Y. 2004–2016 Wintertime Atmospheric Blocking Events over Western Siberia and Their Effect on Surface Temperature Anomalies // Atmosphere. 2018. № 9. 72 p. <https://doi.org/10.3390/atmos902007>
- Bacer S., Jomaa F., Beaumet J., Gallée H., Le Bouëdec E., Ménégot M., Staquet C. Impact of climate change on wintertime European atmospheric blocking // Weather and Climate Dynamics. 2021. <https://doi.org/10.5194/wcd-2021-47>
- Barriopedro D., García-Herrera R., Lupo A. R., Hernández E. A Climatology of Northern Hemisphere Blocking // Journ. of Climate. 2006. № 19. P. 1042–1063. <https://doi.org/10.1175/JCLI3678.1>
- Davini D., D'Andrea F. From CMIP3 to CMIP6: Northern Hemisphere Atmospheric Blocking Simulation in Present and Future Climate // Journ. of Climate. 2020. V. 33. Is. 23. P. 10021–10038. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0862.1>, 2020
- Drouard M., Woollings T. Contrasting Mechanisms of Summer Blocking Over Western Eurasia // Geophysical Research Letters. 2018. V. 45. Is. 21. P. 12040–12048. <https://doi.org/10.1029/2018GL079894>
- IMERG: Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM. NASA // Электронный ресурс. <https://gpm.nasa.gov/data/IMERG> (Дата обращения: 30.03.2023).
- Hersbach H., Dee D. ERA5 reanalysis is in production // ECMWF Newsletter. 2016. V. 147. P. 7.
- Hoffmann L., Günther G., Li D., Stein O. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations // Atm. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 3097–3124.
- Kholoptsev A. V., Naurozbayeva Zh. K. The Northern Caspian Levels and Its Ice Regime Changing During Current Climate Warming // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. Springer Proc. in Earth and Environmental Sciences. 2022 P. 133–146. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99504-1_15
- Kholoptsev A. V., Naurozbayeva Zh. K. Estimates of the Periodicity of Atmospheric Blockings Over Kazakhstan in the Spring–Summer Time According to Era₅ Reanalysis Data // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. Springer Proc. in Earth and Environmental Sciences. 2022. P. 19–29. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25962-3_2
- Kononova N. K., Lupo A. R. Changes in the Dynamics of the Northern Hemisphere Atmospheric Circulation and the Relationship to Surface Temperature in the 20th and 21st Centuries // Atmosphere. 2020. V. 11 (3). 255 p. <https://doi.org/10.3390/atmos11030255>

- Luo D., Xiao Y., Yao Y., Dai A., Simmonds I., Franzke C. L. E. Impact of Ural Blocking on Winter Warm Arctic–Cold Eurasian Anomalies. Part I: Blocking-Induced Amplification // *Journ. of Climate*. 2016. V. 29. P. 3925–3947. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0611.1>
- Masato G., Woollings T., Hoskins B. J. Structure and impact of atmospheric blocking over the Euro-Atlantic region in present-day and future simulations // *Geophys. Research Letters*. 2014. V. 41. P. 1051–1058. <https://doi.org/10.1002/2013GL058570>
- Mokhov I., Timazhev A. Atmospheric Blocking and Changes in its Frequency in the 21st Century Simulated with the Ensemble of Climate Models // *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019. P. 369–377. <https://doi.org/10.3103/S1068373919060013>
- Tyrlis E., Manzini E., Bader J., Ukita J., Nakamura H., Matei D. Ural Blocking Driving Extreme Arctic Sea Ice Loss, Cold Eurasia, and Stratospheric Vortex Weakening in Autumn and Early Winter 2016–2017 // *Journ. of Geophys. Research: Atmospheres*. 2019. V. 124. P. 11313–11329. <https://doi.org/10.1029/2019jd031085>
- Naurozbayeva Z., Baubekova A., Kvasha A., Lobanov V., Kløve B., Haghghi A. T. Determining factors for changes in the ice regime of the Caspian Sea // *Intern. Journ. of Water Resources Development*. 2023. <https://doi.org/10.1080/07900627.2023.2231099>

Citation: Kholoptsev A. V., Naurozbayeva Zh. K. Estimation of the repeatability of atmospheric blockings over the Caspian region in the winter months of 1959–2022 and their impact on the ice regime of the Northern Caspian. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (1): 121–132. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673424010094

Determination of occurrence of atmospheric blockings over the Caspian Sea region in winters of 1959–2022, and influence of them on the ice regime of the Northern Caspian Sea

A. V. Kholoptsev^a, Zh. K. Naurozbayeva^{b#}

^a *Sevastopol Division of the N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russia*

^b *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

[#] *e-mail: naurozbaeva.zhanar@mail.ru*

Received July 13, 2023; revised October 19, 2023; accepted March 31, 2024

The ice regime of the Caspian Sea has pronounced influence on the heat and moisture exchange of the reservoir with the atmosphere, the state of the ecosystem, as well as human marine activities, including shipping, fishing, construction of hydraulic structures, etc. Consequently, the development of existing ideas about the causes of changes in the characteristics of the ice regime of such water bodies is actual and socially significant problem of limnology, hydrometeorology, ecology, and navigation. This study was aimed at determination the frequency of occurrence of atmospheric blockings over the Caspian region with standings longer 5 days in winter period of 1959–2022, and investigation of influence of them on the ice regime in the Northern area of the Sea. The following information and data were used: changes in hourly mean values of atmospheric pressure at the sea level, geopotential of isobaric surfaces 850, 500 and 300 hPa, presented in the ERA5 reanalysis; and observational data on air temperature and ice cover from hydrometeorological stations located in the Caspian region of Kazakhstan and Russia. It has been established that in the winter during a long standing of atmospheric blockings the mean daily air temperatures noticeably drop. The values of all the studied characteristics of every atmospheric blocking which occurred in 1959–2022 were estimated as well the influence of them on the ice regime in the North of the Caspian Sea was analyzed. The relationship between a decrease in the frequency of atmospheric blockings (AB), sums of negative air temperatures on its coasts, and the ice cover thickness in the corresponding areas of coastal waters has been revealed in the region. The longer the total AB duration, the lower is the air temperature, and the ice thickness in February is larger.

Keywords: Caspian Sea, atmospheric blockings, atmospheric pressure, reanalysis, air temperature, sum of negative air temperatures, ice thickness, ice regime

REFERENCES

- Buharicin P. I.* Exploration of the Caspian ice: The ice regime of the Caspian Sea, the processes of ice formation characteristics of the ice cover methods of calculation and prediction of ice phenomena. Palmarium Academic Publishing. 2019: 122 p. [In Russian].
- Buharicin P. I., Boldyrev B. Ju., Novikov V. I.* Integrated system of hydrometeorological safety of navigation, ports and transport complexes on the Caspian Sea. A set of measures for hydrometeorological safety of navigation and operation of ports. *Mezhdunarodnyj zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*. International Journ. of Experimental Education. 2015, 8–2: 190–192 [In Russian].
- All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information — World Data Center. Retrieved from: <http://meteo.ru/> (Last access: 28 January 2022) [In Russian].
- Ginzburg A. I., Kostyanov A. G., Serykh I. V., Lebedev S. A.* Climatic changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980–2020). Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2021, 18 (5): 277–291. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291> [In Russian].
- Data and information provided by the Copernicus service. Retrieved from: <https://www.copernicus.eu/en/access-data> (Last access: 30 March 2023) [In Russian].
- Dzardzeevskij B. L.* Circulation mechanisms in the atmosphere of the northern hemisphere in the XX century. *Materialy meteorologicheskikh issledovanij*. Materials of Meteorological Studies. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR and Mezhd. Geophys. Committee under the Presidium of the Academy of Sciences of the USSR, 1968: 240 p. [In Russian].
- Dzardzeevskij B. L., Kurganskaja V. M., Vitvickaja Z. M.* Typization of circulation mechanisms in the northern hemisphere and characteristics of synoptic seasons. *Trudy nauch. — issled. uchrezhdenij Glavnogo upravleniya gidromet. sluzhby pri Sovete Ministrov SSSR. Ser. 2. Sinopticheskaya meteorologiya. Vyp. 21*. Proc. of the Scientific and Technical institutions of the Main Directorate of the Hydrometeorological Service under the Council of Ministers of the USSR. Ser. 2. Synoptic meteorology. Issue 21. *Gidrometizdat*. Science institute mat. Chap. ex. hydrometeorol. service under the Council of Ministers of the USSR. Ser. 2. Synoptic meteorology. Issue. 21. Leningrad: Hydrometizdat, 1946: 80 p. [In Russian].
- Annual bulletin of monitoring the state and climate change in Kazakhstan. Retrieved from: <https://www.kazhydromet.kz/ru/klimat/ezhegodnyy-byulleten-monitoringa-sostoyaniya-i-izmeneniya-klimata-kazahstana> (Last access: 30 March 2023) [In Russian].
- Zaks L.* *Statisticheskoe ocenivanie*. Statistical estimation. Moscow: Statistics, 1976: 598 p. [In Russian].
- Kozhahmetov P. Zh., Kozhahmetova Je. P.* Extreme meteorological phenomena in Kazakhstan in the context of global climate warming. *Nauchno-tehnicheskij zhurnal "Gidrometeorologiya i ekologiya"*. Hydrometeorology and Ecology. 2016, 2 (81): 7–19 [In Russian].
- Lobanov V. A., Naurozbaeva Zh. K.* *Vlijanie izmeneniya klimata na ledovyy rezhim Severnogo Kaspija*. The impact of climate change on the ice regime of the Northern Caspian. Monograph. Saint Petersburg: RGGMU, 2021: 140 p. http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_f9fc95690a374fa38903ed7cdd3be28b.pdf
- Mohov I. I.* Extreme Atmospheric and Hydrological Phenomena in the Russian Regions: Connection with the Pacific Decadal Oscillation. *Doklady Rossijskoj Akademii nauk. Nauki o Zemle*. Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth sciences. 2021, 2 (500): 183–188 [In Russian].
- Mohov I. I., Akperov M. G., Prokof'eva M. A., Timazhev A. V., Lupo A. R., Le Tret Je.* Blockings in the northern hemisphere and the Euro-Atlantic region: estimates of changes based on reanalysis data and model calculations. *Doklady Rossijskoj Akademii nauk*. Reports of the Russian Academy of Sciences. 2013, 5 (449): 1–5 [In Russian].
- Mohov I. I., Timazhev A. V.* Integral index of atmospheric blocking activity in the Northern Hemisphere in recent decades. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. News of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and ocean. 2022, 6 (58): 638–647 [In Russian].
- Shakina N. P., Ivanova A. R.* Blocking anticyclones: current state of research and forecasting. *Meteorologija i gidrologija*. Meteorology and Hydrology. 2010, 11: 5–18 [In Russian].
- Antokhina O., Antokhin P., Devyatova E., Martynova Y.* 2004–2016 Wintertime Atmospheric Blocking Events over Western Siberia and Their Effect on Surface Temperature Anomalies. *Atmosphere*. 2018, 9: 72 p. <https://doi.org/10.3390/atmos902007>
- Bacer S., Jomaa F., Beaumet J., Gallée H., Le Bouëdec E., Ménégos M., Staquet C.* Impact of climate change on wintertime European atmospheric blocking. *Weather and Climate Dynamics*. 2021. <https://doi.org/10.5194/wcd-2021-47>
- Barriopedro D., García-Herrera R., Lupo A. R., Hernández E.* A Climatology of Northern Hemisphere Blocking. *Journ. of Climate*. 2006, 19: 1042–1063. <https://doi.org/10.1175/JCLI3678.1>
- Davini D., D'Andrea F.* From CMIP3 to CMIP6: Northern Hemisphere Atmospheric Blocking Simulation in Present and Future Climate. *Journ. of Climate*. 2020, 33 (23): 10021–10038. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0862.1>, 2020
- Drouard M., Woollings T.* Contrasting Mechanisms of Summer Blockings Over Western Eurasia // *Geophys. Research Letters*. 2018, 45 (21): 12040–12048. <https://doi.org/10.1029/2018GL079894>
- IMERG: Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM. NASA Retrieved from: <https://gpm.nasa.gov/data/imerg> (Last access: 30 March 2023).

- Hersbach H., Dee D.* ERA5 reanalysis is in production. ECMWF Newsletter. 2016, 147: 7.
- Hoffmann L., Günther G., Li D., Stein O.* From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations. *Atm. Chem. Phys.* 2019, 19: 3097–3124.
- Kholoptsev A. V., Naurozbayeva Zh. K.* The Northern Caspian Levels and Its Ice Regime Changing During Current Climate Warming. *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. Springer Proc. in Earth and Environmental Sciences.* 2022: 133–146. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99504-1_15
- Kholoptsev A. V., Naurozbayeva Zh. K.* Estimates of the Periodicity of Atmospheric Blockings Over Kazakhstan in the Spring–Summer Time According to Era 5 Reanalysis Data. *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. Springer Proc. in Earth and Environmental Sciences.* 2022: 19–29. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25962-3_2
- Kononova N. K., Lupo A. R.* Changes in the Dynamics of the Northern Hemisphere Atmospheric Circulation and the Relationship to Surface Temperature in the 20th and 21st Centuries. *Atmosphere.* 2020, 11 (3): 255 p. <https://doi.org/10.3390/atmos11030255>
- Luo D., Xiao Y., Yao Y., Dai A., Simmonds I., Franzke C. L.E.* Impact of Ural Blocking on Winter Warm Arctic–Cold Eurasian Anomalies. Part I: Blocking-Induced Amplification. *Journ. of Climate.* 2016, 29: 3925–3947. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0611.1>
- Masato G., Woollings T., Hoskins B. J.* Structure and impact of atmospheric blocking over the Euro-Atlantic region in present-day and future simulations. *Geophysical Research Letters.* 2014, 41: 1051–1058. <https://doi.org/10.1002/2013GL058570>
- Mokhov I., Timazhev A.* Atmospheric Blocking and Changes in its Frequency in the 21st Century Simulated with the Ensemble of Climate Models. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2019: 369–377. <https://doi.org/10.3103/S1068373919060013>.
- Tyrlis E., Manzini E., Bader J., Ukita J., Nakamura H., Matei D.* Ural Blocking Driving Extreme Arctic Sea Ice Loss, Cold Eurasia, and Stratospheric Vortex Weakening in Autumn and Early Winter 2016–2017. *Journ. of Geophys. Research: Atmospheres* 2019, 124: 11313–11329. <https://doi.org/10.1029/2019jd031085>
- Naurozbayeva Z., Baubekova A., Kvasha A., Lobanov V., Kløve B., Haghghi A. T.* Determining factors for changes in the ice regime of the Caspian Sea. *Intern. Journ. of Water Resources Development.* 2023. <https://doi.org/10.1080/07900627.2023.2231099>