

УДК [551.467:551.583:001.891.573](262.81) doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-75-95

О возможных изменениях толщины морского льда в Каспийском море в текущем столетии

В.А. Лобанов, Ж.К. Наурозбаева¹

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
lobanov@EL6309.spb.edu

Рассматриваются возможные изменения толщины морского льда в Каспийском море в текущем столетии на основе моделей климата и экстраполяции трендов натуральных данных. С этой целью построены эмпирические зависимости между максимальной толщиной льда и температурой зимнего сезона, выбраны наиболее подходящие модели климата и осуществлена корректировка сценарных температур воздуха на локальные климатические особенности. Установлено, что зимы к концу XXI в. перейдут в основном в разряд мягких и очень мягких, устойчивый ледовый покров сохранится лишь в северо-восточной части моря. Повторяемость безледных зим увеличится в 8–10 раз, граница открытой воды сместится на север и будет проходить по линии о. Тюлений — Форт-Шевченко.

Ключевые слова: Каспийское море, характеристики ледового режима, сценарии и модели климата, уменьшение толщины льда, повторяемость безледных зим.

Caspian seas ice thickness possible changes in the current century

V.A. Lobanov, Zh. K. Naurozbayeva

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia,
lobanov@EL6309.spb.edu

The Caspian Sea is the southern sea with annual ice cover. Climate change significantly affects the environmental characteristics, including ice regime of seas and rivers. On the basis of previously published publications, the conclusion is made about the decrease in the ice thickness and the increase in ice-free winters. The greatest decrease in ice thickness is observed in the northeast, by 20–28 cm on average, the smallest one being in the northwest, by 5–15 cm on average. Article estimates future characteristics of the ice regime, such as the maximum ice thickness, its distribution over the water area, and the frequency of ice-free winters on the base of climate scenarios and models. For this purpose, empirical relationships between the maximum ice thickness and the winter season temperature have been constructed. According to empirical relationships, scenario maximum ice thickness decreases by 10–15 cm. Using the INM and CNRM models, there is no ice by the middle of the century. At the same time, the Hadley model reduces the maximum ice thickness by only 1–4 cm. For the northeastern part of the sea, according to the INM and CNRM models, the decrease is up to 16 cm and only 3–5 cm according to the Hadley model. The boundary between ice and ice-free waters shifts significantly to the north. The winters are shown to be warmer until the end of the 21st century, ice cover being present only in the northeastern part of the sea. However, the frequency of ice-free winters will increase 8–10 times, the divide line between ice and ice-free waters shifting northwards and passing along the line of Tuleniy island – Fort–Shevchenko.

Keywords: Caspian Sea, ice regime characteristics, climate scenarios and models, decrease in ice thickness, frequency of ice-free winters.

For citation: V.A. Lobanov, Zh. K. Naurozbayeva. Caspian seas ice thickness possible changes in the current century. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Journal of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2021. 62: 75—95. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-75-95

Введение

Современное потепление климата начинает уже сегодня существенно влиять на многие характеристики окружающей среды, включая ледовый режим морей и рек. Мониторинг комплексного изменения всех параметров климатической системы осуществляется на протяжении последних 25 лет. Его результаты представлены в виде ежегодных заявлений о состоянии глобального климата ВМО и периодически выпускаемых оценочных докладов МГЭИК по изменению климата всей планеты и аналогичных докладов для территории России и Казахстана [1—4].

В предыдущей работе авторов [5] показано, что максимальная толщина льда в 1980-х годах уменьшилась на всем Северном Каспии, но в разной степени. Наибольшие уменьшения в среднем на 20—28 см имели место на северо-востоке, наименьшие в 5—15 см — на северо-западе, а на станциях центральной части уменьшения составили 13—17 см, что уже приводит здесь к отсутствию устойчивого льда в течение всей зимы. Также почти на месяц сократился и период ледостава, дата его начала стала позже, а окончания — раньше. Даже по непродолжительным спутниковым наблюдениям за последние 13 лет выявлено уменьшение площади льда в январе, феврале на 30 %, а в марте даже на 70 %, что приводит к более раннему освобождению поверхности моря ото льда.

В средней части Каспия устойчивого льда в последние годы совсем не наблюдается, граница кромки льда сдвинулась на север. Причиной этого является уменьшение суммы отрицательных температур, как основного фактора ледового режима. Значения сумм отрицательных температур уменьшились до 40 % в северо-западной и почти до 50 % в центральной части моря. Повторяемость ветров западного и южного направлений увеличилась в 1,5 раза, что обуславливает более частый вынос теплых воздушных масс с Черного моря и южной части Каспия, благоприятствует быстрому очищению моря ото льда в марте и сдвигке дат появления первых ледовых явлений в ноябре. Максимальные скорости ветра более 20 м/с и тем более 25 м/с уже не наблюдаются. Исследование макроциркуляционных процессов, как основных показателей динамики воздушных масс, позволило установить [6], что в конце 1980-х годов произошло резкое усиление в 1,5 раза западного переноса (тип W) в зимний период и ослабление, примерно такое же восточного переноса (тип E).

Целью данной работы является оценка возможных изменений толщины морского льда в текущем столетии на основе климатических моделей из проекта CMIP5 и экстраполяции трендов по фактическим данным. Для достижения поставленной цели построены эмпирические зависимости между максимальной толщиной льда и температурой воздуха, выбраны наиболее эффективные модели

климата с последующей корректировкой сценарных температур воздуха на локальные климатические особенности.

Изучением факторов, влияющих на естественное нарастание ледового покрова, занимались многие известные исследователи: И.Б. Шпиндлер, Н.Н. Горский, Р.Л. Хейфец, К.К. Гюль, С.И. Кан, И.А. Бенашвили, Е.С. Каракаш, Ф.И. Валлер, П.И. Бухарицин и многие другие [7—10]. Известные прогностические методики расчета толщины льда основываются, как правило, на сумме отрицательных температур за зимний период, которые в свою очередь связаны с типом зимы. Существуют различные эмпирические и теоретические формулы для расчета толщины льда по температуре воздуха. Широкое применение нашли формулы, предложенные Н.Н. Зубовым, где учитывается сумма градуса-дней мороза; формула А.П. Колесникова, где добавляется учет снежного покрова на льду; формула Е.М. Саускана для расчета толщины льда в южных морях [11, 12]. Современные методики долгосрочных прогнозов ледовых условий для европейских морей России были предложены И.О. Думанской. Эффективность метода при расчете по зависимому ряду максимальной толщины припайного льда для Каспийского моря составила 28 %. Метод был апробирован в Гидрометцентре России в 2008—2010 гг., но не дал положительных результатов, так как статистические связи оказались весьма неустойчивы. Поэтому необходимо их обновление и учет смены макроциркуляционных эпох [13, 14].

Известны также методики прогнозирования толщины льда на различных замкнутых водоемах, в том числе искусственных, например, водохранилищах. Так как нарастание льда происходит нелинейно, скорость его нарастания различна в начале и в конце зимнего периода. В работах К.Д. Миковой и В.Г. Калинина [15] рассматривается прогноз с заблаговременностью до 5 суток средней толщины льда, имеющий оправдываемость до 85—95 %. В работах М.Д. Андреева рассматривался метод среднесрочного до 10 суток прогноза появления льда и очищения моря ото льда для неарктических морей России [16]. Важен прогноз не только основных параметров ледового режима (дата появления льда, дата очищения, дрейф, положение кромки льда и пр.), но и торосистости, взломов припая, заторов и других сложных ледовых явлений, таких как дрейфующий подвижный лед, гряды торосов, стамухи и тонкий лед «резун» [7, 10, 17].

Если краткосрочные прогнозы ледового режима Каспийского моря достаточно хорошо разработаны, то методы его будущих оценок на перспективу до нескольких десятилетий являются дискуссионными и обычно основаны на сценариях и моделях климата, на экстраполяции одного или нескольких факторов (солнечной активности, парниковых газов, индексов циркуляции атмосферы и т. д.) или на применении палеоаналогов [1, 2, 3, 7]. В настоящей работе использованы результаты сценарных оценок будущих температур воздуха в Прикаспийском регионе в виде 30-летних средних за 3 последовательных периода XXI в., полученные по физико-математическим моделям климата. Дополнительно осуществлялся прогноз толщины морского льда на основе экстраполяции статистических трендов фактических значений толщины льда и эмпирических зависимостей между

максимальной толщиной льда и сценарными оценками зимней температуры. Полученные прогностические оценки сравнивались со сценарными оценками, рассчитанными по климатическим моделям [5].

Исходная информация и метод исследования

Исходными данными послужили: температура воздуха, осадки, скорость и направление ветра, а также параметры ледового режима 8 морских гидрологических пунктов акватории Каспийского моря и речного пункта в г. Астрахань (рис. 1).

На основе многолетних данных наблюдений были рассчитаны эмпирические зависимости максимальной толщины льда на каждой гидрологической станции от суммы отрицательных температур за 3 зимних месяца, а также от средних температур за каждый зимний месяц. Результаты представлены в табл. 1 для линейного уравнения $H_{\max} = b_1 \Sigma t + b_0$ и в виде формул (1)—(3), описывающих зависимость H_{\max} от температур каждого зимнего месяца.

Таблица 1

Эмпирические зависимости максимальной толщины льда
от суммы отрицательных температур воздуха

Empirical dependences of the maximum ice thickness
on the sum air temperatures of winter season

Станция / пост	b_0	$b_1 \Sigma t$	R^2	n	Период
Атырау	2,28	-0,08	0,69	72	1944—2015
Астрахань	2,9	-0,09	0,62	72	1944—2015
о. Тюлений	8,2	-0,12	0,61	18	1959—2015
Жанбай	4,76	-0,07	0,27	65	1945—2017
Пешной	2,28	-0,07	0,53	68	1929—2017
о. Кулалы	5,8	-0,08	0,71	29	1941—2017
Лагань	4,5	-0,09	0,38	34	1959—2016
Форт-Шевченко	5,8	-0,17	0,86	30	1982—2016

$$\text{Атырау } H_{\max} = -2,4T_{12} - 2,3T_1 - 1,1T_2 + 12,0, \quad R^2 = 0,71, \quad n = 71, \quad (1)$$

$$(0,15) \quad (0,50) \quad (0,06)$$

$$\text{Астрахань } H_{\max} = -0,6T_{12} - 1,9T_1 - 1,6T_2 + 15,8, \quad R^2 = 0,67, \quad n = 72, \quad (2)$$

$$(0,01) \quad (0,48) \quad (0,18)$$

$$\text{О. Тюлений } H_{\max} = -1,8T_{12} - 1,1T_1 - 2,2T_2 + 14,1, \quad R^2 = 0,67, \quad n = 18, \quad (3)$$

$$(0,09) \quad (0,21) \quad (0,37)$$

где H_{\max} — максимальная толщина льда в см; Σt — сумма отрицательных температур за 3 зимних месяца в °С; T_{12} , T_1 , T_2 — среднемесячные температуры декабря, января и февраля в °С; R^2 — коэффициент детерминации, в круглых скобках под



Рис. 1. Расположение станций и постов в Прикаспийском регионе.

Fig. 1. Location of stations and posts in the Caspian region.

уравнением приведены вклады каждого фактора в долях R^2 [18]; n — период наблюдений в годах. Аналогичные зависимости были рассчитаны для всех морских пунктов наблюдений.

Как следует из анализа рассчитанных зависимостей, в большинстве случаев коэффициенты детерминации в них равны 0,6—0,7, хотя есть уравнения с невысокими коэффициентами 0,27 и 0,38. Стандартные погрешности во всех случаях меньше среднего квадратического отклонения временных рядов и варьируют от 6—7 см в средней части Каспия до 20 см в северо-восточной части, где максимальная толщина льда достигает 80—90 см.

Можно отметить, что уравнения с тремя факторами в виде средних температур за каждый из трех зимних месяцев иногда даже лучше, чем от одного фактора в виде их суммы и наибольший вклад в этих зависимостях принадлежит температуре января, иногда — февраля.

Замена такого основного фактора максимальной толщины льда как сумма отрицательных температур за весь зимний период на температуру трех зимних месяцев связана с тем, что климатические сценарии разработаны только для среднемесячных температур воздуха. Однако эта замена сильно не повлияла на точность уравнений, т. к. коэффициенты детерминации уменьшились всего на 0,1—0,2, что практически не существенно.

Для продолжительных рядов наблюдений ($n = 60...70$) была осуществлена оценка устойчивости коэффициентов уравнений регрессии и R^2 . Для этой цели были рассчитаны уравнения за первую половину ряда, вторую и для центральной

части ряда. В результате для Атырау получено, что R^2 изменяется от 0,60 до 0,72, а коэффициент уравнения регрессии b_1 меняется от 0,07 до 0,08 при значении за многолетний период $b_1 = 0,08$, для Астрахани R^2 изменяется от 0,47 до 0,61, а коэффициенты b_1 — менее, чем на 0,01. Для Пешного R^2 изменяется от 0,21 до 0,52, а b_1 уже на 0,03. Основной вывод из оценки устойчивости коэффициентов состоит в том, что уравнения за последнюю половину ряда несколько хуже, чем за первую, т. е. уменьшились средние значения максимальных толщин льда.

Полученные уравнения для станций на акватории моря и табл. 1 являются основой для расчета будущих проекций максимальных толщин льда на основе проекций среднемесячных температур воздуха, рассчитанных по моделям климата и сценариям. Метод исследования при этом включал в себя следующие основные шаги:

- выбор наиболее подходящей модели климата для рассматриваемого региона и особенно для пунктов ведущих наблюдения за максимальной толщиной льда на основе сопоставления данных и результатов моделирования по климатическим моделям за совместный исторический период;

- расчет и корректировка средних многолетних температур воздуха за будущие 3 периода XXI в. (2011—2040, 2041—2070 и 2071—2100 гг.) по выбранной климатической модели и для разных климатических сценариев;

- получение пространственных распределений сценарных сумм отрицательных температур за зимний период и сопоставление с современным их распределением;

- расчет средних многолетних максимальных толщин льда по зависимостям (1)—(3), табл. 1, на основе средних многолетних сценарных температур;

- экстраполяция трендов по фактическим данным о толщине льда и прогнозным значениям температуры воздуха;

- получение пространственных распределений сценарных максимальных толщин льда и сопоставление с современным их распределением.

Выбор эффективной климатической модели

В настоящее время для моделирования климата во всем мире разработано около 50 физико-математических моделей, которые включают в себя не только атмосферу и океан, но и остальные составляющие климатической системы, а также учитывают химический состав атмосферы, взаимодействия между стратосферой и атмосферой и многие другие особенности (Earth System Models — ESM) [19, 20]. Благодаря международному проекту по сравнению климатических моделей CMIP3 и его продолжению в виде проекта CMIP5, результаты экспериментов по моделям климата стали унифицированными и находятся в свободном доступе в интернете [20, 21, 22, 23, 24]. В настоящей работе были использованы результаты экспериментов по следующим 10 климатическим моделям, находящиеся в свободном доступе в Интернете:

- 1) модель пекинского климатического центра, Китай (Beijing Climate Centre, China, BCC Model);

2) модель канадского центра моделирования и анализа климата с разрешением T63 (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, CanESM2, CGCM3,1 Model, T63 resolution);

3) модель национального центра атмосферных исследований CCSM3,0, США (National Center for Atmospheric Research, CCSM3,0);

4) модель центра метеорологических национальных исследований, Франция (Meteo-France, Centre National de Recherche Meteorologiques, CNRM, CM3 Model);

5) модель центра атмосферных исследований Австралии версии Mk3,5 (CSIRO Atmospheric Research, Australia);

6) модель HadCM3 Хэдли центра прогноза климата, Великобритания (Hadley Centre for Climate Prediction, Met Office, UK, HadCM3 Model);

7) модель института вычислительной математики РАН, Россия (Institute for Numerical Mathematics, Russia, INM CM4,0 Model);

8) модель института Макса Планка, Германия (Max Planck Institute for Meteorology, Germany, ECHAM5 / MPI OM);

9) японская модель MIROC3,2 с высоким разрешением (CCSR/NIES/FRCGC, Japan, MIROC3,2, high resolution), MIROCESM;

10) французская модель CM4 V1 института Лапласа (IPSL/LMD/LSCE, France, CM4 V1).

Для каждой из этих моделей в интернете представлены результаты двух основных экспериментов: данные моделирования за исторический период с 1850 по 2005 гг. и будущие проекции различных характеристик для трех сценариев климата: RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5, из которых следует, что к концу XXI в. ожидается суммарное антропогенное воздействие на климат в 2,6, 4,5 и 8,5 Вт/м² соответственно.

Оценка эффективности и выбора наиболее подходящей климатической модели для региона Северного Каспия осуществлялась на основе сопоставления средних многолетних наблюдаемых и вычисленных по моделям температур. Коэффициенты корреляции между наблюдаемыми и рассчитанными по моделям многолетними рядами среднемесячных температур были очень низкими и даже статистически незначимыми, что подтверждает результаты выполненных ранее исследований и вывод о том, что модели климата не могут воспроизводить фактическую межгодовую климатическую изменчивость [21, 26]. Рассчитанные по модели температуры интерполировались в точки с координатами 29 метеостанций. Среднемноголетние оценки рассчитывались за период с 1960 по 2005 г. по данным климатического моделирования за исторический период и по данным наблюдений.

В табл. 1 приведены результаты оценки эффективности климатических моделей в виде разности средних многолетних температур между наблюдаемыми и смоделированными данными за период 1960—2005 гг., осредненные за 3 месяца зимы для метеостанций Северного и Среднего Каспия. В последних двух колонках приведены средние отклонения: Cp1 — для всех 8 метеостанций, Cp2 — для первых 6 метеостанций, без двух станций Среднего Каспия с неустойчивым ледовым покровом. В последней строке табл. 1 приведены средние квадратические

отклонения (СКО) рядов наблюдений за период 1960—2005 гг. В табл. 2 выделены ситуации с наименьшими погрешностями.

Таблица 2

Разности между рассчитанными по моделям температурой воздуха и среднемноголетними фактическими значениями за зимний сезон 1960—2005 гг. для станций Северного и Среднего Каспия
Differences between model temperature and the average long-term observed of the winter season for 1960—2005 on stations of the North and Middle Caspian

Модель	Номер метеостанции								Cp1	Cp2
	1	2	3	4	5	6	7	8		
BCC	7,6	6,2	5,0	5,4	4,9	5,5	5,3	6,6	5,8	5,8
CanESM2	11,0	9,0	8,4	8,6	7,5	8,7	7,8	8,7	8,7	8,7
CCSM	9,8	8,4	7,2	7,4	7,7	7,5	8,1	9,8	8,2	8,0
CNRM	6,7	4,1	4,1	5,0	5,5	5,0	5,9	8,0	5,5	5,1
CSIRO	8,4	5,4	5,8	7,2	6,1	7,2	6,4	6,5	6,6	6,7
Nadley	5,7	4,4	3,1	4,9	6,3	4,9	6,6	9,3	5,6	4,9
INM	6,8	5,2	4,2	4,9	5,9	4,9	6,3	7,3	5,7	5,3
MPI	7,7	6,5	5,1	5,5	6,9	5,6	7,1	9,3	6,7	6,2
MIROC	11,9	10,3	9,3	8,8	6,9	8,9	7,3	7,3	8,8	9,4
IPSL	8,2	6,1	5,6	5,5	4,8	5,6	5,1	6,6	5,9	6,0
СКО	3,8	4,0	3,4	3,0	2,5	3,1	2,9	3,0	3,2	3,3

Примечание: 1 — Пешной, 2 — Атырау, 3 — Астрахань, 4 — Лагань, 5 — о. Тюлений, 6 — о. Кула-лы, 7 — Форт-Шевченко, 8 — Актау.

Основной вывод из результатов табл. 2 состоит в том, что все модели систематически завышают среднюю температуру воздуха от 3 °С до почти 12 °С, превышая, иногда в несколько раз, естественную изменчивость, которая в среднем равна 3,2 °С. Подобное завышение зимней температуры моделями климата может быть объяснено тем, что они не учитывают сложный климатический режим моря, характеризующийся наличием значительных пространственных градиентов в гидрометеорологических параметрах, которые не поддаются точной параметризации.

За исключением южных станций наилучшей для остальных является английская модель Nadley центра, дающая наименьшую среднюю систематическую погрешность равную 4,9 °С для 6 северных станций и 5,6 °С для всех станций. Близкие к ней по эффективности результаты дают еще 2 модели климата: немецкая модель MPI со средней погрешностью 5,3 °С и французская модель CNRM при средней погрешности 5,1 °С.

Оценка эффективности моделей климата была осуществлена для всех 29 метеостанций в Прикаспийском регионе и подтвержден вывод о преимуществе тех же трех выбранных моделей климата, к которым добавилась еще и китайская модель BCC. В то же время систематические погрешности моделей имеют пространственные закономерности. На рис. 2 в качестве примера показаны систематические погрешности российской и английской модели для температур февраля.

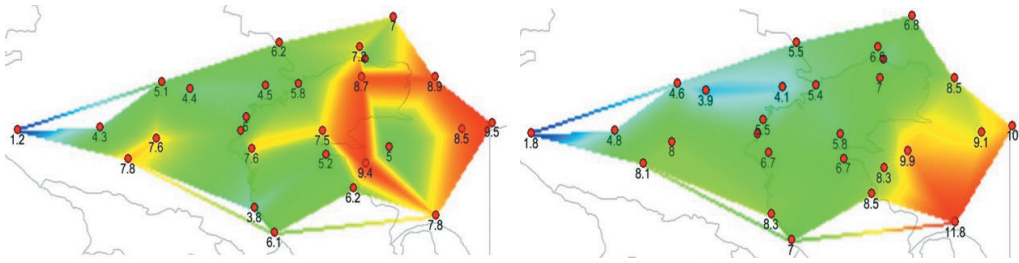


Рис. 2. Распределение систематических погрешностей моделей INM (слева) и Hadley (справа) для температур воздуха февраля.

Fig. 2. Allocation of systematic errors of the INM (left) and Hadley (right) models for February air temperature.

Интересно отметить, что систематические погрешности увеличиваются с запада на восток от 2—4 °С до 9—10 °С, и это обусловлено климатическими особенностями в зимний период для степных и полупустынных зон на востоке рассматриваемой территории.

Климатические проекции температуры

Для трех выбранных наиболее эффективных моделей климата (Hadley, INM и CNRM) были рассчитаны сценарные значения средних многолетних температур (норм) трех зимних месяцев для трех 30-летних периодов XXI в.: 2011—2040, 2041—2070 и 2071—2100 гг. В связи с тем, что результаты исторического эксперимента по моделированию за период наблюдений имеют систематические погрешности из-за недоучета локальных особенностей, то вполне естественно, что эти погрешности будут проявляться и в сценарных оценках. Поэтому необходимо корректировать сценарные средние температуры воздуха и вводить градиентную поправку, как было предложено и реализовано в работе [22].

Если принять условие стационарности современного климатического режима на перспективу, то поправки для будущего режима могут быть рассчитаны по данным для текущего периода. В этом случае средний сценарный градиент норм температуры (dT) вычисляется по формуле:

$$dT = (T_{н3} - T_{н1})/2, \quad (4)$$

где $T_{н1}$, $T_{н3}$ — нормы температур за периоды 2011—2040 и 2071—2100 гг., а градиент между фактическими и сценарными нормами (dT') рассчитывался как

$$dT' = (T_{н1} - T_{н0}), \quad (5)$$

где $T_{н0}$ — нормы температур за последний фактический период 1981—2010 гг.

Если $dT' - dT > 1^\circ\text{C}$, то сценарные нормы уменьшались на эту разность, если $T_{н1} - T_{н0} < 0$, т. е. сценарные нормы были меньше наблюдаемых, то градиентная поправка рассчитывалась как $T_{н0} - T_{н1} + dT$, и на нее сценарные нормы увеличивались.

Пример корректировки сценарных норм температур января на метеостанции Пешной для двух моделей климата и для сценария RCP4.5 показан на рис. 3.

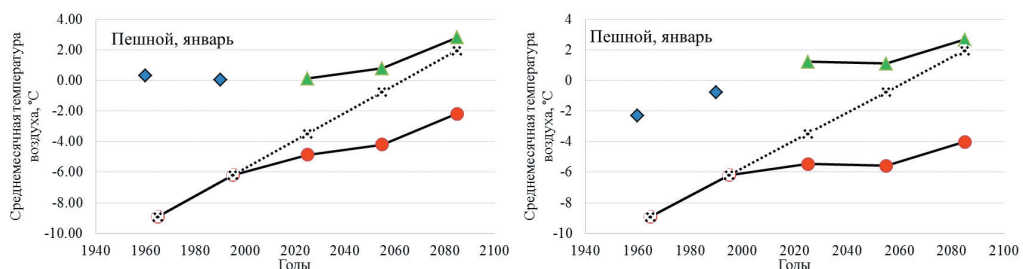


Рис. 3. Корректировка сценарных норм температур января для метеостанции Пешной по моделям INM (слева) и Hadley (справа) с приведением экстраполяции по тренду.

Fig. 3. Correction of the January scenario temperature norms for the Peshnoy station and for INM (left) and Hadley (right) models with extrapolation by trend.

На рис. 3 кружками показаны нормы температур за 2 периода фактических наблюдений (1951—1980 и 1981—2010 гг.) и скорректированные нормы за 3 будущих периода. В виде ромбов представлены нормы температур, полученные по данным исторического эксперимента, а треугольниками — нормы по сценариям без корректировки. На этих графиках все нормы, рассчитанные по модельным экспериментам (исторический и сценарный) существенно больше, чем наблюдаемые и поэтому должны быть уменьшены на разность между нормами исторического эксперимента и наблюдаемыми (систематическая поправка) и на разность проэкстраполированной последней наблюдаемой нормы со средним градиентом сценарных норм. В результате для модели INM градиентная поправка, которую следует вычитать из сценарных оценок составляет $5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для модели Hadley — $6,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Поэтому, если не рассматривать нормы фактических температур в качестве ориентира для будущих проекций, то увеличение норм температур по сравнению с современной нормой к концу XXI в. следует ожидать на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, что нереалистично и является предельным даже для высоких широт и для самого неблагоприятного сценария RCP8.5.

Кроме того, на рис. 3 пунктирной линией показана экстраполяция по тренду фактических значений температуры воздуха, т. е. при условии, что установленный по данным наблюдений градиент роста средних за два периода температур сохранится и в будущем до конца XXI в. Можно отметить, что в ближайшие 30 лет проэкстраполированное по тренду среднее значение температуры ненамного отличается от сценарных оценок за этот же период. Однако, если использовать экстраполяцию по тренду до конца XXI в., то можно получить такие же нереалистичные результаты, как и для сценарных оценок без корректировки.

Градиентные поправки были рассчитаны для каждой из трех выбранных моделей климата, для трех сценариев и для температур каждого из трех зимних месяцев для 8 метеостанций Каспия и также для метеостанций в окрестностях моря. Пример градиентных поправок для 8 метеостанций Каспия и для трех моделей климата и среднего сценария RCP4.5 приведен в табл. 3. Полученные поправки следует вычитать из сценарных данных.

Таблица 3

Поправки к сценарным значениям температуры воздуха трех климатических моделей для трех зимних месяцев (XII, I, II)

Corrections to the scenario air temperature of the three climate models for three winter months

Код	Название	Модель, месяц								
		INM			Hadley			CNRM		
		XII	I	II	XII	I	II	XII	I	II
34880	Астрахань	3,7	2,4	3,8	4,6	4,2	7,2	3,1	3,9	4,6
34984	Лагань	4,5	3,6	4,4	6,3	5,8	8,1	3,7	4,9	5,9
35700	Атырау	5,4	5,9	7,1	6,6	8,2	11	4,1	6,6	6,6
37089	о. Тюлений	5,6	5,5	5,9	7,5	7,4	9,0	4,0	5,7	6,5
97048	Пешной	0,7	5,0	0,9	6,7	6,7	9,9	1,3	6,4	0,8
97059	о. Кулалы	4,3	3,7	4,7	6,2	5,9	8,4	3,6	5,0	6,2
97060	Форт-Шевченко	6,2	5,8	5,9	8,1	7,7	8,9	4,5	6,1	6,4
97061	Актау	7,5	7,2	6,4	11,2	10,6	10	7,1	8,2	7,5

Из данных табл. 3 следует, что поправки изменяются в широких пределах от менее 1 °С до 10—11 °С. При этом наибольшие поправки относятся к метеостанциям Среднего Каспия и к модели Hadley. Для моделей INM и CNRM максимальные значения поправок составляют 7—8 °С.

С учетом градиентных поправок были рассчитаны сценарные нормы температур за каждый месяц и суммы за весь зимний период по каждой модели климата и для трех периодов будущего климата. В результате получены оценки сумм отрицательных температур за зимний период на акватории Каспия. На рис. 4 приводится пространственное распределение сумм отрицательных температур воздуха за зимний период на акватории Каспия для модели Hadley и сценария RCP4.5 за периоды: 1981—2010 (слева) и 2071—2100 гг. (справа).

Из рис. 4 следует, что площадь области с суммами температур менее –500 °С к концу XXI в. уменьшится более чем в 2 раза, вследствие чего умеренные зимы будут наблюдаться только в северо-восточной части моря. На остальной территории будут преобладать мягкие и очень мягкие зимы.

Аналогичные результаты получены и по другим моделям и сценариям. В качестве примера в табл. 4 приведены средние суммы отрицательных температур для метеостанций Атырау, о. Кулалы и Пешной, которые получены по разным моделям и разным сценариям на 3 периода до конца XXI в.: 1 (2011—2040 гг.), 2 (2041—2070 гг.) и 3 (2071—2100 гг.), а 0 — это современный период (1981—2010 гг.).

Из данных табл. 4 следует, что по самому благоприятному из сценариев RCP2.6 сумма отрицательных температур уменьшится с –171 до –80/–90 °С по модели Hadley. По среднему сценарию RCP4.5 сумма температур варьирует от –102 до –10 °С, причем наименьший рост температур ожидается по модели Hadley, а наибольший — по модели INM. По самому неблагоприятному сценарию RCP8.5 устойчивый ледовый покров практически будет отсутствовать при суммах отрицательных температур от –30 до –44 °С в этих пунктах уже к середине XXI в.

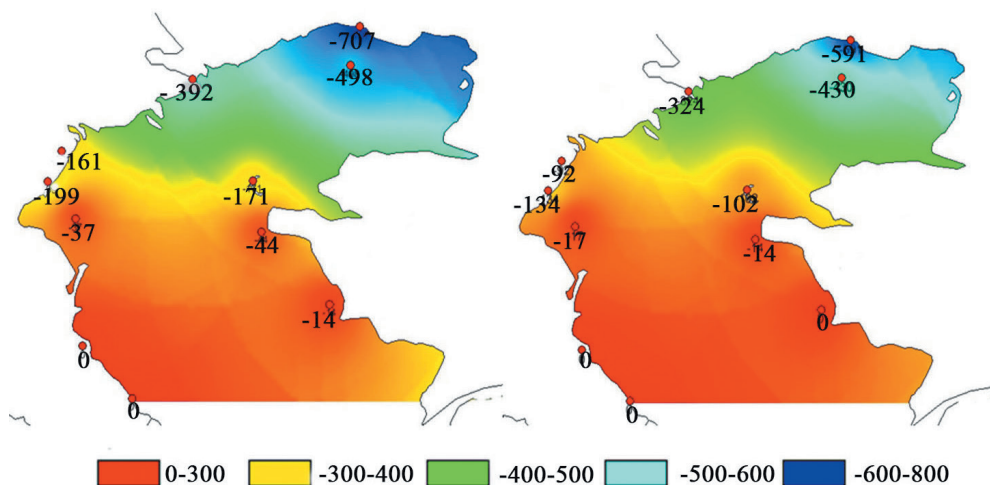


Рис. 4. Пространственное распределение сумм отрицательных температур воздуха за зимний период на акватории Каспия для модели Hadley и сценария RCP4.5 за периоды: 1981—2010 (слева) и 2071—2100 (справа).

Fig. 4. Space distributions of the sums of negative air temperatures for the winter period in the Caspian Sea according to the Hadley model and the RCP4.5 scenario for the periods: 1981—2010 (left) and 2071—2100 (right).

Таблица 4

Сценарные оценки суммы отрицательных температур (в °С) по моделям CNRM, Hadley, INM и тренду для станций Атырау, о. Кулалы и Пешной для периодов: 1 (2011—2040 гг.), 2 (2041—2070 гг.), 3 (2071—2100 гг.), 0 — современный период (1981—2010 гг.)

Scenario estimates of the sum of negative temperatures (°C) by CNRM, Hadley, INM climates models for the Atyrau, Kulaly isl., Peshnoy Scenario estimates of the sum of negative temperatures (°C) by CNRM, Hadley, INM climates models for the Atyrau, Kulaly isl., Peshnoy for periods: 1 (2011—2040), 2 (2041—2070) and 3 (2071—2100), and 0 is the modern period (1981—2010)

Модель	0	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Атырау										
CNRM	-707	—	—	—	-582	-445	-381	-495	-310	-121
Hadley	-707	-682	-634	-632	-654	-662	-591	-542	-451	-263
INM	-707	—	—	—	-579	-517	-373	-598	-648	-370
Тренд	—	-565	-423	-281	-565	-423	-281	-565	-423	-281
о. Кулалы										
CNRM	-171	—	—	—	-117	-53	-39	-51	0	0
Hadley	-171	-144	-85	-90	-148	-160	-102	-85	-44	0
INM	-171	—	—	—	-104	-79	-21	-93	-101	0
Тренд	—	-53	64	182	-53	64	182	-53	64	182

Окончание табл. 4

Модель	0	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
		Пешной								
CNRM	-498	-	-	-	-329	-250	-234	-259	-151	-34
Hadley	-498	-476	-436	-431	-475	-491	-430	-426	-353	-182
INM	-498	-	-	-	-435	-376	-256	-314	-340	-189
Тренд		-278	-59	161	-278	-59	161	-278	-59	161

В табл. 4 также приведены суммы отрицательных температур, полученные при экстраполяции средних значений по тренду. Для пункта Атырау они оказались ближе к сценарию RCP8.5. Для о. Кулалы близкие к сценарным оценкам результаты получены только для первого периода (2011—2040 гг.) и сценария RCP8.5, а для остальных периодов в будущем температура за зиму становится уже положительной. Для пункта Пешной также в последующие 30-летние периоды температура воздуха переходит в положительную область.

Оценка будущих максимальных толщин льда

По сценарным оценкам сумм отрицательных температур за зимний сезон и на основе зависимостей (1)—(3), табл. 1, были рассчитаны сценарные значения максимальных толщин льда на метеостанциях Северного Каспия и получены их пространственные распределения. На рис. 5 представлены пространственные распределения максимальных толщин льда за 1981—2010, 2011—2040 гг. и за последние 30 лет XXI в. для модели INM и среднего сценария RCP 4.5.

Из сопоставления трех пространственных распределений толщин льда следует, что в современных условиях устойчивый лед толще 20 см занимает значительную площадь Северного Каспия, а в последней трети XXI в. эта площадь устойчивого льда должна уменьшиться в несколько раз и сохраниться только на крайнем северо-востоке моря. Также интересно отметить, что граница безледных условий, которая сейчас находится даже южнее Актау, в последней трети XXI в. существенно сместится на север и будет на линии о. Тюлений — Форт-Шевченко. В тот же период в несколько раз увеличится площадь неустойчивого льда, и его граница будет находиться даже несколько севернее устья р. Волги, в то время как сейчас она проходит на широте Форт-Шевченко. Это существенно повлияет на экологию этой части моря, особенно на популяцию каспийского тюленя, что является уже проблемой настоящего времени [26, 27].

Рассчитанные значения средних максимальных толщин льда для разных периодов времени в настоящем и в будущем, и по разным моделям для среднего сценария RCP4.5 приведены в табл. 5.

Из результатов табл. 5 следует, что общая тенденция уменьшения максимальных толщин льда имеет место для всех пунктов наблюдений. По модели Hadley получено некоторое увеличение максимальной толщины льда в середине XXI в. в связи с соответствующим сценарным падением зимней температуры,

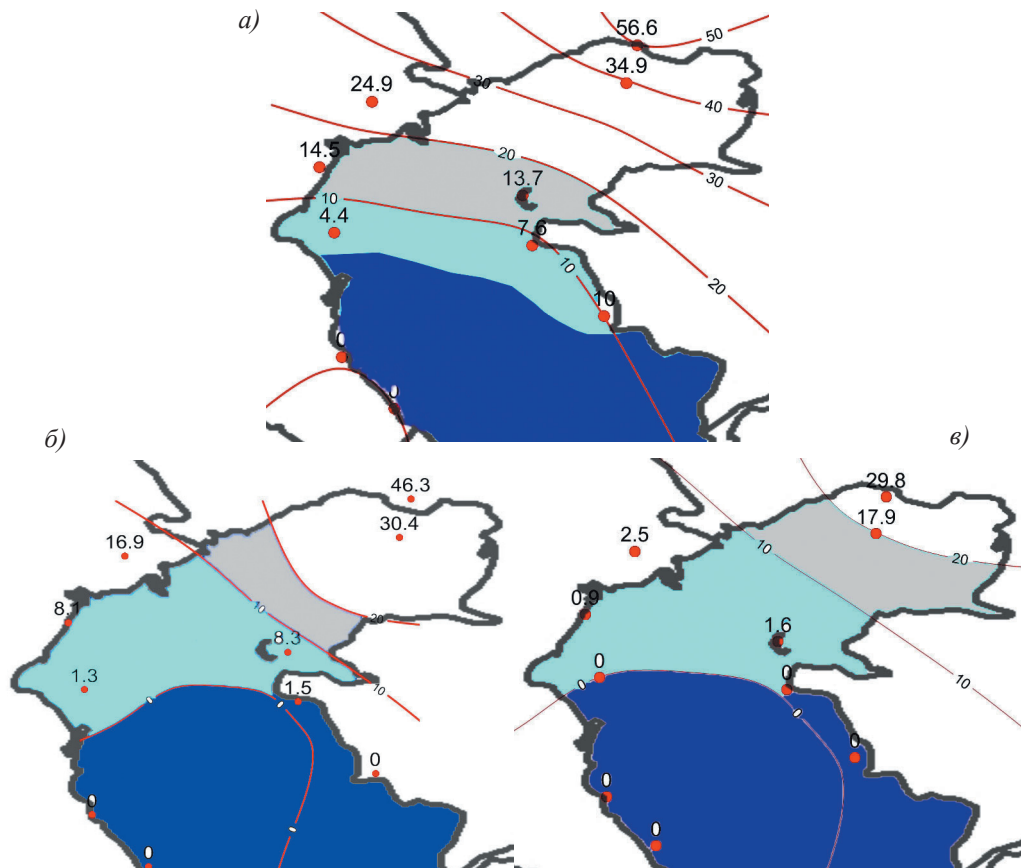


Рис. 5. Пространственное распределение средней толщины льда в период 1981—2010 (а), 2011—2040 (б) и 2071—2100 гг. (в) по модели INM и сценарию RCP4.5.

От 0 до 10 см — неустойчивый лед (голубой); от 10 до 20 см — относительно устойчивый лед для нахождения на нем человека и отдельных животных (серый); более 20 см — устойчивый лед для передвижения транспорта (белый).

Fig. 5. Space distribution of ice thickness in the period 1981—2010 (a), 2011—2040 (б) and 2071—2100 (в) according to the INM model and RCP4.5.

0 to 10 cm — unstable ice (blue); from 10 — to 20 cm — relatively stable ice for finding human and animals on it (grey); 20 cm — stable ice for transport movement (white).

что сказалось на меньшем общем уменьшении толщины льда за XXI в. В целом, по моделям INM и CNRM получены близкие результаты, а модель Hadley показывает более медленное уменьшение толщины льда. Так для северо-западных станций (Астрахань, Лагань, о. Тюлений) по моделям INM и CNRM уменьшение средней максимальной толщины льда за будущий период составляет 10—15 см до отсутствия ледостава уже к середине столетия. В то же время модель Hadley дает уменьшение максимальной толщины льда всего на 1—4 см. Для северо-восточных

Таблица 5

Нормы максимальных толщин льда (см)
в современный и будущие периоды по трем моделям климата и сценарию RCP4.5
Norms of maximum ice thicknesses (cm)
for the present and future periods according to three climate models and RCP4.5 scenario

Период	Модель	Станция							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1951—1980	наблюдения	38	—	—	50	50	68	23	22
1981—2010	наблюдения	25	14	4	35	35	57	14	8
2011—2040	INM	17	8	1	30	30	46	8	2
	Hadley	23	12	3	33	33	52	12	4
	CNRM	17	9	1	23	23	46	9	2
	Тренд	12	—	—	19	—	41	4	0
2041—2170	INM	12	6	0	26	26	41	6	0
	Hadley	24	14	4	34	34	53	13	5
	CNRM	8	4	0	18	18	36	4	0
	Тренд	0	—	—	4	—	28	0	0
2071—2100	INM	2	1	0	18	18	30	2	0
	Hadley	19	8	2	30	30	47	8	2
	CNRM	7	2	0	16	16	30	3	0
	Тренд	0	—	—	0	—	14	0	0

Примечание: 1 — Астрахань, 2 — Лагань, 3 — о. Тюлений, 4 — Пешной, 5 — Жанбай, 6 — Атырау, 7 — о. Кулалы, 8 — Форт-Шевченко.

станций (Пешной, Жанбай, Атырау) по моделям INM и CNRM уменьшение составляет до 16 см, а по модели Hadley всего 3—5 см.

Следует отметить явное противоречие полученных проекций толщины морского льда по климатическим моделям с результатами трендового анализа их фактических значений. При экстраполяции по тренду практическое отсутствие льда будет наблюдаться для станций центрального Каспия (Форт-Шевченко, Кулалы) уже в первое тридцатилетие к 2035 г., а к середине второго 30-летнего периода (2055 г.) лед практически исчезнет уже во всех пунктах кроме северо-востока (Пешной и Атырау). Значения сумм отрицательных температур также становятся близкими к нулю, что будет препятствовать процессу формирования льда.

Еще одной задачей, которая решалась на основе рассчитанных будущих сценарных максимальных толщин льда, была оценка вероятности зим будущего периода без устойчивого ледового покрова или расчет вероятности максимальной толщины льда равной нулю. Принимая, что отклонения от среднего климатического тренда в сценариях распределены по нормальному закону, можно на основе арифметического среднего за 30-летний период ($H_{\max\text{cp}}$) и соответствующего среднего квадратического отклонения (СКО_{cp}) рассчитать вероятность событий, которые отклонятся от средней оценки больше, чем само его значение ($H_{\max0}$), т. е. $P(H_{\max0} \leq H_{\max\text{cp}}) = f(H_{\max\text{cp}}, \text{СКО}_{\text{cp}})$ по таблице накопленных вероятностей для нормального распределения [28, 29, 30].

Особенностью сценарных проекций является то, что помимо уменьшения среднего значения H_{\max} в них заложено и уменьшение дисперсии колебаний относительно среднего. Поэтому между сценарными средними значениями и средними квадратическими отклонениями (СКО) имеют место тесные региональные зависимости для пунктов наблюдений на Каспии с коэффициентами корреляции $r = 0,90—0,95$. По данным же наблюдений за период 1981—2010 гг. такая региональная зависимость более слабая ($r = 0,56$). В результате модели могут искусственно уменьшать вероятность будущих безледовых условий на Каспии. Поэтому при оценке вероятности безледных условий задавались два вида СКО: то, которое получено по ежегодным сценарным оценкам каждого 30-летнего периода в будущем и фактические СКО за последний период наблюдений.

Полученные вероятности безледных условий в виде числа лет, на которые приходится 1 год с безледной зимой, приведены в табл. 6.

Таблица 6

Число лет, на которые приходится 1 зимний период без устойчивого ледового покрова
The number of years for 1 year with a winter without sea ice

Пункт	Модель	1981— 2010	СКО модели			СКО наблюдений		
			2011— 2040	2041— 2070	2071— 2100	2011— 2040	2041— 2070	2071— 2100
Атырау	INM	100	100	50	25	100	100	11
	Hadley		100	100	100			
Пешной	INM	100	50	25	5	12,5	7,1	3,1
	Hadley		33	100	33			
о. Тюлений	INM	2,8	3,1	2,5	2	2,6	1,8	1,8
	Hadley		3,1	3,1	2,8			
о. Кулалы	INM	3,8	4,2	3,6	3,1	2,8	2,7	1,8
	Hadley		3,7	7,1	5,5			
Форт-Шевченко	INM	3,3	3,1	2,6	2,1	2,6	2,5	2
	Hadley		3,1	3,2	2,8			
Астрахань	INM	33	4,1	5	2,9	5,5	4	2,5
	Hadley		6,6	20	5,5			
Лагань	INM	50	4	3,6	2,9	3,6	3,3	2,5
	Hadley		4,5	5,8	4,3			

Из результатов табл. 6 следует, что число лет, на которые приходится 1 случай безледных условий в будущем, закономерно уменьшается. Особенно наглядно это проявляется для северо-восточных станций. Например, в Пешном число лет уменьшается с 50 до 5 к концу XXI в., т. е. вероятность безледных условий возрастает в 10 раз по модели INM. Если же принять СКО по наблюдаемым данным, то вероятность возрастает уже в период 2011—2040 гг., и число лет, на которые приходится 1 случай без ледостава, уменьшается со 100 по наблюдаемым данным до 12,5 для первого сценарного периода. По модели Hadley из-за заложенного в ней сценарного понижения температуры в середине XXI в., вероятность безледных

условий повышается медленнее и даже уменьшается в середине XXI в. Так, для того же пункта Пешной, число лет в первый будущий период упадет со 100 до 33, затем во второй увеличится до 100 и в последний снова упадет до 33 лет.

Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать следующие основные выводы.

1. Для гидрометеорологических станций и постов Каспийского моря получены довольно надежные эмпирические зависимости с коэффициентами корреляции в среднем равными 0,8, связывающие максимальную толщину льда с зимними температурами воздуха.

2. Климатические модели проекта SMIP5 для исследуемого региона плохо отражают реальный климат. Для района Каспийского моря на основе сопоставления наблюдаемых и смоделированных температур для месяцев зимнего сезона из 10 климатических моделей выбраны три: английская Hadley, российская INM и французская CNRM, которые дают систематическое завышение температуры воздуха на 4,9—5,7 °С. Для других моделей это завышение заметно выше. Причина подобного завышения, на наш взгляд, может быть связана со слабым учетом локальных климатических особенностей.

3. Для выбранных климатических моделей получены сценарные оценки температур зимних месяцев за три периода до конца XXI в.: 2011—2040, 2041—2070 и 2071—2100 гг. В сценарные значения среднемесячных температур введены градиентные поправки, без которых будущие температуры воздуха по сравнению с современными были бы до 10—11 °С выше, что с физической точки зрения нереально. Следует также отметить, что в расчетах принимается условие стационарности (неизменности) современного климатического режима в будущем, т. е. поправки рассчитаны по данным для текущего периода.

4. На основе откорректированных суммарных зимних температур получены карты изотерм будущих температур, которые показывают, что для среднего сценария RCP4.5 площадь области с суммами температур менее -500 °С к концу XXI в. уменьшится более чем в 2 раза и умеренные зимы будут наблюдаться только в северо-восточной части моря. На остальной территории будут преобладать мягкие и очень мягкие зимы.

5. Сопоставление сценарных оценок будущих температур воздуха по климатическим моделям и по экстраполяции эмпирического тренда данных наблюдений показало, что результаты сопоставимы только на ближайшую перспективу в 20—30 лет, далее они существенно расходятся, что свидетельствует о ненадежности оценок на дальнюю перспективу.

6. Выявлены существенные расхождения оценок выхода на безледный режим по экстраполяции тренда фактических значений толщины морского льда и по климатическим моделям. Трендовый анализ показывает, что уменьшение толщины морского льда будет происходить более быстрыми темпами. Так, практическое отсутствие льда будет наблюдаться для станций центрального Каспия

(Форт-Шевченко, Кулалы) уже в первое тридцатилетие к 2035 г., а к середине второго 30-летнего периода (2055 г.) лед практически исчезнет уже во всех пунктах кроме северо-востока (Пешной и Атырау).

Список литературы

1. Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата [основная группа авторов, Р.К. Пачаури и Л.А. Мейер (ред.)]. Женева: МГЭИК, 2014. 163 с.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). М., 2014. 60 с.
3. III—IV Национальное сообщение Республики Казахстан к Рамочной Конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН). Астана, 2013. 274 с.
4. Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана: 2017 год. Алматы: Республиканское государственное предприятие «Казгидромет», 2018. 60 с.
5. Лобанов В.А., Наурызбаева Ж.К. Климатические изменения толщины льда на Северном Каспии // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 53. С. 172—187.
6. Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А. Методика краткосрочного прогнозирования нарастания толщины льда в северо-восточном секторе Каспийского моря // Географический вестник. 2020. № 3 (54). С. 82—98.
7. Бухарицин П.И. Исследования Каспийских льдов. Palmarium Academic Publishing, 2019. 122 с.
8. Валлер Ф.И. Некоторые черты ледового режима северной части Каспийского моря // Сб. работ Астраханского ГМО. 1970. Вып. 1. С. 112—131.
9. Морской лед / Под ред. Е.И. Фролова, В.П. Гаврило СПб.: Гидрометеоздат, 1997. 402 с.
10. Бухарицин П.И. Особенности процессов торошения ледяного покрова северной части Каспийского моря // Водные ресурсы. 1984. № 6. С. 115—123.
11. Абузьяров З.К., Кудрявая К.И., Серяков Е.И., Скриптунова Л.И. Морские прогнозы. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 319 с.
12. Попов Е.Г. Гидрологические прогнозы. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 256 с.
13. Думанская И.О. Ледовые условия морей Европейской части России. М.: ФГБУ «Гидрометцентр России», 2014. 608 с.
14. Думанская И.О. О методике долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // Метеорология и гидрология. 2011. № 11. С. 64—77.
15. Микова К.Д., Калинин В.Г. К методике оценки прогнозов толщины ледового покрова на водохранилищах (на примере Воткинского) // Метеорология и гидрология. 2008. № 10. С. 94—99.
16. Андреев М.Д. Среднесрочный прогноз ледовых условий на неарктических морях Европейской территории: автореферат дис. кандидата географ. наук: 11.00.08. М.: Гидрометеорол. науч.-исслед. центр Рос. Фед., 1992. 21 с.
17. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. VI. Каспийское море. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. Вып. 1. 359 с.
18. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.
19. Atmospheric Model Intercomparison Project. [Электронный ресурс]. URL: <http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/amip/index.php>.
20. Gates W.L. (1992) AMIP: The Atmospheric Model Intercomparison Project. Bull. Amer. Meteor. Soc. 73. P. 1962—1970.
21. About the WCRP CMIP5 Multi-Model Dataset Archive at PCMDI. [Электронный ресурс]. URL: http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php.
22. Шукри О.А.А., Лобанов В.А., Хамид М.С. Современный и будущий климат Аравийского полуострова. СПб.: РГГМУ, 2018. 190 с.
23. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change). 2013. The physical science basis. In Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda M.B. Tignor,

- Simon K. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, Pauline M. Midgley (eds). Cambridge University Press: Cambridge. 1552 p.
24. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I. Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Edited by Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda M.B. Tignor, Simon K. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, Pauline M. Midgley Cambridge University Press. Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, Sro Paolo, Delhi, Mexico City. 1552 p.
 25. Лобанов В.А., Кириллина К.С. Современные и будущие изменения климата Республики Саха (Якутия). СПб.: РГГМУ, 2019. 157 с.
 26. Зайцев В.Ф., Мелякина Э.И., Ноздрина Л.Ю. Оценка численности популяции каспийского тюленя. // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2009. № 2. С. 29—32.
 27. Кузнецов В.В., Черноок В.И., Шипулин С.В. Оценка численности популяции каспийского тюленя в современный период // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2013. № 5. С. 86—91.
 28. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1991. 379 с.
 29. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
 30. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.

References

1. *Obobshaushiy doklad. Vklad rabochih grupp I, II i III v Pyatyi otsenochyi doklad Mezhpriavitel'stvennoy gruppy ekspertov po izmeneniyu klimata.* Summary report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [main group of authors, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Geneva: IPCC, 2014: 163 p. [In Russian].
2. *Vtoroy otsenochyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimate i ih posledstviyah na territorii Rossiyskoy Federatsii.* The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet). Moscow, 2014: 60 p. [In Russian].
3. *III—IV Natsyonal'noe soobshenie Respubliki Kazakhstan k Ramochnoy Konventsiyi OON ob izmenenii klimate.* III—IV National Communication of the Republic of Kazakhstan to the UN Framework Convention on Climate Change. Astana, 2013: 274 p. [In Russian].
4. *Ezhгодnyi buleten' monitoringa sostoyaniya i izmeneniya klimate Kazakhstana: 2017 god.* Annual bulletin for monitoring the state and climate change of Kazakhstan: 2017. Republican state enterprise “Kazhydromet”. Almaty, 2018: 60 p. [In Russian].
5. Lobanov V.A., Naurozbayeva Zh.K.. Climatic changes in ice thickness in the North Caspian. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta.* Scientific notes of the of the Russian state hydrometeorological university. 2018, 53: 172—187. [In Russian].
6. Naurozbayeva Zh.K., Lobanov V.A. Method for forecasting of the increase daily thickness of ice in the north-eastern part of the Caspian Sea. *Geograficheskii vestnik.* Geographic Bulletin. 2020, 3 (54): 82—98. [In Russian].
7. Bukharicin P.I. *Issledovaniya Kaspiyskih l'dov.* Caspian seas ice researching. Palmarium Academic Publishing, 2019: 122 p.
8. Valler F.I. Some features of the ice regime in the northern part of the Caspian Sea. *Sbornik rabot Astrakhanskogo GMO.* Collection of works of the Astrakhan GMO. V. 1. 1970: 112—131. [In Russian].
9. *Morskoy led.* Seas ice. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1997: 402 p. [In Russian].
10. Bukharicin P.I. Features of the processes of hummocking the ice cover of the northern part of the Caspian Sea. *Vodnye resursy.* Water Resources. 1984, 6: 115—123. [In Russian].
11. Abuzyarov Z.K., Kudrayvaya K.I., Seryakov E.I., Skriotunova L.I. *Morskie prognozy.* Seas forecast. L.: Hydrometizdat, 1988: 319 p. [In Russian].
12. Popov E.G. *Gidrolodicheskie prognozy.* Hydrology forecast. Leningrad: Hydrometizdat, 1979: 256 p. [In Russian].

13. *Dumanskaya I.O. Ledovye usloviya morei Evropeyskoi chasti Rossii*. European part of Russia seas ice conditions. Moscow: FSFO «Hydrometcenter of Russia», 2014: 608 p. [In Russian].
14. *Dumanskaya I.O.* Long-term forecast methodology for the ice conditions on the European seas of Russia. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 2011, 11: 64—77. [In Russian].
15. *Mikova K.D., Kalinin V.G.* Method ice cover thickness forecasts for reservoirs (example of Votkinskiy). *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 2008, 10: 94—99. [In Russian].
16. *Andreev M.D. Srednesrochniy prognoz ledovykh uslovii na nearkticheskikh moryakh Evropeiskoi territorii*. Mid-term forecast of ice conditions in the non-Arctic seas of the European territory: candidate geogr. of sciences abstracts.: 11.00.08. Moscow: Hydrometeorological scientific researcher center of Rus. Fed., 1992: 21 p. [In Russian].
17. *Gidrologiya i gidrohimiya morei*. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. V. VI. Caspian Sea. V. 1. Hydrometeorological conditions. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1992: 359 p. [In Russian].
18. *Dreyper N., Smit G. Prikladnoy regressionnyi analiz*. Applied regression analysis. Moscow: Statistika, 1973: 392 p. [In Russian].
19. Atmospheric Model Intercomparison Project. Available at: <http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/amip/index.php>.
20. *Gates W.L.* (1992) AMIP: The Atmospheric Model Intercomparison Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73: 1962—1970.
21. About the WCRP CMIP5 Multi-Model Dataset Archive at PCMDI. Available at: http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php.
22. *Shukri O.A.A., Lobanov V.A., Khamid M.S. Sovremenniy i budushiy klimat Araviyskogo poluoostrova*. The current and future climate of the Arabian Peninsula. St. Petersburg: RSHU, 2018: 190 p. [In Russian].
23. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change). 2013. The physical science basis. In Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda M.B. Tignor, Simon K. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, Pauline M. Midgley (eds). Cambridge: Cambridge University Press: 1552.
24. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I. Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Edited by Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda M.B. Tignor, Simon K. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, Pauline M. Midgley Cambridge University Press. Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, Sro Paolo, Delhi, Mexico City: 1552.
25. *Lobanov V.A., Kirilina K.S. Sovremennye i budushie izmeneniya klimata Respubliki Sakha (Yakutiya)*. Current and future climate changes in the Republic of Sakha (Yakutia). St. Petersburg: RSHU, 2019: 157 p. [In Russian].
26. *Zaitsev V.F., Melyakina E.I., Nozdrina L.Yu.* Estimation of the Caspian seal population. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: fisheries. 2009, 2: 29—32. [In Russian].
27. *Kuznetsov V.V., Chernook V.I., Shipulin S.V.* Estimation of the Caspian seal population in the modern period. *Zashchita okruzhaiushchei sredy v neftegazovom komplekse*. Environmental Protection in the Oil and Gas Complex. 2013, 5: 86—91. [In Russian].
28. *Ventzel E.S., Ovcharov L.A. Teoriya sluchaynykh protsekov i eye inzhenernye prilozheniya*. The theory of random processes and its engineering applications. Moscow: Nauka. 1991: 379 p. [In Russian].
29. *Zaks L. Statisticheskoe otcenivanie*. Statistical Evaluation. Moscow: Statistika, 1976: 598 p. [In Russian].
30. *Malinin V.N. Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informacii*. Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information. St. Petersburg: RSHU, 2008: 408 p. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 14.06.2020

Принята к публикации после повторной доработки 15.02.2021

Сведения об авторах

Лобанов Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, ст. научный сотрудник, профессор кафедры МКОА РГГМУ, lobanov@EL6309.spb.edu.

Наурызбаева Жанар Куанышевна, аспирант кафедры МКОА РГГМУ, СНС УГМИКМ РГП «Казгидромет», naurozbaeva.zhanar@mail.ru.

Information about authors

Lobanov Vladimir Alekseevich, Grand PhD (Tech. Sci.), Senior Scientist, Professor of the Department of Meteorology, Climatology and Air Protection, Russian State Hydrometeorological University.

Naurozbayeva Zhanar, PhD student of the Department of Meteorology, Climatology and Air Protection, Russian State Hydrometeorological University, RSE Kazhydromet.