

ГИДРОЛОГИЯ

УДК 551.51 (551.50)

DOI: 10.17072/2079-7877-2020-3-81-97

МЕТОДИКА КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАРАСТАНИЯ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОМ СЕКТОРЕ КАСПИЙСКОГО МОРЯ**Жанар Куанышевна Наурызбаева**

SPIN-код 3585-116, Author ID: 1022200

e-mail: naurozbaeva.zhanar@mail.ru

*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург***Владимир Алексеевич Лобанов**

SPIN-код 7045-4156, Author ID: 2290

e-mail: lobanov@EL6309.spb.edu

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Каспийское море является южным морем с ежегодным ледовым покрытием в северной части. Толщина льда может достигать одного метра и более в зависимости от суровости зимнего периода. Морской лед Каспийского моря отличается значительной изменчивостью, влияющей на промышленную, промысловую деятельность человека, а также на фауну региона. На основе ежесуточной информации за последние 10 лет наблюдений на станциях Северного Каспия разработана методика краткосрочного прогнозирования нарастания толщины льда. Оценка эффективности методики осуществлена на зависимом и независимом от расчетов материале наблюдений различной заблаговременности. Прогностическое изменение толщины льда с суточной заблаговременностью оправдывалось от 82 до 98 %. Проведенное исследование климатического фона позволило установить, что максимальная толщина льда ступенчато уменьшилась с конца 1980-х гг. на 20–25 см в связи с уменьшением суммы отрицательных температур, что, в свою очередь, рост числа дней связан с формой атмосферной циркуляции W и уменьшение числа дней – с формой E за зимний период.

Ключевые слова: суточный прогноз, нарастание толщины льда, Северный Каспий, изменение климатического фона, сумма отрицательных температур, формы атмосферной циркуляции.

METHODS OF SHORT-TERM FORECASTING OF ICE THICKNESS GROWTH IN THE NORTH-EASTERN PART OF THE CASPIAN SEA**Zhanar K. Naurozbayeva,**

SPIN-код 3585-1167, Author ID: 1022200

e-mail: naurozbaeva.zhanar@mail.ru

*Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg***Vladimir A. Lobanov**

SPIN-код 7045-4156, Author ID: 2290

e-mail: lobanov@EL6309.spb.edu

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

The Caspian Sea is a southern sea with annual ice cover in the northern part. The thickness of the ice can reach one meter or more, depending on the severity of the winter. The sea ice of the Caspian Sea is characterized by significant variability, which affects human activities (industrial, fishing ones) as well as the fauna of the region. Based on daily information of North Caspian stations for the last 10 years, there has been developed short-term forecasting methodology for predicting daily increase in ice thickness. The effectiveness of the method was evaluated on the basis of calculation-dependent and independent materials of different lead times. The daily forecast of ice thickness growth was 82 to 98% justified. Climate research allowed us to establish that



Гидрология
Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А.

the maximum ice thickness has decreased stepwise since the late 1980s by 20–25 cm. This is due to the lower sum of negative temperatures, which in turn is associated with an increase in the number of days with a W form of atmospheric circulation and a decrease in the number of days with an E form in the winter period.

Key words: daily forecast, ice thickness growth, Northern Caspian, climate change, sum of negative air temperatures, forms of atmospheric circulation.

Введение

Каспийское море является южным морем с ежегодным ледовым покровом. Льдом может быть покрыта вся северная и средняя части акватории моря, толщина льда и площадь зависят от метеорологических условий зимнего и предзимнего периодов. Ледовый период Северного Каспия обычно длится с ноября по март [4; 8; 12; 36], в Среднем Каспии – в зимние месяцы. Наибольшая толщина льда Каспийского моря наблюдается в его северо-восточной части, где может достигать 80–120 см. В западной части Северного Каспия она меньше (максимум 60–80 см), а в центральной части моря лед наблюдается до 20 см в среднем, но не редки и годы без устойчивого ледового покрова. В работах [15; 17; 38; 39; 45] рассмотрены экстремальные ледовые периоды, мониторинг льда с использованием космических снимков и тенденции развития снежного покрова. В работе [20] показано, что для северной акватории Каспия максимальная толщина льда больше всего уменьшилась на северо-востоке моря (на 20–28 см) и юге (на 13–17 см), причем на юге увеличилась вероятность безледных условий, а северо-западная часть пока остается наиболее устойчивой к климатическим изменениям.

Среди прогнозов наиболее известным является прогноз максимальной толщины льда на основе суммы отрицательных температур за зимний период, которая, в свою очередь, прогнозируется по типу зимы (суровая, умеренная, теплая), хотя точность такого прогноза не высока [1; 11]. Важны также и краткосрочные прогнозы нарастания толщины льда, так как мелководная часть моря при резком понижении температуры воздуха в течение нескольких суток и даже часов может покрыться льдом [1; 5; 7; 34]. Краткосрочные прогнозы толщины льда имеют большое значение не только для перемещения людей и техники по льду, но и для представителей флоры и фауны. Каспийский тюлень, эндемик моря, чувствителен к изменению ледового покрова. Тюлени устраивают лежбища, линяют и щенятся на просторных площадях устойчивого льда. Недостаток места на лежбищах, т.е. небольшие площади ледового покрова и тонкий лёд, приводит к более тесному скоплению особей и впоследствии большой вероятности возникновения эпидемий и болезней среди животных [19; 26]. В последние 20 лет наблюдается резкое сокращение их популяции, и поэтому остро встал вопрос о внесении животного в Красную книгу [37]. 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 [1; 27; 29]. Современные методики долгосрочных прогнозов ледовых условий для европейских морей России были разработаны И.О. Думанской [13], основанные на данных Росгидромета. Эффективность метода при расчете по зависимому ряду наибольшей за зиму 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, в связи с чем необходимы их обновления, а также учет смены макроциркуляционных эпох [13; 44].

Известны также методики прогнозирования толщины льда на различных замкнутых водоемах, в том числе искусственных, например водохранилищах. Так как нарастание льда происходит нелинейно, скорость нарастания различна в начале зимнего периода и в конце. В работах К.Д. Миковой и В.Г. Калинина [28] рассматривается прогноз с заблаговременностью

Гидрология

Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А.

до 5 суток средней толщины льда, имеющий оправдываемость до 85–95%. В работах М.Д. Андреева описан метод среднесрочного до 10 сут прогноза появления льда и очищения моря ото льда для неарктических морей России [3]. 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» [6; 16; 34].

В процессе разработки методики краткосрочного прогноза нарастания суточной толщины льда для казахстанского северо-восточного сектора Каспийского моря были проведены следующие исследования:

- анализ климатического фона, связанный с оценкой динамики многолетних колебаний максимальной толщины льда и ее факторов, таких как суммы отрицательных температур за зимний период и формы атмосферной циркуляции;
- выявление основных факторов, определяющих суточное изменение толщины льда, и построение регрессионных зависимостей от этих факторов для каждого года;
- формирование общего прогностического уравнения для многолетнего периода и оценка его эффективности и применимости для каждого года на зависимом материале;
- оценка эффективности результатов краткосрочного прогноза суточного нарастания толщины льда и его оправдываемости на независимом от расчетов материале наблюдений.

Анализ климатического фона Прикаспийского региона

Оценка климатических изменений максимальной толщины льда на всей северной половине Каспия была выполнена ранее в работе [20] на основе многолетних рядов в 7 пунктах наблюдений с 1940–1950-х гг. по настоящее время. Установлено, что толщина льда уменьшилась, причем ступенчато, в конце 1980-х гг. и в большей степени в северо-восточном секторе [20]. Привлечение информации по среднемесячным температурам воздуха на 29 метеостанциях в районе Северного Каспия также позволило установить уменьшение сумм отрицательных температур за зимний период и значительный рост среднемесячных температур марта в конце 1980-х гг. На рис.1 приведены многолетние ряды максимальных толщин льда (H_{\max} , см) с 1945 по 2018г. в двух пунктах наблюдений северо-восточного Каспия: Атырау и Пешной. Как видно из рис. 1, уменьшение толщины льда стабилизировалось в конце 1980-х – начале 1990-х гг. Поэтому период последних 20–30 лет можно считать квазистационарным и именно для этих новых климатических условий была разработана методика краткосрочных прогнозов суточного нарастания толщины льда.

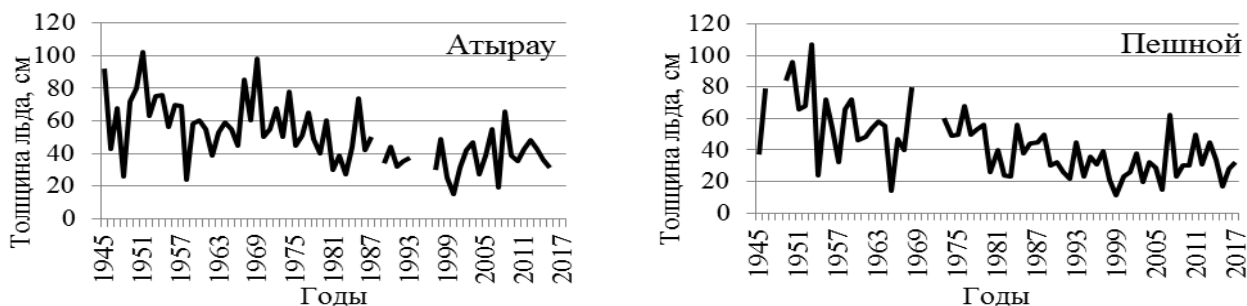


Рис. 1. Многолетние временные ряды максимальных толщин льда на станциях северо-восточной части Каспия
Fig.1. Long-term time series of maximum ice thicknesses in the north-eastern part of the Caspian

Гидрология
Наурозбаева Ж.К., Лобанов В.А.



Рис. 2. Многолетние временные ряды сумм отрицательных температур за зимний период на метеостанциях Пешной и Атырау

Fig.2. Long-term time series of sums of negative temperatures for Peshnoy and Atyrau stations

Основным фактором максимальной толщины льда является сумма отрицательных температур воздуха за холодный период года. Для ее расчета используется отрицательная среднесуточная температура воздуха. Временные графики этой характеристики приведены на рис. 2 для тех же пунктов наблюдений на станциях Пешной и Атырау за период наблюдений 1945–2018 гг. На рис. 2, как и на рис. 1, наблюдается переход к новым стационарным условиям с конца 20-го в. При этом средние суммы отрицательных температур (ΣT) на обеих метеостанциях уменьшились на 200°C : с $715\text{--}718^{\circ}\text{C}$ до $515\text{--}518^{\circ}\text{C}$. Основываясь классификацией типов зим в Северном Каспии по степени их суровости (Е.Я. Тютнев (1975), с дополнениями Ф.И. Валлера (1973) и П.И. Бухарицина (1994)) [6], можно сделать вывод о том, что в современный период чаще стали наблюдаться зимы, относящиеся к категории умеренных ($\Sigma T=700\text{--}400^{\circ}\text{C}$), в то время как в предыдущий период зимы чаще относились к категории суровых ($\Sigma T=900\text{--}700^{\circ}\text{C}$).

Подтверждением того, что сумма отрицательных температур воздуха – это действительно определяющий фактор максимальных толщин льда, являются полученные регрессионные зависимости для метеостанции Пешной, имеющие следующий вид:

$$\text{за период } 1945\text{--}2018 \text{ гг. } H_{\text{макс}} = -0,0625 \Sigma T + 4,1 \quad r = 0,72, \quad (1)$$

$$\text{за период } 1945\text{--}1979 \text{ гг. } H_{\text{макс}} = -0,0637 \Sigma T + 10,9 \quad r = 0,75, \quad (2)$$

$$\text{за период } 1980\text{--}2018 \text{ гг. } H_{\text{макс}} = -0,0349 \Sigma T + 12,1 \quad r = 0,69, \quad (3)$$

где r – коэффициент корреляции.

Вместе с тем из анализа уравнений, полученных за разные периоды, следует, что в последний период по отношению к предшествующему зависимость стала несколько хуже и скорость нарастания льда, которую характеризует коэффициент уравнения, уменьшилась с $0,0637$ до $0,0349$ см/град. Вероятно, это связано с повышением средней температуры воздуха за зиму и уменьшением продолжительности ледового периода.

Чтобы установить причину уменьшения максимальных толщин льда и сумм отрицательных температур воздуха на северо-востоке Каспия, необходимо рассмотреть динамику форм атмосферной циркуляции за многолетний период, которые и характеризуют особенности поступления тепла и холода в течение зимы. Г.Я. Вангенгеймом, с последующим дополнением А.А. Гирсом, проведено разделение макросиноптических процессов на формы W, C и E [10]. При форме W в толще тропосферы наблюдаются зональные движения воздуха и преобладают ветры западных направлений, которые приносят зимой тепло с Атлантического океана. Форма циркуляции E характеризует перенос воздуха воздушными массами с востока, которые зимой обычно приносят холод с территории Сибири. Форма атмосферной циркуляции C связана с меридиональным переносом. Переход

Гидрология

Наурозбаева Ж.К., Лобанов В.А.

от одних форм циркуляции в другие обусловлен возникновением в тропосфере стационарных волн большой амплитуды, что, в свою очередь, определяется условиями вихреобразования в атмосфере [18; 23–25; 28; 40 – 43].

Для анализа был выбран архив форм атмосферной циркуляции W, C, E месячной дискретности, который постоянно пополняется в Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ). При рассмотрении многолетних временных рядов числа дней с формами циркуляции W, C, E за декабрь – март с 1891 по 2018 г. было установлено, что последнее ступенчатое изменение отмечалось в конце 1980-х – начале 1990-х гг. в формах W и E, как показано на рис.3, а форма C практически остается без изменений.

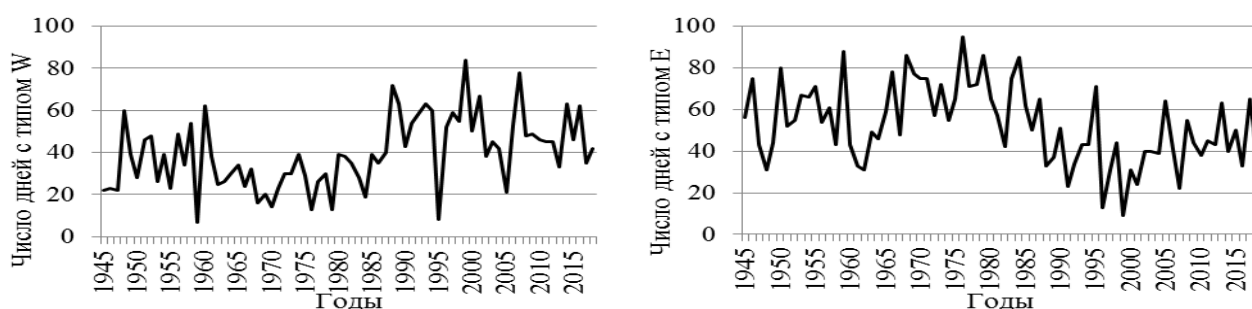


Рис. 3. Многолетние временные ряды числа дней с типом циркуляции W и E за декабрь – март

Fig. 3. Long-term time series of W and E circulation forms for December – March

Как показывают графики рис. 3, суммарное число дней с формой W увеличилось в среднем с 32 до 51 дня, а число дней с формой E уменьшилось с 61 до 40 дней, т.е. существенно в 1,5 раза в обоих случаях. Если же рассматривать вклады трех разных форм атмосферной циркуляции в %, то вклад E в последний период времени уменьшился в среднем с 55 до 35%, а вклад W увеличился в среднем с 20 до 40%, т.е. в 2 раза. Поэтому зимы с конца 1980-х – начала 1990-х гг. стали существенно теплее из-за роста влияния теплого атлантического воздуха и уменьшения числа холодных воздушных масс, приходящих из Сибири. Интересно отметить, что формы атмосферной циркуляции W и E также хорошо связаны между собой обратной зависимостью с коэффициентом корреляции $r = -0,86$. Однако получить долгосрочный прогноз суровости зимы не представляется возможным, так как корреляция сумм отрицательных температур с формами W и E очень низкая ($r = 0,4$) даже без учета заблаговременности.

Информация и методика

Разработка прогнозных зависимостей суточного нарастания льда осуществлялась для двух станций Северного Каспия: Пешной и Жанбай как наиболее репрезентативных морских станций. В качестве исходной информации рассматривались ежедневные наблюдения за нарастанием и уменьшением льда в течение периода ледостава и среднесуточной температурой воздуха с ноября по март в течение непрерывного периода с осени 2007 г. по весну 2018 г., что включало 11 зимних периодов. Кроме этого, рассматривались срочная информация о скоростях и направлениях ветра, среднесуточные данные о температуре воды и некоторые другие предполагаемые факторы.

Первым шагом к разработке методики прогнозов является выбор предполагаемых факторов. Исторически одной из первых прогнозных зависимостей, которые использовались в оперативной практике, является однофакторное уравнение, связывающее максимальную толщину льда с суммой отрицательных температур за зимний период [1–2, 9, 30]. В качестве примера такая зависимость была построена для пункта Пешной за многолетний период с 1980 по 2018 г., имеющая вид:

Гидрология
Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А.

$$H_{\text{макс}} = -0,034 \Sigma T_{\text{макс}} + 15,9 \quad r=0,75, \quad (4)$$

где $H_{\text{макс}}$ – максимальная толщина льда, см; $\Sigma T_{\text{макс}}$ – сумма отрицательных температур воздуха с начала устойчивого перехода температуры через 0°C в отрицательную область до даты максимальной толщины льда.

Зависимость (4) несколько лучше зависимости (3), так как в ней в качестве фактора рассматривалась сумма отрицательных температур не за весь зимний период, а только до даты максимальной толщины льда.

В свою очередь, сумму отрицательных температур можно представить в виде двух составляющих: средняя температура за зимний период ($T_{\text{ср}}$) и число дней с начала ледостава до максимальной толщины льда (D). Тогда уравнение (4) представимо в виде следующего двухфакторного:

$$H_{\text{макс}} = 0,258D + 1,946 T_{\text{ср}} - 0,385, \quad r = 0,75. \quad (5)$$

Хотя коэффициент корреляции и не увеличился, но в уравнении (5) можно оценить вклады отдельных составляющих, которые равны 71 и 29% соответственно для D и $T_{\text{ср}}$. Кроме того, свободный член уравнения (5) $b_0 = -0,385$ ближе к теоретически правильному, равному нулю при нулевых значениях факторов, в то время как в уравнении (4) $b_0 = 15,9$ см.

Для улучшения зависимости (4) рассматривалась возможность учета колебаний среднесуточной температуры воздуха внутри холодного периода. Величину такой изменчивости можно представить в виде среднего квадратического отклонения (СКО) от средней температуры. В результате удалось получить несколько улучшенное уравнение для $H_{\text{макс}}$:

$$H_{\text{макс}} = -0,0247 \Sigma T_{\text{макс}} + 3,27 \text{СКО} + 3,76, \quad r = 0,79, \quad (6)$$

где вклад фактора $\Sigma T_{\text{макс}}$ составляет 88,3%, а вклад СКО – 11,6%.

Построение зависимостей вида (4) – (6) за многолетний период еще раз подтвердило, что сумма отрицательных температур является главным фактором формирования толщины льда, которую следует использовать и во внутригодовом масштабе времени для каждого зимнего периода. С другой стороны, полученные уравнения (4) – (6) могут быть применены для предварительной оценки $H_{\text{макс}}$ по долгосрочному сезонному прогнозу температур воздуха.

Следующей проблемой, решаемой до разработки методики прогноза, была оценка однородности процессов нарастания и таяния льда. Доказательством того, что процессы нарастания и таяния льда происходят по-разному, служат графики рис.4, на которых в качестве примера построены зависимости нарастания и таяния льда от суммы отрицательных для станции Пешной за два зимних периода: 2007–2008 гг. и 2017–2018 гг.

Как следует из графиков рис.4, кривые нарастания и таяния льда не совпадают, так как скорости процессов нарастания и таяния разные, что на графиках отображается в виде гистерезиса. Отсюда следует, что эти процессы должны рассматриваться по одиночке. К сожалению, для процесса таяния льда число наблюдений совсем небольшое и поэтому надежные уравнения, тем более за несколько лет, получить не представляется возможным. Поэтому построение прогнозных зависимостей было ограничено только периодом нарастания льда до его максимального значения.

Гидрология
Наурозбаева Ж.К., Лобанов В.А.

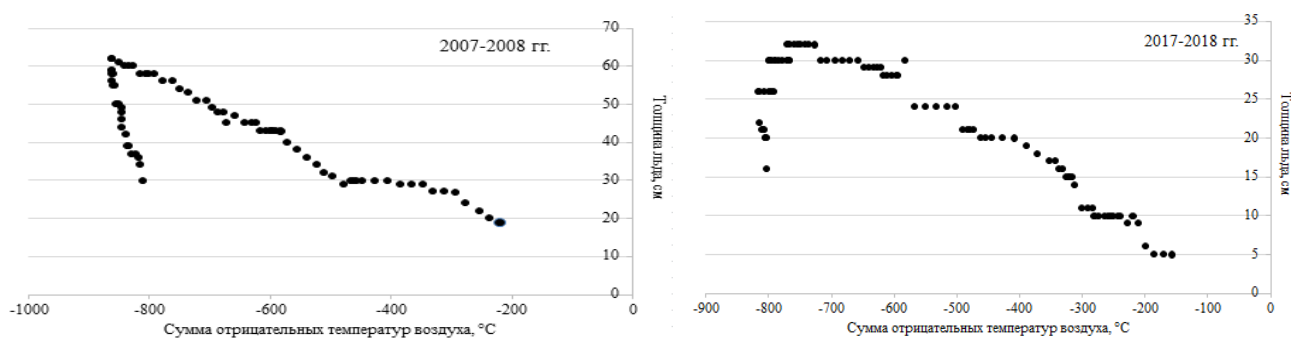


Рис. 4. Зависимости суточного нарастания и таяния льда за зимний период от суммы отрицательных температур воздуха на станции Пешной
Fig. 4. Dependences of daily growth and thawing of ice during the winter on the sum of negative temperatures at Peshnoy station

Последовательность разработки методики суточного прогноза толщины льда включает в себя следующие основные шаги, выполняемые для каждого пункта наблюдений.

1. Построение за каждый j -й зимний период зависимостей вида $H_i = f(\Sigma t_i)$, желательного линейного вида:

$$H_{ij} = -b_{1j} \Sigma t_{ij} + b_{0j}, \quad (7)$$

где H_{ij} – толщина льда в i -й день j -го периода ледостава, Σt_{ij} – сумма среднесуточных температур на i -й день от даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C в отрицательную область в j -й период ледостава; b_{1j} и b_{0j} – коэффициенты уравнения регрессии j -го периода ледостава; $j=1, n$ и n – общее число лет или периодов ледостава.

2. Осреднение коэффициентов b_{1j} и b_{0j} зависимостей вида (7) за многолетний n -летний период и получение общей прогнозной зависимости:

$$H_{ij} = -b_{1cp} \Sigma t_{ij} + b_{0cp}, \quad (8)$$

где b_{1cp} , b_{0cp} – средние многолетние коэффициенты b_{1j} и b_{0j} за период n лет.

3. Оценка стандартных случайных (σ_{ej}) и средних систематических погрешностей (Δ_j) расчета H_{ij} в каждый j -й период ледостава на основе наблюдаемых Σt_{ij} по общей прогнозной зависимости (8). Данный вид проверки является проверкой на зависимой информации, так как коэффициенты b_{1cp} и b_{0cp} получены по информации по всем n периодам ледостава.

4. Построение $n-1$ общих прогнозных уравнений вида (8), где из осреднения последовательно исключаются коэффициенты b_{1j} и b_{0j} каждого j -го зимнего периода для последующей проверки на независимом от расчетов материале наблюдений.

5. Оценка стандартных случайных (σ_{enj}) и средних систематических погрешностей (Δ_{nj}) расчета H_{ij} на независимом материале в каждый j -й период ледостава на основе наблюдаемых Σt_{ij} по общей прогнозной зависимости (8), полученной без этого j -го периода ледостава.

6. Оценка стандартных случайных (σ_{enpj}) и средних систематических погрешностей (Δ_{npj}) расчета H_{ij} на независимом материале в каждый j -й период ледостава на основе прогнозных суточных температур воздуха t_{ijnp} заблаговременностью 1 сутки по общей прогнозной зависимости (8), полученной без этого j -го периода ледостава.

7. Оценка оправдываемости ежедневных прогнозов толщины льда в каждый j -й период ледостава как на зависимой, так и на независимой от расчетов информации.

Гидрология
Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А.

Фактически п.6 представляет собой оценку эффективности методики прогноза в реальных условиях его применения, когда данный зимний период не включен в построение общего прогнозного уравнения и среднесуточная температура также является прогнозной.

Полученные результаты

Для большинства лет были получены эффективные уравнения линейного вида (7), в которых коэффициент b_1 характеризует среднюю скорость нарастания льда (в см) при условии, что сумма отрицательных температур увеличится на 1°C , а коэффициент b_0 должен быть близок 0, т.к. при сумме отрицательных температур, равной нулю, толщина льда также должна быть нулевой. При расчете по методу наименьших квадратов (МНК) коэффициент b_0 может отличаться от нуля, так как включает в себя систематические погрешности аппроксимации [21–22; 27].

Результаты расчета коэффициентов зависимостей вида (7) для всех рассматриваемых лет наблюдений с 2007 по 2018 г. и для двух пунктов Пешной и Жанбай приведены в табл.1, где

r – коэффициент корреляции зависимости (7);

H_{\max} – максимальная толщина льда за весь период, см;

n – количество дней нарастания льда до максимальной толщины;

H_0 – толщина льда на момент начала измерения, см;

Σt – сумма отрицательных температур от момента устойчивого перехода через 0°C до даты наблюдения максимальной толщины льда ($^\circ\text{C}$);

$\Delta H = H_{\max} - H_0$ – размах толщины льда, используемый при построении зависимости (7).

Таблица 1

Коэффициенты уравнения (7) и другие характеристики зимнего периода для станций Пешной и Жанбай
Coefficients of equation (7) and other characteristics of the winter period for Peshnoy and Zhanbay stations

Зимний период	r	b_1	b_0	H_{\max}	n	H_0	Σt	ΔH
Пешной								
2007–2008	0.99	-0.07	1.1	62	53	19	847	43
2008–2009	0.92	-0.05	2.3	24	53	12	492	12
2009–2010	0.94	-0.06	4.1	30	57	8	495	22
2011–2012	0.98	-0.05	3.0	50	89	10	916	40
2012–2013	0.98	-0.07	0.9	32	46	13	453	19
2013–2014	0.93	-0.11	4.0	45	61	9	437	36
2014–2015	0.95	-0.05	2.0	34	93	12	575	22
2015–2016	0.88	-0.08	3.6	17	26	10	166	7
2016–2017	0.94	-0.03	3.9	28	82	12	604	16
2017–2018	0.99	-0.04	-0.8	32	62	5	727	27
Среднее	–	-0.061	2.4	–	–	–	–	–
Максимум	–	-0.11	4.1	62	93	19	916	–
Минимум	–	-0.03	-0.8	17	26	5	166	–
Жанбай								
2007–2008	0.99	-0.05	6.2	51	80	8	911	43
2008–2009	0.84	-0.02	8.2	22	47	15	645	7
2009–2010	0.98	-0.02	17.2	28	37	22	578	6
2011–2012	0.99	-0.07	0.8	58	77	7	763	51
2012–2013	0.93	-0.08	4.1	33	37	10	339	23
2013–2014	0.97	-0.07	4.9	39	47	7	462	32
2014–2015	0.96	-0.06	5.1	28	64	8	394	20
2015–2016	0.86	-0.08	3.0	19	27	6	154	13
2016–2017	0.93	-0.05	9.5	35	60	9	527	26
2017–2018	0.92	-0.11	2.7	38	50	1	359	37
Среднее	–	-0.06	5.9	–	–	–	–	–
Максимум	–	-0.11	14.8	58	80	22	911	–
Минимум	–	-0.02	0.8	19	27	1	154	–

Гидрология
Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А.

В табл.1 жирным шрифтом выделены зимние периоды, в которые прирост толщины льда для построения уравнения регрессии был совсем небольшим от 6–7 см до 13 см. При этом максимальная толщина льда была небольшой от 17 до 28 см и измерения начались с H_0 , которая незначительно отличалась от H_{\max} . Например, зимний период 2015–2016 гг. в обоих пунктах наблюдений отличался небольшой суммой отрицательных температур и незначительной максимальной толщиной льда в 17–19 см. В эту зиму был отмечен поздний устойчивый переход температур воздуха в отрицательную область в начале января, а максимальная толщина льда наблюдалась уже в конце этого месяца. При этом среднесуточная температура воздуха колебалась около нуля, а низкие температуры в пределах -11 – -13°C были всего на протяжении трех – пяти дней. Таким образом, зимние периоды, имеющие маленький диапазон нарастания льда, были исключены из дальнейших расчетов.

В таких ситуациях коэффициенты b_1 и b_0 , которые не могут быть надежно определены, не использовались при осреднении за многолетний период для определения $b_{1\text{cp}}$ и $b_{0\text{cp}}$. В результате осреднения остальных коэффициентов были получены следующие прогнозные уравнения за многолетний период:

$$\text{для пункта Пешной} \quad H_{ij} = -0,06 \sum t_{ij} + 2,28, \quad (9)$$

$$\text{для пункта Жанбай} \quad H_{ij} = -0,07 \sum t_{ij} + 4,76. \quad (10)$$

При среднем значении коэффициента $b_{1\text{cp}} = -0,06$ для Пешного его изменения по годам составляли от $-0,03$ до $-0,11$, т.е. почти в 4 раза, а при среднем $b_{1\text{cp}} = -0,07$ для Жанбая изменения составили от $-0,02$ до $-0,11$, т.е. более чем в 5 раз. Изменчивость коэффициента b_0 также достаточно большая. При средних значениях $b_{0\text{cp}}$, равных 2 см для Пешного и 5 см для Жанбая, их погодичные значения для Пешного достигают 4 см, а для Жанбая – 6–9 см и даже 17 см, что может привести к большим систематическим погрешностям при расчете по среднему значению.

Несмотря на достаточно большую межгодовую изменчивость b_1 и b_0 , каких-либо закономерностей во времени за такой небольшой период не было установлено и поэтому осреднение вполне обосновано. Также в связи с большими коэффициентами корреляции $r > 0,9$ включение в уравнения других факторов, например скорости ветра, наличие снега на льду, не имело практического смысла, также как и использование другой функции кроме прямолинейной.

Оценка эффективности прогнозных зависимостей

В соответствии с п.3–6 методики были рассчитаны стандартные случайные и средние систематические погрешности прогноза как на зависимой, так и на независимой информации. Результаты оценки эффективности прогнозных зависимостей приведены в табл. 2 для двух пунктов наблюдений. Кроме того, в этой таблице приведены СКО толщин льда за каждый j -й ледовый период (σ_y) и стандарт остатков каждого j -го уравнения (σ_ε) вида (7), рассчитываемый по формуле.

Жирным шрифтом в табл. 2 обозначены ситуации предельных систематических погрешностей.

$$\sigma_\varepsilon = \sigma_y \sqrt{1 - r^2} \quad (11)$$

По результатам табл.2 следует, что наименьшие стандартные случайные погрешности отличаются при использовании коэффициентов уравнений каждого j -го холодного периода и равны в среднем 1,9 см для Пешного (при наименьшей $\sigma_\varepsilon = 0,9$ см и наибольшей $\sigma_\varepsilon = 2,5$ см) и 2,5 см (при наименьшей $\sigma_\varepsilon = 1,4$ см и наибольшей $\sigma_\varepsilon = 5,5$ см) для Жанбая.

Гидрология
Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А.

Таблица 2

Результаты оценки эффективности прогноза нарастания ледового покрова
The evaluation results of the ice growth forecast efficiency

Холодный период	σ_y	σ_ε	Зависимая информация		Независимая информация	
			σ_{ej}	Δ_j	σ_{enj}	Δ_{nj}
<i>Пешной</i>						
2007–2008	12.4	2.5	2.6	5.3	2.6	5.2
2008–2009	2.2	0.9	5.9	-2.0	5.9	-2.0
2009–2010	6.1	1.9	2.8	3.9	2.8	4.1
2011–2012	11	1.9	5.4	-3.5	5.4	-3.4
2012–2013	5.5	1.9	1.9	2.8	1.9	2.6
2013–2014	10.4	2.5	3.8	11.9	4.8	13.4
2014–2015	5.8	2.2	3.9	-0.2	3.9	-0.2
2016–2017	4.9	1.5	5.1	-5.5	5.1	-5.3
2017–2018	8.2	1.4	2.4	-9.1	2.4	-9.5
Среднее	7.4	1.9	3,8	0,4	3,9	0,5
<i>Жанбай</i>						
2007–2008	14.7	2.1	5.7	-6.3	5.7	-6.0
2011–2012	14.4	2.0	1.6	-2.9	1.6	-3.6
2012–2013	6.4	2.1	2.4	2.4	2.4	2.3
2013–2014	9.4	2.1	2.1	1.3	2.1	1.3
2014–2015	5.7	1.4	3.3	-2.9	3.3	-2.8
2016–2017	6.1	2.1	2.9	0.9	2.9	1.7
2017–2018	12.3	5.5	5.6	4.9	6.1	6.8
Среднее	10	2,5	3,4	-0,4	3,4	-0,04

При оценке на зависимой информации, когда в каждый j -й ледовый период применяется одно и то же уравнение со средними коэффициентами b_{1cp} и b_{0cp} , получены средние стандартные погрешности: 3,8 см для Пешного (при наименьшей $\sigma_{ej}=0,9$ см и наибольшей $\sigma_{ej}=5,9$ см) и 3,4 см (при наименьшей $\sigma_{ej}=1,6$ см и наибольшей $\sigma_{ej}=5,6$ см) для Жанбая. Поэтому применение общего за многолетний период уравнения вместо индивидуальных за каждый год увеличивает стандартную случайную погрешность более чем в 2 раза. Однако кроме случайной погрешности при применении общего уравнения вместо индивидуальных имеет место и систематическая погрешность, равная в среднем 0,4 см для Пешного при вариации Δ_j от -9,1 см до +11,9 см и равная в среднем -0,4 см для Жанбая при вариации Δ_j от -6,3 см до +4,9 см.

При оценке на независимой информации при задании фактической среднесуточной температуры средние стандартные случайные погрешности по сравнению с зависимой информацией практически не увеличиваются и равны 3,9 см для Пешного (при вариации σ_{enj} от 1,9 см до наибольшей $\sigma_{enj}=5,9$ см) и также 3,4 см (при наименьшей $\sigma_{enj}=1,6$ см и наибольшей $\sigma_{enj}=6,1$ см) для Жанбая. Аналогичным образом практически не изменились и систематические погрешности, которые в среднем также близки к 0, а предельные Δ_{nj} составляют -9,5 см и +13,4 см для Пешного и -6,0 см и +6,8 см для Жанбая. Поэтому замена индивидуальных уравнений каждого ледового сезона на среднее многолетнее существенно больше увеличивает погрешности, чем применение этого общего уравнения для зависимой или независимой информации. С другой стороны, построить новое индивидуальное уравнение за тот зимний сезон, когда даются прогнозы, невозможно.

В последней ситуации проверки на независимой информации, когда учитываются погрешности суточного прогноза температуры, была теоретически оценена только σ_{enpj} , а систематическая погрешность суточного прогноза температуры принималась равной нулю ($\Delta_{npj}=0$). Считая, что стандартная случайная погрешность суточного прогноза температуры за зимние периоды небольшая и может составлять в среднем $\sigma_{enpj}=2^\circ\text{C}$ (интервал градации

Гидрология

Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А.

суточного прогноза), по уравнениям (9) и (10) можно оценить, насколько изменится толщина льда при задании суточной температуры в интервале $\pm 2^\circ\text{C}$. Очевидно, погрешность будет тем меньше, чем больше сумма предыдущих накопленных отрицательных температур, так как на следующий день прогнозное значение заменяется на фактически наблюдаемое и вклад следующей прогнозной температуры в общую сумму уменьшается. Если считать, что средняя сумма температур за зимний период равна -516°C (рис.1), то на основе уравнений (9) и (10) можно рассчитать разность при задании суммы в -514°C и в -518°C за счет погрешности прогноза последних суток в $\pm 2^\circ\text{C}$. Эта разность соответствует $\sigma_{\text{эпр}}$ и будет составлять всего 0,3 см. Если же задать начальную небольшую сумму, например в 20°C , то разность в определении суточной толщины льда будет также всего 0,2 см. Поэтому влияние погрешности суточного прогноза температуры практически не будет влиять на точность прогнозирования суточной толщины льда.

Оценка оправдываемости прогнозов

Согласно Наставлению по службе прогнозов (раздел 3, часть III), службе морских гидрологических прогнозов, оценка прогнозов толщины льда может производиться как для отдельного пункта (порта), так и для района моря. При оценке прогнозов толщины льда допустимая ошибка прогноза устанавливается равной 30% от фактического ее изменения за период заблаговременности прогноза [31, 35]. Если прогноз толщины льда не выходит за пределы допустимой ошибки, он считается оправдавшимся. При малом изменении толщины льда ($\leq 5\text{см}$) допустимая погрешность является постоянной и равна $\Delta H_{\text{п}} = \pm 1\text{см}$, в диапазоне изменения 6–10 см – $\Delta H_{\text{п}} = \pm 3\text{см}$, в диапазоне 11–15 см – $\Delta H_{\text{п}} = \pm 4\text{см}$ и т.д.

Оценка оправдываемости прогнозов осуществлялась на независимой информации различной заблаговременности от 1 до 10 суток за каждый зимний сезон всех лет наблюдений на двух станциях. При этом изменение температуры воздуха за период заблаговременности прогноза задавалось фактическим, а не прогнозным. Результаты оправдываемости краткосрочных (1–3 сут.) и среднесрочных (5–10 сут.) прогнозов (в %) для общего числа прогнозов n за каждый зимний сезон приведены в табл.3.

Как следует из результатов табл.3, оправдываемость суточных прогнозов высокая и составляет в среднем 89–90% при вариации от 82 до 98%, средняя оправдываемость прогнозов с заблаговременностью 3 сут. ниже – всего 67% при существенной вариации от 51 до 80%. Средняя оправдываемость среднесрочных прогнозов еще ниже и составляет 55–56% на 5 сут. и 43–55% на 10 сут. с большой вариацией от 12 до 90%. Эти значения оправдываемости прогнозов нарастания льда получены при фактическом задании температур, т.е. при прогнозах их 100%-ной оправдываемости. Если же принять среднюю оправдываемость суточных прогнозов температуры воздуха 90%, а прогнозов на 3 сут. – 80% и рассматривать самые неблагоприятные условия, когда погрешности прогнозов температур воздуха и льда не связаны между собой (что маловероятно), то на основе произведения вероятностей независимых событий получим среднюю оправдываемость прогнозов нарастания льда на сут. 80%, на трое сут. – примерно 54%. При прогнозах ледовых явлений методику краткосрочного прогнозирования следует считать эффективной, если с помощью ее оправдываемость составляет 75 % [9, 31, 35]. Поэтому можно сделать вывод, что достаточно надежный прогноз нарастания толщины льда в северо-восточной части Каспия имеет заблаговременность одни сут., может иногда и 3 сут., но не больше.

Разработанная методика краткосрочных прогнозов нарастания толщины льда была апробирована и для условий фактического прогноза температур воздуха для станции Пешной за период трех зимних периодов с 2016 по 2019 г. Суточный прогноз температур был взят по ближайшей метеостанции Атырау с диапазоном прогноза температуры в 2°C , и по уравнению связи с суммой отрицательных температур были получены независимые прогнозы суточного

Гидрология
Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А.

прироста толщины льда в диапазоне, но его величина составляла всего 0,2 см и не влияла на оценку оправдываемости. В результате за зимний период 2016–2017 гг. с заблаговременностью 1 сут. оправдалось 94% прогнозов из общего числа – 72 прогноза; за 2017–2018 гг. – 91% из 56 прогнозов; за 2018–2019 гг. – 94% из 77 прогнозов. Если сравнить результаты с данными табл. 3 за 2016–2017 гг. и 2017–2018 гг., то можно сделать вывод, что применение вместо фактических наблюдений прогнозных среднесуточных температур воздуха практически не изменило оправдываемость прогнозов: за зимний период 2016–2017 гг. она так и осталась 94%, а за зимний период 2017–2018 гг. снизилась всего на 2% (в табл.3 – 93%). Поэтому можно сделать вывод о том, что вследствие высокой точности прогнозов температуры воздуха на сутки и малого влияния точности отдельного суточного прогноза на уже накопленную сумму отрицательных температур погрешность прогноза температуры практически не влияет на оправдываемость прогнозов суточного нарастания толщины льда.

Для практической реализации разработанной методики прогноза суточного нарастания льда необходимо начинать суммирование отрицательных температур от даты ее устойчивого перехода в отрицательную область, а надежные прогнозы будут иметь место при линейной зависимости $H=f(\Sigma t)$, которая начинается при $\Sigma t = -110 - -130^\circ\text{C}$, что соответствует толщине льда около 10 см.

Таблица 3

Результаты оценки оправдываемости прогноза нарастания ледового покрова
The results of the ice growth forecast accuracy

Холодный период	1 сут.		3 сут.		5 сут.		10 сут.	
	n	% опр.	n	% опр.	n	% опр.	n	% опр.
<i>Пешной</i>								
2007–2008	52	88	50	64	48	56	43	58
2008–2009	51	88	49	61	47	40	42	12
2009–2010	56	95	54	65	52	60	47	53
2011–2012	88	82	86	69	84	60	79	51
2012–2013	45	87	43	58	41	37	36	42
2013–2014	51	96	49	65	47	60	42	43
2014–2015	92	89	90	69	88	57	83	47
2016–2017	81	94	79	80	77	65	72	33
2017–2018	54	93	52	73	50	58	45	47
<i>Жанбай</i>								
2007–2008	79	86	77	51	75	41	70	51
2011–2012	76	89	74	80	72	82	67	90
2012–2013	37	89	35	63	33	61	28	54
2013–2014	46	87	44	68	42	64	37	59
2014–2015	84	87	82	72	80	55	75	52
2016–2017	59	85	57	75	55	55	50	48
2017–2018	53	98	51	59	49	31	44	32

Выводы

В результате проведенного исследования разработана методика краткосрочного прогноза нарастания толщины льда в северо-восточной части Каспийского моря по уникальным данным наблюдений суточной толщины льда за последний период с 2007 по 2019 г. на двух морских станциях Пешной и Жанбай. Установлено, что наиболее эффективной для этой цели является линейная зависимость между толщиной льда и суммой отрицательных температур для фазы нарастания льда до максимальной его толщины с полученными коэффициентами корреляции $r > 0,9$.

Гидрология

Наурозбаева Ж.К., Лобанов В.А.

Оценка эффективности применения такой зависимости со средними многолетними коэффициентами осуществлена на зависимом и независимом от расчетов материале наблюдений. Полученная оправдываемость суточных прогнозов нарастания толщины льда при задании фактических температур воздуха составила в среднем 89–90% при вариации в отдельные годы от 82 до 98%. При использовании прогнозов суточных температур за 3 последних зимних сезона оправдываемость прогнозов не уменьшилась и составила 91–94%.

Проверка возможности применения разработанной методики для прогнозов большей заблаговременности показала, что в лучшем случае она может быть использована для краткосрочных прогнозов на 3 суток, а для среднесрочных прогнозов на 5–10 сут. уже не эффективна, так как оправдываемость становится 50% и ниже.

Помимо разработки методики прогнозов осуществлено также исследование многолетних изменений максимальной толщины льда, сумм отрицательных зимних температур и форм атмосферной циркуляции W, E и C, которые характеризуют климатический фон Прикаспийского региона. Установлено, что максимальная толщина льда на Каспии ступенчато уменьшилась в 1980-х гг. и наибольшее уменьшение в среднем на 20–28 см произошло в северо-восточной его части. Аналогичным образом сумма отрицательных температур увеличилась, повторяемость суровых зим уменьшилась, а средних и теплых выросла, что обусловлено усилением западного переноса воздушных масс: увеличением формы W и уменьшением формы E атмосферной циркуляции. Надежной зависимости между суммой отрицательных зимних температур и индексами W и E установить не удалось, так как $r=0,4$, в то время как построенные за многолетний период зависимости максимальных толщин льда от сумм отрицательных зимних температур на станциях имели коэффициенты корреляции $r=0,7-0,8$. Однако, если такая зависимость в перспективе может быть получена, то повысится заблаговременность определения максимальной толщины льда и, в свою очередь, надежность и заблаговременность прогнозов нарастания толщины льда.

Библиографический список

1. Абузьяров З.К., Кудрявая К.И., Серяков Е.И., Скриптунова Л.И. Морские прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 319 с.
2. Абузьяров З.К., Шамраев Ю.И. Морские гидрологические информации и прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 219 с.
3. Андреев М. Д. Среднесрочный прогноз ледовых условий на неарктических морях Европейской территории: автореф. дисс. канд. географ. наук: 11.00.08 / Гидрометеорол. науч.-исслед. центр Рос. Фед. М., 1992. 21 с.
4. Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А. Каспийское море экстремальные гидрологические события. М.: Наука, 2007. 381 с.
5. Бухарицин П.И. Расчет и прогноз толщины наслоенного льда в судоходных районах северо-западной части Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 1986. №4. С. 87–93.
6. Бухарицин П.И. Исследования Каспийских льдов. Ледовый режим Каспия, процессы ледообразования, характеристики ледяного покрова, методы расчета и прогноза ледовых явлений. // Palmarium Academic Publishing. 2019. 133 с.
7. Бухарицин П.И. Особенности ледового режима и методы прогноза ледовых условий северной части Каспийского моря: автореф. дисс. канд. географ. наук Л.: Изд-во ААНИИ, 1986. 20 с.
8. Гидрометеорология и гидрохимия морей, Т. VI. Каспийское море, Вып. 1. // Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 359 с.
9. Георгиевский Ю.М. Краткосрочные гидрологические прогнозы. Л.: ЛГМИ, 1982. 99 с.
10. Гирс А.А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1971. С. 7–31.
11. Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е. Морской лед. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 318 с.

Гидрология

Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А.

12. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей Европейской части России. М.: ФГБУ «Гидрометцентр России», 2014. 608 с.
13. *Думанская И.О.* О методике долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России. // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 11. С. 64–77.
14. *Закс Л.* Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
15. *Ивкина Н.И., Наурызбаева Ж.К.* Изменение характеристик ледового режима казахстанской части Каспийского моря в связи с изменением климата // *Гидрометеорология и экология*, 2015. № 2. С. 28–35.
16. *Ивкина Н.И., Наурызбаева Ж.К., Сауров С.Б.* Экстремально холодные зимние периоды на Казахстанской части Каспийского моря за последние десятилетия // *Водные ресурсы Центральной Азии и их использование: мат. науч.-практ. конф., посвященной подведению итогов объявленного ООН десятилетия «Вода для жизни»*. Алматы, Казахстан, 2016. Кн.2. С. 394–400.
17. *Ивкина Н.И., Султанов Н.К.* Особенности ледообразования в северо-восточной части Каспийского моря. // *Гидрометеорология и экология*. 2012. № 4. С. 42–51.
18. *Калинин Н.А.* Динамическая метеорология: учебник. 2-е изд., испр. / Перм. унт. Пермь: Перм. кн. изд-во, 2009. 256 с.
19. *Кузнецов В.В.* Экологический мониторинг каспийского тюленя в ледовый период на акватории северной части Каспийского моря // *Сб. науч. тр. по мат. VIII Межд. конф.* М.: Изд-во РОО «Совет по морским млекопитающим». 2015. С. 256–262.
20. *Лобанов В.А., Наурызбаева Ж.К.* Климатические изменения толщины льда на северном Каспии // *Учен. зап. РГГМУ*. 2018. № 53. С. 172–187. URL: <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/issue53/> (дата обращения: 26.02.2019 г.)
21. *Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е.* Практикум по климатологии. Ч.1: СПб., 2011. 144 с.
22. *Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е.* Практикум по климатологии. Ч. 2: СПб., 2012. 141 с.
23. *Лобанов В.А.* Лекции по климатологии. Ч. 2. Динамика климата. Кн.1. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2016. 332 с.
24. *Лобанов В.А.* Лекции по климатологии. Ч. 2 Динамика климата. Кн. 2 в двух книгах: учебник. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2018. 377 с.
25. *Лобанов В.А., Тоцакова Г.Г.* Особенности и причины современных климатических изменений в России. // *Географический вестник Пермского университета*, 2016. № 3(38). С. 79–89.
26. *Люшвин П.В.* Причина колебаний численности каспийских и беломорских тюленей. *Морские исследования и образование MARESEDU – 2018: Тр. VII Межд. науч.-практ. конф.* М.: ООО "Полипрес". 2018. С. 124–128.
27. *Малинин В.Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: Изд-во. РГГМУ, 2008. 408 с.
28. *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.
29. *Фролова Е.И., Гаврило В.П.* Морской лед. СПб.: Гидрометеиздат, 1997. 402 с.
30. *Попов Е.Г.* Гидрологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 256 с.
31. Наставление по службе прогнозов. Разд. 3, ч. III. Служба морских гидрологических прогнозов. Зарегистрирован ЦМТР ФГБУ "НПО "Тайфун", за номером РД 52.27.759-2011 от 21.11.2011 г. 193 с.
28. *Нестеров Е.С.* Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: ТРИАДА ЛДТ, 2013. 144с.
33. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003, М.: Госстрой России, 2004. 73 с.
34. *Панин Г.Н., Мамедов Р.М., Митрофанов И.В.* Современное состояние Каспийского моря. М.: Наука, 2005. 356 с.
35. Руководство по гидрологическим прогнозам. Прогноз ледовых явлений на реках и водохранилищах. Вып. 3. Л.: Гидрометиздат, 1989. 165 с.
36. *Утешев А.С.* Климат Казахстана. Л.: Гидрометиздат, 1959. 232 с.

Гидрология

Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А.

37. URL: <https://ecologynow.ru/knowledge/kaspiiskii-tulen-vymiranie-i-zanesenie-v-krasnuu-knigu> (24.12.2019 г.)
38. Ivkina N., Naurozbayeva Zh., Klove B. (2017), "Influence of climate change to the ice regime of the Caspian sea" <http://www.water-ca.org/article/2589> 15 p.
39. Kouraev A.V., Papa F., Mognard N.M., Buharizin P.I., Cazenave A., Cretaux J-F., Dozortseva J., Remy F. (2004) "Sea ice cover in the Caspian and Aral Seas from historical and satellite data." *Journal of Marine Systems*. Volume 47, Issues 1-4, pp. 89–100
40. Haerberli W., Hoelzle M., Maisch M. (2001) "Glaciers as Key Indicator of Global Climate Change. Climate of the 21st Century: changes and risk. Scientific facts" Editors: J.L. Lozan, H. Grabl, P. Hupfer. pp. 212–220
41. Hoy A., Matschullat J., Sepp M. (2013) "Atmospheric circulation variability in Europe and northern Asia (1901 to 2010). Theoretical and applied climatology" Springer Verlag Wien. T. 113. №: 1–2. pp. 105–126.
42. Hupfer P. (2001) "Climate and climate system. Climate of the 21st Century: changes and risk." Scientific facts. Editors: J.L. Lozan, H. Grabl, P. Hupfer. 2001. pp.15–21.
43. Savelieva N.I., Semiletov I.P., Weller G.E. Vasilevskaya L.N., Yusupov V.I. (2004) "Climate change in the northern Asia in the second half of the 20th century. Pacific oceanography." T. 2. № 1-2. pp. 74–84.
44. Sidorenkov N.S., Orlov I.A. (2008) "Atmospheric circulation epochs and climate changes Russian meteorology and hydrology." Allerton press, inc. (New York) T. 33. № 9. pp. 553–559.
45. Temimi M., Ghedira H., Khanbilvardi R., Smith K., Romanov P. (2011) "Sea-ice monitoring over the Caspian sea using geostationary satellite data. International journal of remote sensing." Taylor & Francis T. 32. № 6. pp. 1575–1593.

References

1. Abuzyarov Z.K., Kudrayvaya K.I., Seryakov E.I., Skriotunova L.I. (1988), *Morskie prognozy*. [Seas forecast]. L.: Hydrometizdat, 319 p.
2. Abuzyarov Z.K., Shamraev Y.I. (1974), *Morskie gidrologicheskie informatsii i prognozy*. [Marine hydrological informations and forecasts]. L.: Hydrometizdat, 219 p.
3. Andreev M. D. (1992), *Srednesrochnyi 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 / Hydrometeorological scientific researcher center of Rus. Fed., M., 21 p.: RSL OD, 9 92-4/2128-6
4. Bolgov M.V., Krasnozhon G.F., Lubushin A.A. (2007), *Kaspiyskoe more ekstremal'nye gidrologicheskie sobytiya*. [Caspian Sea extreme hydrological events]. M.: Science, 381 p.
5. Bukharicin P.I. (1986), *Raschet i prognoz tolscheny nasloennogo l'da v sudahodnykh rayonah severo-zapadnoy chasti Kaspiyskogo moray*. [Calculation and forecast of the thickness of layered ice in shipping areas of the northwestern part of the Caspian Sea // Meteorology and hydrology. №4. P. 87–93.
6. Bukharicin P.I. (2019), *Isledovaniya Kaspiyskikh l'dov. Ledovyi rezhim Kaspiya, processy ledoobrazovaniya, harakteristiki ledyanogo pokrova, metody rascheta i prognoza ledovykh yavleniy*. [Caspian ice researching. The Caspian ice regime, ice formation processes, ice cover characteristics, methods for calculating and predicting ice phenomena]. Palmarium Academic Publishing, 133 p.
7. Bukharicin P.I. (1986), *Osobennosti ledovogo rezhima i metody prognoza ledovykh uslovii severnoi chasti Kaspiyskogo moray*. [Features of the ice regime and forecast methods of ice conditions in the northern part of the Caspian Sea: abstract of thesis. k g. s. L.: AASII, 20 c.
8. *Gidrologiya i gidrohimiya morei*. (1992), [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas], volume VI. Caspian Sea, vol. 1. Hydrometeorological conditions. SPb.: Hydrometeoizdat, 359 p.
9. Giorgievskiy Y.M. (1982), *Kratkosrochnye gidrologicheskie prognozy*, [Short-term hydrological forecasts]. L.: LHMI, 99 p.
10. Girs A.A. (1971), *Mnogoletnie kolebaniya atmosfernoii circulyacii i dolgosrochnye gidrometeorologicheskie prognozy*. [Long-term atmospheric circulation fluctuations and long-term hydrometeorological forecasts. L.: Hydrometizdat, P. 7–31.
11. Doronin U.P., Heysin D.E. (1975), *Morskoy led*. [Ice of the sea]. L.: Hydrometizdat, 318 p.
12. Dumanskaya I.O. (2014), *Ledovye usloviya morei Evropeyskoi chasti Rossii*. [European part of Russia seas ice conditions]. M.: FSFO «Hydrometcenter of Russia», 608 p.

Гидрология

Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А.

13. Dumanskaya I.O. (2011), *O metodike dolgosrochnogo prognoza ledovyh uslovii na evropeiskih moryah Rossii*. [Long-term forecast methodology for the ice conditions on the European seas of Russia]. // *Meteorology and hydrology*. № 11. P. 64–77.
14. Zaks L. (1976), *Statisticheskoe otsenivanie*. [Statistical Evaluation]. M.: Statistica, 1976. 598 p.
15. Ivkina N.I., Naurozbayeva Zh.K. (2015), *Izmeneniya harakteristik ledovogo rezhima kazhstanskoi chasti Kaspiyskogo moray, v svyazi s izmeneniem klimata*. [Due to climate change Ice regime characteristics change in the Kazakhstan part of the Caspian Sea] // *Hydrometeorology and Ecology*, № 2. P. 28–35.
16. Ivkina N.I., Naurozbayeva Zh.K., Sairov S.B. (2016), *Ekstremal'no holodnye zimnie periody na Kazhstanskoy chasti Kaspiyskogo moray za poslednie desyatiletiya*. [Extremely cold winter periods in the Kazakhstan part of the Caspian Sea over the past decades] // *Water resources of Central Asia and their use. Materials of the scientific-practical conference devoted to summing up the results of the UN Decade "Water for Life"*. Almaty, Kazakhstan, 2016. Book 2.P. 394–400.
17. Ivkina N.I., Sultanov N.K. (2012) *Osobennosti ledoobrazovaniya v severo-vostochnoi chasti Kaspiyskogo moray*. [Features of ice formation in the north-eastern part of the Caspian Sea] // *Hydrometeorology and Ecology*, № 4. P. 42–51.
18. Kalinin N.A. (2009), *Dinamicheskaya meteorologiya* [Dynamic meteorology] Textbook. 2nd ed., Rev. Perm State Nat. Res. Univ., Perm. 256 p.
19. Kuznecov V.V. (2015), *Ekologicheskii monitoring kaspiyskogo tulenya v ledovyi period na akvatorii Kaspiyskogo moray*. [Ecological monitoring of the Caspian seal during the ice period in the waters of the northern part of the Caspian Sea]. Collection of scientific papers of the VIII international conference materials. Publisher: ROO "Council on Marine animals". M.: P. 256–262.
20. Lobanov V.A., Naurozbayeva Zh.K. (2018), *Klimaticheskie izmeneniya tolshiny l'da na severnom Kaspie*. [Climatic changes in the thickness of ice in the northern Caspian] // *Scientific notes of the RSHU*. № 53. P. 172-187. <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/issue53/>
21. Lobanov V.A., Smirnov I.A., Shadursky A.E., (2011), *Praktikum po klimatologii. Chast' 1. (uchebnoye posobiye)* [Workshop on climatology. Part 1. (Textbook)]. Ed. RSHU, St. Petersburg. 144p.
22. Lobanov V.A., Smirnov I.A., Shadursky A.E., (2012), *Praktikum po klimatologii. Chast' 2. (uchebnoye posobiye)* [Workshop on climatology. Part 2. (Textbook)]. Ed. RSHU, St. Petersburg. 141p.
23. Lobanov V.A. (2016), *Lektsii po klimatologii. Chast' 2 Dinamika klimata. Kniga 1*[Lectures on climatology. Part 2 Climate dynamics. Book 1]. Ed. RSHU, St. Petersburg. 332 p.
24. Lobanov V.A. (2018), *Lektsii po klimatologii. Chast' 2 Dinamika klimata. Kniga 2 v dvukh knigakh: uchebnik*. [Lectures on climatology. Part 2 Climate dynamics. Book 2 in two books: a textbook]. Ed. RSHU, St. Petersburg. 377 p.
25. Lobanov V.A., Toshakova G.G. (2016), *Osobennosti i prishiny klimaticheskikh izmeneniy v Rossii*. [Features and causes of modern climate change in Russia]. // *Geographical Bulletin, Perm University*, No. 3 (38). P. 79–89.
26. Lushvin P.V. (2018), *Prichina kolebaniy chislennosti kaspiyskikh i belomorskiy tuleniy*. [The reason for the population fluctuations of Caspian and White Sea seals]. Marine research and education MARESEDU 2018. VII international scientific and practical conference 2018. LLC Polypres M., P. 124–128.
27. Malinin V.N. (2008), *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informacii*. [Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information. SPb.: ed. RSHU, 408 p.
28. Mikova K.D., Kalinin V.G. (2008), *K metodike otsenki prognozov tolschiny ledovogo prognoza na vodohranilishah (na primere Votkinskogo)*. Method ice cover thickness forecasts for reservoirs (example of Votkinskiy) // *Monthly Scientific and Technical Journal. Meteorology and hydrology. State institution "scientific research. Space Planet Hydrometeorology Center*. No. 10. S. P. 94–99.
29. Ed. Frolov E.I., Gavrilov V.P. (1997), *Morskoy led*. [Ice of the sea]. S-Petersburg, Hydrometizdat. 402 p.
30. Popov E.G. (1979), *Gidrologicheskie prognozy*. [Hydrological forecasts]. L.: Hydrometizdat, 256 p.
31. *Nastavlenie po sluzhbe prognozov*. (2011), [Forecasting Manual, Section 3, Part III, Marine Hydrological Forecasting Service], 193 p.
32. Nesterov E. S. (2013), *Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean*. [North Atlantic Oscillation: Atmosphere and Ocean] M.:TRIADA LDT, 144 p.
33. *Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh harakteristik*. (2004), [Determination of the main calculated hydrological characteristics]. Sp. 33–101, M.: Statebil. Russia, 73 p.

Гидрология

Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А.

34. Panin G.N., Mamedov R.M., Mitrofanov I. V. (2005), *Sovremennoe sostoyanie Kaspiyskogo moray*. [Caspian Sea actual state]. M.: Science, 356 p.
35. *Rukovodstvo po gidlogicheskim prognozam*. (1989), [Guide to hydrological forecasts. Forecast of ice phenomena on rivers and reservoirs]. Issue 3. L.: Hydrometizdat, 165 p.
36. Uteshev A. S. (1959), *Klimat Kazakhstana*. [Climate of the Kazakhstan]. L.: Hydrometizdat. 232 p.
37. <https://ecologynow.ru/knowledge/kaspiiskii-tulen-vymiranie-i-zanesenie-v-krasnou-knigu>
38. Ivkina N., Naurozbayeva Zh., Klove B. (2017), "Influence of climate change to the ice regime of the Caspian sea" <http://www.water-ca.org/article/2589> 15 p.
39. Kouraev A.V., Papa F., Mognard N.M., Buharizin P.I., Cazenave A., Cretaux J-F., Dozortseva J., Remy F. (2004) "Sea ice cover in the Caspian and Aral Seas from historical and satellite data." *Journal of Marine Systems*. Volume 47, Issues 1–4, pp. 89–100
40. Haerberli W., Hoelzle M., Maisch M. (2001) "Glaciers as Key Indicator of Global Climate Change. Climate of the 21st Century: changes and risk. Scientific facts" Editors: J.L. Lozan, H. Grabl, P. Hupfer. pp. 212–220
41. Hoy A., Matschullat J., Sepp M. (2013) "Atmospheric circulation variability in Europe and northern Asia (1901 to 2010). Theoretical and applied climatology" *Springer Verlag Wien*. T. 113. №: 1–2. pp. 105–126.
42. Hupfer P. (2001) "Climate and climate system. Climate of the 21st Century: changes and risk." Scientific facts. Editors: J.L. Lozan, H. Grabl, P. Hupfer. 2001. pp.15–21.
43. Savelieva N.I., Semiletov I.P., Weller G.E. Vasilevskaya L.N., Yusupov V.I. (2004) "Climate change in the northern Asia in the second half of the 20th century. Pacific oceanography." T. 2. № 1–2. pp. 74–84.
44. Sidorenkov N.S., Orlov I.A. (2008) "Atmospheric circulation epochs and climate changes Russian meteorology and hydrology." *Allerton press, inc. (New York)* T. 33. № 9. pp. 553–559.
45. Temimi M., Ghedira H., Khanbilvardi R., Smith K., Romanov P. (2011) "Sea-ice monitoring over the Caspian sea using geostationary satellite data. International journal of remote sensing." *Taylor & Francis* T. 32. № 6. pp. 1575–1593.

Поступила в редакцию: 18.01.2020

Сведения об авторах**Наурызбаева Жанар Куанышевна**

аспирант кафедры метеорологии, климатологии, охраны атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ); 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д.98

e-mail: naurozbaeva.zhanar@mail.ru

Лобанов Владимир Алексеевич

доктор технических наук, профессор кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы (МКОА), Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ) 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д.98

e-mail: lobanov@EL6309.spb.edu

About the authors**Zhanar K. Naurozbayeva,**

Postgraduate Student, Department of Meteorology, Climatology and Air Protection, Russian State Hydrometeorological University (RSHU); 98, Malookhtinsky prospekt, St. Petersburg, 195196, Russia

Vladimir A. Lobanov

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Meteorology, Climatology and Air Protection, Russian State Hydrometeorological University (RSHU); 98, Malookhtinsky prospekt, St. Petersburg, 195196, Russia

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А. Методика краткосрочного прогнозирования нарастания толщины льда в северо-восточном секторе Каспийского моря // Географический вестник = Geographical bulletin. 2020. №3(54). С. 81–97. doi 10.17072/2079-7877-2020-3-81-97.

Please cite this article in English as:

Naurozbayeva Z.K., Lobanov V.A. Methods of short-term forecasting of ice thickness growth in the north-eastern part of the Caspian sea // Geographical bulletin. 2020. №3(54). P. 81–97. doi 10.17072/2079-7877-2020-3-81-97.