

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

Научная статья

УДК 551.582
EDN: KEILDP

Повторяемость метеорологических факторов обледенения судов в Баренцевом море и гололедно-изморозевых отложений на его побережье в условиях изменяющегося климата

А. И. Лаврентьева^{1,✉}, И. И. Леонов², Н. Н. Соколичина¹

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² АО «Россети Научно-технический центр», Москва, Россия

✉ lavrentevaai@my.msu.ru

Поступила в редакцию 16.04.2024; одобрена после рецензирования 17.06.2024;
принята к публикации 17.07.2024.

Аннотация

Цель. Целью работы является анализ региональных особенностей повторяемости гололедно-изморозевых отложений и метеорологических условий морского обледенения в районе Баренцева моря, а также многолетних трендов данных характеристик, наблюдаемых в условиях современных изменений климата.

Методы и результаты. Результаты исследования повторяемости гололедно-изморозевых отложений получены путем статистической обработки стандартных наблюдений на сети метеостанций, расположенных вблизи побережья и на островах Баренцева моря, за период с 1966 по 2022 г. Для оценок повторяемости морского обледенения был использован метод Д. Оверлэнда, основанный на расчете интенсивности брызгового обледенения с использованием данных о скорости ветра, температуре воздуха, температуре морской воды, а также температуре ее замерзания. В качестве исходных данных для метода Д. Оверлэнда использовался реанализ ERA5 за период с 1979 по 2022 г. По данным наблюдений получено среднегодовое число дней с атмосферными явлениями, во время которых могут формироваться опасные гололедно-изморозевые отложения различных видов. Проведена количественная оценка временных трендов среднегодового числа дней с такими явлениями. На основе обработки данных реанализа получено среднегодовое число дней с морским обледенением для акватории Баренцева моря. Выявлены области с наибольшей повторяемостью экстремального морского обледенения. Рассмотрены временные тенденции изменения повторяемости числа дней с морским обледенением различной интенсивности за период с 1979 по 2022 г.

Выводы. На побережье Баренцева моря в среднем за год наблюдается около трех дней с опасными гололедно-изморозевыми отложениями различных видов. С 1966 по 2022 г. количество таких явлений в среднем уменьшалось на 0,58 дней за 10 лет. Наибольшая повторяемость морского обледенения наблюдается в восточной части Баренцева моря и вблизи западного побережья Новой Земли, где среднее число дней с экстремальным обледенением составляет более 30 дней в год. В период с 1979 по 2022 г. наблюдалось как уменьшение среднего за год числа дней с обледенением до трех дней за год (южнее 75° с. ш. и западнее 50° в. д.), так и увеличение до трех дней за год (в северной и восточной частях Баренцева моря).

© Лаврентьева А. И., Леонов И. И., Соколичина Н. Н., 2024

Ключевые слова: Арктика, Баренцево море, изменения климата, климатические риски, опасные гидрометеорологические явления, обледенение, гололедно-изморозевые отложения, гололед, реанализ, ERA5

Благодарности: работа выполнена в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-27-00047).

Для цитирования: Лаврентьева А. И., Леонов И. И., Соколикхина Н. Н. Повторяемость метеорологических факторов обледенения судов в Баренцевом море и гололедно-изморозевых отложений на его побережье в условиях изменяющегося климата // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 651–668. EDN KEILDР.

Original article

Frequency of Meteorological Factors of Vessel Icing in the Barents Sea and Ice Accretion on its Coast in a Changing Climate

A. I. Lavrenteva^{1, ✉}, I. I. Leonov², N. N. Sokolikhina¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Rosseti R&D Center, Moscow, Russia

✉ lavrentevaai@my.msu.ru

Abstract

Purpose. The work is purposed at analyzing the regional characteristics of ice accretion frequency and meteorological conditions of vessel icing in the Barents Sea region, as well as long-term trends of these characteristics observed in the context of modern climate change.

Methods and Results. The results of studying the frequency of ice accretions are obtained by statistical processing of 3-hour observations at a network of weather stations located near the coast and on the islands of the Barents Sea for the period 1966–2022. The frequency of vessel icing is estimated using the D. Overland method which is based on calculating the spray icing intensity involving the data on wind speed, air temperature, sea water temperature, and its freezing point. The ERA5 reanalysis for 1979–2022 is used as the input data for the D. Overland method. The average annual number of days with the atmospheric phenomena during which dangerous ice accretions of different types can be formed, is obtained based on the observation data. The time trends in the average annual number of days with such phenomena are quantitatively evaluated. The reanalysis data processing has permitted to obtain the average annual number of days with vessel icing for the Barents Sea area. The regions of the highest frequency of extreme vessel icing are identified. The time trends in frequency of the changes in a number of days with vessel icing of different intensity are considered for the period 1979–2022.

Conclusions. On the Barents Sea coast, on average about three days per year with dangerous ice accretions of different types are observed. From 1966 to 2022, every 10 years the number of such phenomena decreased on average by 0.58 days. The highest frequency of marine icing is revealed in the eastern part of the Barents Sea and near the western coast of Novaya Zemlya where the average number of days with extreme icing exceeds 30 days per year. In course of the period 1979–2022, both a decrease in the average annual number of days with icing up to three ones per year (south of 75° N and west of 50° E) and their increase up to three days per year (in the northern and eastern parts of the Barents Sea) were observed.

Keywords: Arctic, Barents Sea, climate changes, climate risks, hazardous hydrometeorological phenomena, icing, ice accretion, glaze ice, reanalysis, ERA5

Acknowledgements: The research was carried out at the Lomonosov Moscow State University with the support of Russian Science Foundation (project No. 24-27-00047).

For citation: Lavrenteva, A.I., Leonov, I.I. and Sokolikhina, N.N., 2024. Frequency of Meteorological Factors of Vessel Icing in the Barents Sea and Ice Accretion on its Coast in a Changing Climate. *Physical Oceanography*, 31(5), pp. 609-625.

*Статья посвящена памяти
Галины Вячеславовны Сурковой,
выдающегося ученого в области
климатологии, великолепного
преподавателя и прекрасного учителя*

Введение

В последние десятилетия неуклонно возрастает интерес к изменениям климата, происходящим в Арктическом регионе. Главным образом это связано с тем, что увеличение средних годовых температур воздуха в высоких широтах происходит значительно быстрее, чем в целом по земному шару. Также возрастает повторяемость некоторых опасных гидрометеорологических явлений ¹ [1].

Предметом исследования в данной работе стали гидрометеорологические условия обледенения морских судов в акватории Баренцева моря и гололедно-изморозевые отложения на его побережье. Явления данного типа оказывают существенное влияние на развитие хозяйственной деятельности человека [2]. Атмосферное и морское обледенение существенно усложняет процесс разведки и добычи газа и нефти, а также их транспортировку [3, 4]. При интенсивном обледенении морские суда могут терять остойчивость и опрокидываться. Гибель судов при обледенении, а тем более угроза гибели в некоторых районах Мирового океана не столь редкое явление ². Предполагается, что морская деятельность будет активно развиваться в полярных и субарктических регионах как часть общего экономического развития, включая сферу транспорта, рыболовство и туризм [5]. В связи с этим изучение и понимание рисков, связанных с явлениями обледенения в Арктике, являются актуальной задачей.

На суше обледенение связано с атмосферными процессами. Первый процесс связан с выпадением осадков (*precipitation icing*), которое вызывает образование гололеда и отложение мокрого снега. Второй – обледенение в тумане, приводящее к образованию зернистой и кристаллической изморози (*in-cloud icing*). Наибольшую опасность представляют гололед, зернистая изморозь, а также отложения в виде мокрого снега [6].

В акватории морей наиболее значимым видом морского обледенения является обледенение в потоке морских брызг, образующихся при ударе волн о корпус судна. Такое обледенение называется брызговым. При совместном воздействии брызгового и атмосферного обледенения на судах образуется смешанное обледенение ³. Согласно статистическим расчетам, в 90 % случаев лед на поверхности судна нарастает в результате брызгового обледенения [7].

Интенсивность обледенения зависит от различных гидрометеорологических условий, которые, в свою очередь, подчиняются атмосферным процессам. Нарастание льда усиливается с ростом волнения, вызываемого сильным ветром. Высокие скорости ветра могут быть связаны с мезомасштабными циклонами, имеющими короткое время жизни [8].

¹ Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова. Санкт-Петербург : Научно-технологические исследования, 2022. 676 с.

² Аксютин Л. Р. Обледенение судов. Л. : Судостроение, 1979. 128 с.

³ Качурин Л. Г., Смирнов И. А., Гашин Л. И. Обледенение судов. Л. : ЛПИ, 1980. 56 с.

В ходе ранее выполненных исследований получено, что на побережье и в акватории Баренцева моря за последние десятилетия наблюдается как тенденция к снижению повторяемости обледенения в одних районах, так и тенденция к ее увеличению в других [9]. Потепление климата не может означать однозначное уменьшение числа случаев обледенения судов. Необходимо анализировать совокупность факторов, которые приводят к нарастанию льда [10, 11].

Целью работы является анализ региональных особенностей повторяемости гололедно-изморозевых отложений и метеорологических условий морского обледенения в районе Баренцева моря, а также многолетних трендов данных характеристик, наблюдаемых в условиях современных изменений климата. В результате данной работы было получено пространственно-временное распределение гололедно-изморозевых отложений на побережье Баренцева моря за многолетний период с использованием данных наблюдений на метеорологических станциях. Получено пространственное распределение характеристик морского обледенения за многолетний период с использованием данных реанализа *ERA5*, оценены временные тренды количества дней с условиями, способствующими брызговому обледенению судов в Баренцевом море, для современного климата.

Материалы и методика исследования

В данной статье рассматриваются различные типы гидрометеорологических явлений, приводящих к обледенению морских судов, а также морских сооружений на побережье и в акватории морей. В связи с этим были выбраны различные подходы к анализу этих явлений.

Основой анализа распространения гололедно-изморозевых отложений на побережье Баренцева моря были данные срочных наблюдений с метеорологических станций. Основные метеорологические параметры получены из открытого архива данных ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»⁴. В этом архиве содержатся данные срочных наблюдений на 521 станции за период с 1966 г. по текущее время. Перечень станций составлен на основании списка станций Росгидромета, включенных в Глобальную сеть наблюдений за климатом. В ходе исследования были отобраны метеорологические станции, расположенные на побережье Баренцева моря и на островах в его акватории. Дополнительно были отобраны несколько метеорологических станций, располагающихся на побережьях Белого, Гренландского и Карского морей.

Для оценки повторяемости, пространственного распределения и временных изменений для каждой метеорологической станции было получено среднее годовое число дней с атмосферными явлениями, потенциально приводящими к сильным гололедно-изморозевым отложениям. Днями с такими явлениями считались дни, в которые хотя бы один метеорологический срок соответствует определенному коду погоды.

За случаи гололеда принимались промежутки времени, в которые наблюдатель фиксировал замерзающие осадки. Отложения гололеда имеют большую

⁴ Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России : база данных / О. Н. Булыгина, В. М. Веселов, В. Н. Разуваев, Т. М. Александрова ; Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. Электрон. дан. Москва, 2014. № гос. регистрации 2014620549.

плотность и прочность, поэтому потенциально опасными считались все сроки, во время которых наблюдались замерзающие осадки.

В коде КН-01 отсутствует разделение изморози на зернистую и кристаллическую. Поэтому для анализа использовались дни, соответствующие туману с отложением изморози. С целью отсеивания отложений кристаллической изморози были отобраны только те случаи изморози, которые наблюдались в диапазоне температуры воздуха от $-10,3$ до $-0,7$ °С и при скорости ветра 2 м/с и более. Ранее на основании обработки данных инструментальных наблюдений было показано, что 90 % опасных (диаметром более 50 мм) отложений зернистой изморози на территории России образуется именно в этом температурно-ветровом диапазоне [12]. Такая фильтрация данных позволяет убрать из выборки большую часть отложений в виде не представляющей серьезной опасности кристаллической изморози, которая образуется при слабом ветре и температуре воздуха ниже -10 °С.

Фильтрация выборок производилась и для выявления дней с мокрым снегом, для которого в коде КН-01 не предусмотрено отдельного кода. Для выявления мокрого снега отбирались дни, в которые наблюдались осадки в виде умеренного непрерывного или сильного снега, выпадающие при температуре воздуха от 0 до $0,6$ °С и скорости ветра не более 1 м/с. Такой диапазон ранее был обоснован авторами работы как наиболее благоприятный для образования опасных отложений мокрого снега [12].

В результате для каждой метеорологической станции было получено среднее за год количество дней с атмосферными явлениями, потенциально приводящими к образованию гололеда, зернистой изморози и мокрого снега, для периода с 1966 по 2022 г. Рассматривались только годы без пропусков наблюдений во время холодного периода. Для каждого из вида отложений были получены линейные временные тренды, которые проверялись на достоверность с использованием критерия Манна – Кендалла [13, 14]. Данный критерий использовался ранее другими авторами для оценки тенденций характеристик гололедно-изморозевых отложений [15].

Далее рассматривалось брызговое обледенение. Этот вид обледенения является наиболее интенсивным и представляет наибольшую опасность для морских судов. Вероятность обледенения и факторы, способствующие брызговому обледенению, можно определить с использованием различных статистических методов [16]. Большая часть методов основана на определении вероятности морского обледенения как совокупности заданных интервалов значений метеорологических параметров: скорости ветра, температуры воды и воздуха. Например, в методические указания по предупреждению угрозы обледенения судов, разработанные в ААНИИ для определения вероятности и интенсивности обледенения, включено сочетание скорости ветра и температуры воздуха ⁵. Подобные методы используются и в рыбной промышленности ⁶.

В данной работе для расчета интенсивности морского брызгового обледенения использовался метод, предложенный Д. Оверлэндом. Этот метод позво-

⁵ Методические указания по предупреждению угрозы обледенения судов. Л., 1972. 81 с.

⁶ Наставление по предупреждению аварий и борьбе за живучесть судов флота рыбной промышленности СССР. Л., 1983. 120 с.

ляет определить скорость обледенения морских судов с использованием индекса обледенения [17]. Помимо скорости ветра и температуры воздуха, в данном индексе обледенения дополнительно учитываются значения температуры морской воды, а также температуры ее замерзания.

Расчетная формула вычисления индекса обледенения PPR , имеет следующий вид:

$$PPR = \frac{V_a(T_f - T_a)}{1 + 0,4(T_w - T_f)}$$

где PPR – показатель обледенения, пропорциональный его интенсивности; V_a – скорость ветра, м/с; T_f – температура замерзания морской воды; T_a – температура воздуха и T_w – температура воды, °С.

Полученным значениям индекса обледенения PPR соответствует различная интенсивность скорости обледенения (табл. 1).

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Соотношение индекса обледенения PPR и скорости нарастания льда IR
Ratio between the icing index PPR and the icing rate IR

Параметр / Parameter	Обледенение по степени опасности / Degree of icing hazards				
	Легкое / Light	Умеренное / Moderate	Тяжелое / Heavy	Экстремальное / Extreme	Особенно экстремальное / Particularly extreme
PPR , (м·°С)/с / PPR , (m·°C)/s	> 0	> 20,6	> 45,2	> 70,0	> 83,0
Скорость обледенения IR , см/час / Icing rate IR , cm/h	> 0	> 0,7	> 2,0	> 4,0	> 5,3

Существует эмпирическая формула пересчета параметра обледенения в скорость обледенения IR (см/час):

$$IR = A(PPR) + B(PPR)^2 + C(PPR)^3,$$

где A , B , C – эмпирические константы ($A = 2,73 \cdot 10^{-2}$, $B = 2,91 \cdot 10^{-4}$, $C = 1,84 \cdot 10^{-6}$).

В качестве метеорологических данных для построения полей скорости обледенения по методу Д. Оверлэнда были использованы данные реанализа $ERA5$, которые доступны на регулярных сетках широты и долготы с разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ [18]. Расчеты проводились для акватории Баренцева моря с 1979 по 2022 г. с периодичностью 1 ч.

Для каждого срока в период с 1979 по 2022 г. был рассчитан индекс PPR . Индекс рассчитывался только для ячеек сетки, в которых присутствовали данные о температуре поверхности моря (соответствующие «морским» ячейкам), а также для ячеек, в которых морской лед занимал менее 50 % площади ячейки. Если доля морского льда в ячейке составляла более 50 %, то предполагалось, что брызговое обледенение отсутствует.

Далее были рассчитаны средние месячные и средние годовые значения количества дней с обледенением морских судов различной интенсивности (все случаи обледенения и экстремальное обледенение). Днем с обледенением считался любой день, во время которого хотя бы в один из 24 сроков ежечасных данных реанализа наблюдалось обледенение заданной интенсивности. Для выявления всех дней с обледенением задавалась интенсивность $PPR > 0$, для дней с экстремальным обледенением $PPR > 83$.

После оценки средних значений с использованием метода наименьших квадратов были получены многолетние линейные тренды количества дней с морским обледенением. Полученные тренды проверялись на достоверность с использованием критерия Манна – Кендалла [13, 14].

Результаты и обсуждение

Полученные данные о среднем за год числе дней с атмосферными явлениями, которые могут приводить к образованию опасных гололедно-изморозевых отложений на территории побережья Баренцева моря и в его акватории, представлены в табл. 2.

На основании этих данных построена карта-схема повторяемости числа дней с опасными явлениями каждого типа. На карте-схеме для каждой метеорологической станции представлена круговая диаграмма, показывающая долю среднего годового количества случаев атмосферных явлений, которые становятся причиной образования гололедно-изморозевых отложений различного вида. Полученные данные указывают на то, что в рассматриваемом регионе нельзя выделить преобладание какого-либо одного атмосферного явления (рис. 1).

Наибольшая повторяемость туманов с отложением изморози, формирующихся при достаточной скорости ветра и температурном диапазоне, благоприятном для формирования зернистой изморози, наблюдается в юго-восточной части Баренцева моря. Также туман с отложением изморози часто наблюдается на нескольких отдаленных от побережья метеорологических станциях («Мурманск» и «Полярное»).

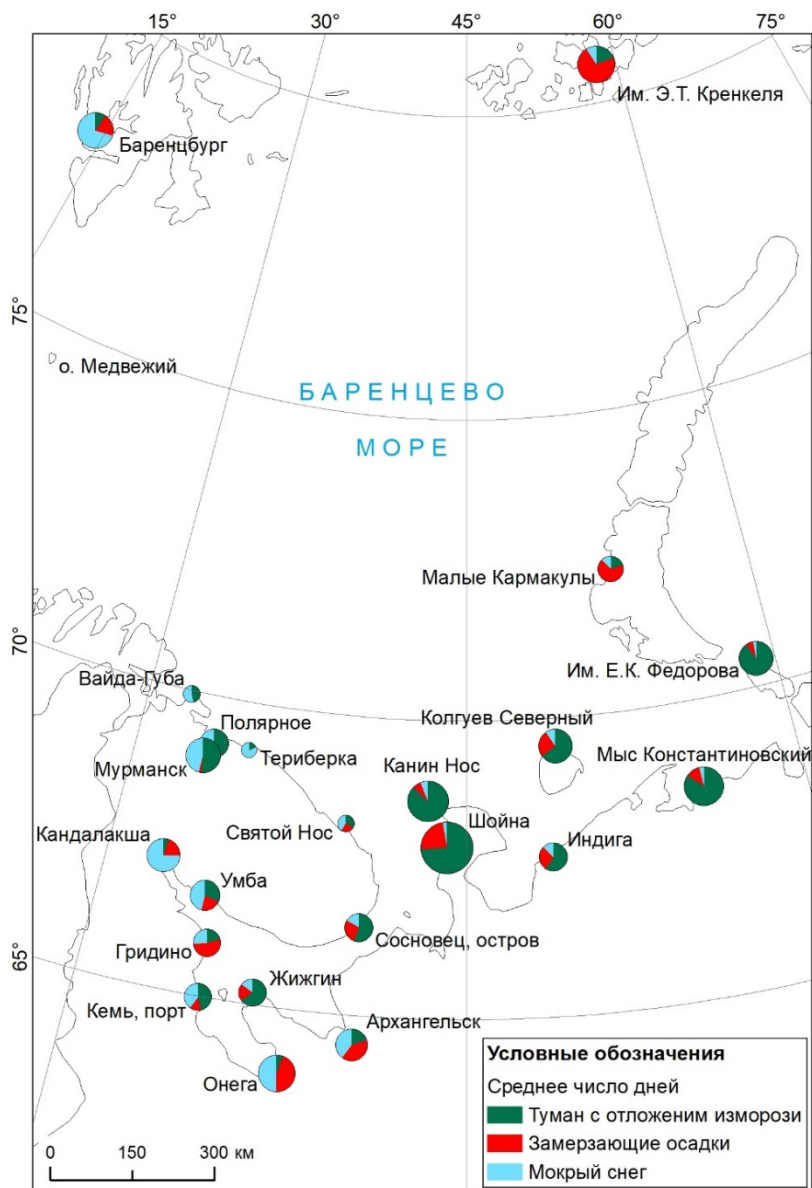
Пространственная картина распределения числа дней с замерзающими осадками крайне неоднородна. Однако можно сделать некоторые предположения относительно этого распределения. Гололед реже всего наблюдается на мысе Константиновском и станции им. Е. К. Федорова. Это метеорологические станции, расположенные на юго-востоке Баренцева моря и в проливе Карские Ворота со стороны Карского моря соответственно. В данном месте наблюдается низкая повторяемость теплых фронтов с термической стратификацией по типу «теплого носа» с характерным приподнятым слоем теплого воздуха, приводящего к образованию замерзающих осадков. Низкая повторяемость замерзающих осадков в районе Мурманска может быть связана с непосредственной близостью Мурманского прибрежного теплого течения, которое способствует существованию теплого нижнего слоя атмосферы, препятствующего образованию замерзающих осадков.

Т а б л и ц а 2
Table 2

Среднее годовое число дней с потенциально опасными явлениями погоды (СЧ) и значения линейного тренда (дней / 10 лет) для периода с 1966 по 2022 г.
Average annual number of days with potentially hazardous weather events (AN) and linear trend values (days / 10 years) for the period 1966–2022

Метеорологическая станция / Weather station	Туман с отложением изморози / Rime fog		Замерзающие осадки / Freezing precipitation		Мокрый снег / Wet snow		Все явления / All events	
	СЧ / AN	тренд / trend	СЧ / AN	тренд / trend	СЧ / AN	тренд / trend	СЧ / AN	тренд / trend
Им. Э. Т. Кренкеля / Krenkel	0,72	-0,28	2,72	-0,97	0,35	-0,01	3,79	-1,26
Баренцбург / Barenzburg	0,33	0,08	0,71	0,14	2,50	0,18	3,54	0,40
Малые Кармакулы / Malye Karmakuly	0,37	-0,20	1,19	-0,65	0,23	-0,03	1,79	-0,88
Им. Е. К. Федорова / Fedorov	2,93	-0,33	0,23	-0,08	0,09	-0,04	3,25	-0,45
Вайда-Губа / Vaida Guba	0,38	0,11	0	0	0,43	-0,05	0,81	0,06
Полярное / Polyarny	1,47	-0,01	0	0	0,84	0,01	2,31	0
Териберка / Teriberka	0,12	-0,03	0	0	0,55	-0,08	0,67	-0,11
Колгуев Северный / Kolguyev Severny	2,06	-0,27	0,81	-0,27	0,31	-0,06	3,18	-0,60
Мурманск / Murmansk	1,71	-0,19	0,08	0	1,51	-0,04	3,30	-0,24
Святой Нос / Svyatoy Nos	0,25	-0,17	0,19	-0,06	0,31	-0,01	0,75	-0,24
Канин Нос / Kanin Nos	4,06	-0,17	0,32	0,11	0,28	0,06	4,66	0
Кандалакша / Kandalaksa	0,16	-0,02	0,63	0,1	2,33	0,38	3,12	0,46
Шойна / Sojna	5,52	0,18	1,73	-0,16	0,2	-0,03	7,45	-0,02
Индига / Indiga	1,33	-0,61	0,63	0	0,27	-0,07	2,23	-0,67
Умба / Umba	0,81	-0,04	0,56	-0,33	1,17	0,31	2,54	-0,06
Сосновец, остров / Sosnovets island	1,24	-0,41	0,59	-0,24	0,37	-0,12	2,2	-0,77
Гридино / Gridino	0,43	-0,26	1,11	-0,61	0,54	-0,08	2,08	-0,95
Жижгин / Zizgin	1,38	-0,37	0,4	-0,18	0,32	-0,11	2,10	-0,65
Кемь, порт / Kem port	0,95	0,09	0,27	-0,02	0,82	0,12	2,04	0,18
Архангельск / Arhangelsk	0,57	-0,17	1,12	-0,01	1,12	0,23	2,81	0,06
Онега / Onega	0,21	-0,07	1,68	0,37	1,88	-0,02	3,77	0,28
Мыс Константиновский / Konstantinovsky cape	3,60	-0,28	0,50	-0,09	0,17	-0,03	4,27	0,33

Пр и м е ч а н и е. Значимые тренды выделены жирным шрифтом.
N o t e. Significant trends are in bold.



Р и с. 1. Карта-схема среднего годового числа дней с представляющими опасность атмосферными явлениями за период с 1966 по 2021 г. по данным визуальных наблюдений

Fig. 1. Map of the average annual number of days with hazardous atmospheric phenomena for the period 1966–2021 based on visual observations

Более четко прослеживаются пространственные особенности повторяемости мокрого снега. Известно, что отложения мокрого снега чаще всего начинают образовываться при температуре воздуха от $-0,1$ до $0,3$ °C и при низкой скорости ветра (от 1 до 4 м/с) или при штиле [12]. Это связано с физическими свойствами снега: снежинки имеют большой размер и высокую парусность,

они легко сдуваются сильным ветром с предметов, на которых происходит обледенение. Поэтому для образования опасных отложений в виде мокрого снега необходимо, чтобы ветер на протяжении всей фазы нарастания был не слишком сильным. С этим фактом связано то, что наибольшая повторяемость опасных отложений мокрого снега наблюдается в акватории Белого моря, а также на некоторых метеорологических станциях с высокой повторяемостью околонулевой температуры воздуха и низкой скорости ветра из-за нахождения в орграфически защищенных формах рельефа. Например, «Баренцбург» располагается на побережье залива Ис-фьорд, а метеорологическая станция «Вайда-Губа» располагается в губе с соответствующим названием. «Мурманск» и «Полярное» также располагаются в Кольском заливе.

Основное внимание в работе уделено явлениям, которые могут приводить к образованию опасных гололедно-изморозевых отложений. Как уже было отмечено в разделе «Материалы и методика исследования», в ходе работы применялась фильтрация данных основных наблюдений с учетом полученных ранее диапазонов температуры воздуха и скорости ветра, характерных для опасных гололедно-изморозевых отложений каждого вида.

К процессу фильтрации данных можно подходить по-разному. Использование более строгих критериев приводит к существенному уменьшению отобранных случаев. Так, например, при отборе случаев мокрого снега допускалось, что отложения мокрого снега могут формироваться при скорости до 1 м/с включительно. Если бы предполагалось, что опасные отложения мокрого снега могли образовываться только при штиле, количество отобранных случаев мокрого снега сократилось бы в три раза. Напротив, если бы потенциально опасными снегопадами считались случаи выпадения снега при температуре воздуха от -2 до 2 °С при любой скорости ветра, то среднее число дней с мокрым снегом в районе Баренцева моря увеличилось бы в 45 раз – с 0,75 до 33 дней в году.

То же самое касается туманов с образованием изморози. Для ужесточения критериев отбора можно повышать скорость ветра, увеличивая плотность потока переохлажденных капель тумана и тем самым оставляя случаи наиболее интенсивных отложений зернистой изморози и исключая все большую часть случаев кристаллической.

В табл. 2 приведены оценки линейных трендов для числа дней с атмосферными явлениями, приводящими к образованию опасных гололедно-изморозевых отложений за период с 1966 по 2022 г. Отдельно приведены оценки для туманов с отложением изморози, замерзающих осадков и мокрого снега. Также представлены оценки тренда для числа дней со всеми явлениями. Тест Манна – Кендалла [13, 14] показал, что для 5%-ного уровня значимости некоторые полученные тренды оказались надежными.

Показано, что значимые тренды числа дней с изморозью имеют отрицательные значения от $-0,61$ до $-0,07$ дней за десятилетие. Число дней с замерзающими осадками тоже имеет тенденцию к сокращению. Линейные тренды числа дней с мокрым снегом значимы только на 4 станциях из 22. В целом тренды числа дней с мокрым снегом можно оценить как околонулевые слабозначимые с отдельными существенными положительными изменениями на метеорологических станциях «Кандалакша», «Умба» и «Онега».

На рис. 2 представлена карта-схема, на которой для каждой метеорологической станции показано значение линейного тренда суммарного числа дней с наблюдением всех потенциально опасных атмосферных явлений за период с 1966 по 2022 г. Для удобства показан тренд числа дней за 10 лет.

Из карты следует, что отрицательные тренды наблюдаются в основном на территориях, выходящих к побережьям Белого и Баренцева моря. Положительные тренды, как правило, наблюдаются на метеорологических станциях, имеющих более континентальное расположение. Почти все значимые тренды имеют отрицательный знак. Исключением является метеорологическая станция «Кандалакша», где наибольший вклад в положительный тренд вносит мокрый снег.

В ранее опубликованных работах были оценены тренды среднегодового количества дней с гололедом на территории России [19]. В целом для Атлантической Арктики был получен слабый отрицательный тренд ($-0,2$ дня/год) числа дней с замерзающим дождем. Полученный в данной работе отрицательный тренд количества дней с опасными явлениями гололеда хорошо согласуется с приведенными ранее оценками.

Несмотря на то что в настоящей работе средняя оценка приведена только для значимых трендов, нельзя сделать однозначный и достоверный вывод о многолетних изменениях повторяемости потенциально опасных явлений атмосферного обледенения в рассматриваемом регионе. Это связано с тем, что полученные значения линейных трендов отличаются большим разбросом, а исходные данные визуальных наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями – высокой степенью неоднородности.

Тенденции современных изменений характеристик гололедно-изморозевых отложений на территории России, полученные с использованием инструментальных наблюдений, по данным доклада об особенностях климата на территории Российской Федерации, показывают, что для квазиоднородной климатической области Атлантической Арктики наблюдается незначимый положительный тренд количества дней с гололедом и значимый тренд количества дней с отложениями мокрого снега ⁷.

Таким образом, в районе Баренцева моря можно ожидать около трех дней в году, когда будут наблюдаться атмосферные явления, приводящие к образованию сильных гололедно-изморозевых отложений. Вероятно, число дней с атмосферным обледенением будет уменьшаться в среднем на 0,2 дня за десять лет. Сокращение числа дней с обледенением и уменьшение его влияния на морские суда и инфраструктуру морских портов можно считать положительным эффектом изменения климата в Арктике. Однако, несмотря на существенную долю значимых трендов, к таким оценкам нужно относиться с осторожностью, учитывая сложность проведения наблюдений за атмосферными явлениями, влияющую на качество обработанных данных, а также на климатическую изменчивость данного региона.

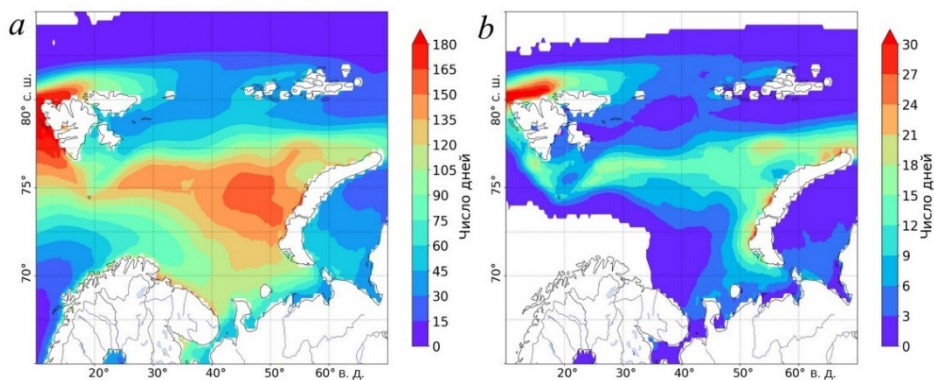
Подход, использующий данные основных срочных наблюдений, может применяться к оценке изменений повторяемости гололедно-изморозевых отложений различной интенсивности, в первую очередь для тех регионов, где

⁷ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. Москва : Росгидромет, 2022. 110 с.

отсутствуют данные инструментальных наблюдений. Однако стоит отметить, что данная методика нуждается в проверке на территориях, находящихся и в других климатических областях России.

Далее в работе рассматривается климатология брызгового обледенения в акватории Баренцева моря. В данном случае обледенением называется совокупность метеорологических факторов, которая способствует образованию обледенения согласно методу Д. Оверлэнда. Получена повторяемость обледенения судов в Баренцевом море в период с 1979 по 2022 г. Наибольшие значения среднего числа дней с обледенением относятся к западу от островов Шпицберген и Новая Земля, а также к северному побережью Кольского полуострова (рис. 3, *a*). Так, в среднем за год в этих районах наблюдается более 150 дней с обледенением.

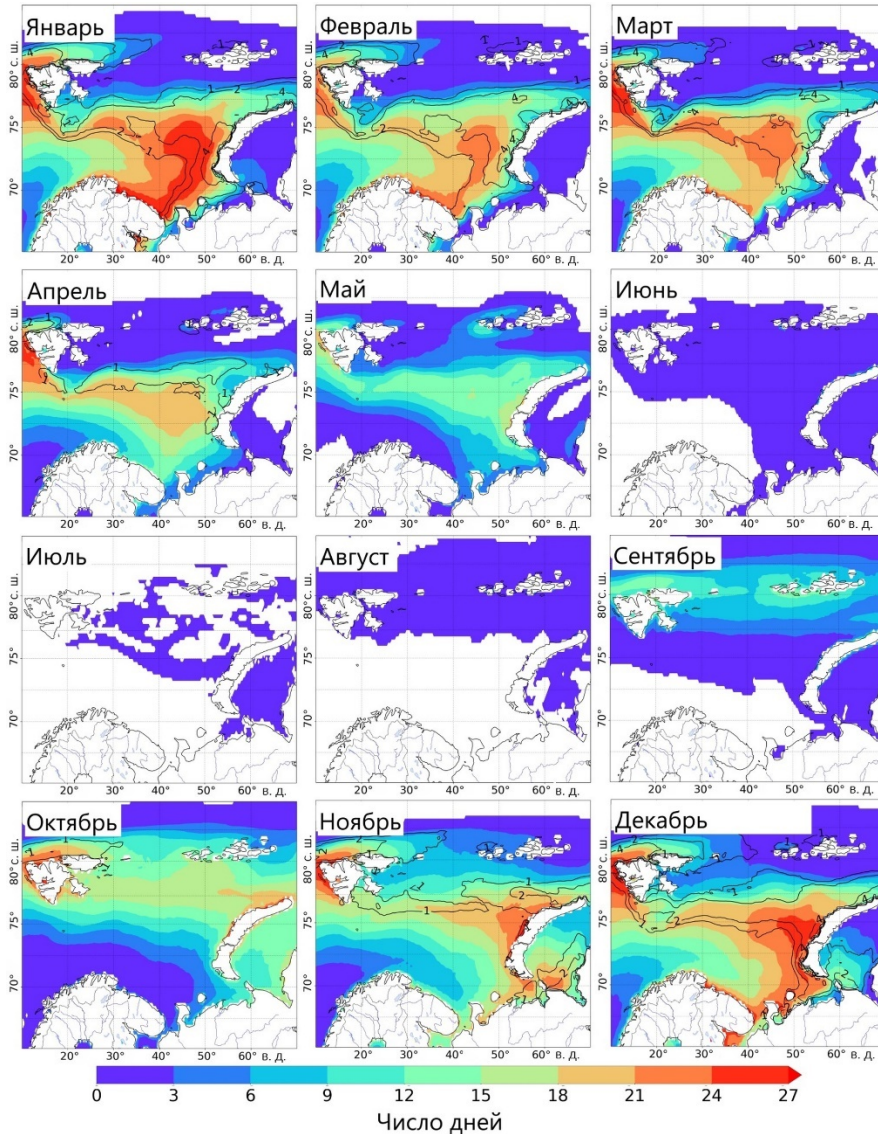
Вдоль побережья материка среднее за год число дней с обледенением имеет неоднородное распределение. Вдоль береговой линии Архангельской области и Ненецкого автономного округа обледенение судов наблюдается реже, чем вдоль береговой линии Мурманской области. Абсолютные высоты над уровнем моря на Кольском п-ове больше, что может приводить к сильным кatabатическим ветрам и увеличению числа случаев с обледенением. Под влиянием теплого Норвежского течения вероятность обледенения судов существенно снижается, его вклад прослеживается до 40° в. д. В этом случае в течение года в среднем наблюдается не более 120 дней с нарастанием льда на поверхности судна в результате брызгового обледенения. Наибольшие значения среднего числа дней с экстремальным обледенением имеют сходное распределение (рис. 3, *b*). Так, наиболее часто экстремальное обледенение встречается к западу от архипелага Шпицберген и Новой Земли. В этих районах число дней с условиями для экстремального обледенения примерно в шесть раз меньше среднего числа дней с обледенением в целом и составляет от 21 до 30 дней в году. К северу от островов повторяемость обледенения относительно невелика вследствие установления продолжительного ледового покрова, в среднем за год наблюдается не более 10 дней с обледенением судов. А к югу от островов Шпицберген за счет теплого Норвежского течения наблюдаются более высокие температуры, что также приводит к меньшей повторяемости обледенения.



Р и с. 3. Среднегодовое число дней с обледенением (*a*) и с экстремальным обледенением ($PPR > 83$) (*b*) судов в Баренцевом море за период с 1979 по 2022 г.

F i g. 3. Average annual number of days with icing (*a*) and extreme icing ($PPR > 83$) (*b*) of vessels in the Barents Sea for the period 1979–2022

Далее рассмотрим годовой ход числа дней с брызговым обледенением в Баренцевом море (рис. 4). Для каждого месяца года построены карты числа дней с морским обледенением. Результаты показали, что наибольшее количество дней с обледенением наблюдается с октября по апрель. На наиболее благоприятных для обледенения территориях это явление в среднем наблюдается почти каждый день (более 27 дней в месяц). Наименьшее количество дней с обледенением наблюдается в июле.



Р и с. 4. Среднее число дней с обледенением судов в Баренцевом море за период с 1979 по 2022 г. для каждого месяца. Черными изолиниями показано число дней с экстремальным обледенением ($PPR > 83$) за месяц

Fig. 4. Average number of days with vessel icing in the Barents Sea for each month during the period 1979–2022. Black isolines show the number of days with extreme icing ($PPR > 83$) per month

На рис. 4 также показано среднее многолетнее число дней с экстремальным обледенением судов. В течение года наиболее часто экстремальное обледенение наблюдается в январе (до пяти дней в месяц). В теплый период года, с мая по сентябрь, среднее количество дней с экстремальным брызговым обледенением составляет менее одного в месяц.

Рассмотрим полученные временные изменения повторяемости общего числа дней с обледенением за год и числа дней с экстремальным обледенением в течение года (рис. 5). Поля распределения этих двух показателей сходны.

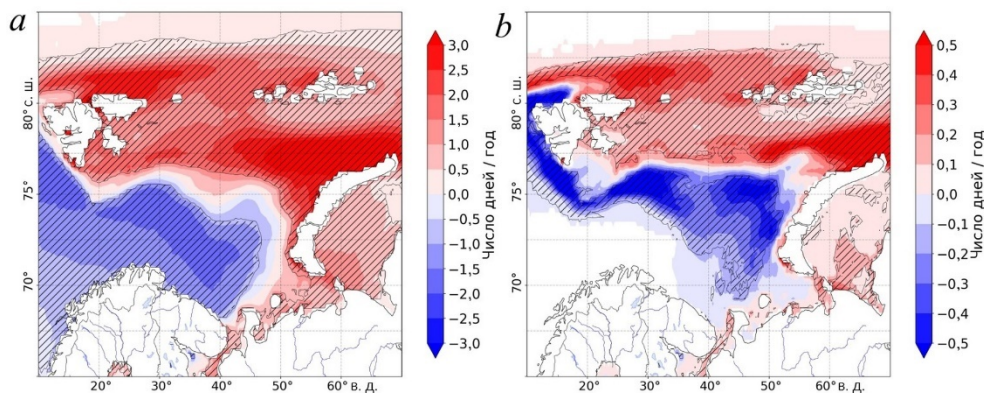


Рис. 5. Временное изменение повторяемости обледенения судов в Баренцевом море за период 1979–2022 г. для общего числа дней с обледенением (а) и числа дней с экстремальным обледенением (б). Штриховкой обозначены области, в которых полученные тренды являются достоверными для 1%-го уровня значимости

Fig. 5. Temporal change in the frequency of vessel icing in the Barents Sea for the total number of days with icing (a) and for the number of days with extreme icing (b) in 1979–2022. Shading shows the areas in which the obtained trends are reliable at the 1% significance level

Вследствие среднегодового увеличения температуры воздуха уменьшается площадь морских льдов. Территории, ранее занятые морским льдом, представляют собой водную поверхность, являющуюся источником морских брызг, способствующих формированию брызгового обледенения. В связи с этим наблюдается увеличение повторяемости обледенения судов в акватории Баренцева моря, расположенной между Шпицбергом, Землей Франца-Иосифа и Новой Землей. В отдельных районах повторяемость обледенения может увеличиваться на три дня в год и более.

На юге Баренцева моря ниже 75° с. ш. и западнее 50° в. д. прослеживается влияние теплого Норвежского течения. В связи с наиболее интенсивным потеплением климата в Арктике в данном районе, не занятом морскими льдами, увеличивается средняя температура воздуха, что приводит к уменьшению повторяемости морского обледенения. В этом случае повторяемость обледенения изменяется приблизительно на три дня в год, только уже в сторону уменьшения случаев с нарастанием льда на поверхности судна.

Для периода с октября по апрель проанализировано 53 синоптических ситуации, во время которых диагностировались условия для экстремального обледенения. Выявлено, что наиболее часто такие условия были выявлены в январе (в 14 случаях из 53), феврале и декабре (11 и 10 случаев соответственно). В подавляющем большинстве случаев условия для экстремального обледенения создавались в тыловых частях циклонов, для которых характерны высокая скорость ветра и мощная адвекция холодного воздуха. Как высокие значения скорости ветра, так и низкие значения температуры воздуха способствуют образованию и нарастанию льда на поверхности судна в результате брызгового обледенения. Кроме того, в ряде случаев экстремальные значения отмечались в прифронтальной области. Узкой полосой обледенение прослеживалось перед теплым фронтом. Прифронтальная область характеризуется уменьшением порывистости ветра, но увеличением скорости ветра. Можно предположить, что именно с повышением скорости ветра связаны экстремальные значения обледенения судов в прифронтальной области.

Заключение

В ходе работы исследованы пространственно-временные изменения обледенения морских судов в акватории Баренцева моря и гололедно-изморозевых отложений на его побережье в условиях современного климата.

Показано, что в данном регионе в среднем наблюдается около трех дней в году с атмосферными явлениями, во время которых могут формироваться опасные гололедно-изморозевые отложения на побережье. С 1966 по 2022 г. прослеживалась тенденция к уменьшению среднего годового числа дней с такими явлениями. В среднем статистически значимый линейный тренд составлял около $-0,58$ дней за 10 лет. Значимый положительный тренд наблюдался только на метеорологической станции «Кандалакша», остальные положительные тренды статистически не значимы. В целом тренды имеют большой разброс, что делает неоднозначным вывод о многолетних изменениях повторяемости явлений атмосферного обледенения.

С использованием данных реанализа *ERA5* получена повторяемость метеорологических условий обледенения морских судов для периода с 1979 по 2022 г. Выявлены области с максимальной и минимальной повторяемостью среднего годового числа дней с обледенением различной интенсивности. Показано, что в некоторых районах Баренцева моря среднее число дней с экстремальным обледенением составляет более 30 дней в году. Наибольшая повторяемость морского обледенения наблюдается в восточной части Баренцева моря, в том числе – вблизи западного побережья Новой Земли.

Показано, что в течение последних десятилетий произошли значимые изменения повторяемости обледенения судов в Баренцевом море. Наблюдалось как уменьшение среднего за год числа дней с обледенением до трех дней за год (южнее 75° с. ш. и западнее 50° в. д), так и увеличение до трех дней за год (в северной и восточной части Баренцева моря).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жилина И. Ю. Потепление в Арктике: возможности и риски // Экономические и социальные проблемы России. 2021. № 1 (45). С. 66–87. EDN GSPTRV. <https://doi.org/10.31249/espr/2021.01.04>
2. Суханов С. И., Лавренов И. В., Яковлева Н. П. Обледенение судов на Черном море // Метеорология и гидрология. 2006. № 12. С. 75–86. EDN KUHMAF.
3. Assessment of undiscovered oil and gas in the Arctic / D. L. Gautier [et al.] // Science. 2009. Vol. 324, iss. 5931. P. 1175–1179. <https://doi.org/10.1126/science.1169467>
4. Marine icing phenomena on vessels and offshore structures: Prediction and analysis / A. R. Dehghani-Saniij [et al.] // Ocean Engineering. 2017. Vol. 143. P. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.07.049>
5. Mintu S., Molyneux D. Ice accretion for ships and offshore structures. Part 1 – State of the art review // Ocean Engineering. 2022. Vol. 258. 111501. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111501>
6. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты / Н. П. Шакина [и др.] // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2012. № 348. С. 130–161. EDN PTTLTB.
7. Zhou L., Liu R., Yi X. Research and development of anti-icing/deicing techniques for vessels: Review // Ocean Engineering. 2022. Vol. 260. 112008. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112008>
8. Петров А. Г. Синоптические условия обледенения судов на акваториях дальневосточных морей // Гидрометеорологические процессы на шельфе: Оценка воздействия на морскую среду. Владивосток : Дальнаука, 1998. С. 38–45. (Труды Дальневосточного Ордена Трудового Красного Знамени регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института).
9. Суркова Г. В., Лаврентьева А. И., Ткачева Е. С. Региональные особенности повторяемости гололеда на севере европейской территории России на фоне меняющегося климата // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70, № 1. С. 21–32. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-21-32>
10. Naseri M., Samuelsen E. M. Unprecedented vessel-icing climatology based on spray-icing modelling and reanalysis data: A risk-based decision-making input for Arctic offshore industries // Atmosphere. 2019. Vol. 10, iss. 4. 197. <https://doi.org/10.3390/atmos10040197>
11. Samuelsen E. M., Gravervsen R. G. Weather situation during observed ship-icing events off the coast of Northern Norway and the Svalbard archipelago // Weather and Climate Extremes. 2019. Vol. 24. 100200. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2019.100200>
12. Леонов И. И., Аржанова Н. М. Метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложений на территории России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2023. Т. 9, № 1. С. 107–126. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2023-1-107-126>
13. Kendall M. Rank correlation methods. London : Griffin, 1970. 202 p.
14. Mann H. Nonparametric tests against trend // Econometrica. 1945. Vol. 13, no. 3. P. 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
15. Аржанова Н. М., Коришунова Н. Н. Характеристики гололедно-изморозевых явлений на территории России в условиях современных изменений климата // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных. 2019. № 184. С. 33–44. EDN PWJPUR.
16. Мастрюков С. И. Оценка отечественных и зарубежных методов расчета брызгового обледенения судов // Навигация и гидрография. 2011. № 31. С. 81–86. EDN OFWLRZ.
17. Prediction of vessel icing / J. E. Overland [et al.] // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 1986. Vol. 25, iss. 12. P. 1793–1806. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025%3C1793:POVI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025%3C1793:POVI%3E2.0.CO;2)
18. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146, iss. 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

19. Recent changes in the frequency of freezing precipitation in North America and Northern Eurasia / P. Groisman [et al.] // Environmental Research Letters. 2016. Vol. 11, no. 4. 045007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/045007>

Об авторах:

Лаврентьева Анастасия Игоревна, студент, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), **ORCID ID: 0000-0002-2985-0063**, lavrentevaai@my.msu.ru

Леонов Игорь Иванович, главный специалист, АО «Россети Научно-технический центр» (115201, Россия, Москва, Каширское ш., д. 22, к. 3), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0009-0000-6747-8170**, **SPIN-код: 5038-0828**, ebernlev@gmail.com

Соколихина Наталья Николаевна, доцент, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), кандидат географических наук, доцент, **SPIN-код: 5311-0026**, **ORCID ID: 0000-0001-9373-609X**; **WOS Research ID: L-6159-2015**; **Scopus Author ID: 6507391878**, natalia.sokolikhina@gmail.com