

Гидрометеорология и экология. 2025. № 80. С. 407—429.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(80):407—429.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.574.42

doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-407-429

Оценка опасности образования гололедно-изморозевых отложений на территории федеральных округов России

***Игорь Иванович Леонов, Наталья Николаевна Соколихина,
Анастасия Игоревна Гибадуллина, Александр Викторович Кислов***

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия,
leonov@geogr.msu.ru

Аннотация. В работе представлены результаты анализа условий формирования и пространственно-временных особенностей гололедно-изморозевых отложений на территории федеральных округов России по данным визуальных наблюдений за период с 1979 г. по 2022 г. Выполнено оценивание диапазонов метеорологических условий, наблюдаемых в момент образования гололедно-изморозевых отложений различных видов. Получены количественные оценки среднего годового и максимального числа дней с гололедно-изморозевыми отложениями и значения линейных трендов их повторяемости. Приводятся оценки явлений погоды, потенциально приводящих к образованию сильных гололедно-изморозевых отложений.

Ключевые слова: изменения климата, опасные явления погоды, гололедно-изморозевые отложения, обледенение, гололед, изморозь, мокрый снег.

Благодарности. Работа выполнена в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-27-00047 «Гололедно-изморозевые отложения на территории России в условиях современных изменений климата»).

Для цитирования: Леонов И. И., Соколихина Н. Н., Гибадуллина А. И., Кислов А. В. Оценка опасности образования гололедно-изморозевых отложений на территории федеральных округов России // Гидрометеорология и экология. 2025. № 80. С. 407—429. doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-407-429.

Original article

Assessment of the hazard of ice accretion formation in the federal districts of Russia

*Igor I. Leonov, Natalia N. Sokolikhina,
Anastasia I. Gibadullina, Alexander V. Kislov*

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, leonov@geogr.msu.ru

Summary. This research presents the results of an analysis of the formation conditions and spatio-temporal characteristics of ice accretion across the federal districts of Russia over the period from 1979 to 2022. Visual observation data of atmospheric phenomena and main 3-hour observation data were used. The unified dataset was created. For 521 meteorological stations, meteorological conditions of its formation were entered for each case of atmospheric icing. Quantitative estimates of the ranges of air temperature, wind speed and relative air humidity at the time of formation of ice accretion of various types are obtained, and thermal conditions for the formation of fogs with rime deposits are considered.

Quantitative estimates of the average annual and maximum number of days with ice accretion of each type, as well as the values of linear trends for their average annual numbers are obtained. It is shown that in the period from 1979 to 2022, the number of days with soft rime decreased almost everywhere in Russia, and the number of days with wet snow increased. The number of days with glaze ice increased in the North-western and Volga Federal Districts. This is probably due to the northward shift of the area of maximum glaze ice observations.

Separate quantitative estimates are given for weather phenomena that potentially cause the formation of hazardous ice accretion: freezing precipitation, fogs with rime deposits and wet snow. The most frequently observed type of phenomena is freezing precipitation, the amount of which has been decreasing in Russia since 1979, except for the Volga Federal District. The number of days with potentially hazardous fogs with rime deposits has decreased, and the number of days with potentially dangerous wet snowfall has increased. The approach used can be used in the future to assess the hazard factor of other hydrometeorological phenomena in other areas under study.

Keywords: climate changes, hazardous weather events, ice accretion, icing, glaze ice, rime, wet snow.

Acknowledgments. The research was carried out at Lomonosov Moscow State University with the support of Russian Science Foundation (grant No. 24-27-00047 «Ice accretion on the territory of Russia under the conditions of modern climate change»).

For citation: Leonov I. I., Sokolikhina N. N., Gibadullina A. I., Kislov A. V. Assessment of the hazard of ice accretion formation in the federal districts of Russia. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(80):(407—429). doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-407-429. (In Russ.).

Введение

В настоящее время особенно важными остаются исследования, связанные с изучением природы опасных гидрометеорологических явлений. В XXI веке сохраняется тенденция к увеличению количества опасных гидрометеорологических явлений, наблюдаемых на территории России [1, 2].

В типовой перечень опасных явлений погоды входят также сильные гололедно-изморозевые отложения [3]. Наибольшую опасность для хозяйственной деятельности человека представляют отложения гололеда, зернистой изморози и мокрого снега [4, 5].

Формирование гололедно-изморозевых отложений может приводить к катастрофическим последствиям. Отложения льда наносят ощутимый ущерб наиболее важным отраслям экономики — энергетике, железнодорожному и автомобильному транспорту, сельскому и лесному хозяйству, — а в некоторых случаях даже вызывают гибель людей [6—9]. Анализ последствий образования гололедно-изморозевых отложений указывает на высокую степень подверженности и уязвимости объектов хозяйственной деятельности, жизни и здоровья людей к данному типу климатического воздействия.

С точки зрения оценки физических климатических рисков, связанных с гололедно-изморозевыми отложениями, актуальной задачей является изучение опасности характеристик этих явлений, выражающейся в изменении повторяемости явлений обледенения на территории России [10]. Ранее были опубликованы работы, посвященные региональным исследованиям повторяемости гололедно-изморозевых отложений на территории Обской губы, Баренцева моря, а также Арктической зоны Российской Федерации [11—13].

В предлагаемой работе представлены новые результаты исследования особенностей метеорологических условий образования гололедно-изморозевых отложений различных видов по данным созданного объединенного массива основных срочных наблюдений и визуальных наблюдений за атмосферными явлениями на всей территории России за период с 1979 г. по 2022 г. с акцентом на анализ условий для территории федеральных округов России. Это исследование расширяет и уточняет результаты работы [14].

Цель статьи состоит в оценивании климатических характеристик с использованием ранее разработанной методики потенциально опасных явлений обледенения на территории федеральных округов России и определении линейных трендов числа дней с явлениями обледенения различного вида и интенсивности.

Исходные данные и методика исследования

В качестве исходных материалов использовались данные наблюдений с наземных метеорологических станций на территории России. Информация была получена из электронных архивов ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» [15].

Для создания объединенного цифрового массива данных, содержащего информацию о зафиксированных случаях атмосферного обледенения, были задействованы данные двух архивов: наблюдения за атмосферными явлениями [16] и данные основных срочных наблюдений [17]. В настоящее время в этих архивах содержатся данные с 521 метеорологической станции. Временной период, охватываемый наблюдениями, составляет промежуток времени с 1966 г. по 2022 г., однако в работе рассматривался период с 1979 г., так как для более ранних лет в архивах было обнаружено большое количество ошибочных записей.

В первом архиве содержится описание отдельных случаев всех наблюдаемых на метеорологических станциях явлений погоды. Одна запись базы данных относится к одному случаю наблюдения явления и содержит в себе данные о времени начала, времени окончания явления, его интенсивности и уникальном шифре. В данной работе были рассмотрены явления гололеда, зернистой изморози и

кристаллической изморози, которым соответствует собственный шифр явления (шифр 12 — гололед, 13 — кристаллическая изморозь, 14 — зернистая изморозь). Для оценки повторяемости мокрого снега использовались два вида явлений — мокрый снег и ливневой мокрый снег (шифры 72 и 73).

Во втором архиве содержатся данные восьмисрочных наблюдений за основными метеорологическими параметрами в стандартные синоптические сроки с интервалом в 3 часа. В каждый из сроков наблюдатель записывает значения температуры воздуха, относительной влажности воздуха, скорости ветра и другие метеорологические параметры, а также наблюдаемые в срок и между сроками явления погоды в соответствии с кодом КН01. Информация о прошедшей погоде (погоде в период между сроками наблюдений) располагается в седьмой группе кода КН-01, где каждое явление обозначается кодовыми цифрами от 00 до 99.

Описанные выше архивы получены путем визуальных наблюдений, которые отличаются от инструментальных измерений тем, что не используются гололедные станки, позволяющие определять толщину, диаметр гололедно-изморозевых отложений, а также рассчитать их массу.

В ходе создания объединенного цифрового массива данных к каждой строке из архива наблюдений за атмосферными явлениями добавлялась информация срочных наблюдений. Таким образом, для каждой из 521 метеорологической станции был получен массив, в котором для каждого случая явления обледенения были внесены метеорологические условия его формирования.

По данным созданного массива были сформированы выборки температуры воздуха, скорости ветра и относительной влажности воздуха в момент образования гололеда, двух видов изморози и мокрого снега для всех наблюдений за период с 1979 г. по 2022 г. Отдельно были рассмотрены термические условия образования туманов с отложениями изморози по данным основных срочных наблюдений. Рассчитывались количественные оценки полученных выборок для каждого из метеорологических параметров — среднее, медиана, стандартное отклонение и значения 5, 25, 75 и 95-го процентилей.

Далее были рассмотрены пространственно-временные особенности явлений атмосферного обледенения на территории федеральных округов России. По данным визуальных наблюдений были построены карты-схемы среднего годового числа дней с гололедом, зернистой и кристаллической изморозью, а также с мокрым снегом. При оценке среднего годового числа дней для каждой метеорологической станции были отобраны только те годы, в которые для периода с октября по апрель в основных срочных наблюдениях отсутствовало не более 5 % сроков. Неполные годы были исключены из выборки.

Полученные данные были представлены в виде диаграмм, описывающих распределение числа дней с явлениями обледенения разного вида на территории каждого из федеральных округов России.

Для каждой метеорологической станции методом наименьших квадратов были рассчитаны значения линейных трендов. Их достоверность проверялась с использованием критериев Манна-Кендалла и Стьюдента [18, 19]. Достоверными считались только тренды, значимые на уровне 5 % по обоим критериям и

полученные по рядам наблюдений продолжительностью не менее 30 лет. Выбор данных методик мотивирован тем, что они ранее были использованы в работах других авторов, посвященных исследованию климатологии гололедно-изморозевых отложений [23, 24].

Основное внимание в статье уделялось опасным явлениям погоды. В связи с этим из общего количества атмосферных явлений, вызывающих обледенение, были отобраны только явления, потенциально вызывающие сильные гололедно-изморозевые отложения. Так как данные основных срочных и визуальных наблюдений не имеют информации о толщине и диаметре отложения, для исследования повторяемости атмосферных явлений, потенциально приводящих к опасным гололедно-изморозевым отложениям, в качестве оценки опасности явлений использовалась информация о метеорологических условиях в момент обледенения. На основании результатов ранее выполненных расчетов, проведенных путем обработки инструментальных наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями, были получены температурно-ветровые диапазоны, благоприятные для формирования опасных отложений каждого вида [20].

Наиболее опасным видом гололедно-изморозевых отложений является гололед. Он образуется в результате выпадения замерзающих осадков. Потенциально опасными считались все случаи выпадения замерзающего дождя и замерзающей мороси (кодовые цифры КН-01 24, 56, 57, 66 и 67).

В коде КН-01 отсутствует разделение изморози на зернистую и кристаллическую, поэтому для анализа использовались сроки, соответствующие туману с отложением изморози (кодовые цифры КН-01 48 и 49). С целью отсеивания не представляющей опасности кристаллической изморози были отобраны только те случаи изморози, которые наблюдались в диапазоне температуры воздуха от $-10,3$ до $-0,7$ °C и скорости ветра 2 м/с и более. Такая фильтрация данных позволяет убрать из выборки большую часть отложений в виде кристаллической изморози, которая образуется в безветренную морозную погоду.

Для выявления потенциально опасных случаев мокрого снега отбирались сроки, в которые наблюдались умеренные непрерывные, сильные и ливневые осадки твердой и смешанной фазы (кодовые цифры КН-01 73, 74, 75, 85 и 86), выпадающие при температуре воздуха от 0 до $0,6$ °C и скорости ветра не более 1 м/с. Такой диапазон ранее был обоснован авторами работы как наиболее благоприятный для образования опасных отложений мокрого снега.

Результаты исследований и их обсуждение

По данным созданного цифрового массива данных получены некоторые новые сведения о метеорологических условиях формирования атмосферного обледенения различных видов. Были проанализированы условия образования всех зафиксированных на 521 метеорологической станции случаев гололеда, зернистой и кристаллической изморози, а также мокрого снега за период с 1979 г. по 2022 г. За этот период наблюдений на всех метеорологических станциях было отмечено 368560 случаев гололеда, 2068660 случаев кристаллической

изморози, 241841 случай зернистой изморози и 1688000 случаев выпадения мокрого снега.

В работе рассмотрены значения температуры воздуха, скорости ветра и относительной влажности воздуха во время наблюдения явлений обледенения разного вида. Ранее была выполнена схожая работа, в ходе которой по данным 183 метеорологических станций за период с 1985 г. по 2018 г. исследовались температурно-ветровые условия образования гололедно-изморозевых отложений различных видов по данным инструментальных наблюдений [20]. Анализ данных визуальных наблюдений, проведенный в настоящей статье, дополняет ранее полученные данные, так как рассматриваются выборки явлений, превышающие предыдущие в несколько десятков раз. Также в данной статье в дополнение к температурно-ветровым условиям рассмотрены значения относительной влажности воздуха в момент наблюдения гололедно-изморозевых отложений.

Рассмотрим термические условия образования атмосферного обледенения различных видов (табл. 1).

Таблица 1

Параметры выборок температуры воздуха, скорости ветра и относительной влажности воздуха в момент наблюдения гололеда, кристаллической (К) изморози, зернистой (З) изморози и мокрого снега

Parameters of air temperature, wind speed and relative air humidity at the time of observation of glaze ice, soft rime, hard rime, and wet snow

Атмосферное явление	Кол-во случаев	Среднее	Медиана	Стандартное отклонение	Значение процентиля			
					5 %	25 %	75 %	95 %
Температура воздуха, °С								
Гололед	368560	−4,4	−2,5	5,9	−16,7	−5,7	−0,8	0,5
Изморозь (К)	2068660	−22,3	−21,1	10,5	−41,4	−29,4	−14,5	−6,5
Изморозь (З)	241841	−7,7	−6,2	6,8	−21,5	−9,6	−3,6	−0,6
Мокрый снег	1688000	0,5	0,5	1,6	−2,0	−0,1	1,2	3,0
Скорость ветра, м/с								
Гололед	368560	3,6	3	2,7	0	2	5	9
Изморозь (К)	2068660	1,8	1	1,9	0	0	3	5
Изморозь (З)	241841	2,7	2	2,4	0	1	4	7
Мокрый снег	1688000	4,1	3	3,1	0	2	5	10
Относительная влажность воздуха, %								
Гололед	368560	91,4	93	7,6	77	88	97	100
Изморозь (К)	2068660	82,6	83	8,4	69	77	89	96
Изморозь (З)	241841	91,8	94	7,7	77	89	97	100
Мокрый снег	1688000	88,7	92	11,4	64	85	96	100

В табл. 1 представлены данные о величине выборки, среднем значении, медиане, стандартном отклонении выборки, а также значениях 5, 25, 75 и 95-го процентиля. Полученные значения процентилей использовались для оценки диапазонов температуры воздуха: 25-й и 75-й процентиля использовались для оценки

наиболее характерных условий образования атмосферного обледенения, 5-й и 95-й процентиля — для оценки наиболее вероятных границ этих условий.

На рис. 1 представлены дифференциальные функции распределения температуры воздуха, скорости ветра и относительной влажности воздуха в момент наблюдения гололеда, мокрого снега, кристаллической и зернистой изморози. Отдельно представлены дифференциальные функции распределения температуры воздуха в момент наблюдения просвечивающего тумана с отложением изморози (кодированная цифра 48) и сплошного тумана с отложением изморози (кодированная цифра 49) (рис. 1 з).

По данным объединенного массива гололед и мокрый снег образуются в ветреную погоду, наиболее часто при скорости ветра от 2 до 5 м/с. Относительно высокая скорость ветра в момент выпадения мокрого снега и образования гололеда связана с тем, что данные явления наблюдаются преимущественно во время прохождения атмосферных фронтов, сопровождающихся усилением ветра. Оценки скорости ветра при выпадении мокрого снега по данным визуальных наблюдений несколько выше, чем по данным инструментальных наблюдений. Это связано с тем, что инструментальные наблюдения включают в себя только отложения мокрого снега на проводах гололедного станка, в то время как во время визуальных наблюдений отмечают любой мокрый снег, даже тот, который не налипает на провода, ветви деревьев и другие предметы. Кристаллическая изморозь наблюдается во время штиля или во время слабого ветра. Зернистая изморозь чаще наблюдается при скорости ветра от 1 до 4 м/с. Наличие ветра во время зернистой изморози является необходимым условием, так как ветер нужен для переноса капель переохлажденного тумана и последующего столкновения этих капель с предметами, на которых происходит обледенение.

Интересным результатом исследования является оценка диапазона относительной влажности воздуха во время образования гололеда, изморози и мокрого снега. Зернистая изморозь и гололед образуются при наиболее высоких значениях относительной влажности воздуха — от 77 до 100 % соответственно. Мокрый снег может выпадать при более низкой относительной влажности, начиная с 64 %. Для формирования подавляющего числа случаев кристаллической изморози было достаточно 69 % относительной влажности, также практически все случаи данного вида изморози образовывались при относительной влажности ниже 94 %.

Оценки температуры воздуха в момент образования обледенения представлены на двух рисунках (рис. 1 в и рис. 1 г). На рис. 1 в представлены функции распределения температуры воздуха в момент обледенения по данным объединенного массива. Для всех явлений полученные диапазоны температуры шире тех, что ранее были получены по данным инструментальных наблюдений. Это связано с тем, что визуальное определение атмосферных явлений является более сложным, чем инструментальное, и, как следствие, диапазон возможных метеорологических условий в момент наблюдений отличается большей вариативностью. Наибольшие различия температурных диапазонов наблюдаются в выборках гололеда, который по данным визуальных наблюдений образуется в диапазоне

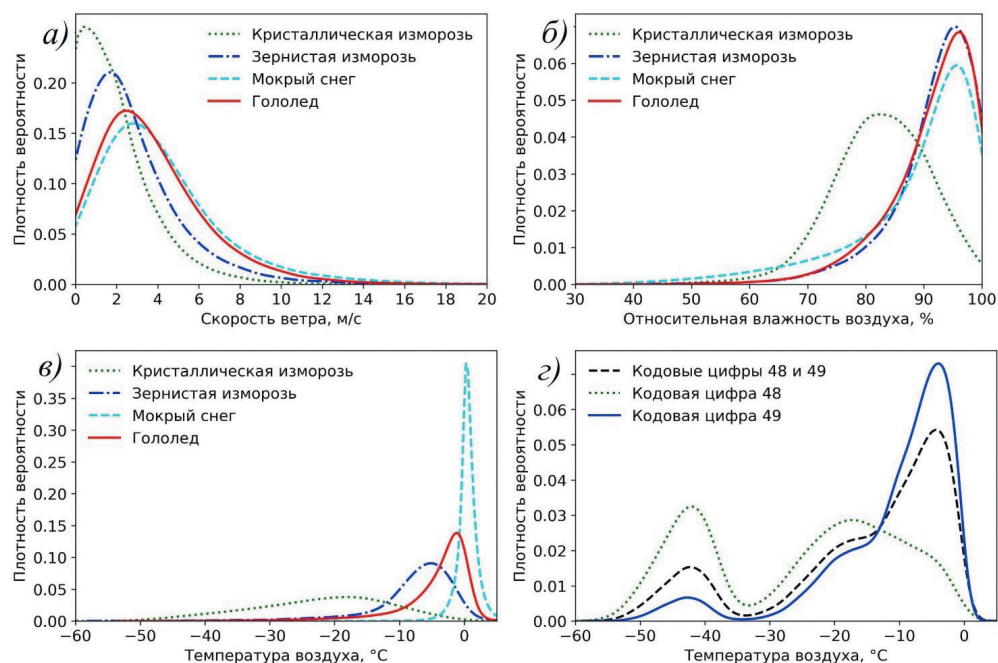


Рис. 1. Дифференциальные функции распределения: а — скорости ветра, б — относительной влажности воздуха, в — температуры воздуха в момент наблюдения атмосферных явлений, з — температуры воздуха в момент наблюдения тумана с отложением изморози в соответствии с кодом КН-01.

Fig. 1. Differential distribution functions of: а — wind speed, б — relative humidity, and в — air temperature at the time of atmospheric phenomenon observations, and з — air temperature during observations of fog with rime deposition in accordance with code SYNOP.

от $-16,7$ до $0,5$ °C, а по полученным ранее оценкам от $-6,9$ до 0 °C. Отдельно были рассмотрены термические условия в момент наблюдения туманов с отложением изморози, регистрируемые наблюдателем в седьмой группе кода КН-01 в разделе текущей погоды (рис. 1 з). Показано, что просвечивающие туманы с отложением изморози чаще наблюдаются при более низкой температуре воздуха, чем те туманы, во время которых видно небо. Таким образом, бóльшая часть отложений зернистой изморози образуется во время сплошных, а бóльшая часть кристаллической изморози — во время просвечивающих туманов. Отдельно стоит рассмотреть третью моду от -35 до -55 °C. При столь низкой температуре воздуха образуется ледяной туман без отложения изморози какого-либо вида. Такая погода нередко наблюдается в зимнее время года на территории Уральского, Сибирского и Дальневосточного ФО России.

По данным визуальных наблюдений за атмосферными явлениями построены карты-схемы среднего годового числа дней с гололедом, кристаллической

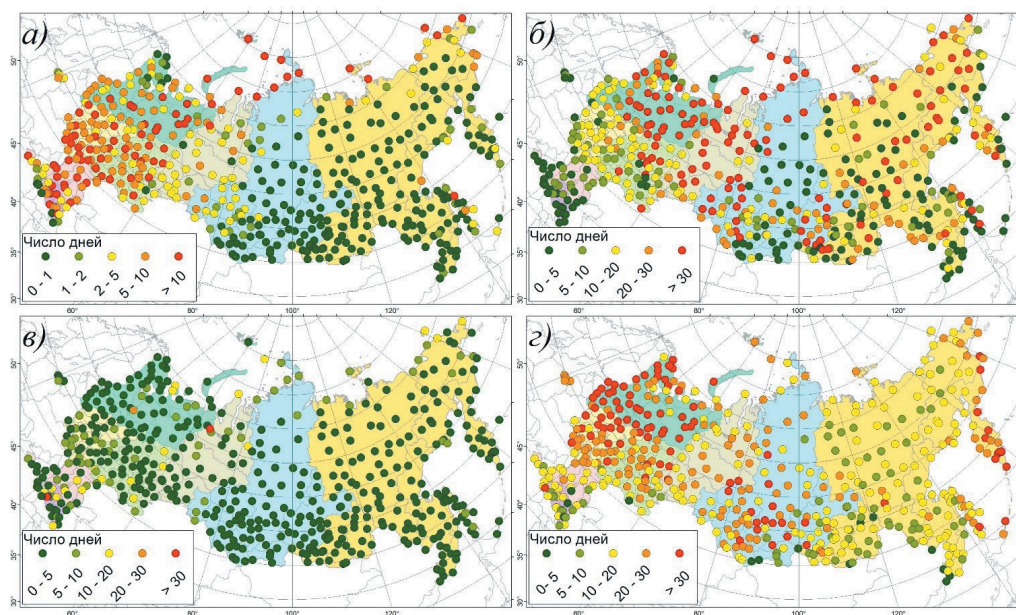


Рис. 2. Среднее годовое число дней с: а — гололедом, б — кристаллической изморозью, в — зернистой изморозью, г — мокрым снегом на территории федеральных округов России за период с 1979 г. по 2022 г.

Fig. 2. Average annual number of days with: а — glaze ice, б — soft rime, в — hard rime, г — wet snow across the federal districts of Russia for the period from 1979 to 2022.

изморозью, зернистой изморозью и мокрым снегом на территории федеральных округов России (рис. 2).

Гололед наиболее часто наблюдается на Европейской территории России, где в холодный период года возникают синоптические условия, во время которых циклоны приносят теплые и влажные воздушные массы, которые при взаимодействии с выхолаженной поверхностью континента создают благоприятные условия для выпадения замерзающих осадков. Гололед часто наблюдается на метеорологических станциях, расположенных на побережьях северных морей России — Баренцева, Карского, моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского моря. Здесь гололед в среднем наблюдается более 10 дней в году. В данном случае обледенение образуется преимущественно в переходные сезоны, когда поверхность суши стремительно выхолаживается, но с океана на континент все еще поступает относительно теплый и влажный воздух. С продвижением на восток страны процентное соотношение гололеда уменьшается, а на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока гололед является крайне редким явлением и в среднем наблюдается менее 1 дня в году (рис. 2 а).

Кристаллическая изморозь часто наблюдается на всей территории России. Это связано с высокой повторяемостью радиационного выхолаживания поверхности,

в результате которого происходит образование туманов с десублимацией водяного пара (рис. 2 б). Зернистая изморозь — более редкое явление. Для формирования зернистой изморози необходимо существование переохлажденного тумана, капли которого под действием воздушного потока сталкиваются с предметами и образуют на них снеговидные рыхлые отложения льда. Наибольшая повторяемость зернистой изморози, как и гололеда, наблюдается на Европейской территории России, где зимой воздух часто имеет достаточное влагосодержание для образования переохлажденных туманов с отложением изморози. Отдельно стоит отметить высокую повторяемость (около 50 дней в году) зернистой изморози на горных метеорологических станциях, таких как Рай-Из (Ямало-Ненецкий АО) и Шаджатмаз (Карачаево-Черкессия). На таких метеостанциях зернистая изморозь часто наблюдается в периоды, когда нижняя граница облачности находится ниже уровня станции (рис. 2 в).

Наибольшая частота выпадения осадков в виде мокрого снега отмечается на севере Европейской равнины, что обусловлено высокой повторяемостью околонулевых температур воздуха, создающих благоприятные условия для формирования осадков смешанного фазового состава [21].

На Дальнем Востоке, в частности на Камчатке и Сахалине, мокрый снег наблюдается с высокой повторяемостью — в среднем свыше 20 дней в году, что обусловлено воздействием мощных циклонов, формирующихся над акваториями Берингова, Охотского и Японского морей (рис. 2 г).

Для каждого федерального округа Российской Федерации были построены диаграммы, отражающие распределение среднего годового количества дней с наблюдением гололеда, кристаллической и зернистой изморози, а также мокрого снега (рис. 3). На диаграммах по оси ординат отложено среднее годовое число дней с каждым из указанных явлений за период наблюдений с 1979 г. по 2022 г., а по оси абсцисс — значение эмпирической обеспеченности (P), рассчитанное по формуле: $P = (m/(n + 1)) \times 100 \%$, где m — порядковый номер элемента в ранжированном ряду, n — общее количество членов ряда.

Для каждого явления построены отдельные графики, что обеспечивает возможность проведения сравнительного анализа повторяемости различных явлений как внутри округа, так и между различными округами. Такой подход позволяет наглядно отразить пространственные особенности повторяемости рассматриваемых явлений в пределах каждого федерального округа. Так, например, анализ диаграммы для Центрального ФО показал, что наибольшую повторяемость на территории округа имеет мокрый снег: на отдельных метеорологических станциях среднее годовое число дней с данным видом осадков достигает 40. Это указывает на высокую климатическую предрасположенность региона к формированию отложений в виде мокрого снега в холодный период года. Предложенные диаграммы позволяют выявлять резкие особенности наблюдаемой повторяемости атмосферных явлений. Так, например, на территории Сибирского и Дальневосточного ФО в целом наблюдается низкая повторяемость гололеда — на большинстве станций менее одного дня в году, однако на графиках отчетливо видно, что на части территории повторяемость гололеда увеличивается до 20 дней в году и более.

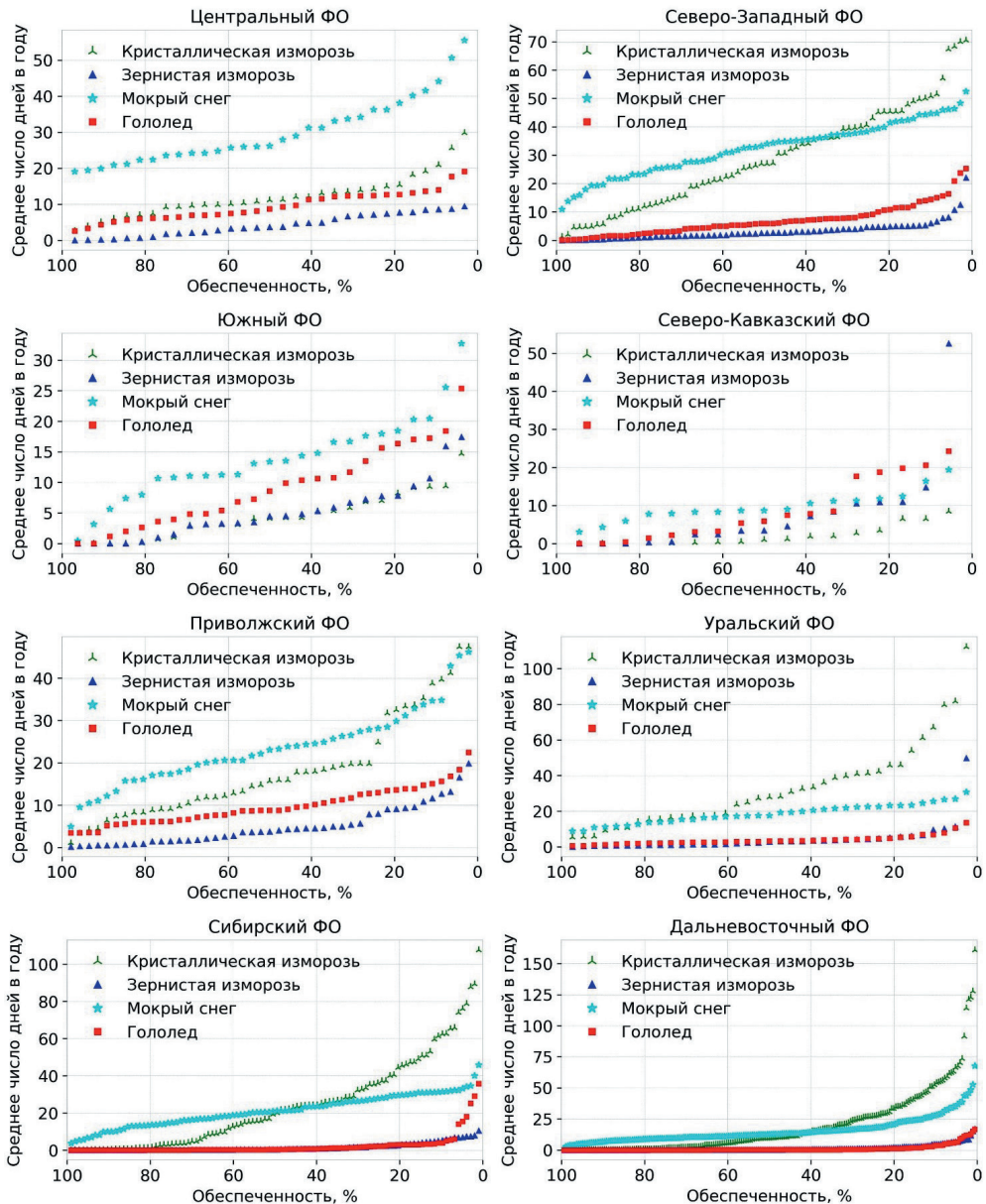


Рис. 3. Эмпирические распределения среднего числа дней с гололедом, кристаллической изморозью, зернистой изморозью и мокрым снегом на метеорологических станциях для каждого федерального округа России за период с 1979 г. по 2022 г.

Fig. 3. Empirical distributions of the average number of days with glaze ice, soft rime, hard rime, and wet snow at meteorological stations across each federal district of Russia for the period 1979—2022.

Аналогичным образом, на примере Уральского и Северо-Кавказского ФО, можно рассмотреть отдельные локальные максимумы повторяемости некоторых явлений, таких как отложения зернистой изморози на горном массиве Рай-Из и хребте Шаджатмаз.

В табл. 2. приведены количественные оценки среднего и максимального числа дней с обледенением каждого вида, а также значения линейных трендов для каждого федерального округа России. Линейный тренд по каждому федеральному округу определялся как среднее арифметическое значений трендов метеорологических станций, расположенных в его границах. Для обеспечения надежности результатов в осреднение включались только те станции, для которых тренды были статистически значимыми на уровне 5 % при одновременном использовании обоих критериев. Данные метеорологических станций с незначимыми трендами при осреднении не учитывались.

Из табл. 2 следует, что на территории России наблюдаются как положительные, так и отрицательные тренды числа дней с гололедом. На территории Северо-Западного и Приволжского ФО отмечаются положительные тренды. Вероятно, это связано со смещением максимальной повторяемости явлений гололеда с юга России в сторону северо-запада, происходящим в условиях современного потепления климата. Увеличение числа дней с гололедом на территории Северо-Западного ФО было отмечено и ранее [12]. На территории остальных округов наблюдается отрицательный тренд числа дней с гололедом. Быстрее всего число дней с гололедом сокращается в Северо-Кавказском ФО, где наблюдается уменьшение в среднем на 2,3 дня за 10 лет. Сокращение до 1,5 дней за 10 лет происходит на территории Южного и Сибирского ФО. На территории Центрального, Уральского и Дальневосточного ФО число дней с гололедом убывает медленнее — от 0,6 до 0,7 дней за 10 лет. В ранее опубликованных работах были оценены тренды среднегодового количества дней с гололедом на территории России. Показаны значимые тенденции к увеличению числа дней с замерзающим дождем на северо-западе и северо-востоке Восточно-Европейской равнины и тенденции к уменьшению числа дней с замерзающим дождем в степной части Восточно-Европейской равнины [22].

На территории России кристаллическая изморозь также, как и гололед, имеет тренды разного знака, однако в среднем на всей территории России число дней с отложениями данного вида уменьшается. Наибольшее количество метеорологических станций с положительными трендами находится на территории Дальневосточного ФО, поэтому здесь наблюдается самое медленное сокращение — около 0,4 дней за 10 лет. Быстрее всего сокращается число дней с кристаллической изморозью в Сибирском ФО, в среднем на 3,2 дня за 10 лет. Число дней с зернистой изморозью наиболее быстро уменьшается на Европейской территории России, а увеличивается — за Уралом.

Повторяемость мокрого снега увеличивается на всей территории России, за исключением Северо-Кавказского ФО. В Приволжском ФО число дней с выпадением мокрого снега увеличивалось в течение последних десятилетий более чем на 3 дня за 10 лет. Полученные значения линейных трендов числа дней

с кристаллической изморозью и мокрым снегом хорошо согласуются с результатами ранее выполненных исследований. По данным инструментальных наблюдений для периода с 1984 г. по 2022 г. был показан значимый положительный тренд числа случаев с отложением мокрого снега [23].

Помимо описанных выше характеристик, стоит рассмотреть величину максимального числа дней с наблюдением гололеда, изморози и мокрого снега. Показано, что в отдельные годы хотя бы на одной метеорологической станции, располагающейся на территории всех федеральных округов России, наблюдалось экстремальное число дней с обледенением. Даже на территории Уральского ФО в отдельные годы гололед наблюдался 29 дней в году. На территории Сибирского и Дальневосточного ФО кристаллическая изморозь может наблюдаться более 170 дней в году, т. е. практически каждый день холодного периода года.

Таблица 2

Данные о среднем годовом числе дней с гололедом, кристаллической изморозью, зернистой изморозью и мокрым снегом на территории Центрального (ЦФО), Северо-Западного (СЗФО), Южного (ЮФО), Северо-Кавказского (СКФО), Приволжского (ПФО), Уральского (УФО), Сибирского (СФО), Дальневосточного (ДФО) федеральных округов

Data on the average annual number of days with glaze ice, soft rime, hard rime, and wet snow in the territories of the Central, Northwestern, Southern, North Caucasian, Volga, Ural, Siberian, and Far Eastern federal districts of Russia

№	ФО	Гололед			Изморозь (К)			Изморозь (З)			Мокрый снег		
		Среднее	Максимум	Тренд (дней за 10 лет)	Среднее	Максимум	Тренд (дней за 10 лет)	Среднее	Максимум	Тренд (дней за 10 лет)	Среднее	Максимум	Тренд (дней за 10 лет)
1	ЦФО	9,4	42	−0,6	12,1	62	−3,9	4,1	31	−1,8	30,1	104	1,4
2	СЗФО	7,0	75	0,9	29,8	116	−6,1	3,2	49	−0,5	32,5	87	2,6
3	ЮФО	9,0	78	−1,5	4,4	45	−2,2	5,1	37	−0,4	13,8	50	0,2
4	СКФО	8,6	71	−2,3	2,0	24	−0,6	7,8	90	−2,7	9,7	38	−0,3
5	ПФО	9,6	60	0,7	18,4	84	−1,4	4,9	64	−0,6	23,7	89	3,5
6	УФО	3,3	29	−0,6	29,7	148	−3,0	2,7	85	0,1	18,7	53	2,2
7	СФО	2,2	144	−1,5	24,2	177	−3,2	1,5	33	0,0	21,6	78	2,9
8	ДФО	0,8	83	−0,7	18,3	197	−0,4	1,1	56	0,3	15,3	113	1,1

Рассмотрим повторяемость атмосферных явлений, которые могут приводить к образованию опасных гололедно-изморозевых отложений на территории России. На рис. 4 представлены карты-схемы с информацией о среднем за год числе дней с замерзающими осадками, туманами с отложением изморози и мокрым снегом. Описанный в разделе методики подход к выделению потенциально опасных явлений из общего числа явлений погоды, наблюдаемых на станции, позволяет отбросить из выборки большую часть явлений, не представляющих опасности. На карте-схеме для каждой метеорологической станции представлена круговая диаграмма, показывающая долю атмосферных явлений каждого вида.

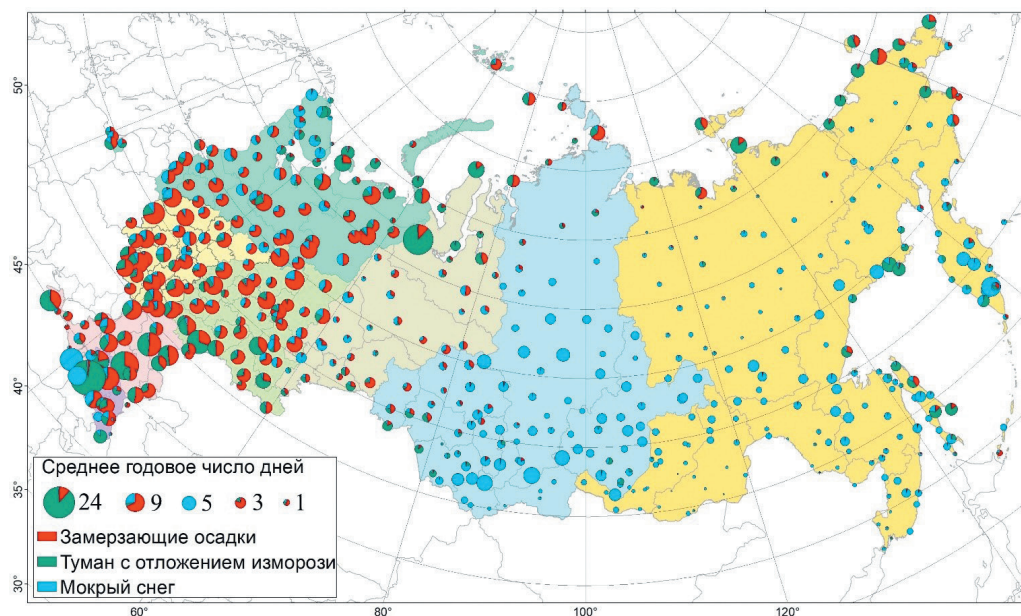


Рис. 4. Доля среднего годового числа дней с потенциально опасными явлениями замерзающих осадков, туманов с отложением изморози и мокрого снега за период с 1979 г. по 2022 г. по данным основных срочных наблюдений.

Размер кружков пропорционален сумме среднего числа дней всех явлений.

Fig. 4. The proportion of the average annual number of days with potentially hazardous freezing precipitation, fog depositing rime and wet snow for the period from 1979 to 2022, based on data from main 3-hour observations.

The size of the circles is proportional to the total average number of days for all phenomena.

Так как потенциально опасными замерзающими осадками нами также считались дождь и морось, то пространственное распределение этих явлений похоже на распределение всех случаев гололеда с рис. 2 а. На Европейской части России высока повторяемость туманов с отложением изморози при скорости ветра 2 м/с и более. На территории Сибири основным потенциально опасным метеорологическим явлением является мокрый снег, преимущественно характерный для переходных сезонов года. Похожая картина наблюдается и на Дальнем Востоке, где частота выпадения мокрого снега снижается по мере продвижения вглубь континента, в связи с чем для внутренних районов федерального округа гололедно-изморозевые отложения можно считать нехарактерными. В то же время для отдельных территорий Дальневосточного ФО, таких как Камчатка, Сахалин и побережье Магаданской области, наблюдаются специфические условия: здесь характерны обильные снегопады, а на ряде метеостанций отмечаются частые туманы с отложением изморози.

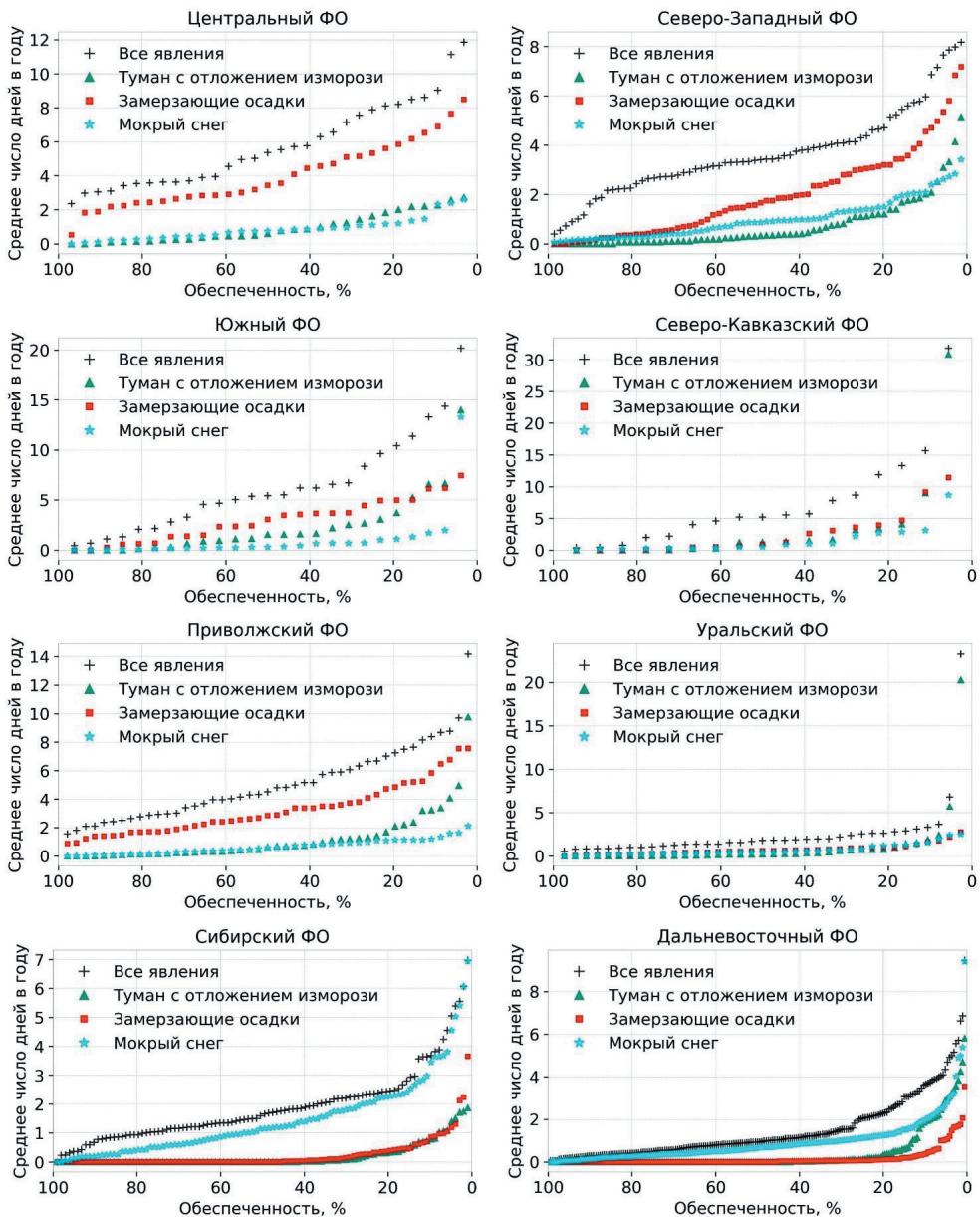


Рис. 5. Эмпирические распределения среднего числа дней с потенциально опасными замерзающими осадками, туманом с отложением изморози и мокрым снегом на метеорологических станциях для каждого федерального округа России за период с 1979 г. по 2022 г.

Fig. 5. Empirical distributions of the average number of days with potentially hazardous freezing precipitation, fog with rime deposition, and wet snow at meteorological stations across each federal district of Russia for the period 1979—2022.

Эти и другие локальные особенности можно отчетливо проследить по данным диаграмм распределения среднего годового числа дней с потенциально опасными явлениями погоды (рис. 5). Аналогично диаграммам общего количества атмосферных явлений можно оценить степень и характер пространственной изменчивости их повторяемости. На территории федеральных округов, расположенных на Европейской части России, отмечается преобладание потенциально опасных замерзающих осадков по сравнению с осадками в виде мокрого снега. Это связано с большим количеством отфильтрованных случаев мокрого снега, выпадающих при скорости ветра больше 1 м/с. Замерзающие осадки абсолютно преобладают на территории Центрального, Северо-Западного, Южного и Приволжского ФО. Туманы с отложением изморози чаще других явлений наблюдаются на территории Уральского и Северо-Кавказского ФО, а отложения мокрого снега — на территории Сибирского и Дальневосточного ФО.

В общем, среднее годовое количество атмосферных явлений, потенциально приводящих к образованию сильных гололедно-изморозевых отложений, уменьшается с запада на восток страны. Наибольшее среднее годовое число таких явлений наблюдается в Северо-Кавказском округе за счет вклада в выборку наблюдений на высокогорной станции Шаджатмаз. Наименьшее число потенциально опасных явлений обледенения отмечается на территории Дальневосточного ФО, несмотря на то, что на побережьях Северного Ледовитого и Тихого океанов наблюдается от 5 до 10 опасных явлений за год.

На рис. 6 представлены карты-схемы со значениями линейных трендов числа дней с потенциально опасными явлениями на территории России, где цветом показаны значения только для статистически значимых трендов, а статистически незначимые тренды отмечены символом «×». На подавляющем числе метеорологических станций наблюдаются статистически незначимые тренды. Это связано с жесткими условиями производимых оценок — использованием двух статистических критериев проверки трендов на значимость и использованием рядов не менее 30 лет. Также на оценки значимости существенное влияние оказывает большая межгодовая изменчивость повторяемости явлений обледенения и ошибки, связанные со сложностью наблюдения рассматриваемых явлений.

На Европейской территории России тренды числа дней с замерзающими осадками имеют различную направленность (рис. 6 а). Положительные тренды отмечаются на большей части станций Приволжского ФО. На территории Центрального, Южного и Северо-Кавказского ФО в среднем происходит уменьшение числа дней с замерзающими осадками. Повторяемость туманов с отложением изморози уменьшается на всей территории России, причем наиболее быстрое сокращение происходит на территории Южного и Северо-Кавказского ФО — от 1,1 до 1,2 дней за 10 лет соответственно (рис. 6 б). Повсеместно наблюдается увеличение числа дней с потенциально опасным интенсивным мокрым снегом — от 0,1 до 1,2 дней за 10 лет (рис. 6 в). В целом, на территории России наблюдается увеличение числа дней с потенциально опасными явлениями обледенения на территории Уральского и Сибирского ФО за счет увеличения повторяемости мокрого

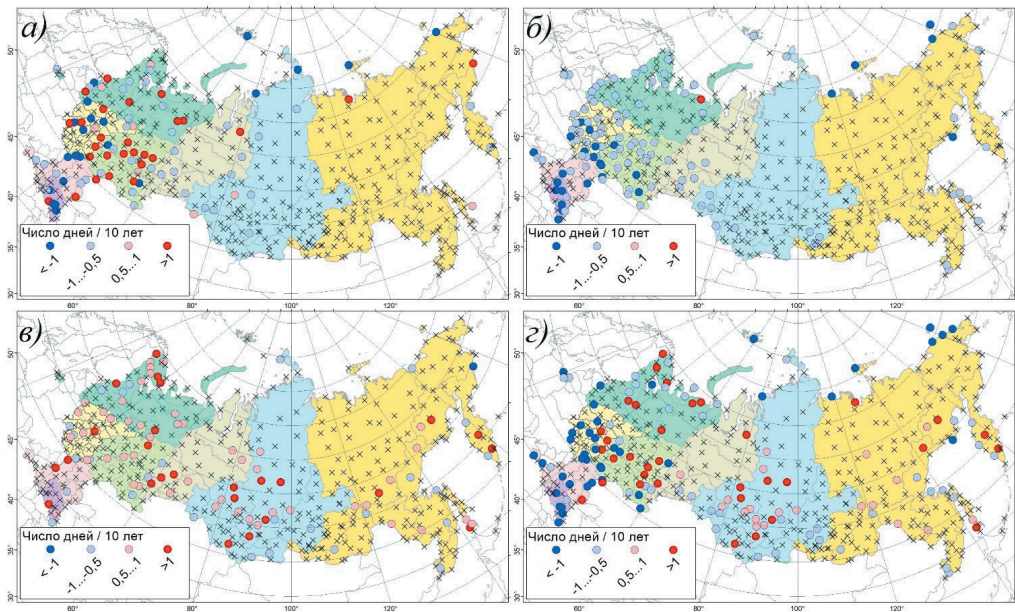


Рис. 6. Значения линейных трендов (число дней / 10 лет) для: *а* — замерзающих осадков, *б* — туманов с отложением изморози, *в* — мокрым снегом и *г* — суммой всех явлений на территории федеральных округов России за период с 1979 г. по 2022 г.

Символом «х» отмечены статистически незначимые тренды.

Fig. 6. Linear trend values (number of days per 10 years) for atmospheric phenomena: *a* — freezing precipitation, *б* — fogs depositing rime, *в* — wet snow, *г* — sum of all phenomena (bottom right) across the federal districts of Russia for the period from 1979 to 2022.

The symbol “x” marks statistically non-significant trends.

снега и уменьшение общего числа таких явлений в остальных федеральных округах (рис. 6 г).

В табл. 3. приведены количественные оценки среднего и максимального числа дней с потенциально опасными явлениями каждого вида, а также средние значения линейных трендов для каждого федерального округа России. Так же, как и в табл. 2, в осреднении участвовали только статистически значимые тренды.

Аналогично данным из табл. 2 рассмотрим условия максимального количества наблюдений потенциально опасных условий погоды. На территории федеральных округов, расположенных в Европейской части России, замерзающие осадки могут наблюдаться более 30 дней в году. Максимум наблюдений тумана с отложением изморози наблюдается на высокогорных станциях — более 40 дней в году. Максимальное количество дней с наблюдением потенциально опасного мокрого снега оказалось ниже по сравнению с максимумами замерзающих осадков и туманов с отложением изморози. Наибольшее число дней с мокрым снегом зафиксировано в Южном и Дальневосточном ФО — 26 и 24 дня соответственно.

Таблица 3

Данные о среднем годовом числе дней с потенциально опасными замерзающими осадками, туманом с отложением изморози и мокрым снегом на территории Центрального (ЦФО), Северо-Западного (СЗФО), Южного (ЮФО), Северо-Кавказского (СКФО), Приволжского (ПФО), Уральского (УФО), Сибирского (СФО), Дальневосточного (ДФО) федеральных округов

Data on the average annual number of days with potentially hazardous freezing precipitation, fog depositing rime and wet snow in the territories of the Central, Northwestern, Southern, North Caucasian, Volga, Ural, Siberian, and Far Eastern federal districts of Russia

№	ФО	Замерзающие осадки			Туман с отложением изморози			Мокрый снег			Все явления		
		Среднее	Максимум	Тренд (дней за 10 лет)	Среднее	Максимум	Тренд (дней за 10 лет)	Среднее	Максимум	Тренд (дней за 10 лет)	Среднее	Максимум	Тренд (дней за 10 лет)
1	ЦФО	4,0	19	-0,4	0,9	14	-0,7	0,8	12	0,2	5,8	27	-1,1
2	СЗФО	2,0	17	0,0	0,7	16	-0,3	1,0	11	0,3	3,7	21	-0,1
3	ЮФО	2,9	19	-0,8	2,4	30	-1,1	1,0	26	1,2	6,3	42	-1,0
4	СКФО	2,5	36	-1,2	3,4	48	-1,2	1,5	19	0,3	7,3	48	-2,1
5	ПФО	3,2	21	0,3	1,1	18	-0,6	0,6	9	0,1	5,0	25	-0,4
6	УФО	0,7	10	-0,3	0,4	43	-0,2	0,7	8	0,5	1,8	43	0,1
7	СФО	0,3	17	-0,5	0,2	8	-0,3	1,5	14	0,4	1,9	20	0,2
8	ДФО	0,1	21	-0,1	0,3	15	-0,6	1,0	24	0,2	1,4	25	-0,1

Наблюдения за гололедно-изморозевыми отложениями являются трудной задачей. Это связано как с большим разнообразием видов и разновидностей отложений, так и с большим разнообразием атмосферных явлений, вызывающих обледенение. В связи с этим возникает сложность оценки опасности атмосферного обледенения. Для нее можно использовать данные из разных источников — инструментальные наблюдения, визуальные наблюдения за атмосферными явлениями и данные о погоде из основных срочных наблюдений.

Наблюдения разных видов имеют свои особенности, достоинства и недостатки. Инструментальные наблюдения включают в себя измерение толщины, диаметра и массы отложений, а также более точное определение его вида. К минусам относится то, что такой вид наблюдений проводится не на всех станциях, а архивы содержат меньший период наблюдений. Визуальные и основные срочные наблюдения производятся на всех станциях, в архивах содержится данные за большой период наблюдений, но эти массивы содержат больше неточностей и не позволяют оценить интенсивность явления напрямую. Примененная в предлагаемой статье методика выявления потенциально опасных явлений погоды позволяет оценить повторяемость образования гололедно-изморозевых отложений для территорий, не освещенных инструментальными наблюдениями.

Отметим, что полученные количественные оценки приведены для территории федеральных округов России. Часть из них расположена в похожем климате

(например, Центральный и Приволжский ФО), но большая часть округов располагается в нескольких климатических областях (например, Сибирский и Дальневосточный ФО), поэтому оценки гололеда имеют не климатическое, а, в первую очередь, экономико-географическое и экологическое значение. Приведенный в работе анализ является примером оценки опасности набора гидрометеорологических явлений, и в дальнейшем аналогичные исследования могут быть проведены для оценок опасности для других территорий, например, для отдельных субъектов Российской Федерации.

Заключение

В ходе работы исследованы метеорологические условия формирования и пространственно-временные особенности гололедно-изморозевых отложений на территории России по данным визуальных и основных срочных наблюдений за период с 1979 г. по 2022 г.

Создан совместный массив данных, в котором для 521 метеорологической станции для каждого случая явления обледенения были внесены метеорологические условия его формирования. Получены количественные оценки диапазонов температуры воздуха, скорости ветра и относительной влажности воздуха в момент образования гололедно-изморозевых отложений различных видов, отдельно рассмотрены термические условия формирования туманов с отложением изморози. Впервые получены значения диапазонов относительной влажности воздуха во время образования гололеда, изморози и мокрого снега. Зернистая изморозь и гололед образуются при относительной влажности воздуха от 77 до 100 % соответственно. Мокрый снег может выпадать при более низкой относительной влажности, начиная с 64 %, для формирования кристаллической изморози достаточно 69 %. Показано, что большая часть отложений зернистой изморози образуется во время сплошных, а большая часть кристаллической изморози — во время просветляющих туманов.

Получены количественные оценки среднего годового и максимального числа дней с гололедно-изморозевыми отложениями каждого вида, а также значения линейных трендов для их повторяемости. Гололед чаще всего наблюдается на европейской части России, в зависимости от федерального округа от 7 до 9,6 случаев в году. С продвижением на восток страны повторяемость гололеда резко уменьшается — до 0,8 дней в году в ДФО. Выявлена высокая повторяемость гололеда на побережьях северных морей России, где он наблюдается в среднем более 10 дней в году, а в отдельные годы на некоторых метеорологических станциях более, чем 100 дней в году. Зернистая изморозь наблюдается на территории России реже других явлений (в разных ФО от 1,1 до 7,8 дней в году), однако на горных метеорологических станциях регистрируется до 90 дней в году с зернистой изморозью. Чаще других явлений наблюдается мокрый снег в ЦФО и СЗФО — более 30 дней в году. Показано, что в период с 1979 г. по 2022 г. на территории России практически повсеместно уменьшалось число дней с кристаллической изморозью (более, чем на 3 дня за 10 лет в ЦФО, УФО и СФО) и увеличивалось число дней с мокрым

снегом (более, чем на 2 дня за 10 лет в СЗФО, ПФО, УФО и СФО). Число дней с гололедом увеличивалось на территории Северо-Западного и Приволжского ФО (на 0,9 и 0,7 дней за 10 лет соответственно) что, вероятно, связано со смещением на север области максимальной повторяемости гололеда.

Отдельные количественные оценки приведены для явлений погоды, потенциально вызывающих образование сильных гололедно-изморозевых отложений — замерзающих осадков, туманов с отложением изморози и мокрого снега. Показано, что наиболее часто наблюдающимся видом обледенения являются замерзающие осадки, среднее число дней с которыми сокращается с продвижением на восток страны от 4 дней в году в ЦФО до 0,1 дня в ДФО. Среднее годовое число дней с замерзающими осадками с 1979 г. сокращалось на территории России везде, кроме ПФО. Наибольшее уменьшение наблюдалось в СКФО — 1,2 дней за 10 лет. На горных метеорологических станциях в отдельные годы наблюдалось более 40 дней в году с потенциально опасными туманами, сопровождавшимися отложением изморози. При этом в среднем по территории России число дней с такими явлениями сокращалось на 0,2–1,2 дня за десятилетие, а число дней с потенциально опасным выпадением мокрого снега увеличивалось (от 0,1 до 1,2 дней за десять лет).

Следует отметить, что к полученным результатам о многолетних изменениях повторяемости потенциально опасных явлений атмосферного обледенения на территории России стоит относиться с некоторой осторожностью. Это связано с тем, что полученные значения линейных трендов отличаются большим разбросом, а исходные данные визуальных наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями имеют множество погрешностей и низкую точность. Кроме того, в пространственные различия изменчивости повторяемости гололедно-изморозевых отложений вносят вклад и естественные факторы — кластеризация экстремумов, их нестационарность и другие особенности, требующие отдельного изучения.

Список литературы

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. Санкт-Петербург: Научные технологии. 2022. 676 с.
2. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. Москва. Росгидромет. 2025. 104 с.
3. Типовой перечень и критерии опасных метеорологических явлений. [Электронный ресурс]: сайт. URL: <https://meteoinfo.ru/hazards-definitions> (дата обращения: 01.04.2024).
4. Бучинский В. Е. Атлас обледенения проводов. Л.: Гидрометеиздат. 1966. 114 с.
5. Шакина Н. П., Хоменко И. А., Иванова А. Р., Скриптунова Е. Н. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2012. № 348. С. 130—161. EDN: PTTLTB.
6. Changnon S. A., Changnon J. M. Major ice storms in the United States, 1949–2000 // Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards. 2002. Vol. 4. No. 4. P. 105—111. DOI: 10.3763/ehaz.2002.0412.
7. Call D. A. Changes in ice storm impacts over time: 1886–2000 // Weather, Climate, and Society. 2010. Vol. 2, No. 1. P. 23—35. DOI: 10.1175/2009WCAS1013.1.

8. Вильфанд Р. М., Голубев А. Д. Метеорологические условия выпадения ледяных дождей 25—26 декабря 2010 г. над центром Европейской части России // Лед и снег. 2011. №4 (115). С. 119—124. EDN: PJLPPF.
9. Голубев А. Д., Кабак А. М., Никольская Н. А. и др. Ледяной дождь в Москве, Московской области и прилегающих областях центра Европейской территории России 25—26 декабря 2010 года. // Труды Гидрометцентра России. 2013. Т. 349. С. 214—230. EDN: RDJAMN.
10. Макаров И. А., Чернокульский А. В. Влияние изменения климата на экономику России: рейтинг регионов по необходимости адаптации // Журнал Новой экономической ассоциации. 2023. №. 4. С. 145—202. DOI: 10.31737/22212264_2023_4_145-202 EDN: LQDYUW.
11. Соколичина Н. Н., Леонов И. И. Преобладающие виды гололедно-изморозевых отложений по наблюдениям на станциях Обской губы // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 3. С. 343—355. DOI: 10.30758/0555-2648-2023-69-3-343-355 EDN: TFOOEK.
12. 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. DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-1-21-32 EDN: XOVKCCQ.
13. Леонов И. И., Соколичина Н. Н., Ильин В. И. Продолжительность периода с гололедно-изморозевыми отложениями в Арктической зоне Российской Федерации в условиях изменяющегося климата // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2025. №. 2. С. 84—98. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.2.7 EDN: XTWJPI.
14. Кислов А. В., Суркова Г. В. Влияние глобального потепления на климатические ресурсы России // Экономика. Налоги. Право. 2021. Т. 14. № 4. С. 6—14. DOI: 10.26794/1999-849X-2021-14-4-6-14 EDN: SMXUOP.
15. ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» [Электронный ресурс]: офиц. сайт. URL: <https://meteo.ru> (дата обращения: 24.04.2024).
16. Булыгина О. Н., Веселов В. М., Разуваев В. Н., Александрова Т. М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России // Свидетельство о государственной регистрации базы данных. 2014. №. 2014620549.
17. Булыгина О. Н., Веселов В. М., Александрова Т. М., Коршунова Н. Н. Описание массива данных по атмосферным явлениям на метеорологических станциях России // Свидетельство о государственной регистрации базы данных. 2015. №. 2015620081.
18. Mann H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*. 1945. 245—259. DOI: 10.2307/1907187.
19. Kendall M. Rank correlation measures. Charles Griffin. London. 1975. 202. 15.
20. 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. DOI: 10.21513/2410-8758-2023-1-107-126 EDN: EANDOT.
21. Суркова Г. В., Лебедева А. А. Современный режим температуры воздуха в диапазоне около 0 °C на европейской части России // Метеорология и гидрология. 2019. № 9. С. 95—99. EDN: QRSYIL.
22. Groisman P., Bulygina O., Yin, X., et al. Recent changes in the frequency of freezing precipitation in North America and Northern Eurasia // *Environmental Research Letters*. 2016. Vol. 11. No. 4. P. 045007. DOI: 10.1088/1748-9326/11/4/045007 EDN: WWDXZJ.
23. Аржанова Н. М., Коршунова Н. Н. Мониторинг гололедно-изморозевых отложений на территории России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 4(390). С. 138—153. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-4-138-153 EDN: JVGXPJ.

References

1. *Tretij ocenochnyj doklad ob izmenenijah klimata i ih posledstvijah na territorii Rossijskoj Federacii = The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Roshydromet*. St. Petersburg. High-tech Technologies. 2022: 676 p. (In Russ.).
2. *Doklad ob osobennostjah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2024 god = Report on climate change in the territory of the Russian Federation for 2024*. Moscow: Roshydromet, 2025: 104 p. (In Russ.).

3. The standard list and criteria of hazardous meteorological phenomena. site. URL: <https://meteo.ru> (access date: 23.04.2024). (In Russ.).
4. Buchinsky V. E. *Atlas obledeneniya provodov = Atlas of wire icing*. Leningrad: Gidrometizdat, 1966: 114 p. (In Russ.).
5. Shakina N. P., Khomenko I. A., Ivanova A. R., Skriptunova Ye. N. Freezing Precipitation Formation and Prediction: Literature Review and Some New Findings. *Trudy Gidromettsentra Rossii = Proc. of Hydrometcentre of Russia*. 2012; (348): (130—161). EDN: PTTLTB. (In Russ.).
6. Changnon S. A., Changnon J. M. Major ice storms in the United States, 1949—2000. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*. 2002; 4(4): 105—111. DOI: 10.3763/ehaz.2002.0412.
7. Call D. A. Changes in ice storm impacts over time: 1886—2000. *Weather, Climate, and Society*. 2010; 2(1): 23—35. DOI: 10.1175/2009WCAS1013.1
8. Vilfand R. M., Golubev A. D. Meteorological conditions for freezing rain on December 25—26, 2010 over the central European part of Russia. *Led i sheg = Ice and Snow*. 2011; (115): (119—124). EDN: PJLJPF (In Russ.).
9. Golubev A. D., Kabak A. M., Nikol'skaya N. A. et al. Freezing rain in Moscow, Moscow region and adjacent areas of the central European territory of Russia on December 25-26, 2010. *Trudy Gidromettsentra Rossii = Proc. of Hydrometcentre of Russia*. 2013; (349): (214—230). EDN: RDJAMN. (In Russ.).
10. Makarov I. A., Chernokulsky A. V. Impacts of climate change on the Russian economy: ranking of regions by adaptation needs. *Zhurnal Novoj jekonomicheskoy asociacii = The Journal of the New Economic Association*. 2023; (4): (145—202). DOI: 10.31737/22212264_2023_4_145-202 EDN: LQDYUW. (In Russ.).
11. Sokolikhina N. N., Leonov I. I. Dominant types of ice accretions according to observations at Ob' Bay stations. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2023. 69(3):. (343—355). DOI: 10.30758/0555-2648-2023-69-3-343-355 EDN: TFOOEK. (In Russ.).
12. Surkova G. V., Lavrenteva A. I., Tkacheva E. S. Regional features of glaze ice events frequency in the north of the European territory of Russia in the current changing climate. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2024; 70(1): (21—32). DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-1-21-32 EDN: XOVKCQ. (In Russ.).
13. Leonov I. I., Sokolikhina N. N., Ilyin V. I. Duration of the period with ice accretion in the Arctic zone of the Russian federation under the changing climate. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografija = Lomonosov Geography Journal*. 2025; (2): (84—98). DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.2.7 EDN: XTWJPI. (In Russ.).
14. Kislov A. V., Surkova G. V. The impact of global warming on Russia's climate resources. *Jekonomika. Nalogi. Pravo = Economics, taxes & law*. 2021; 14(4): (6—14). DOI: 10.26794/1999-849X-2021-14-4-6-14 EDN: SMXUOP. (In Russ.).
15. All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information — World Data Center (RIHMI-WDC): official site. URL: <https://meteo.ru> (access date: 23.04.2024).
16. Bulygina O. N., Veselov V. M., Razuvaev V. N., Alexandrova T. M. Description of the Dataset of Observational Data on Major Meteorological Parameters from Russian Weather Stations, Database State Registration Certificate No. 2014620549. 2014. (In Russ.).
17. Bulygina O. N., Veselov V. M., Aleksandrova T. M., Korshunova N. N. Description of the Dataset of Atmospheric Events at the Russian Weather Stations. The State Registration Certificate No. 2015620081. 2015. (In Russ.).
18. Mann H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica = Journal of the Econometric Society*. 1945. 245—259. DOI: 10.2307/1907187.
19. Kendall M. *Rank correlation measures*. Charles Griffin. London. 1975. 202. 15.
20. Leonov I. I., Arzhanova N. M. Meteorological conditions for the formation of ice accretions in Russia. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*. 2023; 9(1): (107—126). DOI: 10.21513/2410-8758-2023-1-107-126 EDN: EAHDOT. (In Russ.).
21. Surkova G. V., Lebedeva A. A. The current air temperature regime is in the range of about 0 °C in the European part of Russia. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology*. 2019; (9): (95—99). EDN: QRSYIL. (In Russ.).

22. Groisman P., Bulygina O., Yin, X., et al. Recent changes in the frequency of freezing precipitation in North America and Northern Eurasia. *Environmental Research Letters*. 2016; 11(4): 045007. DOI: 10.1088/1748-9326/11/4/045007 EDN: WWDXZJ.
23. Arzhanova N. M., Korshunova, N. N. Monitoring of glaze-ice on the territory of Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological Research and Forecasting*. 2023; 4(390): (138—153). DOI: 10.37162/2618-9631-2023-4-138-153 EDN: JVGXPJ. (In Russ.).

Информация об авторах

Леонов Игорь Иванович, канд. геогр. наук, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, младший научный сотрудник, leonov@geogr.msu.ru.

Соколихина Наталья Николаевна, канд. геогр. наук, доцент, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, доцент, natalia.sokolikhina@gmail.com.

Гибадуллина Анастасия Игоревна, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, техник, lavrentevaai@ty.msu.ru.

Кислов Александр Викторович, д-р. геогр. наук, профессор, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, заведующий кафедрой, avkislov@mail.ru.

Information about authors

Leonov Igor I., Ph.D. in Geography, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Junior Scientific Researcher.

Sokolikhina Natalia N., Ph.D. in Geography, Docent, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Associate Professor.

Gibadullina Anastasia I., Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Technician.

Kislov Alexander V., D.Sc. in Geography, Professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Head of Department.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 11.06.2025

Принята к печати после доработки 21.08.2025

The article was received on 11.06.2025

The article was accepted after revision on 21.08.2025