

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ПЕРИОДА С ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

И.И. Леонов¹, Н.Н. Соколихина², В.И. Ильин³

^{1–3} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

¹ Кафедра метеорологии и климатологии, мл. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: leonov@geogr.msu.ru

² Кафедра метеорологии и климатологии, доц., канд. геогр. наук; e-mail: natalia.sokolikhina@gmail.com

³ Кафедра океанологии, студент; e-mail: vsevolod_ilin@mail.ru

В статье рассматриваются характеристики гололедно-изморозевых отложений на территории Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), полученные по данным основных срочных наблюдений на 109 метеорологических станциях за период с 1966 по 2022 г. Показано, что чаще всего на территории АЗРФ наблюдается кристаллическая изморозь. Наибольшая повторяемость гололеда отмечается на побережьях северных и дальневосточных морей, а мокрого снега – на европейской части АЗРФ. В среднем по АЗРФ наблюдается отрицательный тренд числа дней с явлениями погоды, потенциально приводящими к опасным гололедно-изморозевым отложениям. При этом в атлантической области арктического пояса величина тренда составляет –3,51 дней за 10 лет, в атлантико-арктической области умеренного пояса 0,68 дней за 10 лет. Наибольшая средняя годовая продолжительность периода с образованием гололедно-изморозевых отложений отмечается у мокрого снега (149 суток) и кристаллической изморози (172 суток). Во внутриарктической климатической области средняя продолжительность периода с гололедом достигает 86 дней в год, а максимальная – 248 дней. В период с 1966 по 2022 г. наблюдалась значимая тенденция уменьшения продолжительности периода с образованием гололеда и кристаллической изморози, в некоторых климатических областях более чем на 20 дней за 10 лет. Средняя годовая продолжительность периода с образованием зернистой изморози увеличивалась на всей территории АЗРФ в среднем на 9 дней за 10 лет.

Ключевые слова: опасные явления погоды, атмосферное обледенение, гололед, изморозь, мокрый снег

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.2.7

ВВЕДЕНИЕ

В марте 2022 г. в докладе [Изменение климата..., 2022] была представлена информация о современном и прогнозируемом изменении климата, о его основных природных и социально-экономических последствиях для России. В частности, в этом докладе отмечается, что последствия изменения климата в нашей стране неоднозначны, например, сокращение на 13% минимальной площади льдов в Арктике улучшает условия навигации по Северному морскому пути. В то же время изменения климата приводят и к изменению повторяемости и продолжительности образования опасных явлений погоды в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) [Третий оценочный доклад..., 2022].

К опасным явлениям погоды относятся сильные гололедно-изморозевые отложения, которые ежегодно наблюдаются на территории АЗРФ [Доклад..., 2023]. Влияние изменений климата на повторяемость замерзающих дождей в Европе оценивалось в рамках эксперимента EURO-CORDEX. Согласно исследованию, при реализации сценария RCP8.5 к 2100 г.

частота выпадения замерзающих дождей увеличится в северной части Скандинавского полуострова более чем на 50%. В западной части Кольского полуострова ожидается увеличение ежегодного количества замерзающих дождей на 20–30%. В то же время на востоке Кольского полуострова и на побережьях Баренцева и Белого морей ожидается уменьшение повторяемости замерзающих дождей на 20–50% [Kämäräinen et al., 2018]. В связи с ожидаемыми изменениями становится актуальным изучение характеристик гололедно-изморозевых отложений в условиях современного климата.

На поверхности суши обледенение обусловлено различными атмосферными процессами. Первый процесс связан с выпадением осадков (precipitation icing) в виде замерзающего дождя и замерзающей мороси, а также с выпадением снега при околонулевой температуре воздуха. В результате этого процесса образуется гололед и отложения мокрого снега. Осадки, выпадающие в условиях околонулевой температуры воздуха, сложно измеряются и прогнозируются [Stewart et al., 2015]. Второй процесс –

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 [Шакина и др., 2012].

В настоящее время опубликован ряд работ, посвященных исследованию гололедно-изморозевых отложений на территории России. Для оценки их текущего состояния рассчитаны характеристики (суммарное число случаев, суммарная продолжительность отдельных случаев и средний вес отложений) и их тренды для каждого вида обледенения [Bulygina et al., 2015; Аржанова, Коршунова, 2019, 2023]. Опубликованы региональные исследования, посвященные гололедно-изморозевым отложениям. В этих работах рассмотрены особенности повторяемости гололеда на севере европейской территории России и гололедно-изморозевых отложений всех видов в районе Обской губы [Суркова и др., 2023; Соколихина, Леонов, 2023]. В англоязычной литературе представлены исследования климатологии замерзающих осадков на территории Северной Америки и Северной Евразии [Groisman et al., 2016]. Согласно исследованиям, на северо-востоке США, юго-востоке Канады, над южной и юго-западными частями Восточно-Европейской равнины замерзающие осадки наблюдаются в среднем от 3 до 8 дней в год.

Наиболее подробно климатология выпадения замерзающих осадков изучена для США и Канады. Опубликованы оценки количества часов с замерзающими осадками на территории США за период с 1928 по 2001 г.; получено распределение продолжительности отдельных случаев выпадения замерзающих дождей и оценки метеорологических условий их выпадения [Houston, Changnon, 2006]. Исследованы региональные особенности распространения повторяемости замерзающих осадков на территории США [Bernstein, 2000]. Для территории канадской провинции Квебек были рассчитаны даты самого раннего и самого позднего наблюдения гололеда [Laflamme, Périard, 1998]. Подобное исследование было проведено и для территории США [Changnon, Karl, 2003].

Вопрос, связанный с исследованием продолжительности периода с гололедно-изморозевыми отложениями на территории России, остается недостаточно изученным. Под продолжительностью периода с гололедно-изморозевыми отложениями понимается промежуток времени между датой первого и датой последнего в году наблюдения обледенения определенного вида гололедно-изморозевого отложения.

Целью данной работы было изучение пространственно-временных изменений характеристик го-

лоледно-изморозевых отложений на территории АЗРФ. Для каждой климатической области АЗРФ рассчитывались количественные характеристики: среднее число дней с гололедом, зернистой изморозью, кристаллической изморозью и мокрым снегом. Впервые получено среднее годовое число дней с представляющими особую опасность атмосферными явлениями. Так же впервые определялась средняя годовая и максимальная продолжительность периодов атмосферного обледенения отдельно для каждого вида гололедно-изморозевых отложений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Используемые в работе данные были получены из архива ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» – Федерального государственного бюджетного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных» [meteo.ru].

Использовались данные основных срочных наблюдений и данные наблюдений за атмосферными явлениями. В электронных архивах содержатся данные 521 станции для периода наблюдений с 1966 по 2023 г. Перечень станций составлен на основании списка Росгидромета, включенных в Глобальную сеть наблюдений за климатом. В ходе исследования были отобраны 109 метеорологических станций, расположенных в Арктической зоне Российской Федерации, четыре из которых расположены в сельских поселениях, включенных в Арктическую зону (Тутончаны, Тура, Кислокан, Ессей).

Для изучения преобладающих видов гололедно-изморозевых отложений и продолжительности периода атмосферного обледенения, использовались данные наблюдений за атмосферными явлениями [Булыгина и др., 2015]. В этом архиве одна запись относится к одному случаю наблюдаемого явления и содержит время начала и окончания явления, а также его интенсивности. В настоящей работе подсчитывалось среднее годовое число дней с явлениями атмосферного обледенения – гололеда, кристаллической и зернистой изморози и мокрого снега.

При расчете среднего годового количества дней с явлениями обледенения отбирались уникальные случаи явлений, которым соответствует собственный шифр (12 – гололед, 13 – кристаллическая изморозь, 14 – зернистая изморозь, 72 и 73 – мокрый снег). Для каждой метеорологической станции было получено среднее годовое количество дней с атмосферными явлениями, которые могут приводить к формированию гололедно-изморозевых отложений различных видов. Днем с такими явлениями считались сутки, в течение которых явление наблюдалось хотя бы один раз.

Продолжительность периода с наблюдением различных атмосферных явлений, приводящих к образованию гололедно-изморозевых отложений различных видов, определялась также по данным визуальных наблюдений. Каждому зарегистрированному случаю атмосферного явления присваивался номер дня в году. Для явлений холодного полугодия суммировалась продолжительность периода с наблюдением явления в начале (зимой–весной) и конце года (осенью–зимой). Для явлений, наблюдающихся в теплое время года (например гололеда, образующегося в наиболее холодных климатических областях), продолжительность периода определялась как разница между первым и последним днем в году с образованием отложений конкретного вида. Для явлений, наблюдающихся в переходные сезоны, годовая продолжительность рассчитывалась как сумма продолжительности образования гололедно-изморозевых отложений весной и осенью. Для отложений каждого вида (гололед, кристаллическая изморозь, зернистая изморозь и мокрый снег) рассчитывалась средняя годовая и максимальная продолжительность периода с обледенением.

Для исследования повторяемости атмосферных явлений, потенциально приводящих к опасным гололедно-изморозевым отложениям, использовались данные основных срочных наблюдений [Булыгина и др., 2014]. В прошлых работах была применена методика, позволяющая выделять потенциально опасные явления погоды, приводящие к образованию сильных гололедно-изморозевых отложений [Соколихина, Леонов, 2023]. На основании расчетов, полученных путем обработки инструментальных наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями, были получены температурно-ветровые диапазоны, благоприятные для формирования опасных отложений каждого вида. В данной работе применялась схожая методика фильтрации опасных явлений.

За случаи гололеда принимались сроки, в которые наблюдатель фиксировал замерзающие осадки (коды КН-01 24, 56, 57, 66 и 67). Гололед обладает высокой плотностью и прочностью, поэтому потенциально опасными считались все случаи наблюдения замерзающего дождя и замерзающей мороси.

В коде КН-01 отсутствует разделение изморози на два вида. Поэтому для анализа использовались сроки, соответствующие туману с отложением изморози (коды КН-01 48 и 49). С целью отсеивания слабоинтенсивных отложений кристаллической изморози были отобраны только те случаи изморози, которые наблюдались в диапазоне температуры воздуха от $-10,3$ до $-0,7^{\circ}\text{C}$ и скорости ветра 2 м/с и более. Такая фильтрация данных позволяет убрать из выборки большую часть отложений в виде кристал-

лической изморози, которая образуется при температуре воздуха менее -10°C и в среднем составляет более 90% всех явлений изморози.

Фильтрация выборок производилась и для выявления сроков с мокрым снегом, для которого в коде КН-01 не предусмотрено отдельного кода. Для выявления мокрого снега отбирались сроки, в которые наблюдались умеренные непрерывные, сильные и ливневые осадки твердой и смешанной фазы (коды КН-01 73, 74, 75, 85 и 86), выпадающие при температуре воздуха от 0 до $0,6^{\circ}\text{C}$. Такой диапазон ранее был обоснован авторами работы как наиболее благоприятный для образования опасных отложений мокрого снега [Леонов, Аржанова, 2023].

Для всех полученных в работе характеристик с использованием метода наименьших квадратов рассчитывались значения многолетних линейных трендов для периода с 1966 по 2022 г. Полученные линейные тренды проверялись на достоверность с использованием критерия Манна–Кендалла [Mann, 1945; Kendall, 1975]. Значимыми считались тренды, достоверные на 5% уровне значимости. Данный критерий использовался ранее другими авторами для оценки тенденций характеристик гололедно-изморозевых отложений по данным инструментальных наблюдений на территории России за период с 1984 по 2018 г. [Bulygina et al., 2015; Groisman et al., 2016].

Полученные характеристики осреднялись по территории квазиоднородных климатических областей в соответствии с классификацией Б.П. Алисова: 1) внутриарктической; 2) атлантической; 3) сибирской; 4) тихоокеанской области арктического климатического пояса; 5) атлантической; 6) сибирской; 7) тихоокеанской области субарктического климатического пояса; 8) атлантико-арктической; 9) континентальной западно-сибирской северной; 10) континентальной восточно-сибирской области умеренного климатического пояса.

Результаты исследования и их обсуждение

По данным архива об атмосферных явлениях было получено среднее годовое число дней с гололедно-изморозевыми отложениями различных видов на территории Арктической зоны Российской Федерации. Данные были осреднены по каждой рассматриваемой климатической области. Получены средние по климатическим областям значения многолетних линейных трендов (табл. 1).

Данные, приведенные в табл. 1, изображены на картосхеме (рис. 1). Для каждой метеорологической станции представлена круговая диаграмма, показывающая долю зафиксированных случаев атмосферных явлений, которые становятся причиной образования гололедно-изморозевых отложений каждого вида.

Таблица 1

Число дней с гололедом, кристаллической изморозью, зернистой изморозью, мокрым снегом для периода с 1966 по 2022 г.; по данным визуальных наблюдений

Климатическая область	Гололед		Кристаллическая изморозь		Зернистая изморозь		Мокрый снег	
	Среднее	Тренд, дней за 10 лет	Среднее	Тренд, дней за 10 лет	Среднее	Тренд, дней за 10 лет	Среднее	Тренд, дней за 10 лет
<i>Арктический климатический пояс</i>								
Внутриарктическая (1)	26,0	–5,1	67,8	–17,4	6,4	–	20,4	1,8
Атлантическая (2)	14,0	–2,3	64,6	–11,8	4,6	1,8	21,0	7,0
Сибирская (3)	8,0	–2,5	60,9	–14,0	4,2	2,0	15,4	1,5
Тихоокеанская (4)	10,3	–4,2	29,7	–5,8	8,5	3,6	18,9	3,0
<i>Субарктический климатический пояс</i>								
Атлантическая (5)	5,8	–0,2	29,2	–4,2	3,5	1,3	25,4	2,8
Сибирская (6)	0,6	–0,5	25,0	1,9	0,7	0,5	12,1	–1,5
Тихоокеанская (7)	3,6	–1,0	17,9	5,1	2,5	1,2	20,9	3,5
<i>Умеренный климатический пояс</i>								
Атлантико-арктическая (8)	5,2	–0,2	41,0	–3,3	3,6	3,2	25,9	3,5
Континентальная западно-сибирская северная (9)	1,1	–0,4	12,4	–3,6	0,3	0,5	22,5	0,9
Континентальная восточно-сибирская (10)	0,1	–0,2	9,1	3,3	0,3	1,0	16,1	–0,4

Примечание. Значения трендов указаны за 10 лет. Малозначимые тренды выделены знаком «–».

Кристаллическая изморозь часто наблюдается на всей территории Российской Арктики. Это связано с высокой повторяемостью благоприятных условий для ее образования – сильного радиационного выхолаживания поверхности, в результате которого происходит сублимация водяного пара. Зернистая изморозь – более редкое явление. Для формирования зернистой изморози необходимо существование переохлажденного тумана, капли которого, сталкиваясь с препятствием, будут превращаться в лед. Наибольшая повторяемость зернистой изморози наблюдается на европейской территории Российской Арктики, где зимой воздух часто имеет достаточное влагосодержание для образования переохлажденных туманов с отложением изморози. Отдельно стоит отметить высокую повторяемость зернистой изморози на горных метеорологических станциях, таких как Рай-Из (66°53' с. ш., 65°39' в. д., Ямало-Ненецкий АО). На таких метеостанциях зернистая изморозь часто наблюдается в периоды, когда нижняя граница облачности располагается на высоте горных массивов.

Отложения мокрого снега наиболее часто наблюдаются в климатических областях, подверженных влиянию Атлантического и Тихого океанов, так как

в зимнее время осадки в виде снега часто выпадают при температуре воздуха от –2 до 2°С. Особенность распространения мокрого снега состоит в высокой его повторяемости на Дальнем Востоке. Здесь отложения мокрого снега образуются во время выхода мощных циклонов на побережье Берингова моря. В климатических областях, располагающихся в глубине континента, мокрый снег выпадает реже из-за короткого переходного периода со слабopоложительной температурой воздуха.

Отложения в виде гололеда в первую очередь характерны для европейской территории России. Для данных регионов во время холодного периода года нередко наблюдаются синоптические условия, во время которых циклоны приносят теплые и влажные воздушные массы, которые при взаимодействии с выхолаженной поверхностью создают благоприятные условия для выпадения замерзающих осадков. Во-вторых, гололед часто наблюдается на метеорологических станциях, расположенных на побережьях северных морей России – Баренцева, Карского, моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей. В данном случае гололед образуется преимущественно в переходные сезоны, когда поверхность земли стремительно выхолаживается, но с океана на

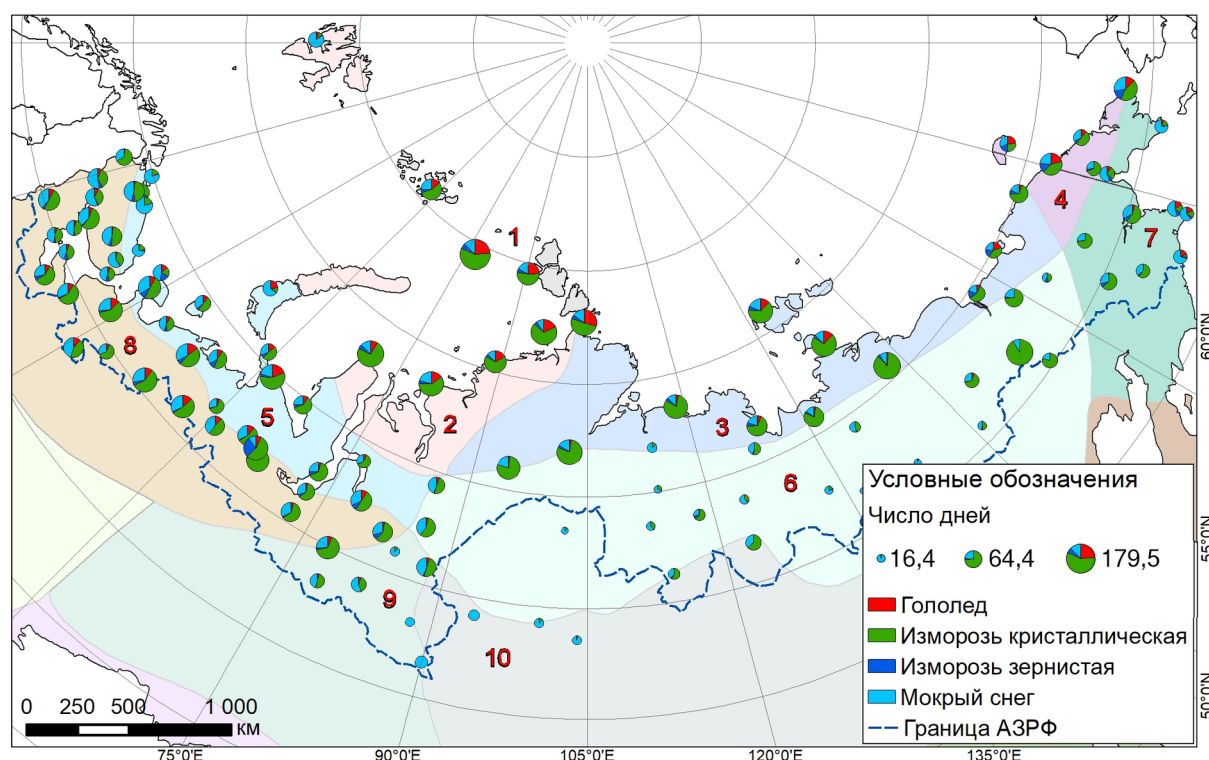


Рис. 1. Доля среднего годового числа дней с явлениями гололеда, зернистой изморози, кристаллической изморози, мокрого снега за период с 1966 по 2022 г.; по данным визуальных наблюдений. Размер кружка пропорционален сумме среднего числа дней всех явлений. Красными цифрами обозначены климатические области согласно классификации Б.П. Алисова

Fig. 1. The proportion of the average annual number of days with the phenomena of glaze ice, soft rime, hard rime and wet snow for the period from 1966 to 2022; according to visual observations. The size of the circles is proportional to the sum of the average number of days of all phenomena. The red numbers indicate the climatic regions according to the classification of B. Alisov

континент все еще поступает относительно теплый и влажный воздух. На территории Западной Сибири процентное соотношение гололеда уменьшается, а на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока гололед является крайне редким явлением (за исключением прибрежных станций).

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 по 2022 г. был показан значимый отрицательный тренд числа случаев с кристаллической изморозью и значимый положительный тренд числа случаев с отложением мокрого снега на территории атлантической Арктики [Аржанова, Коршунова, 2023]. В работе других авторов был получен положительный тренд числа дней с гололедом на территории СЗФО для периода с 1986 по 2022 г. Однако, в данной работе значения трендов осреднялись по всем метеостанциям СЗФО, где наибольший вклад в положительный тренд вносили метеостанции, располагающиеся вне АЗРФ [Суркова и др., 2024].

Используя температурно-ветровые диапазоны, в которых наиболее часто образуются опасные гололедно-изморозевые отложения [Соколихина, Леонов, 2023], было получено среднее годовое количество потенциально опасных атмосферных явлений для территории АЗРФ (табл. 2). Использование данной методики позволяет исключить из рассматриваемых выборок явления, не представляющие опасность, например кристаллическую изморозь, образующуюся при низкой температуре воздуха (менее -10°C), или мокрый снег, выпадающий при скорости ветра более 1 м/с. Такой подход позволяет использовать срочные наблюдения за погодой для оценки наиболее часто встречающихся опасных явлений погоды.

На территории Арктики наблюдаются существенные различия преобладающих опасных явлений в зависимости от принадлежности территории к определенному типу климата (рис. 2). Наиболее часто опасные гололедно-изморозевые отложения наблюдаются на европейской части АЗРФ и на Дальнем Востоке, несколько реже – в Западной Сибири и крайне редко – в Восточной Сибири.

Таблица 2

Число дней с потенциально опасными явлениями: замерзающие осадки, туманы с отложением изморози, мокрый снег – для периода с 1966 по 2022 г.; по данным визуальных наблюдений

Климатическая область	Замерзающие осадки		Туман с отложением изморози		Мокрый снег		Сумма всех явлений	
	Среднее	Тренд, дней за 10 лет	Среднее	Тренд, дней за 10 лет	Среднее	Тренд, дней за 10 лет	Среднее	Тренд, дней за 10 лет
Арктический климатический пояс								
Внутриарктическая (1)	3,2	–1,36	1,9	–0,86	0,3	–0,14	5,4	–2,26
Атлантическая (2)	1,7	–1,89	2,3	–2,29	0,6	–	4,6	–3,51
Сибирская (3)	1,1	–0,44	2,3	–0,80	0,2	0,22	3,5	–1,14
Тихоокеанская (4)	1,9	–1,03	2,8	–0,59	0,4	–0,11	5,1	–1,52
Субарктический климатический пояс								
Атлантическая (5)	1,0	–0,17	1,8	–0,20	0,4	0,02	3,1	–0,35
Сибирская (6)	0,1	–0,12	0,1	–	0,5	0,07	0,7	–0,04
Тихоокеанская (7)	0,7	–0,68	0,8	–0,82	0,7	–0,33	2,1	–1,05
Умеренный климатический пояс								
Атлантико-арктическая (8)	1,4	–0,35	1,2	0,59	1,1	0,29	3,7	0,68
Континентальная западно-сибирская северная (9)	0,1	–	0,0	–	1,4	0,29	1,6	0,29
Континентальная восточно-сибирская (10)	0,0	–0,10	0,1	–	1,3	0,24	1,4	–

Примечание. Значения трендов указаны за 10 лет. Малозначимые тренды выделены знаком «–».

По сравнению с рис. 1, наблюдается значительно большее количество метеостанций, на которых преобладающие виды наблюдаемых атмосферных явлений – замерзающие осадки (гололед), туман с отложением изморози (предполагается зернистая изморозь) и мокрый снег. Так как потенциально опасными случаями гололеда считались все без исключения замерзающие осадки, повторяемость этого типа явлений преобладает на европейской части Арктики. Также замерзающие осадки часто наблюдаются на побережьях северных морей, как уже было отмечено выше.

Предполагается, что фильтрация случаев изморози позволила получить выборку только потенциально опасных случаев образования переохлажденных туманов. Не слишком холодная (до -10°C) и ветреная (ветер более 2 м/с) погода крайне благоприятна для образования зернистой изморози. Ее повторяемость составляет около 1,5 случаев в год за исключением внутриконтинентальных сибирских областей, где явления данного типа практически не наблюдаются.

На территории АЗРФ потенциально опасные явления мокрого снега чаще всего наблюдаются в областях, относящихся к умеренному климати-

ческому поясу. В атлантической и тихоокеанской областях выпадение мокрого снега обычно вызвано прохождением мощных циклонов. Реже всего мокрый снег выпадает в областях арктического климата. Это связано с тем, что были отфильтрованы случаи мокрого снега, выпадающего при скорости ветра более 1 м/с и температуре воздуха от 0 до $0,6^{\circ}\text{C}$. Такие случаи обычно не приводят к образованию сильных отложений мокрого снега, так как он сдувается с поверхностей, на которых происходит обледенение (прежде всего речь идет о проводах, опорах ЛЭП и ветвях деревьев). Именно из-за высокой повторяемости штилей отложения мокрого снега не являются редкостью в континентальной восточно-сибирской области умеренного климата.

Одной из наиболее важных характеристик гололедно-изморозевых отложений, влияющих на хозяйственную деятельность человека в Арктике, является продолжительность периода их наблюдений. Для анализа продолжительности периода с атмосферным обледенением были получены средние периоды для всех отложений по каждой рассматриваемой климатической области (табл. 3).

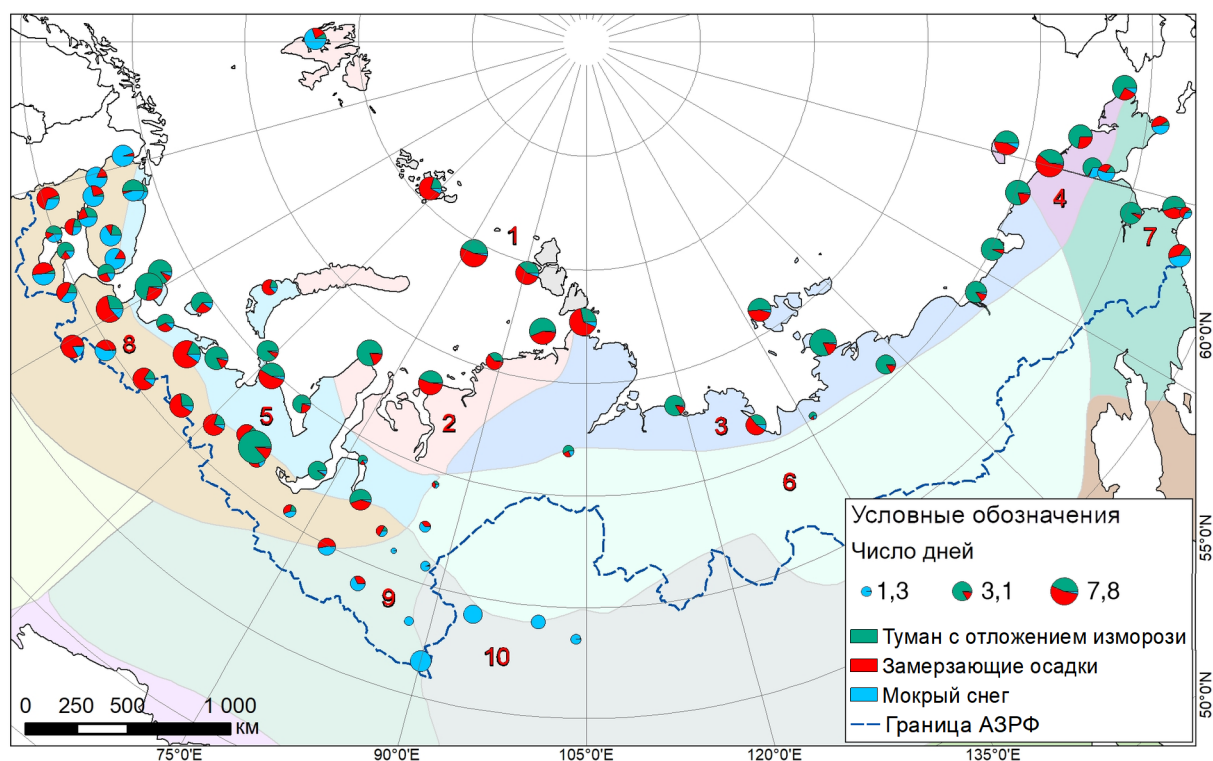


Рис. 2. Доля среднего годового числа дней с потенциально опасными явлениями замерзающих осадков, туманов с отложением изморози и мокрого снега за период с 1966 по 2022 г.; по данным основных срочных наблюдений. Размер кружка пропорционален сумме среднего числа дней всех явлений. Цифрами обозначены климатические области согласно классификации Б.П. Алисова

Fig. 2. The proportion of the average annual number of days with potentially hazardous phenomena of freezing precipitation, fog depositing rime and wet snow for the period from 1966 to 2022; according to the main 3-hour observations. The size of the circles is proportional to the sum of the average number of days of all phenomena. The red numbers indicate the climatic regions according to the classification of B. Alisov

На рис. 3 представлена продолжительность периода, во время которого в АЗРФ наблюдался гололед. Наибольшая средняя продолжительность периода с гололедом наблюдалась на европейской территории АЗРФ. Также наблюдалась высокая продолжительность формирования гололеда на побережьях северных и дальневосточных морей России. С продвижением на восток и вглубь континента отмечается сильное сокращение продолжительности гололедного периода. Максимальная за период с 1966 по 2022 г. продолжительность гололедного периода отмечается на территории климатических областей, подверженных воздействию влажных морских воздушных масс.

Средняя продолжительность периода наблюдения кристаллической изморози существенно превышает среднюю продолжительность гололеда (рис. 4). Можно было бы предположить, что в наиболее континентальных областях, на территории которых в холодный период года господствует сибирский антициклон, должна наблюдаться наибольшая продолжительность кристаллической изморози. Однако с продвижением вглубь континента уменьшается общее содержание водяного пара в воздухе и, как след-

ствие, способность его к сублимации даже при очень низкой температуре воздуха. Поэтому максимальная продолжительность периода с образованием кристаллической изморози в наиболее континентальных областях часто не превышает 60 дней в году.

Формирование зернистой изморози особенно сильно подвержено влиянию орорафии. Это связано с тем, что, в отличие от замерзающих осадков и мокрого снега, выпадающих из вышележащих слоев атмосферы, зернистая изморозь образуется вследствие горизонтального переноса капель переохлажденного тумана. В опубликованных ранее работах было показано усиление интенсивности образования зернистой изморози, вызванной перетеканием воздушных масс через горы, на примере отдельных случаев обледенения, наблюдавшихся в районе горного массива Рай-Из [Леонов, 2022]. В связи с ведущей ролью мезомасштабных процессов закономерности распределения зернистой изморози на территории России выражены слабо (рис. 5). Изморозь данного вида наиболее часто отмечается на горных метеорологических станциях и на побережьях морей, где часто наблюдается высокая скорость ветра.

Таблица 3

Продолжительность периода (дни) с гололедом, кристаллической изморозью, зернистой изморозью, мокрым снегом для периода с 1966 по 2022 г.; по данным визуальных наблюдений

Климатическая область	Гололед			Кристаллическая изморозь			Зернистая изморозь			Мокрый снег		
	Среднее	Тренд, дней за 10 лет	Макс.	Среднее	Тренд, дней за 10 лет	Макс.	Среднее	Тренд, дней за 10 лет	Макс.	Среднее	Тренд, дней за 10 лет	Макс.
<i>Арктический климатический пояс</i>												
Внутриарктическая (1)	86	–13,2	248	172	–22,2	319	32	7,0	201	93	–	230
Атлантическая (2)	63	–8,9	192	163	–16,5	276	28	10,3	157	116	–0,1	218
Сибирская (3)	28	–10,1	127	158	–23,2	259	16	8,8	120	72	6,7	164
Тихоокеанская (4)	60	–22,6	209	133	–24,0	244	51	16,7	165	108	–7,7	230
<i>Субарктический климатический пояс</i>												
Атлантическая (5)	43	–12,4	157	117	–18,0	209	24	10,9	123	147	–10,2	247
Сибирская (6)	2	–4,4	25	60	–0,9	172	2	1,8	35	60	–5,9	151
Тихоокеанская (7)	26	–13,9	130	82	6,0	183	16	9,6	120	134	–1,8	262
<i>Умеренный климатический пояс</i>												
Атлантико-арктическая (8)	34	–6,9	152	133	–13,3	212	16	18,7	104	149	0,6	244
Континентальная западно-сибирская северная (9)	5	–	47	49	–12,8	125	1	2,9	30	109	–2,9	208
Континентальная восточно-сибирская (10)	0	–	11	27	7,7	131	1	3,7	22	71	–7,5	137

Примечание. Значения трендов указаны за 10 лет. Малозначимые тренды выделены знаком «—».

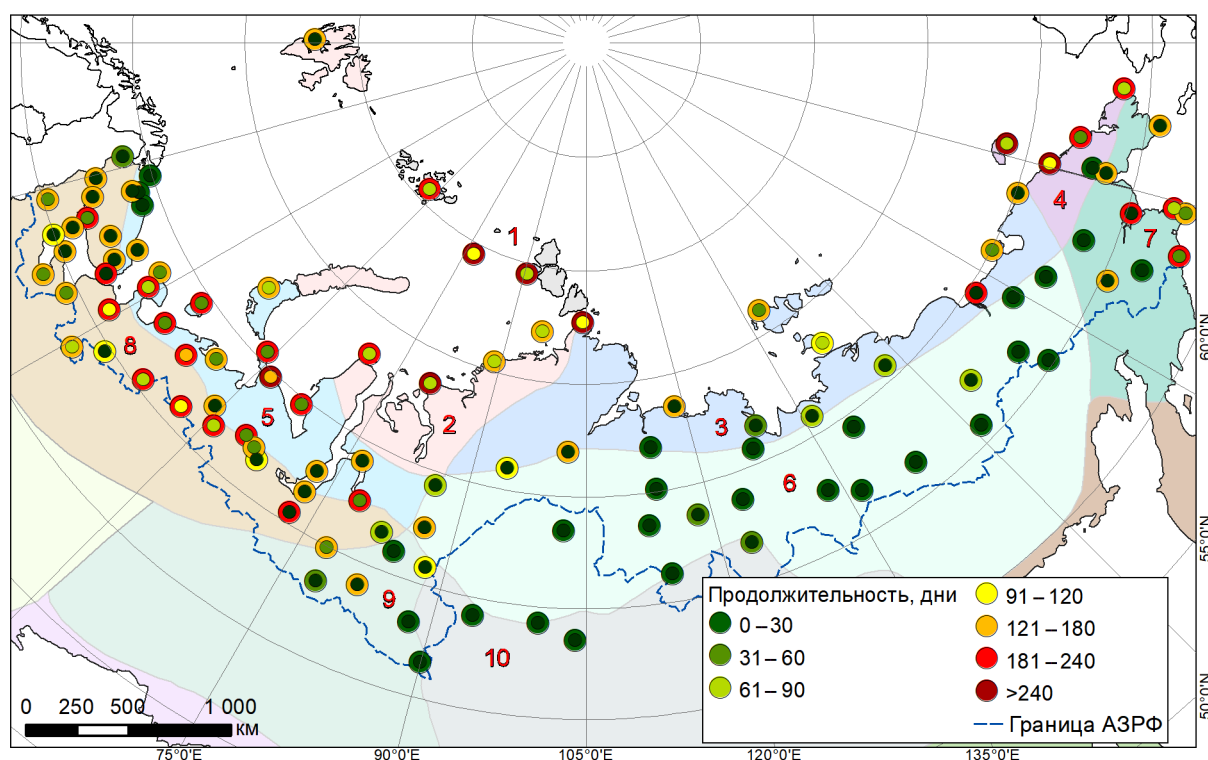


Рис. 3. Средняя годовая (внутренний пунсон) и максимальная (внешний пунсон) продолжительность периода с наблюдением гололеда за период с 1966 по 2022 г.; по данным визуальных наблюдений. Цифрами обозначены климатические области согласно классификации Б.П. Алисова

Fig. 3. The average annual (inner circle) and maximum annual (outer circle) duration of the period with glaze ice observation for the period from 1966 to 2022; according to visual observations. The red numbers indicate the climatic regions according to the classification of B. Alisov

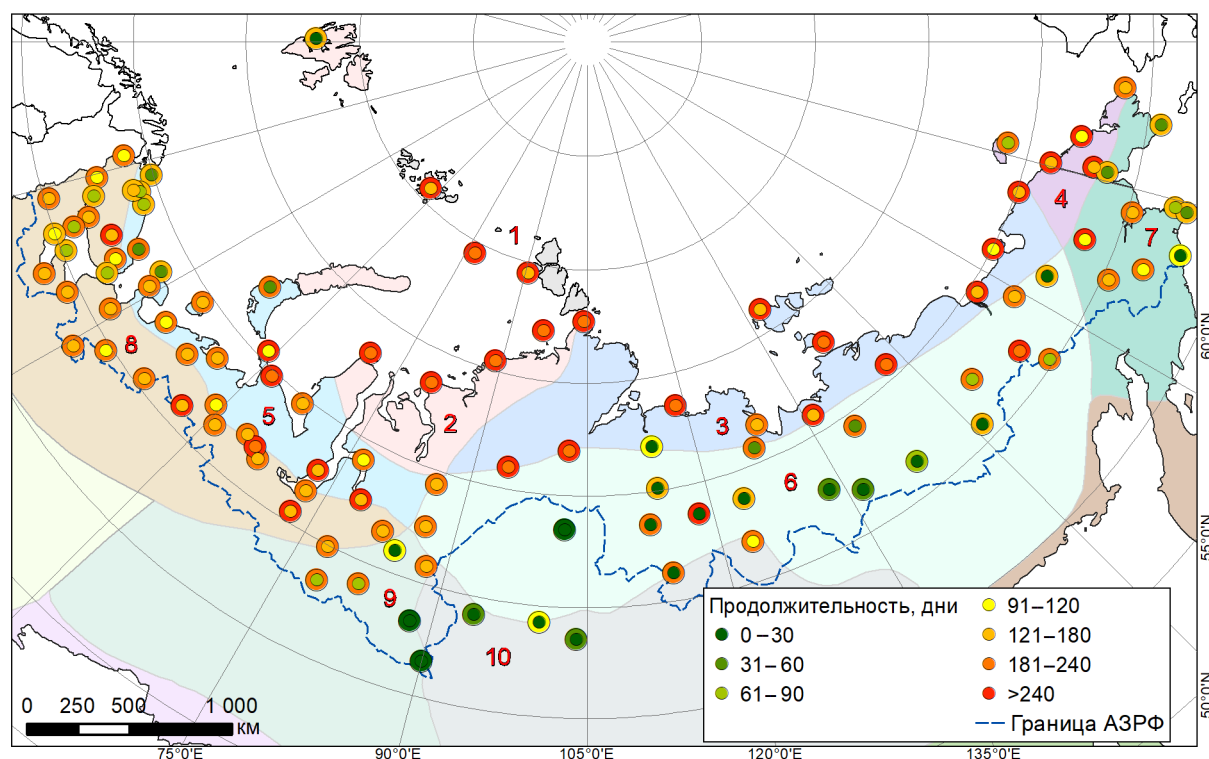


Рис. 4. Средняя годовая (внутренний пунсон) и максимальная (внешний пунсон) продолжительность периода с наблюдением кристаллической изморози за период с 1966 по 2022 г.; по данным визуальных наблюдений. Цифрами обозначены климатические области согласно классификации Б.П. Алисова

Fig. 4. The average annual (inner circle) and maximum annual (outer circle) duration of the period with soft rime observation for the period from 1966 to 2022; according to visual observations. The red numbers indicate the climatic regions according to the classification of B. Alisov

Особенностью зернистой изморози является то, что, в отличие от других отложений, максимальная продолжительность периода ее наблюдений в несколько раз отличается от средней. Это связано с тем, что зернистая изморозь под действием локальных факторов может образовываться при большом спектре синоптических ситуаций, что создает очень продолжительный период ее формирования. Однако такие ситуации формируются не часто, и поэтому дни с образованием зернистой изморози распределены в течении всего холодного периода года.

Перед анализом оценки продолжительности периода с наблюдением мокрого снега стоит дать пояснения к используемой в статье терминологии. Согласно наставлению гидрометеорологическим станциям и постам, мокрый снег – это осадки, выпадающие в виде тающего снега при положительной температуре воздуха. Результаты наблюдений за атмосферными осадками в виде мокрого снега записываются в соответствующие графы книжки КМ-1. Отдельно производятся наблюдения за отложениями мокрого снега на проводах гололедного станка, их результаты записываются в книжку КМ-4 [Наставления..., 1985]. Это значит, что не все атмосферные явления в виде мокрого снега приводят к его налипанию на провода,

ветви деревьев и различные сооружения. Поэтому реальное число дней и продолжительность периода с наблюдением мокрого снега не совсем точно описывают период с отложениями данного вида.

Мокрый снег отличается от прочих атмосферных явлений, связанных с образованием гололедно-изморозевых отложений, тем, что на всей территории Российской Арктики имеет среднюю годовую продолжительность наблюдений более 30 дней (рис. 6). Немного уменьшается продолжительность в холодных областях – сибирских. Наибольшая средняя продолжительность наблюдается в атлантическом секторе Российской Арктики. Максимальная продолжительность мокрого снега является самой большой среди всех рассматриваемых явлений. На многих метеорологических станциях европейской части АЗРФ средняя годовая продолжительность периода с наблюдениями мокрого снега превышает 200 дней. Это значит, что первые осадки в виде мокрого снега наблюдаются в сентябре, а последние в апреле. Столь большая продолжительность на севере европейской территории России связана с высокой повторяемостью дней со средней температурой около 0°C , которая в данном регионе превышает 100 дней в году [Суркова, Лебедева, 2019].

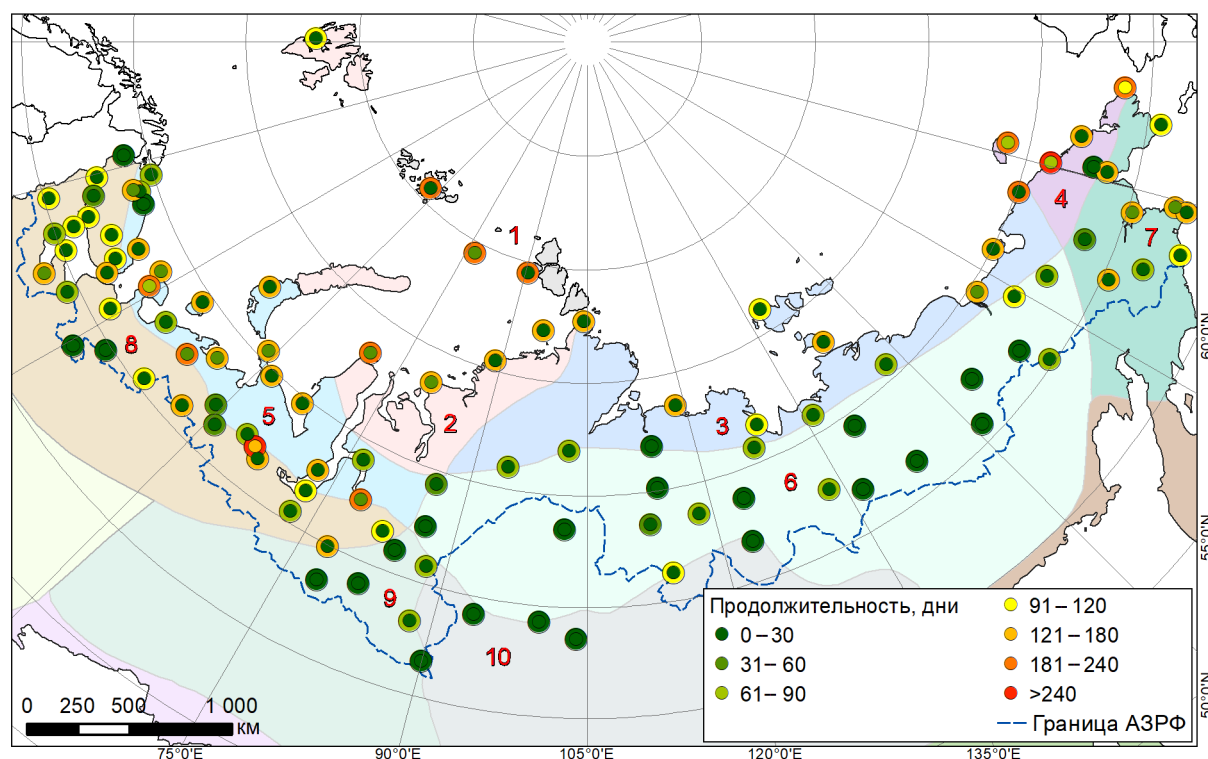


Рис. 5. Средняя годовая (внутренний пунсон) и максимальная (внешний пунсон) продолжительность периода с наблюдением зернистой изморози за период с 1966 по 2022 г.; по данным визуальных наблюдений. Цифрами обозначены климатические области согласно классификации Б.П. Алисова

Fig. 5. The average annual (inner circle) and maximum annual (outer circle) duration of the period with hard rime observation for the period from 1966 to 2022; according to visual observations. The red numbers indicate the climatic regions according to the classification of B. Alisov

Полученные линейные тренды показывают, что гололедно-изморозевые отложения различных видов имеют свои временные особенности (рис. 7). Так, практически на всей территории Арктики уменьшается продолжительность гололедного периода (см. рис. 7А). Это может быть связано с быстрым потеплением арктического региона. Из-за повышения температуры поверхности уменьшается повторяемость благоприятных для формирования на холодной поверхности замерзающих осадков. Ранее выполненные исследования в рамках эксперимента EURO-CORDEX показали, что в XXI в. ожидается слияние весеннего и осеннего максимумов наблюдений замерзающих дождей в один зимний максимум [Kämäräinen et al., 2018]. Такое перераспределение частоты выпадения замерзающих осадков внутри годового хода также указывает на уменьшение продолжительности периода наблюдений гололеда.

Средняя продолжительность периода с образованием кристаллической изморози также уменьшается на большей части территории АЗРФ (см. рис. 7Б). Это также связано с потеплением, приводящим к уменьшению повторяемости метеорологических условий, благоприятных для сублимации водяного пара. Интересно, что положительные тренды наблюдаются на метеорологических станциях, располо-

женных в наиболее холодных областях, где, наоборот, было слишком холодно и сухо для образования изморози, а с потеплением климата и увеличением влагосодержания воздуха увеличивается средняя продолжительность периода с благоприятными условиями для сублимации водяного пара. Локальное увеличение продолжительности периода с образованием кристаллической изморози наблюдается в областях умеренного климата на Дальнем Востоке.

Показано, что на всей территории Арктической зоны Российской Федерации наблюдается положительный тренд продолжительности периода с наблюдением зернистой изморози (см. рис. 7В). Можно сделать предположение, что из-за увеличения температуры и влагосодержания увеличивается повторяемость переохлажденных туманов, во время которых формируется зернистая изморозь. Однако это предположение нуждается в дополнительных исследованиях.

Метеорологических станций, для которых получен значимый тренд продолжительности периода с наблюдениями мокрого снега, немного. Кроме этого, значения трендов, полученные в пределах одних и тех же климатических областей, имеют разные знаки. Таким образом, затруднительно сделать выводы об изменении продолжительности периода с выпадением мокрого снега.

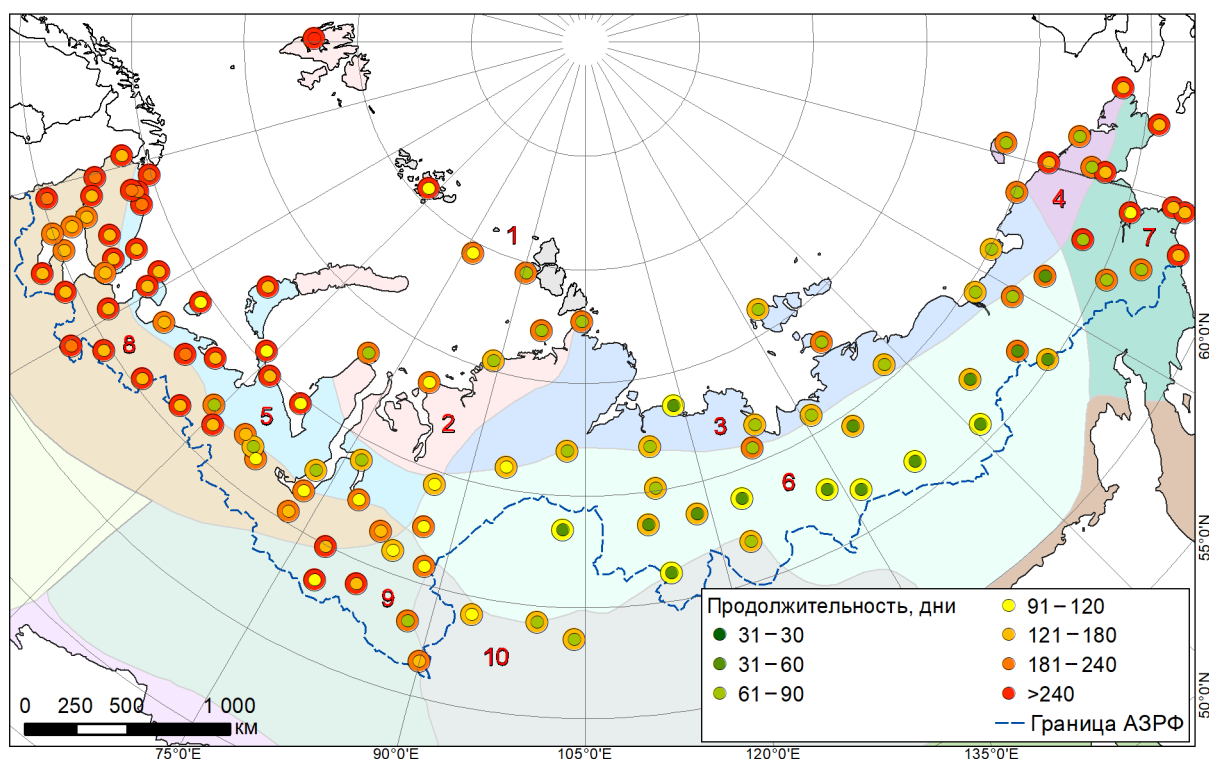


Рис. 6. Средняя годовая (внутренний пунсон) и максимальная (внешний пунсон) продолжительность периода с наблюдением мокрого снега за период с 1966 по 2022 г.; по данным визуальных наблюдений. Цифрами обозначены климатические области согласно классификации Б.П. Алисова

Fig. 6. The average annual (inner circle) and maximum annual (outer circle) duration of the period with wet snow observation for the period from 1966 to 2022; according to visual observations. The red numbers indicate the climatic regions according to the classification of B. Alisov

ВЫВОДЫ

В ходе работы были построены карты преобладающих атмосферных явлений, приводящих к образованию гололедно-изморозевых отложений на территории Арктической зоны Российской Федерации за период с 1966 по 2022 г. Такие же карты были построены для числа дней с атмосферными явлениями, которые могут приводить к формированию опасных гололедно-изморозевых отложений.

Показано, что в среднем на территории АЗРФ преобладают отложения кристаллической изморози, далее по повторяемости числа дней идет мокрый снег, за ним гололед и далее зернистая изморозь. Пространственное распределение среднего годового числа дней по территории Арктики неравномерно. В целом с увлечением континентальности климата уменьшается среднее число дней с атмосферным обледенением, в том числе и с кристаллической изморозью. Отобранные с использованием температурно-ветровых диапазонов потенциально опасные явления погоды имеют еще более сильную зависимость повторяемости от континентальности климата.

Оценка многолетних линейных трендов показала, что на территории АЗРФ наблюдается сокращение числа дней с гололедом на величину от 0,2 до 5,1 дня

за 10 лет. Наиболее заметно сокращается число дней с гололедом в арктическом климатическом поясе – в среднем на 3,5 дня за 10 лет. Также повсеместно сокращается среднее число дней с кристаллической изморозью: в среднем по АЗРФ на 5 дней за 10 лет, а в арктическом поясе на 12,2 дня за 10 лет. Число дней с зернистой изморозью в среднем увеличивается на 1,7 дня за 10 лет. Изменение числа дней с мокрым снегом имеет положительную тенденцию, оно увеличивалось в среднем на 2,2 дня за каждые 10 лет. Отобранные высокоинтенсивные отложения имеют схожие тенденции – наблюдается уменьшение числа дней с замерзающими осадками (–0,68 дня за 10 лет) и туманами с отложением изморози (–0,71 дня за 10 лет). В среднем по территории АЗРФ наблюдается тенденция к снижению числа дней с атмосферными явлениями, которые могут приводить к формированию опасных гололедно-изморозевых отложений приблизительно на 1 день за 10 лет.

Показано, что наибольшая продолжительность атмосферного обледенения характерна для мокрого снега и кристаллической изморози. Зернистая изморозь может наблюдаться в течение всего холодного периода, однако повторяемость числа дней с этим отложением низкая. Продолжительность периода

образования гололеда сильно зависит от типа климата и составляет от 172 дней в году во внутриарктической области арктического климатического пояса до 26 дней в континентальной восточно-сибирской области умеренного климата.

Оценка многолетних линейных трендов показала, что на территории АЗРФ наблюдается уменьшение продолжительности периода с наблюдением гололеда (–11,5 дней за 10 лет) и кристаллической изморози (–11,7 дня за 10 лет). Средняя продолжи-

тельность периода с формированием зернистой изморози увеличивается в среднем по АЗРФ на 9 дней за 10 лет.

Значительные изменения характеристик гололедно-изморозевых отложений на территории АЗРФ делают актуальным проведение дополнительных исследований по данной теме, в том числе исследований будущего климата с использованием прогностических данных моделей климатической системы Земли.

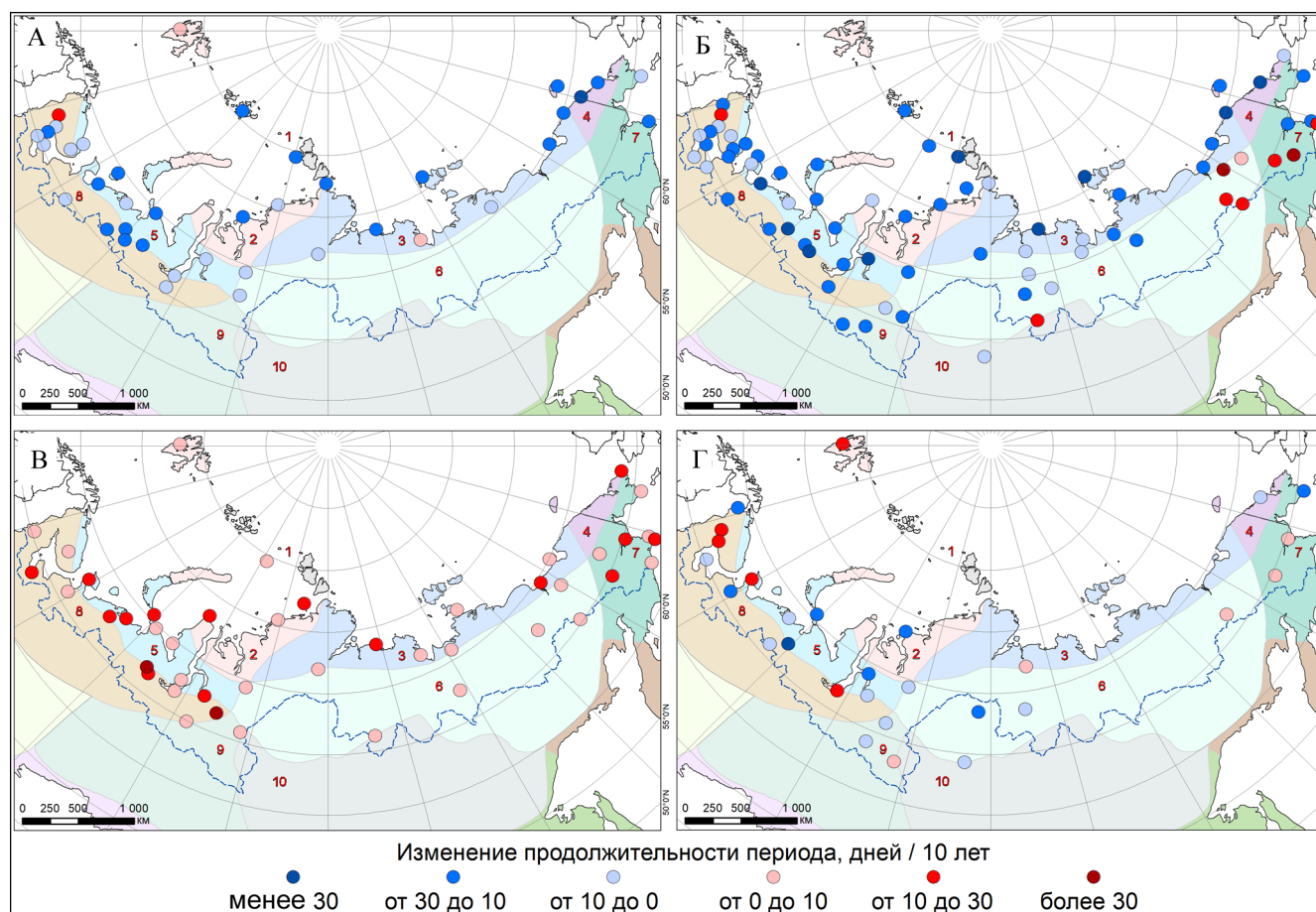


Рис. 7. Многолетние тренды (дней за 10 лет) изменения продолжительности периода наблюдения: А – гололеда; Б – кристаллической изморози; В – зернистой изморози; Г – мокрого снега. Период: с 1966 по 2022 г.; по данным визуальных наблюдений. Показаны только тренды, достоверные для 5% уровня значимости. Цифрами обозначены климатические области согласно классификации Б.П. Алисова

Fig. 7. Long-term trends (days per decade) of changes in the duration of the period with the observation of: А – glaze ice; Б – soft rime; В – hard rime; Г – wet snow for the period from 1966 to 2022; according to visual observations. Only trends that are reliable for 5% of the significance level are shown. The red numbers indicate the climatic regions according to the classification of B. Alisov

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»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аржанова Н.М., Коришанова Н.Н. Характеристики гололедно-изморозевых явлений на территории России в

условиях современных изменений климата // Труды Всероссийского научно-исследовательского институ-

- та гидрометеорологической информации – Мирового центра данных. 2019. № 184. С. 33–44.
- Аржанова Н.М., Коришанова 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.
- Булыгина О.Н., Веселов В.М., Александрова Т.М. и др. Описание массива данных по атмосферным явлениям на метеорологических станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных. 2015. № 2015620081.
- Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н. и др. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных. 2014. № 2014620549.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: Росгидромет, 2023. 104 с.
- Изменение климата в Российской Арктике: риски и новые возможности / О.А. Анисимов и др. М.: Сколково, 2022. 105 с.
- Леонов И.И. Условия формирования опасных отложений зернистой изморози на Полярном Урале // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4(386). С. 20–35. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-4-20-35.
- 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.
- Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Часть 1. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 301 с.
- 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.
- 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.
- 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.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова; Росгидромет. СПб.: Научно-технологические технологии, 2022. 676 с.
- Шакина Н.П., Хоменко И.А., Иванова А.Р. и др. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 348. С. 130–161.
- Bernstein B.C. Regional and Local Influences on Freezing Drizzle, Freezing Rain, and Ice Pellet Events, *Weather Forecasting*, 2000, vol. 15, p. 485–508, DOI: 10.1175/1520-0434(2000)015<0485:RALIOF>2.0.CO;2.
- Bulygina O.N., Arzhanova N.M., Groisman P.Y. Icing conditions over Northern Eurasia in changing climate, *Environmental research letters*, 2015, vol. 10, no. 2, p. 025003, DOI: 10.1088/1748-9326/10/2/025003.
- Changnon S.A., Karl T.R. Temporal and spatial variations of freezing rain in the contiguous United States: 1948–2000, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2003, vol. 42, no. 9, p. 1302–1315, DOI: 10.1175/1520-0450(2003)042<1302:TASVOF>2.0.CO;2.
- 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.
- Houston T.G., Changnon S.A. Freezing rain events: a major weather hazard in the conterminous US, *Nat Hazards*, 2007, vol. 40, p. 485–494, DOI: 10.1007/s11069-006-9006-0.
- Kämäräinen M., Hyvärinen O., Vajda A. et al. Estimates of present-day and future climatologies of freezing rain in Europe based on CORDEX regional climate models, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, vol. 123, p. 13291–13304, DOI: 10.1029/2018JD029131.
- Kendall M. *Rank correlation measures*, Charles Griffin, London, 1975, 202 p.
- Laflamme J.N., Périard G. The climate of freezing rain over the province of Québec in Canada: A preliminary analysis, *Atmospheric research*, 1998, vol. 46, no. 1–2, p. 99–111, DOI: 10.1016/S0169-8095(97)00054-9.
- Mann H. Nonparametric tests against trend, *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1945, p. 245–259, DOI: 10.2307/1907187.
- Stewart R.E., Thériault J.M., Henson W. On the Characteristics of and Processes Producing Winter Precipitation Types near 0°C, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2015, vol. 96, p. 623–639, DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00032.1.
- Электронный ресурс
ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». URL: <https://meteo.ru> (дата обращения 01.03.2024).

Поступила в редакцию 24.06.2024

После доработки 25.11.2024

Принята к публикации 21.01.2025

DURATION OF THE PERIOD WITH ICE ACCRETION IN THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION UNDER THE CHANGING CLIMATE

I.I. Leonov¹, N.N. Sokolikhina², V.I. Ilyin³

¹⁻³ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

¹ *Department of Meteorology and Climatology, Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: leonov@geogr.msu.ru*

² *Department of Meteorology and Climatology, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: natalia.sokolikhina@gmail.com*

³ *Department of Oceanology, student; e-mail: vsevolod_ilin@mail.ru*

The article considers the characteristics of ice accretions in the Arctic zone of the Russian Federation (AZRF), obtained from the main 3-hour observations at 109 meteorological stations for the period from 1966 to 2022. It is shown that soft rime is most often observed in the AZRF. The highest frequency of glaze ice is observed on the coasts of the northern and Far Eastern seas. Wet snow is most often observed in the European part of the AZRF. Generally the AZRF shows a negative trend in the number of days with weather phenomena potentially leading to hazardous ice accretions. The lowest trend is in the Atlantic climate region of the Arctic zone (–3,51 days per 10 years), the highest in the Atlantic-Arctic climate region of the Polar zone (0,68 days per 10 years). The longest average annual duration of the period with ice accretions formation is for wet snow and soft rime (149 and 172 days, respectively). In the Intra-Arctic climate region, the average duration of the period with glaze ice is 86 days per year, and the maximum is 248 days. During 1966 to 2022, there was a significant tendency to shorten the period with the formation of glaze ice and soft rime, in some climatic regions by more than 20 days per 10 years. The average annual duration of the period with the formation of hard rime increased throughout the Arctic zone of the Russian Federation, on average by 9 days per 10 years.

Keywords: hazardous weather phenomena, atmospheric icing, glaze ice, rime, wet snow

Acknowledgements. The research was carried out at the Lomonosov Moscow State University and financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 24-27-00047 «Ice accretion on the territory of Russia under the conditions of modern climate change»).

REFERENCES

- Arzhanova N.M., Korshunova N.N. [Characteristics of glaze-ice and rime phenomena over the Russian territory under current climate change], 2019, *Trudy VNIIGMI-MCD* [VNIIGMI-MCD Proceedings], vol. 184, p. 33–44. (in Russian)
- Arzhanova N.M., Korshunova N.N. Monitoring gololedno-izmorozevykh otlozhenij na territorii Rossii [Monitoring of glaze-ice on the territory of Russia], *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2023, no. 4(390), p. 138–153, DOI: 10.37162/2618-9631-2023-4-138-153. (in Russian)
- Bernstein B.C. Regional and Local Influences on Freezing Drizzle, Freezing Rain, and Ice Pellet Events, *Wea. Forecasting*, 2000, vol. 15, p. 485–508, DOI: 10.1175/1520-0434(2000)015<0485:RALIOF>2.0.CO;2.
- Bulygina O.N., Arzhanova N.M., Groisman P.Y. Icing conditions over Northern Eurasia in changing climate, *Environmental Research Letters*, 2015, vol. 10, no. 2, p. 025003, DOI: 10.1088/1748-9326/10/2/025003.
- Bulygina O.N., Veselov V.M., Aleksandrova T.M., Korshunova N.N. *Opisanie massiva dannyh po atmosferynym yavleniyam na meteorologicheskikh stantsiyah Rossii* [Description of the Dataset of Atmospheric Events at the Russian Weather Stations], The State Registration Certificate, 2015, no. 2015620081. (in Russian)
- Bulygina O.N., Veselov V.M., Razuvaev V.N., Alexandrova T.M. *Opisanie massiva srochnykh dannyh ob osnovnykh meteorologicheskikh parametrah na stantsiyah Rossii* [Description of the Dataset of Observational Data on Major Meteorological Parameters from Russian Weather Stations], Database State Registration Certificate, 2014, no. 2014620549. (in Russian)
- Changnon S.A., Karl T.R. Temporal and spatial variations of freezing rain in the contiguous United States: 1948–2000, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2003, vol. 42, no. 9, p. 1302–1315, DOI: 10.1175/1520-0450(2003)042<1302:TASVOF>2.0.CO;2.
- Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2021 god* [Report on climate change in the territory of the Russian Federation for 2021], Moscow, Roshydromet Publ., 2022, 104 p. (in Russian)
- 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.
- Houston T.G., Changnon S.A. Freezing rain events: a major weather hazard in the conterminous US, *Nat Hazards*, 2007, vol. 40, p. 485–494, DOI: 10.1007/s11069-006-9006-0.
- Izmenenie klimata v Rossijskoj Arktike: riski i novye vozmozhnosti* [Climate change in the Russian Arctic: risks and new opportunities], O.A. Anisimov et al., Moscow, Skolkovo, School of Management Publ., 2022, 105 p. (in Russian)

- Kämäräinen M., Hyvärinen O., Vajda A. et al. Estimates of present-day and future climatologies of freezing rain in Europe based on CORDEX regional climate models, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, vol. 123, 13291–13304, DOI: 10.1029/2018JD029131.
- Kendall M. *Rank correlation measures*, Charles Griffin, London, 1975, 202 p.
- Laflamme J.N., Périard G. The climate of freezing rain over the province of Québec in Canada: A preliminary analysis, *Atmospheric Research*, 1998, vol. 46, no. 1–2, p. 99–111, DOI: 10.1016/S0169-8095(97)00054-9.
- Leonov I.I. Usloviya formirovaniya opasnyh otlozhenij zernistoj izmorozi na Polyarnom Urale [Formation conditions of hazardous hard rime accretion in the Polar Urals], *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2022, no. 4(386), p. 20–35, DOI: 10.37162/2618-9631-2022-4-20-35. (in Russian)
- Leonov I.I., Arzhanova N.M. Meteorologicheskie usloviya obrazovaniya golosedno-izmorozevykh otlozhenij na territorii Rossii [Meteorological conditions for the formation of ice accretions in Russia], *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*, 2023, vol. 9, no. 1, p. 107–126, DOI: 10.21513/2410-8758-2023-1-107-126. (in Russian)
- Mann H. Nonparametric tests against trend, *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1945, 245–259, DOI: 10.2307/1907187.
- Nastavleniya gidrometeorologicheskimi stanciyami i postami, vyp. 3, ch. 1 [Instructions for hydrometeorological stations and posts, iss. 3, pt 1], Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1985, 301 p. (in Russian)
- Shakina N.P., Homenko I.A., Ivanova A.R., Skriptunova E.N. [Freezing Precipitation Formation and Prediction: Literature Review and Some New Findings], *Trudy Gidrometcentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometeorological Centre of Russia], 2012, vol. 348, p. 130–161. (in Russian)
- Sokolikhina N.N., Leonov I.I. Preobladayushchie tipy golosedno-izmorozevykh otlozhenij po nablyudeniyam nastantsiyah Obskoj guby [Dominant types of ice accretions according to observations at Ob' Bay stations], *Arctic and Antarctic Research*, 2023, 69(3):343–355, DOI: 10.30758/0555-2648-2023-69-3-343-355. (in Russian)
- Stewart R.E., Thériault J.M., Henson W. On the Characteristics of and Processes Producing Winter Precipitation Types near 0°C, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2015, vol. 96, p. 623–639, DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00032.1.
- Surkova G.V., Lavrenteva A.I., Tkacheva E.S. Regionalnye osobennosti povtoryaemosti golosedna na severe evropejskoj territorii Rossii na fone menyayuschegosya klimata [Regional features of glaze ice events frequency in the north of the European territory of Russia in the current changing climate], *Arctic and Antarctic Research*, 2024, 70(1):21–32, DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-1-21-32. (in Russian)
- Surkova G.V., Lebedeva A.A. Sovremennyyi rezhim temperatury vozdukh v diapazone okolo 0°C na evropejskoi chasti Rossii [Modern regime of air temperature in the range of about 0°C in the European part of Russia], *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2019, no. 9, p. 95–99. (in Russian)
- Tretij ocenochnyj doklad ob izmenenijah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation], ed. V.M. Kattsova, Roshydromet, St. Petersburg, High-tech Technologies Publ., 2022, 676 p. (in Russian)

Web-sources

All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center (RIHMI-WDC), URL: <https://meteo.ru> (access date 01.03.2024).

Received 24.06.2024

Revised 25.11.2024

Accepted 21.01.2025