

Метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложений на территории России

И.И. Леонов^{1)}, Н.М. Аржанова²⁾*

¹⁾Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские Горы, ГСП-1; info@geogr.msu.ru

²⁾ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных», Россия, 249035, Обнинск, Королева, 6; wacb@meteo.ru

*Адрес для переписки: leonov@geogr.msu.ru

Реферат. Опасные гололедно-изморозевые отложения оказывают существенное негативное влияние на отдельные секторы экономики и хозяйственную деятельность человека. В статье рассмотрены метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложения на территории России, по данным инструментальных наблюдений. Приведены количественные оценки для температуры воздуха и скорости ветра в момент начала обледенения. Также представлены оценки времени нарастания, диаметра и плотности для каждого из видов отложений. Показано, что метеорологические условия образования опасных гололедно-изморозевых отложений отличаются от условий образования отложений небольшого диаметра. Отложения в виде зернистой изморози имеют схожую плотность с отложениями мокрого снега, исходя из этого целесообразно принимать за опасные явления зернистую изморозь, диаметр которой достиг 35 мм.

Ключевые слова. Опасные явления погоды, гололедно-изморозевые отложения, обледенение, зернистая изморозь, кристаллическая изморозь, гололед, мокрый снег.

Meteorological conditions for the formation of ice accretions in Russia

I.I. Leonov^{1)}, N.M. Arzhanova²⁾*

¹⁾Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskiye Gory, 119991, Moscow, Russian Federation; info@geogr.msu.ru

²⁾Russian research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Centre (RIHMI-WDC), 6, Korolyov street, 249035, Obninsk, Russian Federation; wacb@meteo.ru

*Correspondence address: leonov@geogr.msu.ru

Abstract. Hazardous ice accretions have a significant negative impact on many sectors of the economy and human economic activity. Meteorological

conditions for the formation of ice accretions in the territory of Russia according to instrumental observations are considered. Quantitative estimates are given for air temperature and wind speed at the beginning of icing. Also presented are estimates of the growth time, diameter, and density for each of the icing types. It is shown that the meteorological conditions for the formation of hazardous icing accretions differ from those for the formation of small-diameter icing. Hard rime has a similar density to wet snow deposits; thus, it is reasonable to take as dangerous the hard rime, the diameter of which reached 35 mm.

Keywords. Weather hazards, ice accretions, icing, hard rime, soft rime, glaze ice, wet snow.

Введение

Гололедно-изморозевые отложения при достижении определенных размеров относятся к опасным явлениям погоды (РД, 2002). Образование такого рода отложений на различных конструкциях приводит к появлению дополнительных нагрузок, особенно если отложения сопровождаются ветром со значительной скоростью (Глухов, 1971; Захаров, 1984; Заварина, Глухов, 1974; Ломилина, 1974; Луговой и др., 2014). Последствия обледенения могут нанести ощутимый экономический ущерб различным отраслям экономики (энергетика, железнодорожный и автомобильный транспорт, сельское и лесное хозяйства, садоводство и т.д.), в некоторых случаях даже вызвать гибель людей. Воздействию гололедно-изморозевых отложений на отдельные секторы экономики и хозяйственную деятельность человека посвящены многочисленные исследования (Яковлев и др., 2008; Cortinas et al., 2004; Changnoo, 2003). Образованию и сохранению гололедно-изморозевых отложений способствуют атмосферные явления, такие, как переохлажденный туман, замерзающие дождь и морось, мокрый снег и др. В последнее время все чаще стали выпадать замерзающие дожди как в России, так и в других странах (Jones et al., 1998; Stewart et al., 2015).

Условия образования, выпадения замерзающих осадков и способы их прогнозирования подробно описаны в Гидрометцентре России (Шакина и др., 2012). В отдельных работах изучены синоптические условия, приведшие к катастрофическому гололеду на территории Европейской России (Голубев и др., 2013, Семенов и др., 2018). На ЕТР и в Западной Сибири отмечена положительная тенденция повторяемости гололеда, при этом для территории России в целом отмечено сокращение частоты выпадения замерзающей мороси (Groisman et al., 2016). Условия образования зернистой и кристаллической изморози, а также мокрого снега изучены не так хорошо. Анализ современного состояния характеристик рассматриваемых отложений на всей территории России рассмотрен в работах (Аржанова, Коршунова, 2019, 2020, 2021; Bulygina et al., 2015).

В связи с возрастающим интересом к гололедно-изморозевым отложениям, в условиях современных изменений климата, возникает необходимость

изучения этих отложений во всех аспектах с целью предупреждения и уменьшения негативных последствий на различные секторы экономики. В представленной статье рассматриваются метеорологические условия формирования гололедно-изморозевых отложений различных видов и интенсивности на территории России.

Материалы и методика исследования

Данные инструментальных измерений гололедно-изморозевых отложений по 183 станциям на территории России за период с 1985 по 2021 год были предоставлены ВНИИГМИ-МЦД (meteo.ru). Используемые в работе данные инструментальных наблюдений включали в себя информацию о:

- дате начала обледенения и времени начала обледенения;
- виде гололедно-изморозевого отложения;
- продолжительности стадии нарастания и стадии обледенения;
- диаметре, толщине и массе отложения;
- температуре воздуха в момент начала и в стадии максимального развития обледенения;
- скорости ветра в момент начала и в стадии максимального развития обледенения;
- направлении ветра в момент начала и в стадии максимального развития обледенения.

Данные были представлены в закодированном текстовом формате. Для каждой метеорологической станции отобраны выборки указанных выше параметров для общего количества гололедно-изморозевых отложений и для отложений, достигших критериев опасного явления. Также для каждой метеорологической станции были получены средние значения и значения экстремумов для каждого из вышеуказанных параметров каждого вида отложений.

В первую очередь, для анализа условий формирования гололедно-изморозевых отложений использовались параметры, наблюдаемые в момент начала обледенения, т.к. именно они определяли благоприятные условия формирования гололедно-изморозевых отложений различных видов и интенсивности.

Одной из наиболее важных характеристик гололедно-изморозевых отложений, наравне с диаметром и толщиной, является их плотность. На метеорологических станциях данная величина не измеряется. Для отложений гололеда, зернистой изморози и отложений мокрого снега, достигших определенного диаметра (табл. 1), проводятся измерения массы отложения.

Зная диаметр и толщину отложения, а также его массу можно рассчитать и его плотность. Предполагается, что поперечное сечение гололедно-изморозевого отложения можно принять за эллипс, в котором большая полуось определяется как половина суммы диаметра отложения и диаметра провода гололедного станка, а малая полуось как половина суммы толщины отложения и диаметра провода (рис. 1).

Таблица 1. Значение диаметра отложения (за вычетом диаметра провода), при достижении которого нужно измерять размеры отложения на верхних (сменных) проводах и производить измерение массы отложения (Наставление, 1985)

Table 1. The value of the accretion's diameter (minus the wire diameter), upon reaching which it is necessary to measure the dimensions of the accretions on the upper (replaceable) wires and measure the mass of the accretions (Nastavleniye, 1985)

Вид отложения	Диаметр отложения
Гололед и стекловидное отложение мокрого снега	5
Зернистая изморозь и снеговидное отложение мокрого снега	10
Кристаллическая изморозь	15

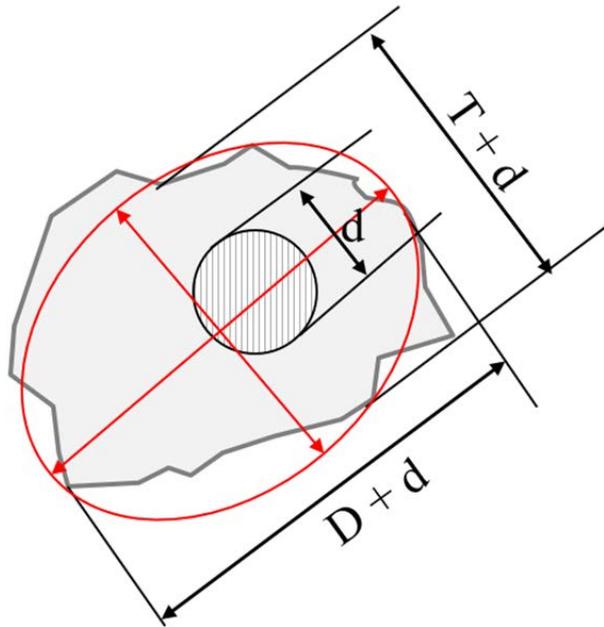


Рисунок 1. Схема гололедно-изморозевого отложения на проводе гололедного станка (Наставление, 1985)

Figure 1. Scheme of ice accretions on the wire of an ice machine (Nastavleniye, 1985)

Плотность гололедно-изморозевых отложений (ρ_i) рассчитывалась по формуле 1.

$$\rho_i = \frac{m}{\frac{\pi}{4} ((T + d)(D + d) - d^2)}, \quad (1)$$

где ρ_i – плотность гололедно-изморозевого отложения, m – масса отложения, T – толщина отложения, D – диаметр отложения, d – диаметр провода гололедного станка.

Результаты

Здесь рассматриваются метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложений различных видов и интенсивности.

Одним из наиболее важных метеорологических параметров, влияющих на условия образования гололедно-изморозевых отложений, является температура воздуха. Для анализа условий формирования использовалась температура воздуха, измеренная на метеорологических станциях в момент начала обледенения. В результате анализа были получены параметры для выборок температуры в момент начала обледенения каждого из видов гололедно-изморозевых отложений (табл. 2). В таблице представлены величина выборки, среднее значение, медиана, стандартное отклонение выборки, а также значения 5, 25, 75 и 95-го перцентиля. В таблице приведена информация для общего количества гололедно-изморозевых отложений каждого вида и для случаев, достигших опасных значений, установленных Росгидрометом.

Таблица 2. Параметры выборок температуры воздуха в момент начала формирования гололедно-изморозевых отложений

Table 2. Parameters of air temperature sampling at the moment of the beginning of the formation of ice accretions

	Гололед		Изморозь (К)		Изморозь (З)		Отложения мокрого снега	
	все случаи	случай ОЯ	все случаи	случай ОЯ	все случаи	случай ОЯ	все случаи	случай ОЯ
кол-во случаев	18421	128	81052	108	12154	121	7590	256
среднее	-2.1	-2.4	-19.1	-14.2	-6.7	-5.4	0.0	0.3
медиана	-1.3	-1.5	-18.0	-13.8	-6.0	-4.9	0.1	0.2
σ	2.3	2.9	8.2	6.6	4.5	3.3	1.1	0.4
$Q_{0.05}$	-6.9	-7.1	-34.9	-28.5	-14.3	-10.3	-1.2	0.0
$Q_{0.25}$	-3.0	-3.1	-24.1	-17.2	-8.5	-7.2	-0.1	0.1
$Q_{0.75}$	-0.5	-0.6	-13.3	-10.5	-3.8	-2.9	0.3	0.3
$Q_{0.95}$	0.0	-0.2	-7.0	-4.2	-1.4	-0.7	1.0	0.6

Расчитанные перцентили использовались для оценки диапазонов температуры воздуха: 25-й и 75-й перцентили использовались для оценки наиболее характерных условий формирования гололедно-изморозевых отложений, 5-й и 95-й перцентили для оценки наиболее вероятных границ рассматриваемых значений.

Данные табл. 2 для наглядности представлены в виде диаграммы размаха (диаграммы «ящик с усами»). Ящики, выделенные цветной заливкой, обозначают 25-й и 75-й перцентили, сплошная линия внутри ящика – медиану, пунктирная – среднее значение выборки. Усами обозначен размах, соответствующий 5-му и 95-му перцентилю, точками отмечены выбросы – наблюдения, выходящие за пределы усов. Аналогичные параметры для явлений, достигших критериев опасных, представлены в виде ящиков серого цвета для каждого из видов отложений (рис. 2).

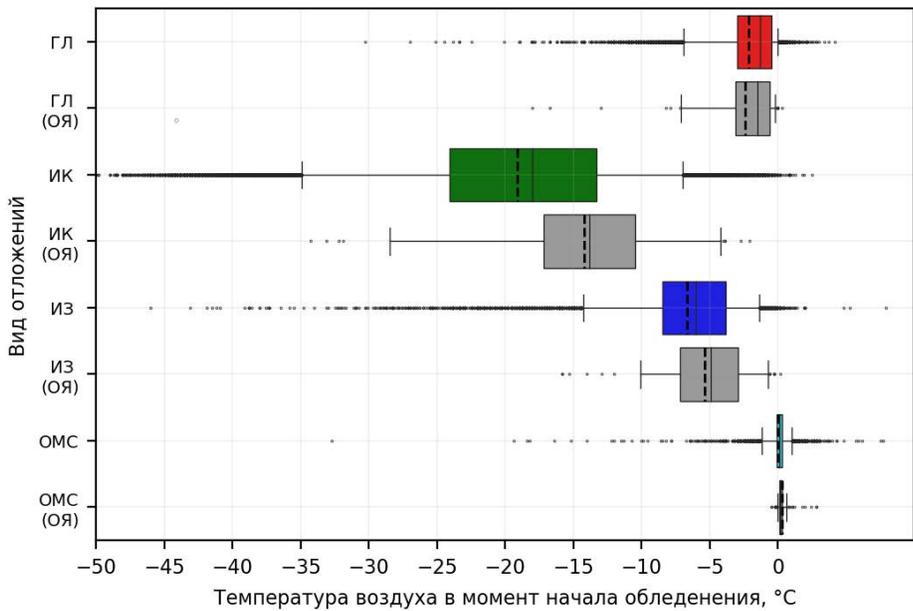


Рисунок 2. Различие наблюдаемой температуры воздуха в момент начала обледенения для каждого из видов гололедно-изморозевых отложений

Figure 2. The difference in the observed air temperature at the time of the beginning of icing for each of the types of ice accretions

Гололед образуется преимущественно при температуре воздуха от -3 до 0.5°C . Для опасных отложений гололеда в среднем характерна немного более низкая температура воздуха. Вероятно, это связано с тем, что сильный гололед часто наблюдается в условиях приземной адвекции холода. На рис. 2 видно, что опасные отложения гололеда практически никогда не формируются при температуре воздуха выше 0°C , т.к. в случае около нулевой и слабоположительной температуры воздуха обледенение происходит не так интенсивно из-за таяния льда.

Согласно литературным источникам, отложения в виде кристаллической изморози не приводят к опасным последствиям, однако условия их формирования в данном разделе рассматриваются для сравнения с условиями формирования зернистой изморози (Шакина, 2012). Температура воздуха в момент начала образования кристаллической изморози располагается в очень широком диапазоне значений от -35 до -7°C , чаще всего в диапазоне от -24 до -13°C . Это связано с тем, что условия формирования кристаллической изморози, главным образом, связаны с сублимацией водяного пара и не зависят от развития редко встречающихся синоптических условий или возникновения редких атмосферных явлений. Наиболее часто кристаллическая изморозь образуется в условиях зимних антициклонов, в которых, особенно в ночное время, наблюдается сильное радиационное выхолаживание, способствующее процессу сублимации водяного пара. Среднее значение температуры воздуха в момент начала образования опасных отложений в виде кристаллической изморози в среднем на 5°C выше, чем температура образования кристалличе-

ской изморози небольшого диаметра. Это связано с тем, что более теплый воздух обычно содержит большее количество водяного пара, необходимого для последующей сублимации.

Отложения зернистой изморози наиболее часто начинают формироваться при температуре воздуха от -8.5 до -3.8°C , практически все случаи попадают в температурный диапазон от -15 до -1°C . Опасные отложения начинают формироваться при более высокой температуре воздуха – от -0.5 до -10°C . Это, как и в случае с кристаллической изморозью, связано с увеличивающимся пропорционально температуре воздуха влагосодержанием воздушных масс. Также при более высокой температуре воздуха капли переохлажденного тумана в среднем имеют больший диаметр, что способствует более интенсивному росту ледяных отложений.

Мокрый снег наблюдается в значительно более узком диапазоне температуры воздуха, чем другие гололедно-изморозевые отложения. Большая часть случаев отложений мокрого снега наблюдалась при температуре воздуха от -1 до 1°C . Опасные отложения мокрого снега вовсе образуются при положительной температуре воздуха – от 0 до 0.6°C . Столь узкий диапазон температур вызван физическими свойствами снега. С одной стороны, температура воздуха не может быть слишком низкой, в таком случае снежинки будут полностью твердыми и не смогут удерживаться на препятствиях. С другой стороны, температура воздуха не может быть слишком высокой, в противном случае отложения будут быстро таять и опадать с предметов, на которых происходит обледенение. Таким образом, благоприятные термические условия образования отложений мокрого снега ограничены двумя очень близкими значениями температуры. В подавляющем большинстве случаев благоприятные условия обледенения в виде мокрого фронта связаны с прохождением атмосферных фронтов и интенсивным выпадением осадков.

Вторым рассматриваемым параметром была скорость ветра в момент начала обледенения. Результаты исследования представлены в табл. 3. Также полученные данные из таблицы были представлены в виде диаграммы размаха (рис. 3).

По данным из табл. 3, можно сделать вывод о том, что гололед образуется при относительно высокой скорости ветра, в среднем 4.2 м/с. Наиболее часто отложения в виде гололеда начинают формироваться при скорости ветра от 2 до 6 м/с. По данным наблюдений, опасные отложения в виде гололеда наиболее часто формировались при более высокой скорости ветра. Это связано с тем, что при увеличении скорости ветра увеличивается количество капель замерзающей мороси и замерзающего дождя, которые сталкиваются с препятствием и образуют ледяное отложение.

Метеорологические условия образования кристаллической изморози отличаются низкой наблюдаемой скоростью ветра в момент начала обледенения – обычно от 0 до 2 м/с и практически никогда при скорости ветра более 4 м/с. Данный вид отложений наиболее часто связан с сублимацией водяного пара, которая происходит в условиях радиационного выхолаживания, часто с образованием тумана. Высокая скорость ветра является неблагоприятным

условием образования таких синоптических и мезометеорологических условий. Из рис. 3 видно, что опасные отложения кристаллической изморози наблюдались при более высокой скорости ветра. Это, вероятно, связано с ошибками в наблюдениях, когда наблюдатель записывал данные о зернистой изморози как о кристаллической.

Таблица 3. Параметры выборок скорости ветра в момент начала формирования гололедно-изморозевых отложений

Table 3. Parameters of wind speed sampling at the moment of the beginning of the formation of ice accretions

	Гололед		Изморозь (К)		Изморозь (З)		Отложения мокрого снега	
	все случаи	случай ОЯ	все случаи	случай ОЯ	все случаи	случай ОЯ	все случаи	случай ОЯ
кол-во случаев	18421	128	81052	108	12154	121	7590	256
среднее	4.2	5.1	1.5	4.0	2.6	5.5	3.2	1.2
медиана	4.0	5.0	1.0	3.0	2.0	5.0	3.0	0.0
σ	2.7	3.1	1.5	3.6	2.5	4.3	2.7	2.6
Q0.05	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Q0.25	2.0	3.0	0.0	2.0	1.0	2.0	1.0	0.0
Q0.75	6.0	6.0	2.0	5.0	4.0	7.0	4.0	1.0
Q0.95	9.0	11.1	4.0	10.3	7.0	14.0	8.0	6.0

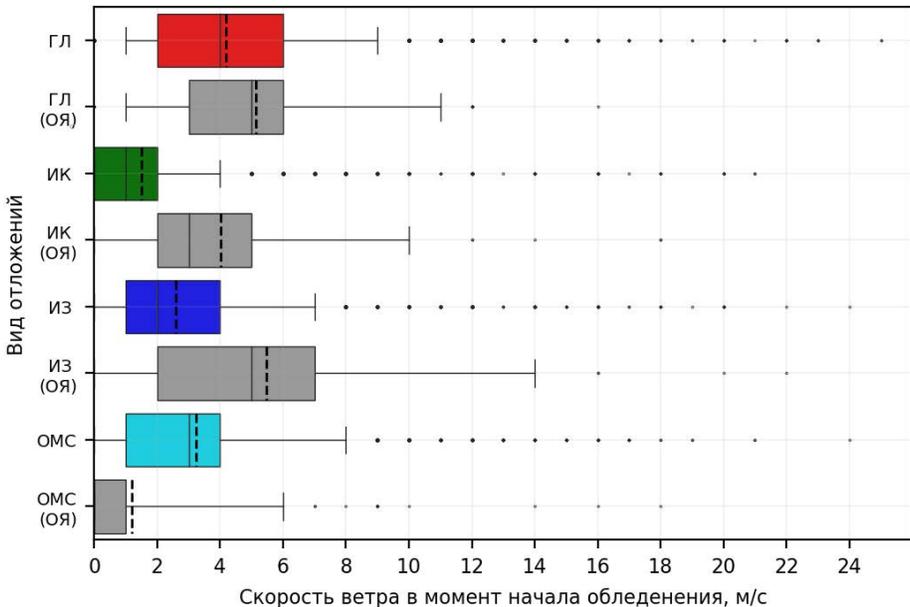


Рисунок 3. Различия наблюдаемой скорости ветра в момент начала обледенения для каждого из видов гололедно-изморозевых отложений

Figure 3. The difference in the observed wind speed at the moment of the beginning of icing for each of the types of ice accretions

Отложения в виде зернистой изморози формируются при столкновении капель переохлажденного тумана с предметами. Наиболее часто зернистая изморозь начинает образовываться при невысокой скорости ветра – от 1 до 4 м/с. Однако в отдельных случаях обледенение может происходить при очень высокой скорости ветра, достигающей 15 м/с и более. Такие условия формирования наиболее характерны для опасных отложений зернистой изморози, наблюдающихся в сложных орографических условиях, когда обледенение происходит вследствие усиления ветра при перетекании возвышенностей и при одновременном туманообразовании. Также высокая скорость ветра при зернистой изморози может наблюдаться в моменты, когда нижняя граница облаков располагается ниже уровня станции.

Отложения мокрого снега чаще всего начинают образовываться при скорости ветра от 1 до 4 м/с. Однако данный вид гололедно-изморозевых отложений имеет важную особенность – в отличие от других видов отложений опасные отложения мокрого снега наблюдаются при низкой скорости ветра или при штиле. Это связано с физическими свойствами снега – снежинки имеют большой размер и высокую парусность, они легко сдуваются сильным ветром с предметов, на которых происходит обледенение. Поэтому для образования опасных отложений в виде мокрого снега необходимо, чтобы ветер на протяжении всей фазы нарастания был не слишком сильный – в большинстве случаев не более 2 м/с.

На рис. 4 представлены дифференциальные функции распределения температуры воздуха и скорости ветра в момент начала обледенения и диаграммы рассеяния для гололеда, мокрого снега, кристаллической и зернистой изморози. Цветом закрашены функции распределения для общего количества гололедно-изморозевых отложений, а серым цветом только для отложений, достигших критериев опасного явления. Каждая точка диаграммы рассеяния представляет собой одно наблюдение в координатах температура-скорость ветра, цветные точки соответствуют общему количеству наблюдений, черные – наблюденным опасным явлениям.

Представленные диаграммы суммируют описанную выше информацию об условиях формирования гололедно-изморозевых отложений и позволяют рассмотреть отличия метеорологических условий формирования гололедно-изморозевых отложений невысокой интенсивности и отложений, достигших опасных значений для каждого вида.

Важной характеристикой, наблюдаемой на метеорологических станциях, является продолжительность фазы нарастания обледенения. Продолжительность нарастания льда напрямую влияет на размеры и массу гололедно-изморозевых отложений. Кроме этого, продолжительность фазы нарастания обледенения имеет особенное прикладное значение. Так, например, при продолжающемся обледенении проводов линий электропередачи затруднена ликвидация последствий, возникающих из-за обледенения.

Данные о продолжительности фазы нарастания гололедно-изморозевых отложений для каждого из видов приведены в табл. 4. Для наглядности данные о продолжительности представлены в виде диаграмм размаха (рис. 5).

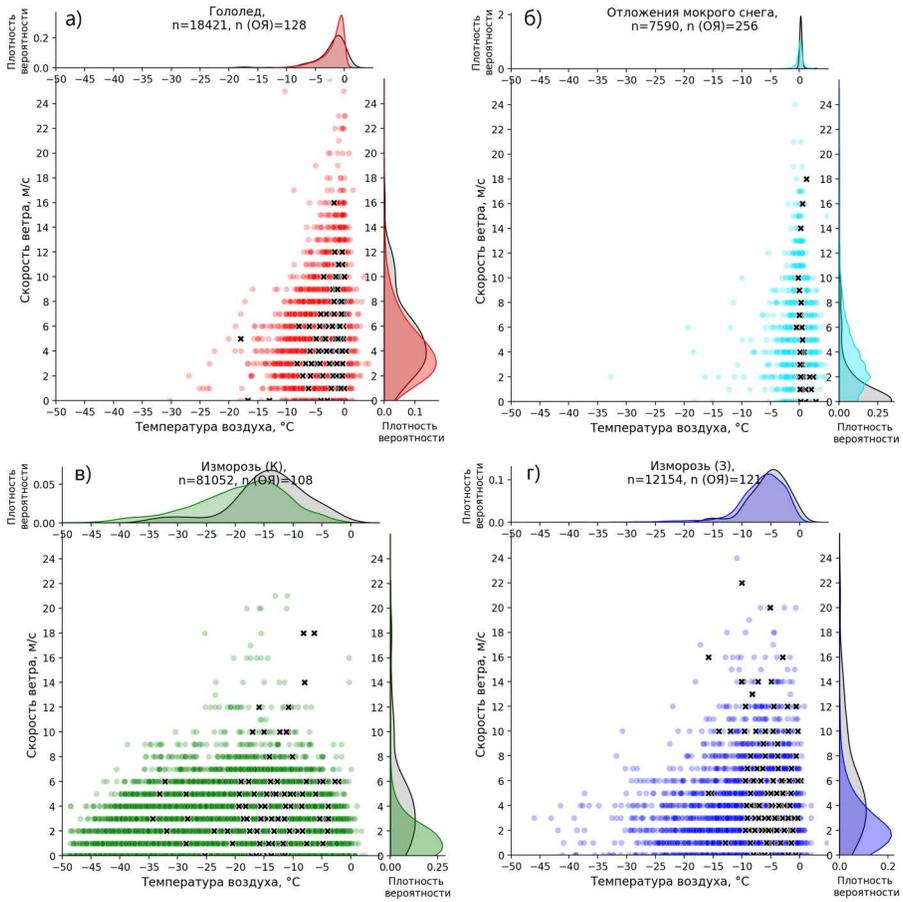


Рисунок 4. Дифференциальные функции распределения температуры воздуха и скорости ветра в момент начала обледенения и диаграммы рассеяния для а) гололеда, б) мокрого снега, в) кристаллической изморози и г) зернистой изморози

Figure 4. Differential distribution functions of air temperature and wind speed at the moment of icing beginning and scatter diagrams for glaze ice (top left), wet snow (top right), soft rime (bottom left) and hard rime (bottom right)

Продолжительность фазы нарастания гололеда обычно составляет от 1 до 5 часов, в среднем 4.5 часа. В некоторых отдельных случаях продолжительность нарастания может превышать сутки и достигать продолжительности более 48 часов, такие условия обычно связаны с опасными отложениями гололеда.

Наращение отложений изморози обоих видов в среднем имеет более высокую продолжительность – 8.8 и 6.9 часов для кристаллической и зернистой изморози соответственно. Большая средняя продолжительность фазы нарастания связана с иными условиями формирования отложений. Так, например, кристаллическая изморозь образуется во время сильного радиационного выхолаживания поверхности земли, которое может продолжаться несколько суток. Как следствие этого, отложения кристаллической изморози в

отдельных случаях нарастали в течение 5 и более суток. Наблюденные случаи зернистой изморози, достигающие критериев опасного явления, также имеют существенно большую продолжительность фазы нарастания, чем случаи образования изморози небольшого диаметра.

Таблица 4. Параметры выборок продолжительности фазы нарастания гололедно-изморозевых отложений

Table 4. Parameters of growth duration sampling of ice accretions

	Гололед		Изморозь (К)		Изморозь (З)		Отложения мокрого снега	
	все случаи	случай ОЯ	все случаи	случай ОЯ	все случаи	случай ОЯ	все случаи	случай ОЯ
кол-во случаев	18421	128	81052	108	12154	121	7590	256
среднее	4.5	22.2	8.8	47.4	6.9	26.8	3.3	6.5
медиана	3.0	16.0	6.0	36.0	5.0	22.0	2.0	5.0
σ	6.0	16.5	14.3	44.6	7.6	15.9	3.4	6.1
$Q_{0.05}$	0.0	6.0	2.0	13.0	1.0	11.0	1.0	1.0
$Q_{0.25}$	1.0	11.0	3.0	21.0	3.0	17.0	1.0	3.0
$Q_{0.75}$	5.0	28.0	9.0	55.0	9.0	34.0	4.0	8.0
$Q_{0.95}$	14.0	56.5	24.0	127.5	19.0	58.0	9.0	15.4

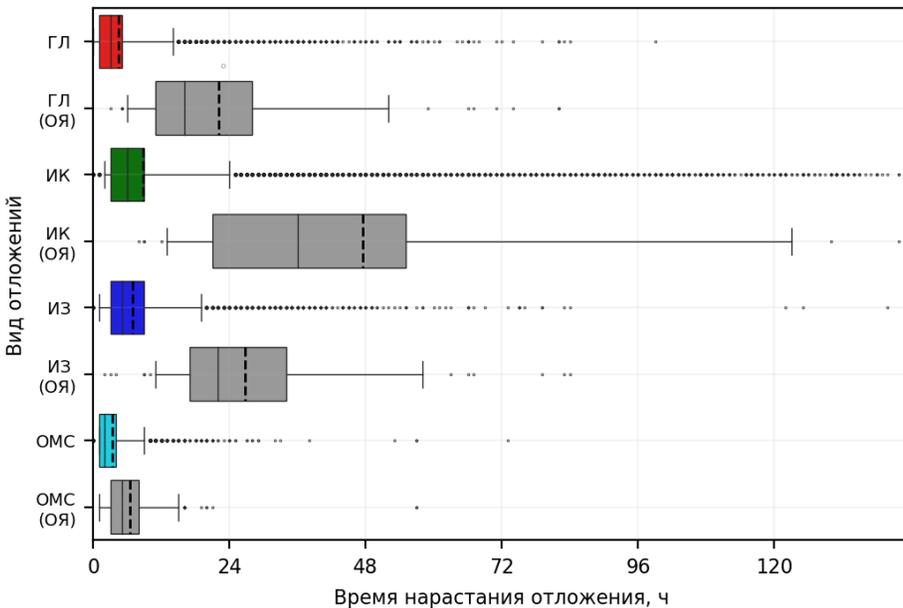


Рисунок 5. Различия времени нарастания для каждого из видов гололедно-изморозевых отложений

Figure 5. Growth time difference for each type of ice accretions

Отложения мокрого снега имеют наименьшую продолжительность фазы нарастания отложений. Главным образом, это связано с условиями формиро-

вания отложений в виде мокрого снега. Отложения мокрого снега преимущественно связаны с выпадением интенсивных осадков в виде мокрого снега, которые наиболее часто вызваны прохождением атмосферных фронтов в мощных южных циклонах. Выше было показано, что температурные условия формирования лежат в очень узком диапазоне (от -1.2 до 1°C). Таким образом, период формирования отложений данного вида зависит от совокупности благоприятных условий и обычно не превышает 4 часов.

Следующий рассмотренный параметр – диаметр гололедно-изморозевых отложений. Этот параметр важен поскольку именно величина диаметра отвечает за присвоение гололедно-изморозевым отложениям статуса опасного явления. Результаты анализа диаметра отложений представлены в табл. 5.

Таблица 5. Параметры выборок диаметра гололедно-изморозевых отложений

Table 5. Parameters of diameter sampling of ice accretions

	Гололед		Изморозь (К)		Изморозь (З)		Отложения мокрого снега	
	все случаи	случаи ОЯ	все случаи	случаи ОЯ	все случаи	случаи ОЯ	все случаи	случаи ОЯ
кол-во случаев	18421	128	81052	108	12154	121	7590	256
среднее	2.4	33.2	4.6	72.7	6.4	78.0	7.6	55.5
медиана	1.0	28.0	3.0	63.0	3.0	64.0	4.0	48.5
σ	3.7	16.5	6.2	28.6	11.0	47.2	11.5	20.3
$Q_{0.05}$	0.0	20.0	0.0	50.0	1.0	50.0	1.0	35.0
$Q_{0.25}$	1.0	23.8	1.0	56.0	2.0	54.0	2.0	39.0
$Q_{0.75}$	3.0	37.0	6.0	75.0	7.0	81.0	8.0	65.0
$Q_{0.95}$	7.0	60.0	15.0	129.5	22.0	161.0	28.0	96.2

Полученные данные были представлены в виде диаграммы размаха (рис. 6). По данным диаграммы, отложения в виде гололеда имеют заметно более низкие значения диаметра отложений. 90% наблюдаемых случаев гололеда имеет диаметр отложений от 1 до 7 мм, а наиболее часто встречающиеся случаи не превышают 3 мм. В первую очередь это связано с тем, что гололед образуется вследствие выпадения замерзающих осадков, по этой причине гололед имеет более высокую плотность и, как следствие, меньший объем и диаметр. Опасные отложения гололеда могут достигать значения более 60 мм. Такие отложения наблюдаются крайне редко на метеорологических станциях, однако регулярно наблюдаются на воздушных линиях электропередачи при ликвидации аварий, произошедших из-за образования гололеда.

Зернистая и кристаллическая изморозь в среднем имеют больший диаметр, чем гололед, из-за меньшей плотности отложений. Медианное значение для обоих видов изморози составляет 3 мм, однако среднее значение существенно отличается и равно 4.6 и 6.4 мм для кристаллической и зернистой изморози соответственно. Данное различие обусловлено высокими значениями наблюдаемых диаметров опасных отложений зернистой изморози. Значение 95-го перцентиля для опасных отложений зернистой изморози составляет

161 мм. Такие отложения, как правило, наблюдаются на метеорологических станциях, имеющих особенные микроклиматические условия, способствующие образованию высокоинтенсивных отложений изморози. К таким метеорологическим станциям относятся Ра-Из и Шаджатмаз.

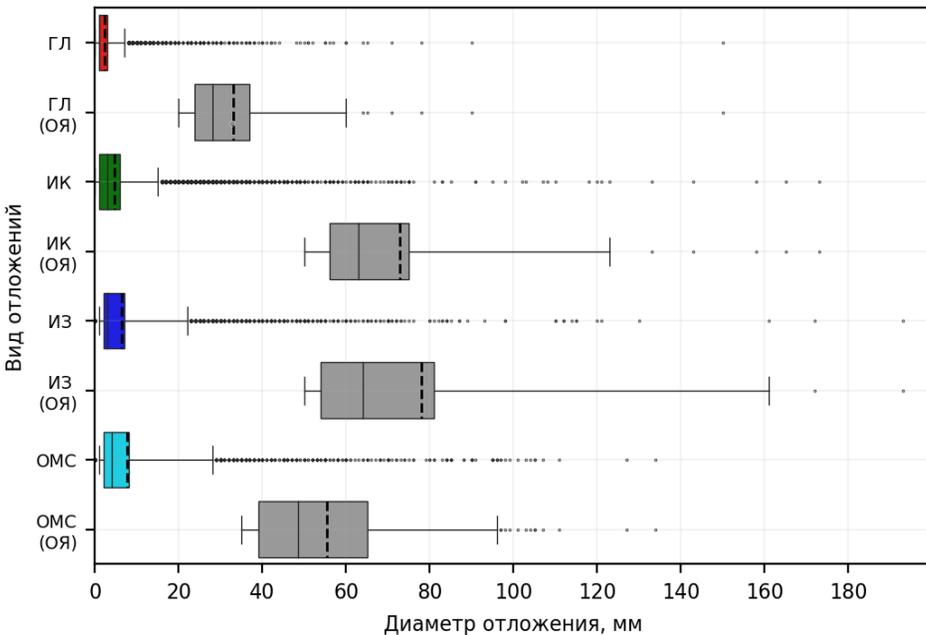


Рисунок 6. Различие диаметра обледенения для каждого из видов гололедно-изморозевых отложений

Figure 6. The difference in the diameter of icing for each type of ice accretions

Метеорологическая станция Рай-Из располагается на территории горного хребта Рай-Из, относящегося к Полярному Уралу. Наблюдения проводятся на высоте 890 м над уровнем моря. Метеорологическая станция Шаджатмаз располагается на высоте 2070 м над уровнем моря, на территории Скалистого хребта Большого Кавказа. Из-за горного расположения на данных метеорологических станциях часто наблюдается обтекание облаками горных хребтов, которое становится причиной особенно интенсивного внутриоблачного обледенения.

Отложения мокрого снега в среднем имеют больший диаметр, чем у гололеда и у всех видов изморози. Этот факт является следствием того, что интенсивность обледенения вследствие выпадения атмосферных осадков выше, чем у внутриоблачного обледенения, а также мокрый снег имеет меньшую плотность, чем жидкие замерзающие осадки. Опасные отложения мокрого снега, напротив, имеют в среднем меньший диаметр чем отложения зернистой изморози, т.к. их образование в первую очередь определяется синоптическими условиями и столь сильно зависит от микроклиматических условий местности и местных мезомасштабных циркуляций.

В типовом перечне опасных и неблагоприятных явлений погоды в качестве критерия опасности принят диаметр отложения, хотя фактически на опасность гололедно-изморозевых отложений влияет их масса. Таким образом, одним из наиболее важных физических свойств гололедно-изморозевых отложений является их плотность. В данном разделе представлены результаты оценки плотности гололедно-изморозевых отложений различных видов.

Параметры выборок для каждого из видов представлены в табл. 6. Стоит отметить, что плотность была рассчитана не для всех отложений, а только для тех, где были проведены измерения массы отложения, поэтому размер выборки для общего количества явлений на порядок ниже, чем при анализе метеорологических условий, рассмотренных выше.

Таблица 6. Параметры выборок рассчитанной плотности гололедно-изморозевых отложений

Table 6. Parameters of density sampling of ice accretions

	Гололед		Изморозь (К)		Изморозь (З)		Отложения мокрого снега	
	все случаи	случаи ОЯ	все случаи	случаи ОЯ	все случаи	случаи ОЯ	все случаи	случаи ОЯ
кол-во случаев	1386	124	4219	107	1577	119	1447	251
среднее	492	287	54	59	179	206	241	157
медиана	479	247	41	31	144	178	159	108
σ	282	246	50	63	147	126	236	200
Q _{0.05}	78	29	15	13	30	62	44	40
Q _{0.25}	275	77	26	20	79	118	92	71
Q _{0.75}	656	397	64	71	236	267	301	182
Q _{0.95}	975	759	139	206	452	461	680	410

Наибольшую плотность имеют отложения в виде гололеда. Среднее значение плотности – 492 кг/м³, медианное – 479 кг/м³. Наиболее часто, плотность гололеда составляет от 275 до 656 кг/м³ (рис. 7). Полученные значения достаточно сильно отличаются от литературных данных, где плотность гололеда часто принимается равной 900 кг/м³ (Fikke et al., 2006). В первую очередь это связано с тем, что за плотность гололеда часто принимается плотность чистого льда. В атмосфере чистый лед образуется довольно редко, обычно ледяные отложения содержат воздушную прослойку. Во-вторых, стоит учитывать погрешность в расчетах плотности, из-за неточностей в измерении диаметра, толщины и массы отложения, а также в несовершенстве метода расчета плотности по величине диаметра и толщины отложения.

Часть отложений в виде гололеда имеет плотность менее 200 кг/м³. Такие значения могут быть связаны как с погрешностями в расчетах, так и с особенностями отдельных разновидностей гололеда. Отложения, имеющие плотность более 900 кг/м³, можно считать выбросами.

Отложения кристаллической изморози имеют очень низкую плотность, очень редко превышающую 150 кг/м³, и наиболее часто располагающуюся в диапазоне от 26 до 64 кг/м³. Зернистая изморозь имеет существенно более

высокую плотность, в среднем в три раза более высокую, чем у кристаллической, в отдельных случаях достигающую 450 кг/м^3 . Полученные значения плотности зернистой изморози также несколько ниже, чем обычно, указывается в литературных источниках.

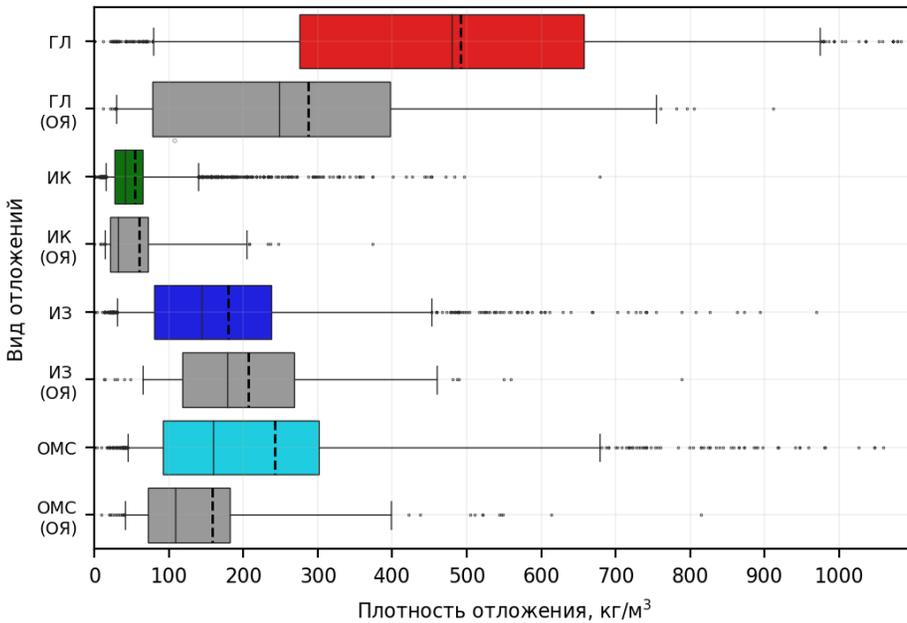


Рисунок 7. Плотность гололедно-изморозевых отложений различных видов

Figure 7. Density of ice accretions of various types

Отложения в виде мокрого снега чаще всего имеют плотность от 92 до 300 кг/м^3 , немного выше плотности отложений зернистой изморози. В отдельных случаях плотность отложений мокрого снега достигает 700 кг/м^3 .

Различия плотности опасных гололедно-изморозевых отложений скорее всего связаны с типом их образования. Для отложений, образующихся вследствие выпадения замерзающих осадков и осадков в виде мокрого снега, характерна меньшая плотность опасных отложений. Для внутриоблачного обледенения плотность опасных отложений выше, чем плотность отложений небольшого диаметра.

Отложения в виде зернистой изморози имеют схожую плотность с отложениями мокрого снега. Таким образом, более целесообразно считать опасными отложения зернистой изморози, достигающие диаметра 35 мм, как и отложений в виде мокрого снега. В настоящий момент и для кристаллической, и для зернистой изморози критерием опасного явления является достижение диаметра 50 мм.

Заключение

В ходе работы было установлено, что метеорологические условия формирования высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений различ-

ных видов отличаются от условий образования гололедно-изморозевых отложений невысокой интенсивности.

Опасные отложения в виде изморози и мокрого снега начинали формироваться при более высокой температуре воздуха, чем отложения небольшого диаметра. Средняя температура образования опасных отложений в виде кристаллической изморози, зернистой изморози и отложений в виде мокрого снега была выше на 4.9, 1.3 и на 0.3°C соответственно. Опасные отложения гололеда, напротив, в среднем образуются при температуре воздуха на 0.3°C ниже, чем слабый гололед.

Опасные отложения гололеда и изморози чаще наблюдаются при более высокой скорости ветра, чем отложения небольшого диаметра. Причем опасные отложения зернистой изморози нередко наблюдаются при скорости ветра до 14 м/с, а отложения гололеда при скорости до 9 м/с. Для высокоинтенсивных отложений мокрого снега, наоборот, характерна низкая скорость ветра, около 1 м/с, или штиль.

Также было показано, что продолжительность фазы нарастания напрямую влияет на диаметр отложений, особенно для зернистой и кристаллической изморози. Продолжительность формирования зернистой изморози большого диаметра в отдельных случаях достигает нескольких суток, когда наиболее часто кристаллическая изморозь формируется на протяжении 3-9 часов. Для опасной зернистой изморози и гололеда также характерна в 4-5 раз более продолжительная фаза нарастания.

В ходе анализа данных инструментальных наблюдений были выявлены различия плотности гололедно-изморозевых отложений разных видов и интенсивности. Было показано, что плотность гололеда часто имеет меньшие значения, чем значения, приведенные в литературных источниках. Средняя плотность отложений гололеда, по данным расчетов, составляет около 500 кг/м³, что существенно отличается от плотности чистого льда.

Также было показано, что плотность отложений зернистой изморози близка к плотности отложений мокрого снега и в среднем составляет 179 кг/м³, что приблизительно в 3 раза превышает среднюю плотность кристаллической изморози. Таким образом, при выделении опасных явлений целесообразно использовать в качестве критерия опасного отложения зернистой изморози значение диаметра большего или равного 35 мм, а не 50 мм.

Список литературы

Аржанова, Н.М., Коршунова, Н.Н. (2019) Характеристики гололедно-изморозевых явлений на территории России в условиях современных изменений климата, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 184, с. 33-44.

Аржанова, Н.М., Коршунова, Н.Н. (2020) Мониторинг характеристик гололедно-изморозевых отложений на территории России в холодный сезон 2017-18 гг., *Труды ГГО*, вып. 597, с. 94-103.

Аржанова, Н.М., Коршунова, Н.Н. (2021) Оценка многолетних измене-

ний характеристик гололёдно-изморозевых отложений на территории России, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 188, с. 18-29.

Глухов, В.Г. (1971) К оценке гололедных нагрузок на высотные сооружения по данным аэрологических наблюдений, *Труды ГГО*, вып. 283, с. 3-11.

Голубев, А.Д., Кабак, А.М., Никольская, Н.А. (2013) Ледяной дождь в Москве, Московской области и прилегающих областях центра Европейской территории России 25-26 декабря 2010 года, *Труды Гидрометцентра России*, вып. 348, с. 214-230.

Захаров, А.Г. Распределение гололедных нагрузок на территории СССР (1984), *Труды ГГО*, вып. 485, с. 87-93.

Заварина, М.В., Глухов, В.Г. (1974) О приведении данных гололедного станка к рабочим уровням линий электропередачи, *Труды ГГО*, вып. 33, с. 68-71.

Ломилина, Л.Е. (1974) Учет влияния рельефа местности при районировании территории по гололедным нагрузкам, *Труды ГГО*, вып. 333, с. 57-60.

Луговой, В.А., Тимашова, Л.В., Черешнюк, С.В. (2014) Учет климатических нагрузок на воздушные линии электропередачи, *Энергия единой сети*, № 3, с. 30-40.

Наставления гидрометеорологическим станциям и постам (1985) вып. 3, часть 1, Л., Гидрометиздат, 301 с.

РД 52.04.563-2002. *Инструкция «Критерии опасных метеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения».*

Семенов, Е.К., Соколихина, Н.Н., Соколихина, Е.В., Леонов, И.И. (2018) Атмосферная циркуляция над центром Европейской России в период ледяного дождя в декабре 2010 года, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 91-101.

Шакина, Н.П., Хоменко, И.А., Иванова, А.Р., Скриптунова, Е.Н. (2012) Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты, *Труды Гидрометцентра России*, вып. 348, с. 130-161.

Яковлев, Л.В., Коган, Ф.Л., Каверина, Р.С. (2008) Повышение надежности ВЛ в условиях гололедообразования и ветровых нагрузок, *Энергетик*, № 4, с. 14-16.

Bulygina, O.N., Arzhanova, N.M., Groisman P.Ya. (2015) Icing conditions over Northern Eurasia in changing climate, *Environ. Res. Lett.* 10, 025003 doi:10.1088/1748-9326/10/2/ 025003.

Changnoon, S.A. (2003) Characteristics of Ice Storms in the United States, *J. Appl. Meteor.*, vol. 42, no. 5, pp. 630-639.

Cortinas, J.V., Bernstein, B.C., Robbins, C.C. Strapp, J.W. (2004) An Analysis of Freezing Rain, Freezing Drizzle, and Ice Pellets across the United States and Canada: 1976-90, *Weather and Forecasting*, vol. 19, no. 2, pp. 377-390.

Fikke, S. et al. (2006) Cost 727 atmospheric icing on structures, Measurements and data collection on icing. State of the Art, *Publication of MeteoSwiss*, vol. 75, no. 110, pp. 1381-1422.

Groisman, P.Ya., Bulygina, O.N., Yin, X. et al. (2016) Recent changes in the frequency of freezing precipitation in North America and Northern Eurasia, *Environmental Research Letters*, vol. 11, no. 4, pp. 045007.

Jones, K.F., Mulherin, N.D. (1998) *An Evaluation of the Severity of the January 1998 Ice Storm in Northern New England*. Report for FEMA Region 1, Hanover, New Hampshire, 73 p.

Stewart, R.E., Theriault, J.M., Henson, W. (2015) On the Characteristics of and Processes Producing Winter Precipitation Types near 0°C, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 96, no. 4, pp. 623-629.

References

Arzhanova, N.M., Korshunova, N.N. (2019) Harakteristiki gololedno-izmorozevykh yavlenij na territorii Rossii v usloviyah sovremennykh izmenenij klimata [Characteristics of glaze-ice and rime phenomena over the Russian territory under current climate change], *Trudy VNIIGMI-MCD*, vol. 184, pp. 33-44.

Arzhanova, N.M., Korshunova, N.N. (2020) Monitoring harakteristik gololedno-izmorozevykh otlozhenij na territorii Rossii v holodnyj sezon 2017-18 gg. [Monitoring of glaze and rime coating characteristics over the Russian territory in the cold season of 2017/18], *Trudy GGO*, vol. 597, pp. 94-103.

Arzhanova, N.M., Korshunova, N.N. (2021) Ocenka mnogoletnih izmenenij harakteristik gololyodno-izmorozevykh otlozhenij na territorii Rossii [Estimating long term changes of glaze-ice and rime deposition characteristics over the Russian territory], *Trudy VNIIGMI-MCD*, vol. 188, pp. 18-29.

Gluhov, V.G. (1971) K ocenke gololednykh nagruzok na vysotnye sooruzheniya po dannym aerologicheskikh nablyudenij. [On the assessment of ice loads on high-rise structures according to aerological observations], *Trudy GGO*, vol. 283, pp. 3-11.

Golubev, A.D., Kabak, A.M., Nikol'skaya, N.A. (2013) Ledyanoj dozhd' v Moskve, Moskovskij oblasti i prilegayushchih oblastyah centra Evropejskoj territorii Rossii 25-26 dekabrya 2010 goda. [Freezing rain in Moscow, Moscow region and adjacent areas of the center of the European territory of Russia on December 25-26, 2010], *Trudy Hidrometcentra Rossii*, vol. 348, pp. 214-230.

Zaharov, A.G. (1984) Raspredelenie gololednykh nagruzok na territorii SSSR. [Distribution of ice loads on the territory of the USSR], *Trudy GGO*, vol. 485, pp. 87-93.

Zavarina, M.V., Gluhov, V.G. (1974) O privedenii dannyh gololednogo stanka k rabochim urovnyam linij elektroperedachi. [On bringing the data of the icing machine to the working levels of power lines], *Trudy GGO*, vol. 333, pp. 68-71.

Lomilina, L.E. (1974) Uchet vliyaniya rel'efa mestnosti pri rajonirovanii territorii po gololednym nagruzkam. [Taking into account the influence of the terrain when zoning the territory according to ice loads], *Trudy GGO*, vol. 333. pp. 57-60.

Lugovoj, V.A., Timashova, L.V., Chereshnyuk, S.V. (2014) Uchet klimaticheskikh nagruzok na vozdushnye linii elektroperedachi. [Climatic loads consideration on Overhead Line], *Energiya edinoj seti*, no. 3, pp. 30-40.

Nastavleniya gidrometeorologicheskim stancyam i postam. (1985) Vypusk 3. Chast' 1 [Instructions for hydrometeorological stations and posts. Issue 3. Part 1], Gidrometizdat, Leningrad, Russia, 301 p.

RD 52.04.563-2002. Instrukciya «Kriterii opasnyh meteorologicheskikh yavlenij i poryadok podachi shtormovogo soobshcheniya» [Guidance document 52.04.563-2002. Instruction «Criteria for dangerous meteorological phenomena and the procedure for submitting a storm message»].

Semenov. E.K., Sokolihina. N.N., Sokolihina. E.V., Leonov. I.I. (2018) Atmosfernaya cirkulyaciya nad centrom Evropejskoj Rossii v period ledyanogo dozhdy v dekabre 2010 goda [Atmospheric circulation over the center of European Russia during the freezing rain in December 2010], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 91-102.

Shakina, N.P., Homenko, I.A., Ivanova, A.R., Skriptunova, E.N. (2012) Obrazovanie i prognozirovaniye zamerzayushchih osadkov: obzor literatury i nekotorye novye rezul'taty. [Freezing Precipitation Formation and Prediction: Literature Review and Some New Findings], *Trudy Gidrometcentra Rossii*, vol. 348, pp. 130-161.

Yakovlev, L.V., Kogan, F.L., Kaverina, R.S. (2008) Povyshenie nadezhnosti VL v usloviyah golledoobrazovaniya i vetrovykh nagruzok [Improving the reliability of overhead lines in conditions of icing and wind loads], *Energetik*, no. 4. pp.14-16.

Bulygina, O.N., Arzhanova, N.M., Groisman P.Ya. (2015) Icing conditions over Northern Eurasia in changing climate, *Environ. Res. Lett.* 10, 025003 doi:10.1088/1748-9326/10/2/ 025003.

Changnoon, S.A. (2003) Characteristics of Ice Storms in the United States, *J. Appl. Meteor.*, vol. 42, no. 5, pp. 630-639.

Cortinas, J.V., Bernstein, B.C., Robbins, C.C. Strapp, J.W. (2004) An Analysis of Freezing Rain, Freezing Drizzle, and Ice Pellets across the United States and Canada: 1976-90, *Weather and Forecasting*, vol. 19, no. 2, pp. 377-390.

Fikke, S. et al. (2006) Cost 727 atmospheric icing on structures, Measurements and data collection on icing. State of the Art, *Publication of MeteoSwiss*, vol. 75, no. 110, pp. 1381-1422.

Groisman, P.Ya., Bulygina, O.N., Yin, X. et al. (2016) Recent changes in the

frequency of freezing precipitation in North America and Northern Eurasia, *Environmental Research Letters*, vol. 11, no. 4, pp. 045007.

Jones, K.F., Mulherin, N.D. (1998) *An Evaluation of the Severity of the January 1998 Ice Storm in Northern New England*. Report for FEMA Region 1, Hanover, New Hampshire, 73 p.

Stewart, R.E., Theriault, J.M., Henson, W. (2015) On the Characteristics of and Processes Producing Winter Precipitation Types near 0°C, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 96, no. 4, pp. 623-629.

Статья поступила в редакцию (Received): 30.01.2023.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 10.02.2023.

Принята к публикации (Accepted): 24.02.2023.

Для цитирования /For citation:

Леонов, И.И., Аржанова, Н.М. (2023) Метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложений на территории России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 1, с. 107-126, doi:10.21513/2410-8758-2023-1-107-126.

Leonov, I.I., Arzhanova, N.M. (2023) Meteorological conditions for the formation of ice accretions in Russia, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 1, pp. 107-126, doi: 10.21513/2410-8758-2023-1-107-126.