

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-4-109-127>

УДК 551.578.9

## **Замерзающие осадки на Европейской территории России в 1979-2022 гг. и их воспроизведение реанализом ERA5**

***И.И. Леонов, Н.Н. Соколикхина, А.И. Лаврентьева***

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

Проведена оценка качества воспроизведения замерзающих осадков реанализом ERA5 на Европейской территории России. Для анализа использованы данные основных срочных наблюдений за погодными явлениями и данные атмосферного реанализа ERA5 с шагом  $0,25^\circ$  по пространству и 1 час по времени. Построены карты среднего числа дней с замерзающими осадками в виде мороси, дождя и их совокупности для периода с 1979 по 2022 год и аналогичные карты среднего числа дней с замерзающим дождем с использованием данных о типе осадков из реанализа ERA5. Показано, что реанализ ERA5 успешно воспроизводит отдельные случаи выпадения высокоинтенсивных замерзающих осадков, формирующихся при стратификации по типу «теплого носа». При сопоставлении данных реанализа о количестве смоделированных случаев замерзающего дождя с данными наблюдений на 214 метеорологических станциях коэффициент детерминации  $R^2$  составил 0,291 для замерзающего дождя и 0,14 для замерзающей мороси. Низкие значения коэффициентов детерминации связаны с тем, что в реанализе ERA5 образование осадков в виде замерзающего дождя возможно только при наличии слоя таяния, из-за чего преобладающее количество случаев замерзающих осадков, выпадающих в полностью холодной атмосфере, не воспроизводится реанализом. Данные реанализа ERA5 о типе осадков наиболее полезны для анализа условий выпадения высокоинтенсивных замерзающих дождей, формирующихся при «классическом механизме».

*Ключевые слова:* опасные явления погоды, гололедно-изморозевые отложения, обледенение, замерзающие осадки, замерзающий дождь, ледяной дождь, гололед, реанализ, ERA5

## **Freezing precipitation in European Russia in 1979-2022 and its reproduction by the ERA5 reanalysis**

***I.I. Leonov, N.N. Sokolikhina, A.I. Lavrenteva***

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
leonov@geogr.msu.ru*

The quality of reproduction of freezing precipitation by the ERA5 reanalysis in European Russia is assessed. The analysis was performed using the data of the main 3-hour observations of weather phenomena and the ERA5 atmospheric reanalysis data with a step of  $0.25^\circ$  in space and 1 hour in time. The maps of the average number of days with freezing precipitation in the form of drizzle, rain, and their combination were drawn for the period from 1979 to 2022. Similar maps of the average number of days with freezing rain were

obtained from the ERA5 data on the precipitation type. It is shown that the ERA5 successfully reproduces individual cases of high-intensity freezing precipitation formed under the stratification of the “warm nose” type. When comparing the reanalysis data on the number of simulated cases of freezing rain with observational data from 214 meteorological stations, the coefficient of determination  $R^2$  was 0.291 for freezing rain and 0.14 for freezing drizzle. The low values of the coefficients of determination are related to the fact that the formation of freezing rain in the ERA5 is possible only in the presence of a melting layer, due to which the predominant number of cases of freezing precipitation occurring in a completely cold atmosphere is not reproduced by the reanalysis. The ERA5 data on the precipitation type are most useful for analyzing the conditions of high-intensity freezing rain formed according to the “classic mechanism”.

*Keywords:* severe weather events, ice accretion, icing, freezing precipitation, freezing rain, ice pellets, glaze ice, reanalysis, ERA5

## Введение

В настоящее время особенно важными остаются исследования, связанные с изучением климатологии опасных метеорологических явлений на территории России. В перечень опасных метеорологических явлений входят сильные гололедно-изморозевые отложения, включающие в себя отложения гололеда диаметром не менее 20 мм [8].

Гололед является причиной серьезных негативных воздействий на множество отраслей экономики, а также может представлять угрозу для жизни и здоровья людей. Так, например, замерзающий дождь, прошедший в 2010 году в Московском регионе, стал причиной длительного нарушения электроснабжения населения, обледенения автодорог, изменения режима работы железнодорожного транспорта и серьезных сбоев в режиме работы аэропортов [2, 3]. Гололед ежегодно наблюдается на территории России [5, 11], особенно часто на ее европейской части [19]. Высокая повторяемость явлений гололеда в совокупности с большой плотностью населения, автомобильных и железных дорог, линий электропередачи и аэропортов, приводит к большой подверженности территории ЕТР климатическим рискам, связанным с гололедом.

Основой для изучения климатических характеристик гололедно-изморозевых отложений являются данные метеорологических наблюдений. Помимо данных наблюдений, в настоящее время особенно важную роль играют данные атмосферных реанализов. Эти данные используются для изучения климата различных территорий, наблюдаемых тенденций, а также в качестве исходных данных для мезомасштабного моделирования. Преимуществом реанализов является то, что, в отличие от данных наблюдений, данные реанализа расположены на регулярной сетке с большим количеством вертикальных уровней. Современные реанализы имеют высокое пространственное разрешение и хорошо воспроизводят основные метеорологические поля – давление, температуру и скорость ветра. Воспроизведение осадков является более сложной задачей. Еще более сложной задачей

является воспроизведение осадков сложного фазового состава, например замерзающего дождя и мороси.

Ранее были осуществлены попытки воспроизведения климатологии замерзающих осадков по данным реанализа прошлого поколения ERA-Interim для территории Европы [21]. Использование данных реанализа ERA-Interim позволило получить реалистичную картину пространственно-осредненной межгодовой изменчивости замерзающих осадков, однако на уровне отдельных метеорологических станций для межгодовой изменчивости были получены низкие значения коэффициента корреляции (в среднем 0,38).

В рамках представленной статьи рассматриваются результаты оценки качества воспроизведения замерзающих осадков на Европейской территории России современным реанализом ERA5, в котором впервые было реализовано разделение осадков на различные фазовые состояния. Исследования приводятся для современного периода с 1979 по 2022 год.

### Материалы и методика исследования

В качестве области исследования была выбрана Европейская территория России. Этот выбор был обусловлен тем, что на данной территории замерзающие осадки наблюдаются чаще, чем в других регионах России, а также тем, что территория ЕТР относительно плотно покрыта сетью наземных метеорологических станций.

В начале работы для территории с 40 до 85° с. ш. и с 15 по 70° в. д. были получены данные реанализа ERA5 с шагом сетки по пространству 0,25° и временным разрешением 1 час [20]. Рассматривались данные для стандартного периода с 1979 по 2022 г. Выбранный временной период был обусловлен тем, что при расчете реанализа для ранних лет использовался меньший набор данных наблюдений, в том числе данных с метеорологических спутников.

Основным рассматриваемым параметром реанализа ERA5 был тип осадков (precipitation type). В реанализе ERA5 представлены шесть типов осадков: дождь (rain), снег с дождем (mixed rain and snow), мокрый снег (wet snow), снег (dry snow), замерзающий дождь (freezing rain) и ледяной дождь (ice pellets). Отдельным кодом регистрируется отсутствие осадков. В документации к модели IFS Cy41r2 (которая является основой реанализа ERA5) указывается, что в параметризации микрофизики модели предусмотрены осадки только в виде снега и дождя, а дальнейшее разделение осадков на типы производится с использованием дополнительной диагностики температуры и влажности в пограничном слое [18].

Помимо данных о типе осадков, в ходе работы были использованы данные реанализа об общем количестве осадков, температуре воздуха, зональной и меридиональной скорости ветра и давлении на уровне моря.

В данной работе сроками с наличием замерзающего дождя считались все сроки реанализа, во время которых интенсивность осадков превышала

0,1 мм/час. Днем с замерзающими осадками считался день, во время которого, по данным реанализа, хотя бы в одном из 24 сроков присутствовали осадки в виде замерзающего дождя.

По данным реанализа для территории ЕТР были получены пространственно-временные поля количества сроков, дней и среднего числа сроков и дней с замерзающими осадками в виде замерзающего дождя.

В качестве фактических данных были использованы данные метеорологических наблюдений за погодными явлениями. Используемые в работе данные метеорологических наблюдений были получены из архива ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». Использовались данные стандартных наблюдений в основные синоптические сроки в рамках кодовой формы КН-01 на 214 метеорологических станциях ЕТР для периода с 1979 по 2022 год [1].

За случаи выпадения замерзающих осадков принимались сроки, во время которых наблюдатель на метеорологической станции отмечал следующие атмосферные явления в соответствии с кодом КН-01: 24 – замерзающая морось или дождь в последний час, 56 – слабая замерзающая морось, 57 – умеренная или сильная замерзающая морось, 66 – слабый замерзающий дождь и 67 – умеренный или сильный замерзающий дождь.

В данной статье использовалось разделение замерзающих осадков на замерзающую морось и дождь. К общему количеству замерзающих осадков относились все виды (кодовые цифры 24, 56, 57, 66, 67), к замерзающей мороси и замерзающему дождю осадки любой интенсивности соответственно (кодовые цифры 56, 57 и 66, 67).

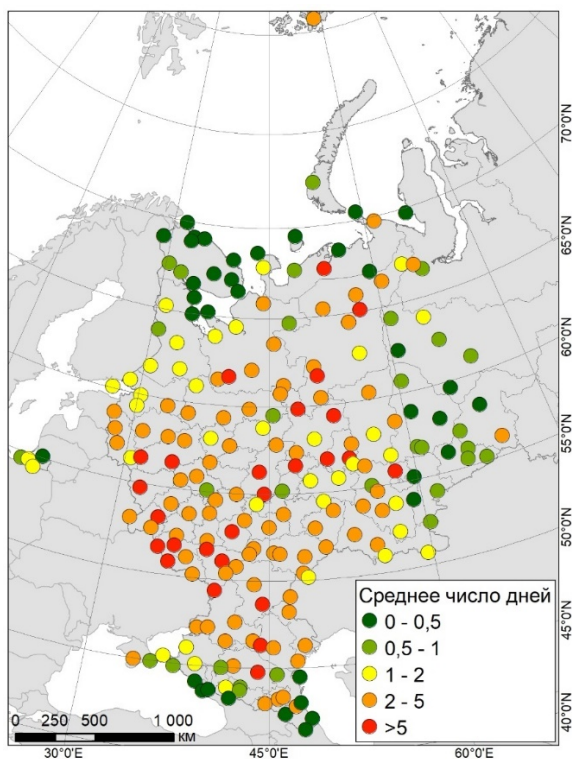
Доля случаев замерзающего дождя в общем количестве замерзающих осадков была получена только для метеорологических станций, на которых количество наблюдаемых явлений было не менее 30 случаев за период с 1979 по 2022 год.

Для корректной оценки качества воспроизведения замерзающих осадков реанализом ERA5, для каждой метеорологической станции были отобраны только те годы, в которые для периода с октября по апрель в основных срочных наблюдениях отсутствовало не более 5 % сроков. Неполные годы были исключены из выборки. Для соответствия данным наблюдений из набора данных реанализа ERA5 также были исключены отобранные неполные годы.

Далее для каждой метеорологической станции был рассчитан коэффициент корреляции для оценки связи межгодовой изменчивости повторяемости замерзающих осадков по данным наблюдений и данным реанализа ERA5. Для каждой метеорологической станции был отобран ряд ежегодного количества случаев с замерзающими осадками и ряд для тех же лет по данным реанализа ERA5. Оценки были получены только для тех метеорологических станций, где количество наблюдаемых случаев замерзающих осадков было не менее 30.

## Результаты

По данным основных срочных наблюдений была построена карта среднего годового числа дней с замерзающими осадками (рис. 1). Повторяемость выпадения замерзающих осадков на ЕТР распределена неравномерно. Наиболее часто замерзающие осадки выпадают в южных и центральных регионах ЕТР, где на многих метеорологических станциях наблюдается более 5 дней с замерзающими осадками за год. В первую очередь это связано с тем, что на данные территории в холодное время года часто приходят теплые и влажные воздушные массы, которые при взаимодействии с холодными континентальными воздушными массами создают сложную термическую структуру тропосферы, приводящую к образованию замерзающих осадков.



**Рис. 1.** Среднее годовое число дней с замерзающими осадками по данным срочных наблюдений за период с 1979 по 2022 г.

**Fig. 1.** Average annual number of days with freezing precipitation based on 3-hour observations for the period from 1979 to 2022.

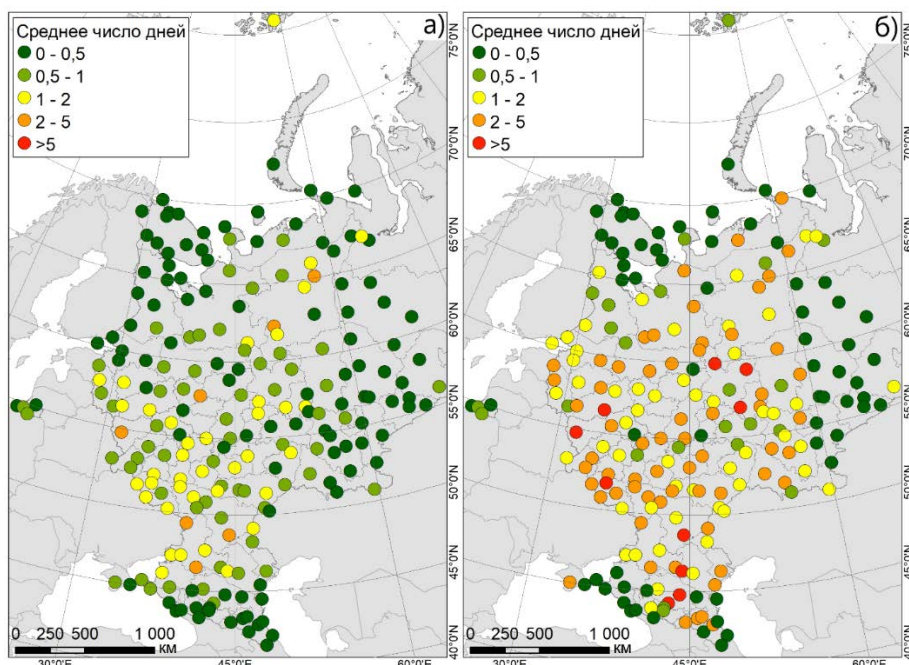
Замерзающие осадки наблюдаются очень часто и на некоторых метеорологических станциях, расположенных на севере. Например, на метеостанции им. Э.Т. Кренкеля замерзающие осадки наблюдаются в среднем

3,67 дней в году, в Нарьян-Маре – 8,2 дней в году. Высокая повторяемость замерзающих осадков на некоторых метеорологических станциях северной части ЕТР была отмечена ранее и другими авторами [10].

Можно выделить четыре области, на территории которых замерзающие осадки наблюдаются редко: 1) север ЕТР, включая Кольский полуостров и побережья Белого и Баренцева моря; 2) районы вблизи южной границы России – побережье Черного моря и юг Республики Дагестан; 3) территория к востоку от Уральских гор и 4) Калининградская область. На данных территориях в среднем наблюдается менее 1 дня в году с выпадением замерзающих осадков. Калининградская область находится в атлантико-континентальной области умеренного климата. Влияние Балтийского моря уменьшает повторяемость синоптических условий, во время которых у земли наблюдается слой воздуха с отрицательной температурой при выпадении жидких осадков. Малая повторяемость замерзающих осадков на Кольском полуострове и побережье северных морей связана с тем, что до высоких широт редко доходят теплые и влажные тропические воздушные массы. Кроме того, северная часть территории Мурманской области омывается теплыми течениями, которые препятствуют образованию стратификации по типу «теплого носа». На некоторых метеорологических станциях замерзающие осадки не наблюдаются вовсе (Вайда-Губа, Полярное, Териберка). К востоку от Уральских гор резко уменьшается число наблюдений замерзающих осадков, как и количество осадков в целом. Описанные в научной литературе случаи выпадения замерзающего дождя на Урале являются крайне редкими и, как правило, не приводят к образованию сильного гололеда [6]. Низкая повторяемость замерзающих осадков на юге ЕТР связана с влиянием Черного моря. Высокие температуры воздуха значительно сокращают период возможного формирования замерзающих осадков. Короткий холодный период характерен и для побережья Каспийского моря. Кроме этого, побережье Каспийского моря в целом отличается низким количеством осадков, выпадающих во время холодного периода.

Стоит отметить большую пространственную неоднородность полученных данных. Эта неоднородность может быть связана с орографическими и микрофизическими особенностями местности. Однако на некоторых метеорологических станциях, расположенных недалеко друг от друга, наблюдаемые различия крайне существенны. Например, на метеорологической станции Коломна (Московская область) в среднем наблюдается 0,75 дней в году с замерзающими осадками, в то время как в Рязани 6,65 дней в году. Эти пункты находятся на расстоянии 85 км друг от друга в одной климатической области, ярко выраженные особенности рельефа отсутствуют. Такие существенные различия наблюдаемого числа дней с замерзающими осадками могут быть следствием ошибок наблюдений. Сложность наблюдений за замерзающими осадками указывает на важность привлечения данных спутникового зондирования и атмосферных реанализов высокого разрешения для климатических исследований данных явлений [4].

Отдельно были построены карты среднего годового числа дней с замерзающим дождем и замерзающей моросью (рис. 2). Разделение замерзающих осадков на дождь и морось имеет существенное значение при оценке данных численного моделирования, в том числе данных реанализа. Известно, что морозящие осадки воспроизводятся численными моделями атмосферы существенно хуже. Модель IFS, с использованием которой создается реанализ ERA5, не является исключением.



**Рис. 2.** Среднее годовое число дней с замерзающим дождем (а) и замерзающей моросью (б) по данным визуальных наблюдений за период с 1979 по 2022 г.

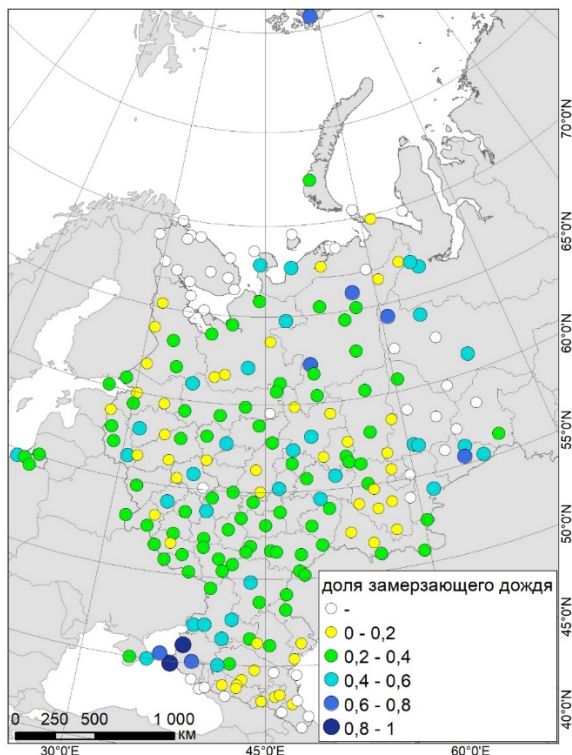
**Fig. 2.** Average annual number of days with freezing rain (left) and freezing drizzle (right) based on 3-hour observations for the period from 1979 to 2022.

Данные наблюдений указывают на то, что подавляющее количество замерзающих осадков выпадает именно в виде мороси. Это значит, что, если не разделять дождь и морось, а сравнивать данные реанализа с общим количеством замерзающих осадков, стоит ожидать больших расхождений.

В целом, пространственное распределение повторяемости замерзающего дождя и мороси схожее. Можно выделить лишь то, что число дней с замерзающим дождем начинает резко убывать севернее 55° с. ш. (рис. 2а), а число дней с замерзающей моросью – севернее 65° с. ш. (рис. 2б).

Для большей наглядности была построена карта доли замерзающего дождя в общем количестве замерзающих осадков. В соответствии

с выбранной методикой исследования около 20 % метеорологических станций оказались не репрезентативными из-за малого количества наблюдаемых замерзающих осадков. Эти станции отмечены белыми пунсонами (рис. 3).



**Рис. 3.** Доля метеорологических сроков с наблюдением осадков в виде замерзающего дождя среди сроков с наблюдением замерзающих осадков всех видов.

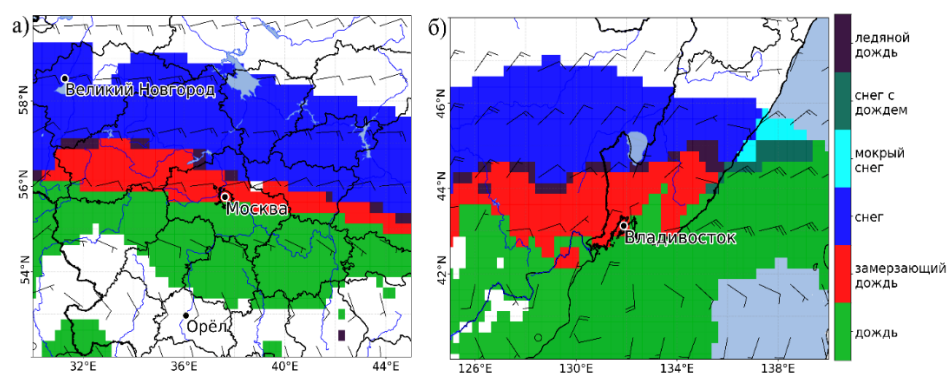
**Fig. 3.** The share of meteorological terms with observation of freezing rain among terms with observation of freezing precipitation of all types.

В среднем на территории ЕТР осадки в виде замерзающего дождя составляют около 29 % от всех замерзающих осадков. Это значит, что замерзающая морось наблюдается в среднем в три раза чаще замерзающего дождя. Преобладание замерзающей мороси было получено и другими авторами при анализе ежечасных данных наблюдений в аэропортах Московского авиационного узла, Нижнего Новгорода и Минеральных вод, где замерзающая морось занимала 68, 63 и 92 % наблюдений соответственно [12, 13, 15].

Интересная картина пространственного распределения доли замерзающих дождей наблюдается южнее 50° с. ш. Здесь, вблизи побережья

Черного моря, на Таманском полуострове и Кубано-Приазовской низменности замерзающие дожди наблюдаются более чем в 60 % случаев (метеостанции Приморско-Ахатрск, Краснодар, Анапа и Керчь), а при движении на восток их доля уменьшается до 10–20 %, достигая минимума в горах Кавказа и вблизи Каспийского моря. Это связано с тем, что на побережье Черного моря в холодный период года нередко выходят южные средиземноморские циклоны, которые приносят влажный и теплый тропический воздух, который при взаимодействии с холодным континентальным воздухом в нижнем слое тропосферы приводит к выпадению замерзающих дождей. Подобное влияние средиземноморских циклонов на формирование замерзающих осадков было отмечено для аэропорта Одессы, где по данным наблюдений за период с 1986 по 2001 г. замерзающий дождь составил 60 % от всех замерзающих осадков [14]. При движении на восток в ходе трансформации тропических воздушных масс термический контраст ослабляется и вместе с этим уменьшается доля интенсивных замерзающих осадков в виде замерзающего дождя.

Реанализ ERA5 успешно воспроизводит случаи выпадения интенсивных замерзающих осадков с образованием сильного гололеда. Такие случаи наиболее часто происходят при «классическом механизме» образования замерзающего дождя. На рис. 4 приведены карты-схемы областей выпадающих осадков различного фазового состава согласно данным реанализа ERA5 для двух наиболее ярких случаев образования сильного гололеда на территории Центральной России и Приморского края [7, 9]. Случай выпадения замерзающего дождя в Приморском крае рассматривается как пример воспроизведения осадков различного фазового состава на территории со сложной подстилающей поверхностью и слабой освещенностью территории метеорологическими наблюдениями.



**Рис. 4.** Поле осадков различного фазового состава по данным реанализа ERA5: 03 ч ВСВ 26 декабря 2010 г. (а) и 23 ч ВСВ 18 ноября 2020 г. (б).  
**Fig. 4.** Precipitation field of different phase compositions according to ERA5 reanalysis data: 03UTC on December 26, 2010 (left) and 23UTC on November 18, 2020 (right).

Для этих случаев реанализом была точно воспроизведена структура осадков на теплом фронте, характерная для образования интенсивных замерзающих осадков. В области теплой воздушной массы наблюдаются осадки в виде дождя, к северу от нее наблюдается полоса осадков в виде замерзающего дождя. В момент, когда холодный слой у поверхности земли становится достаточно толстым, замерзающий дождь переходит в ледяной дождь (ice pellets, кодовая цифра КН-01 – 79). В области холодной воздушной массы перед фронтом выпадают осадки в виде снега. Интересно, что для случая ледяного шторма во Владивостоке (рис. 4б), над экваторией Японского моря, моделью были воспроизведены осадки в виде мокрого снега и снега с дождем.

Отдельные, особенно интенсивные случаи выпадения замерзающих осадков успешно воспроизводятся реанализом в первую очередь из-за их «классического механизма» формирования с наличием приподнятого слоя с положительной температурой воздуха. Однако ранее было показано, что большая часть замерзающих осадков образуется в полностью холодном воздухе [16]. В связи с этим большой интерес представляет исследование способности реанализа воспроизводить климатологию замерзающих осадков на ЕТР в целом, а не только отдельные случаи.

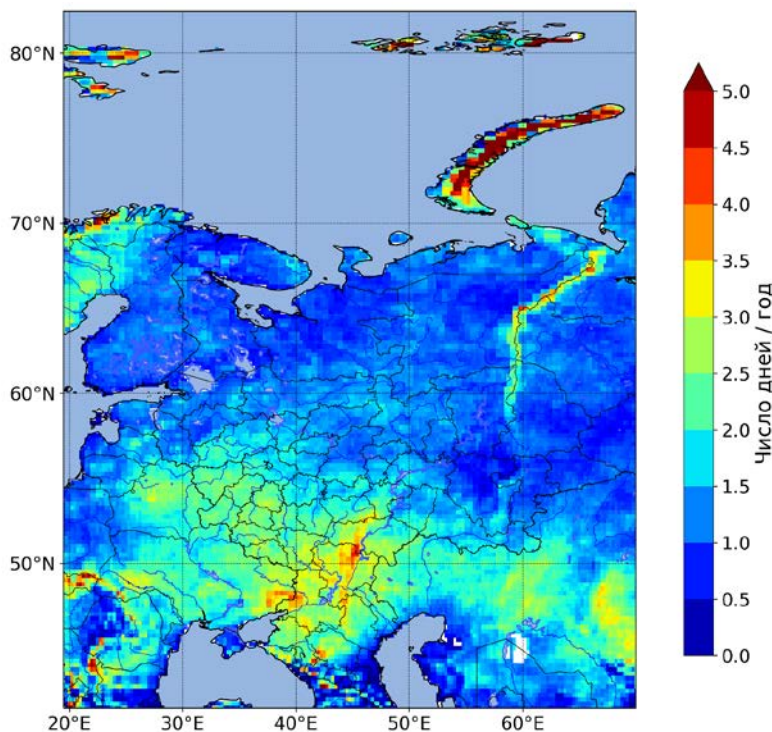
Для каждой ячейки сетки реанализа ERA5 было получено среднее годовое число дней с замерзающим дождем (рис. 5). Полученная пространственная картина хорошо согласуется с общеизвестными представлениями о распределении замерзающих осадков на территории ЕТР.

Основной максимум числа дней с замерзающим дождем наблюдается на юго-западе ЕТР, приблизительно до  $55^{\circ}$  с. ш. и до  $50^{\circ}$  в. д. По данным реанализа, замерзающий дождь выпадает здесь в среднем от 2 до 5 дней в году. Также около 2 дней в году с замерзающим дождем наблюдается на территории Валдайской возвышенности. Наибольшее число дней с замерзающим дождем приурочено к приподнятым территориям – Приволжской и Ставропольской возвышенностям и Донецкому кряжу. Здесь, по данным реанализа, среднее число дней с замерзающим дождем составляет около 4 дней в году.

Отмечается увеличение повторяемости замерзающих дождей на западных склонах Уральских гор. Наиболее выражено это для Северного, Приполярного и Полярного Урала. Так, например, в районе г. Народной данные реанализа показывают 4,3 дня с замерзающим дождем в год. Это приблизительно в 8 раз больше, чем на соседних равнинных ячейках сетки к западу от хребта. Количество замерзающих осадков, так же как и осадков в целом, увеличивается на горных территориях, однако низкая плотность наблюдений в горах не позволяет произвести оценки точности воспроизведения данных эффектов для замерзающих дождей реанализом.

Крайне высокая повторяемость замерзающих дождей показана реанализом ERA5 на территории островов Северного Ледовитого океана. На архипелаге Новая Земля и Земля Франца-Иосифа значения среднего числа

дней с замерзающим дождем превышают 9 дней в году. Низкая плотность метеорологических наблюдений на этих территориях не позволяет достоверно оценить точность воспроизведения замерзающих осадков реанализом.



**Рис. 5.** Среднее годовое число дней с осадками в виде замерзающего дождя по данным реанализа ERA5 за период с 1979 по 2022 г.  
**Fig. 5.** Average annual number of days with freezing rain from ERA5 reanalysis data for the period 1979–2022.

Значения среднего годового числа дней с замерзающей моросью, замерзающим дождем и замерзающими осадками по данным основных срочных наблюдений, в соответствии с кодом КН-01, для метеорологических станций, расположенных вблизи крупных городов, приведены в таблице. Для сравнения, в таблице также представлены значения среднего годового числа дней с замерзающим дождем по данным реанализа ERA5, соответствующие ближайшим к метеорологическим станциям узлам сетки.

Несмотря на то, что поля замерзающих осадков, полученные с использованием данных реанализа ERA5 и данных наблюдений, демонстрируют значительное сходство, между ними также присутствуют выраженные различия.

**Таблица.** Среднее годовое число дней с замерзающей моросью, замерзающим дождем, замерзающими осадками по данным основных срочных наблюдений и с замерзающим дождем по данным реанализа ERA5 за период с 1979 по 2022 г.

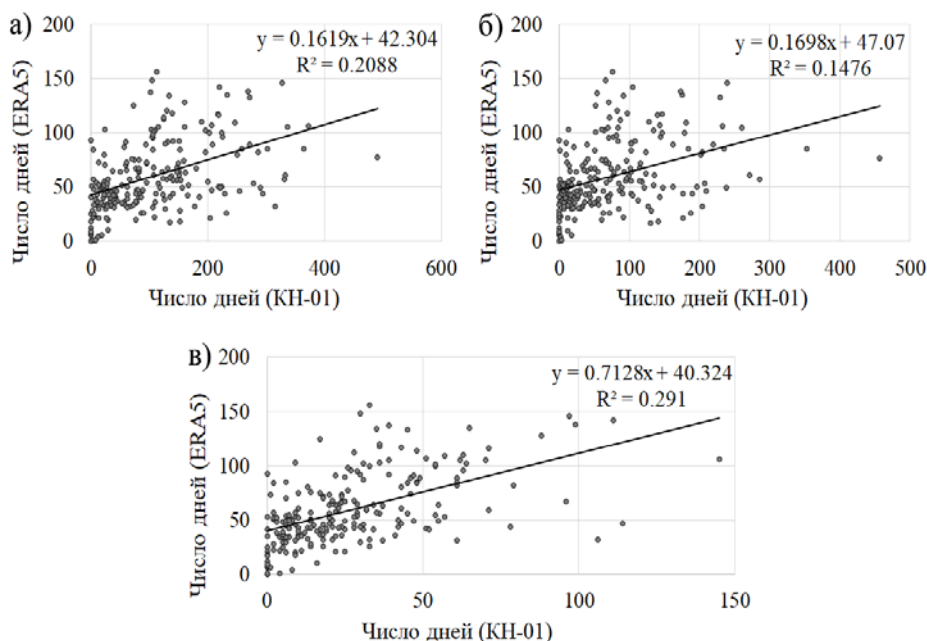
**Table.** Average annual number of days with freezing drizzle, freezing rain, freezing precipitation from the 3-hour observations and with freezing rain from the ERA5 reanalysis for the period 1979–2022

Название станции	Среднее годовое число дней			
	с замерз. моросью (56, 57)	с замерз. дождем (66, 67)	с замерз. осадками (24, 56, 57, 66, 67)	с замерз. дождем по данным ERA5
Мурманск	0,00	0,05	0,07	0,68
Архангельск	0,84	0,26	1,33	0,84
Петрозаводск	1,00	0,70	1,86	0,93
Нарьян-Мар	4,77	0,70	5,80	1,05
Санкт-Петербург	1,05	0,18	1,43	1,14
Псков	2,21	1,05	3,44	1,30
Калининград	0,86	0,53	1,47	1,00
Смоленск	5,30	3,30	8,48	2,41
Вологда	2,32	0,82	3,20	1,27
Нижний Новгород	3,77	0,98	5,21	1,16
Казань	0,80	0,44	1,46	1,71
Москва, ВДНХ	1,16	1,02	2,41	1,91
Пенза	3,77	1,14	4,84	2,07
Пермь	1,00	0,55	1,77	0,82
Уфа	1,67	0,33	2,12	0,60
Курск	5,91	1,41	7,66	2,39
Волгоград	5,43	2,20	7,45	3,32
Ростов-на-Дону	1,73	1,80	3,57	3,37
Астрахань	2,80	0,84	3,68	1,43
Краснодар, Круглик	0,49	0,72	1,33	2,02
Оренбург	2,61	0,45	3,50	1,27
Минеральные Воды	10,63	0,60	11,42	1,79
Керчь	0,48	0,88	1,48	0,74

По данным наблюдений (и для замерзающего дождя, и для общего количества замерзающих осадков) убывание среднего годового числа дней с данными явлениями при увеличении широты происходит более равномерно, в отличие от реанализа, где отмечается резкое уменьшение числа

дней с замерзающим дождем. Так, например, по данным наблюдений на территории Республики Коми замерзающие дожди встречаются не так редко (см. рис. 2б), в то время как по данным реанализа уменьшение частоты их выпадения по сравнению с югом ЕТР уменьшается более чем в 3 раза.

Для оценки согласованности данных наблюдений и данных реанализа были построены диаграммы рассеяния для общего количества замерзающих осадков (рис. 6а), замерзающей мороси (рис. 6б) и замерзающего дождя (рис. 6в).



**Рис. 6.** Сравнение суммы числа дней по данным срочных наблюдений и по данным реанализа ERA5 за период с 1979 по 2022 г. с наблюдением: замерзающих осадков (а); замерзающей мороси (б); замерзающего дождя (в).

**Fig. 6.** Comparison of the sum of the number of days according to 3-hour observations and according to ERA5 reanalysis data for the period from 1979 to 2022 with observations of: freezing precipitation (left); freezing drizzle (right); freezing rain (bottom).

Показано, что для общего количества замерзающих осадков коэффициент детерминации  $R^2$  равен 0,2088, что является слабой зависимостью. Для замерзающей мороси коэффициент детерминации  $R^2$  составляет всего 0,1476. Для общего числа дней с замерзающим дождем  $R^2$  приблизительно равен 0,291. Полученные значения коэффициента детерминации позволяют сделать несколько выводов.

Несмотря на отдельные сходства с данными наблюдений, нельзя утверждать, что реанализ ERA5 точно воспроизводит пространственное распределение частоты выпадения замерзающих дождей на ЕТР. В результате того, что в физической параметризации осадков модели IFS заложены алгоритмы, выявляющие замерзающий дождь только при наличии «классического механизма» формирования с наличием слоя таяния, часть замерзающих дождей, выпадающих в полностью холодной атмосфере, не воспроизводится реанализом. Так как большая часть замерзающих дождей выпадает именно в «процессе переохлажденного теплого дождя» [17], реанализ не воспроизводит существенную долю таких осадков, из-за чего коэффициент детерминации для замерзающего дождя не превышает 0,3.

Низкий коэффициент детерминации, полученный для замерзающей мороси, указывает лишь на тот факт, что рассматриваемая переменная типа осадков в виде замерзающего дождя из реанализа ERA5 не может быть использована для диагностики осадков в виде замерзающей мороси.

Далее была проведена оценка точности воспроизведения межгодовой изменчивости числа дней с замерзающим дождем. На рис. 7а представлена карта, на которой для каждой станции (с количеством наблюдений замерзающего дождя более 30) указан коэффициент корреляции  $R$ , показывающий соответствие ежегодного количества явлений замерзающего дождя по данным основных срочных наблюдений и данным реанализа ERA5.

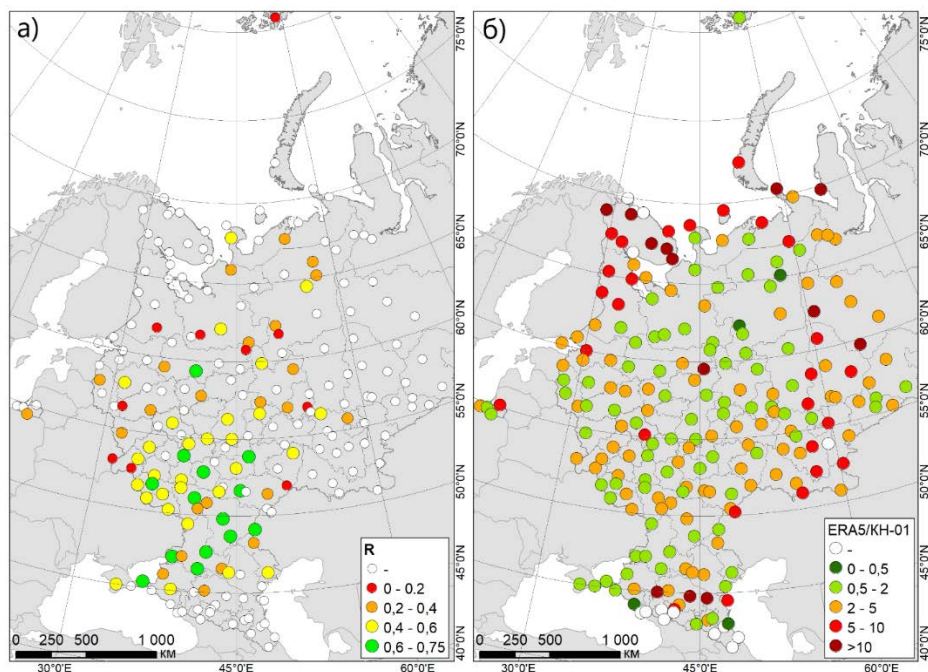
Для большого количества метеорологических станций (36,4 %) данные коэффициента корреляции не рассчитаны. Это территории юга России, района Урала и Севера, на метеостанциях которых наблюдалось слишком мало случаев замерзающего дождя. Для большинства метеорологических станций коэффициент корреляции составляет около 0,5.

На части метеорологических станций коэффициент корреляции составляет более 0,6. Это значит, что данные реанализа в целом воспроизводят межгодовую изменчивость числа дней с выпадением осадков в виде замерзающего дождя. Область наибольших значений коэффициента корреляции схожа с областью максимума числа дней с выпадением замерзающего дождя по данным наблюдений (рис. 2а).

На рис. 7б представлена карта, на которой показано отношение количества всех смоделированных случаев замерзающего дождя в реанализе ERA5 ко всем наблюдаемым случаям замерзающего дождя по данным срочных наблюдений в рамках кодовой формы КН-01. В данном случае для анализа интересна качественная картина полученных значений. В некоторых регионах число дней с замерзающим дождем по данным реанализа превышает число дней с замерзающим дождем по данным наблюдений более чем в 10 раз.

Таким образом, наиболее высокая точность воспроизведения отмечается в центральных и южных регионах ЕТР с наибольшим числом наблюдений замерзающего дождя. Наибольшие различия данных реанализа и

наблюдений характерны для регионов, на территории которых замерзающий дождь наблюдается редко.



**Рис. 7.** Величина коэффициента корреляции (R) для межгодовой изменчивости числа дней с замерзающим дождем по данным реанализа ERA5 и основных наблюдений за период с 1979 по 2022 г. (а) и отношение числа дней с замерзающим дождем по данным реанализа ERA5 к числу дней с замерзающим дождем по данным срочных наблюдений (б).

**Fig. 7.** The value of the correlation coefficient (R) for the interannual variability of the number of days with freezing rain according to the ERA5 reanalysis data and the 3-hour observations for the period from 1979 to 2022 (left) and the ratio of the number of days with freezing rain according to the ERA5 reanalysis data to the number of days with freezing rain according to the 3-hour observations (right).

Подводя итог, можно заключить, что данные реанализа, на первый взгляд, показывают достаточно реалистичную картину распределения замерзающих осадков на ЕТР. Однако количественные оценки сопоставления данных реанализа с данными наблюдений выявляют существенные различия.

Первая и основная причина – это сложность моделирования осадков различного фазового состава, особенно замерзающего дождя. Современные модели, при всем достигнутом прогрессе в описании микрофизических процессов, не выделяют переохлажденные капли как отдельный вид гидрометеоров, а используемый постпроцессинг не обеспечивает достаточной

точности. Вторая причина заключается в том, что в реанализе ERA5 изначально рассматриваются только случаи замерзающего дождя, выпадающего при стратификации по типу «теплого носа» с наличием слоя таяния. В связи с этим реанализ не воспроизводит преобладающее число случаев замерзающих осадков, образующихся в полностью холодной атмосфере. Третья причина состоит в сложности наблюдений за замерзающими осадками, из-за которых возникает множество ошибок, которые в последующем влияют на оценки качества реанализа.

### Заключение

В ходе работы впервые была проведена оценка качества воспроизведения замерзающих осадков реанализом ERA5 для Европейской территории России. Для ЕТР по данным основных срочных наблюдений были получены карты среднего числа дней с замерзающими осадками в виде мороси, дождя и их совокупности для периода с 1979 по 2022 год. По данным реанализа ERA5 с шагом  $0,25^\circ$  по пространству и 1 час по времени были получены карты среднего числа дней с замерзающим дождем.

Реанализ ERA5 успешно воспроизводит структуру осадков в области теплого фронта при формировании отдельных случаев выпадения высокоинтенсивных замерзающих осадков, приводящих к формированию сильного гололеда. Сравнение общего количества замерзающих осадков по данным реанализа ERA5 с данными наблюдений за период с 1979 по 2022 год показало, что реанализ воспроизводит основные черты распределения замерзающих осадков на ЕТР. Однако наблюдаются и существенные различия с данными наблюдений. При сопоставлении данных реанализа о количестве смоделированных случаев замерзающего дождя с данными наблюдений на 214 метеорологических станциях коэффициент детерминации  $R^2$  составил 0,291 для замерзающего дождя и 0,14 для замерзающей мороси.

Низкие значения коэффициентов детерминации связаны с тем, что в реанализе ERA5 образование осадков в виде замерзающего дождя возможно только при наличии слоя таяния, из-за чего преобладающее количество случаев замерзающих осадков, выпадающих в полностью холодной атмосфере, не воспроизводится реанализом.

Оценки сравнения межгодовой изменчивости числа дней с замерзающим дождем по данным реанализа и данным наблюдений показали, что коэффициент корреляции более 0,6 отмечен лишь на 14 метеорологических станциях. В среднем коэффициент корреляции для станций с достаточным количеством наблюдений составил 0,32.

Таким образом, данные реанализа ERA5 о типе осадков наиболее полезны для анализа условий выпадения отдельных случаев высокоинтенсивных замерзающих дождей, формирующихся при стратификации по типу «теплого носа».

**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»).

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

### Список литературы

1. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. «Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549 <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных>
2. Вильфанд Р.М., Голубев А.Д. Метеорологические условия выпадения ледяных дождей 25-26 декабря 2010 г. над центром Европейской части России // Лед и снег. 2011. № 4 (115). С. 119-124.
3. Голубев А.Д., Кабак А.М., Никольская Н.А. и др. Ледяной дождь в Москве, Московской области и прилегающих областях центра Европейской территории России 25-26 декабря 2010 года // Труды Гидрометцентра России. 2013. Вып. 349. С. 214-230.
4. Гурвич И.А. и др. Ледяной шторм в Приморье 18–19 ноября 2020 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, №. 6. С. 241-252. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-241-252
5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: Росгидромет, 2023. 109 с.
6. Калинин Н.А., Смородин Б.Л. Редкое явление замерзающего дождя в Пермском крае // Метеорология и гидрология. 2012. № 8. С. 27-35.
7. Леонов И.И., Соколичина Н.Н. Условия формирования ледяного шторма во Владивостоке в ноябре 2020 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 4 (382). С. 69-83. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-4-69-83
8. РД 52.04.563-2002. Инструкция «Критерии опасных метеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения».
9. Семенов Е.К., Соколичина Н.Н., Леонов И.И., Соколичина Е.В. Атмосферная циркуляция над центром Европейской России в период ледяного дождя в декабре 2010 г. // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 91-101.
10. Суркова Г.В., Лаврентьева А.И., Качева 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
11. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации // под ред. В. М. Катцова. СПб.: Научное издание, 2022. 676 с.
12. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Условия выпадения замерзающий осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. I. Аэропорты московского аэроузла // Метеорология и гидрология. 2003. № 6. С. 40-58.
13. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Условия выпадения замерзающий осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. II. Аэропорт Минеральные Воды // Метеорология и гидрология. 2005. № 2. С. 27-42.
14. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. и др. Условия выпадения замерзающий осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. III. Аэропорт Одесса // Метеорология и гидрология. 2005. № 9. С. 5-18.

15. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Завьялова А.А. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. IV. Аэропорт Нижний Новгород // Метеорология и гидрология. 2007. № 7. С. 25–39.
16. Шакина Н.П., Хоменко И.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 348. С. 130–161.
17. Шакина Н.П., Хоменко И.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Условия образования замерзающих осадков в европейской России и катастрофический гололед в декабре 2010 г. // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: Труды Международной конференции, посвященной памяти академика А.М. Обухова. М.: ГЕОС, 2014. С. 412–423.
18. Электронная документация модели IFS [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ecmwf.int/en/publications/ifs-documentation> (дата обращения: 03.04.2024).
19. Groisman P., Bulygina O., Yin, X., Vose, R., Gulev S., Hanssen-Bauer I., Førland E. 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.
20. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146, no. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803
21. Kämäräinen M. et al. A method to estimate freezing rain climatology from ERA-Interim reanalysis over Europe // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2017. Vol. 17, no. 2. P. 243–259. DOI: 10.5194/nhess-17-243-2017

### References

1. Bulygina O. N., Veselov V. M., Razuvaev V. N., Alexandrova T. M. Описание массива сырых данных об основных метеорологических параметрах на станциях России [The description of the array of term data on the main meteorological parameters at stations in Russia] [in Russ.].
2. Vilfand R.M., Golubev A. D. Метеорологические условия выпадения ледяных дождей 25–26 декабря 2010 г. над центром Европейской части России [Meteorological conditions for freezing rain on December 25–26, 2010 over the central European part of Russia]. *Led i sheg [Ice and Snow]*, 2011, vol. 115, pp. 119–124 [in Russ.].
3. Golubev A.D., Kabak A.M., Nikol'skaya N.A. et al. Ледяной дождь в Москве, Московской области и прилегающих областях центра Европейской территории России 25–26 декабря 2010 года [Freezing rain in Moscow, Moscow region and adjacent areas of the central European territory of Russia on December 25–26, 2010]. *Труды Гидрометцентра России [Proceedings of Hydrometcentre of Russia]*, 2013, vol. 349, pp. 214–230 [in Russ.].
4. Gurvich I.A. et al. Ледяной шторм в Приморье 18–19 ноября 2020 года [Ice storm in Primorye on November 18–19, 2020]. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2021, vol. 18, no. 6, pp. 241–252. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-241-252 [in Russ.].
5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год [Report on climate change in the territory of the Russian Federation for 2022]. Moscow, Roshydromet, 2023, 109 p. [in Russ.].
6. Kalinin N.A., Smorodin B.L. Unusual Phenomenon of Freezing Rain in Perm Krai. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, no. 8, pp. 2735 [in Russ.].
7. Leonov I.I., Sokolihina N.N. Условия формирования ледяного шторма во Владивостоке в ноябре 2020 года [Formation conditions of an ice storm in Vladivostok in November 2020]. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 382, no. 4, pp. 69–83. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-4-69-83 [in Russ.].
8. RD 52.04.563-2002. Инструкция «Критерии опасных метеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения» [Guidance document 52.04.563-2002. Instruction «Criteria for dangerous meteorological phenomena and the procedure for submitting a storm message»] [in Russ.].

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

10. Surkova G.V., Lavrenteva A.I., Tkacheva E.S. Regional'nye osobennosti povtoryaemosti gololeda na severe evropejskoj territorii Rossii na fone menyayushchegosya klimata [Regional features of glaze ice events frequency in the north of the European territory of Russia in the current changing climate]. *Problemy Arktiki i Antarktiki* [Arctic and Antarctic Research], 2024, vol. 70, no. 1, pp. 21-32. DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-1-21-32 [in Russ.].

11. Tretij ocenocnyj doklad ob izmenenijah klimata i ih posledstvijah na territorii Rossijskoj Federacii [The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation]. Roshydromet. St. Petersburg High-tech Technologies, 2022, 676 p. [in Russ.].

12. Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R. Conditions associated with freezing precipitation at airports of Russia and the CIS. I. Airports of the Moscow air zone. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2003, no. 6, pp. 40-58 [in Russ.].

13. Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R. Conditions for freezing precipitation at some airports of Russia and the CIS: IV. Airport of Mineralnye Vody. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2005, no. 2, pp. 27-42 [in Russ.].

14. Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R., et al. Conditions for freezing precipitation at airports of Russia and CIS. III. The airport of Odessa. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2005, no. 9, pp. 5-18 [in Russ.].

15. Shakina N.P., Skriptunova E.N., Zav'yalova A.A. Conditions for freezing precipitation at some airports of Russia and the CIS: IV. Airport of Nizhni Novgorod. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2007, no. 7, pp. 25-39 [in Russ.].

16. Shakina N.P., Homenko I.A., Ivanova A.R., Skriptunova E.N. Obrazovanie i prognozirovaniye zamerzayushchih osadkov: obzor literatury i nekotorye novye rezul'taty [Freezing Precipitation Formation and Prediction: Literature Review and Some New Findings]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcentre of Russia], 2012, no. 348, pp. 130-161 [in Russ.].

17. Shakina N.P., Khomenko I.A., Ivanova A.R., Skriptunova E.N. Usloviya obrazovanija zamerzajushchih osadkov v evropejskoj Rossii i katastroficheskij gololed v dekabre 2010 g. [Conditions for the formation of freezing precipitation in European Russia and the catastrophic ice storm in December 2010]. *Turbulence, atmosphere and climate dynamics*. Collected papers of the International Conference dedicated to the memory of academician A.M. Obukhov. Moscow, GEOS publ., 2014, pp. 412-423 [in Russ.].

18. IFS documentation. Available at: <https://www.ecmwf.int/en/publications/ifs-documentation> – (accessed 3 April 2024).

19. Groisman P., Bulygina O., Yin, X., Vose, R., Gulev S., Hanssen-Bauer I., Førland E. 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.

20. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, no. 730, pp. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803

21. Kämäräinen M. et al. A method to estimate freezing rain climatology from ERA-Interim reanalysis over Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 243-259. DOI: 10.5194/nhess-17-243-2017

Поступила 08.11.2024; одобрена после рецензирования 02.12.2024;  
принята в печать 10.12.2024.

Submitted 08.11.2024; approved after reviewing 02.12.2024;  
accepted for publication 10.12.2024.