

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-1-30-50>

УДК 556.582

Оценка изменений повторяемости замерзающих осадков на территории России в XX–XXI веке с использованием модели INM-CM5

***А.И. Гибадуллина, И.И. Леонов,
А.В. Кислов, Н.Н. Соколикхина***

*Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
naytask@mail.ru*

Проведена оценка качества воспроизведения замерзающих осадков климатической моделью INM-CM5 на территории России. Для верификации данных моделирования использованы данные основных срочных наблюдений и визуальных наблюдений за атмосферными явлениями за период с 1979 по 2014 год. С использованием климатической модели INM-CM5 получено пространственное распределение среднего годового числа дней с замерзающими осадками за период с 1979 по 2014 г. Сделан прогноз изменения повторяемости замерзающих осадков на территории России для периодов 2015–2100 и 2071–2100 гг. по трем возможным социально-экономическим климатическим сценариям SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Наибольшие изменения повторяемости замерзающих осадков ожидаются при реализации сценария SSP5-8.5. Увеличение повторяемости замерзающих осадков на территории России более чем в 5 раз к концу XXI века прогнозируется на севере Европейской территории, южной и центральной части Западной Сибири, восточной части Чукотского АО. Уменьшение повторяемости замерзающих осадков прогнозируется в районе островов и побережий Северного Ледовитого океана, а также Берингова и Охотского морей.

Ключевые слова: изменения климата, прогноз климата, опасные явления погоды, замерзающие осадки, гололед, обледенение, реанализ, модель INM-CM5, CMIP6

An evaluation of changes in the frequency of freezing precipitation in Russia in the 20th–21st centuries using the INM-CM5 model

***A.I. Gibadullina, I.I. Leonov,
A.V. Kislov., N.N. Sokolikhina***

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
naytask@mail.ru*

The quality of simulating freezing precipitation by the INM-CM5 climate model is assessed for Russia. The modeling data were verified using main 3-hour observations and visual observations of atmospheric events during 1979–2014. The INM-CM5 climate model was used to obtain the spatial distribution of the average annual number of days with

freezing precipitation for this period. Forecasts of changes in the frequency of freezing precipitation in Russia were prepared for 2015–2100 and 2071–2100 based on three possible socioeconomic climate scenarios: SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5. The greatest changes in the frequency of freezing precipitation are expected under the SSP5-8.5 scenario. It is predicted that the frequency of freezing precipitation in Russia in the northern European part of Russia, southern and central Western Siberia, and the eastern part of the Chukotka Autonomous Okrug will increase by more than five times by the end of the 21st century. A decrease in the frequency of freezing precipitation is predicted in the areas of the islands and coasts of the Arctic Ocean, as well as the Bering and Okhotsk seas.

Keywords: climate change, climate forecast, severe weather events, freezing precipitation, glaze ice, icing, reanalysis, INM-CM5 model, CMIP6

Введение

Замерзающие осадки могут приводить к возникновению чрезвычайных ситуаций, а также к угрозе здоровью и жизни людей. Ущерб, причиненный отложениями льда на поверхности дорог, линиях электропередачи и деревьях, может быть очень значительным [36].

В настоящее время повышенное внимание исследователей направлено на регионы, расположенные в высоких широтах [15]. Это объясняется тем, что увеличение среднегодовых температур в высоких широтах происходит значительно быстрее, чем в целом по земному шару [7]. С ростом среднегодовой температуры также возрастает повторяемость некоторых опасных явлений. К одним из наиболее опасных гидрометеорологических явлений относятся гололедно-изморозевые отложения, толщина которых превышает 20 мм [12].

Замерзающие осадки наблюдаются во многих регионах мира, но наиболее часто встречаются в странах, расположенных в высоких широтах: России, Канаде, США и странах Скандинавии [20, 24]. Объекты инфраструктуры могут получить существенные повреждения в ходе нарастания атмосферного льда, образовавшегося в результате выпадения замерзающих осадков. Несколько десятилетий назад при проектировании зданий, линий электропередач не всегда уделялось значительное внимание возможным изменениям климата [27]. Следовательно, значительное число построенных объектов инфраструктуры в настоящее время находится в уязвимом положении. Важно иметь представление о повторяемости замерзающих осадков и их пространственном распределении как в нынешнее время, так и в будущем [23].

В работе [24] использовались данные наземных станций на территории Северной Америки и Северной Евразии с 1975 по 2014 год. Было показано, что на Европейской территории России (ЕТР) и на территории Западной Сибири повторяемость замерзающих осадков в последние десятилетия увеличивается, за исключением некоторых южных (степных районов) и северных (арктических) территорий. По данным срочных наблюдений повторяемость выпадения замерзающих осадков на ЕТР имеет неоднородное распределение. Реже всего замерзающие осадки были

зафиксированы на севере ЕТР, на Кавказе вдоль государственной границы Российской Федерации, восточнее Уральских гор и на территории Калининградской области [11].

В рамках представленной статьи рассматриваются результаты расчета повторяемости замерзающих осадков на территории Российской Федерации по данным климатической модели INM-CM5 [4, 34]. Исследования проводились как для текущего периода современного климата («historical») с 1979 по 2014 г., так и для будущего климата (прогнозы по сценариям SSP). В настоящее время разработано несколько сценариев развития общества и окружающей среды до конца XXI века, известных как Shared Socioeconomic Pathways (SSP). Сценарий SSP1-2.6 характеризуется масштабными вложениями в социальную сферу, а также предполагает динамичное развитие экономики при эффективной работе государственных институтов. SSP5-8.5 описывает модель развития, где экономика остается высокочрезвычайно затратной в плане энергопотребления и продолжает опираться на традиционные ископаемые источники энергии. При сценарии SSP2-4.5 глобальные тенденции следуют исторически сложившемуся курсу без резких изменений или отклонений от текущей траектории развития [33]. В данной работе для расчета будущих изменений до 2100 г. использовались три климатических сценария: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5.

Новизна работы заключается в оценке возможности воспроизведения моделью INM-CM5 климатологии замерзающих осадков и получения прогноза их пространственного распределения на территории России в XXI веке.

Материалы и методика исследования

Исследования проводились для территории России с 40° по 85° с. ш. и с 15° в. д. по 165° з. д. Этот выбор обусловлен тем, что для отдельных регионов страны характерна высокая повторяемость замерзающих осадков [20]. Кроме того, значительная часть территории России расположена в высоких широтах, где изменение климата происходит быстрее, чем в среднем по земному шару, вследствие чего важно рассмотреть изменение климатологии замерзающих осадков на фоне современных и будущих изменений климата.

В качестве метеорологических данных для получения пространственного распределения замерзающих осадков в период XX–XXI вв. были выбраны расчеты, проведенные в рамках проекта CMIP6, с использованием климатической модели INM-CM5. Модель INM-CM5 является российской моделью, разработанной в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН. Данная модель имеет шаги сетки 1.5° по широте, 2° по долготе и 73 вертикальных уровня [4, 34]. Использовались расчеты модели для двух периодов: с 1979 по 2014 г. (современный климат) и с 2015 по 2100 г. (климат XXI века). Выбор периода с 1979 г. обусловлен наличием качественных данных наблюдений для верификации данных моделирования, этот временной промежуток соответствует современному климату

конца XX – начала XXI века. Кроме того, для периода с 1979 г. ранее уже проводились исследования замерзающих осадков на территории России с использованием реанализа ERA5 [11].

В ранних работах была предложена методика описания климатологии замерзающих осадков на территории Европы с использованием данных реанализа ERA-Interim [28]. Эта методика была также апробирована при выполнении оценки изменений климата на повторяемость замерзающих дождей в Европе в рамках эксперимента по региональному климатическому моделированию CORDEX [29].

В настоящей работе использовался схожий алгоритм выявления замерзающих осадков. Для расчетов использовались следующие среднесуточные метеорологические характеристики: температура воздуха на уровне 2 м и на изобарических поверхностях 925, 850 и 700 гПа. Необходимая для расчетов относительная влажность на изобарических поверхностях 925, 850 и 700 гПа была получена через удельную влажность по формуле Магнуса. Также использовались данные о количестве атмосферных осадков.

Днями с замерзающими осадками считались те дни, во время которых одновременно выполнялись следующие условия:

- средняя суточная температура воздуха на уровне 2 м имела отрицательные значения;
- хотя бы на одной из изобарических поверхностей 925, 850 и 700 гПа должна была быть положительная температура воздуха и относительная влажность более 90 %;
- сумма выпавших осадков за сутки превышала заданное пороговое значение. В работе использовались несколько пороговых значений (критериев) для количества осадков: 0.05, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10 мм за сутки. Расчеты были проведены для всех пороговых значений.

Таким образом, вероятность возникновения замерзающих осадков зависит от вертикальной температурно-влажностной структуры атмосферы, количества выпадающих осадков и приповерхностной температуры воздуха. Важно отметить, что используемый алгоритм позволяет выявлять замерзающие осадки только при наличии «классического механизма» формирования с термической структурой тропосферы по типу «теплого носа».

Для построения карт повторяемости гололеда и замерзающих осадков, а также для верификации данных моделирования были использованы данные наблюдений с наземных метеорологических станций, расположенных на территории России. Информация была получена из электронного архива ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». В работе были задействованы данные двух архивов: наблюдения за атмосферными явлениями [3] и данные основных срочных наблюдений [2]. В настоящее время в этих архивах содержатся данные 521 метеорологической станции за период наблюдений с 1966 по 2024 год. В работе рассматривался период с 1979 по 2014 г., соответствующий выбранному периоду для обработки данных моделирования. В первом

архиве содержится описание отдельных случаев всех наблюдаемых на метеорологических станциях явлений погоды. Одна запись базы данных относится к одному случаю наблюдения явления и содержит в себе данные о времени начала, времени окончания явления, его интенсивности и уникальном шифре. В данной работе были рассмотрены явления гололеда (шифр атмосферного явления 12).

Во втором архиве содержатся данные наблюдений, проводимых в стандартные синоптические сроки с интервалом 3 часа. В работе использовались данные наблюдений замерзающих осадков. Были отобраны случаи мороси или дождя с образованием гололеда в течение последнего часа до начала срока измерений (кодовая цифра 24). Также были отобраны явления, наблюдаемые в срок: морось слабая, образующая гололед; морось умеренная и сильная, образующая гололед (кодовые цифры 56 и 57); дождь слабый, образующий гололед; дождь умеренный или сильный, образующий гололед (кодовые цифры 66 и 67).

При оценке среднего годового числа дней с гололедом и замерзающими осадками 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 территории России были построены карты среднего годового числа дней с гололедом и замерзающими осадками по данным наблюдений на метеорологических станциях и данным модели INM-CM5 для современного периода и прогностических сценариев. Были построены карты линейных трендов, вычисленных методом наименьших квадратов для периода с 2014 по 2100 г. Достоверность трендов проверялась с использованием критерия Манна – Кендалла [30, 32]. Достоверными считались только тренды, значимые на уровне 5 %. Также были построены карты разностей и отношений числа дней с замерзающими осадками за различные периоды осреднения.

Результаты

По данным визуальных наблюдений за атмосферными осадками и данным основных срочных наблюдений за явлениями погоды были построены карты среднего годового числа дней с гололедом (рис. 1а) и замерзающими осадками (рис. 1б) за период с 1979 по 2014 г. Отметим некоторые наиболее важные особенности. Гололед в данном случае представляет собой гололедно-изморозевое отложение, а замерзающие осадки – атмосферные явления. Из-за этого среднее годовое число дней на рис. 1а и 1б существенно различается. В данной статье основное внимание уделялось не абсолютным показателями повторяемости гололеда или замерзающих осадков, а особенностям их пространственного распределения и временным изменениям.

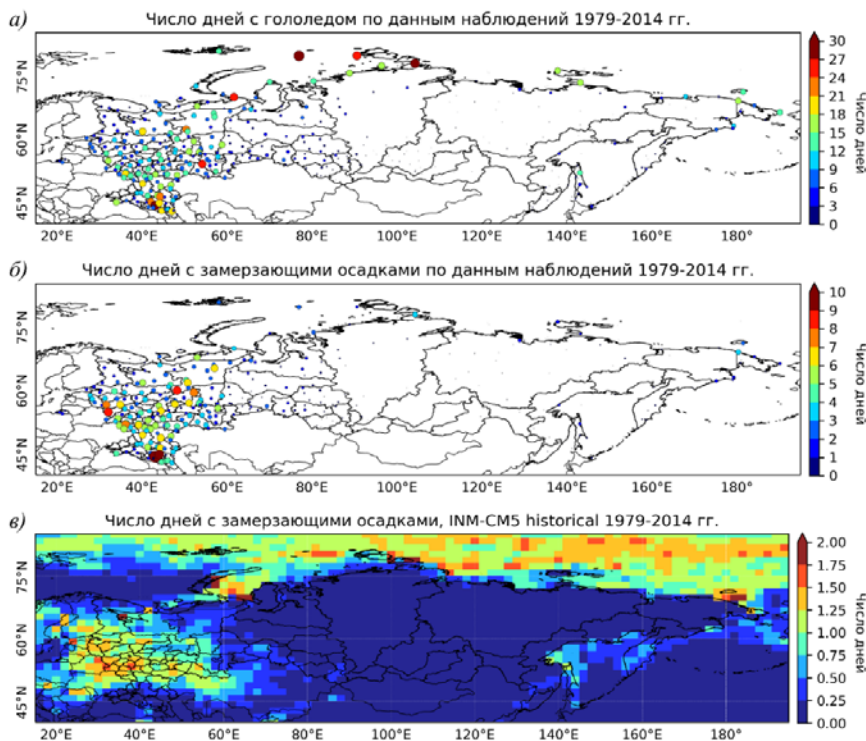


Рис. 1. Среднее годовое число дней с гололедом по данным визуальных наблюдений за атмосферными явлениями за период с 1979 по 2014 г. (а); замерзающими осадками по данным основных срочных наблюдений за период с 1979 по 2014 г. (б); замерзающими осадками по данным климатической модели INM-CM5 за период с 1979 по 2014 г. (в).

Fig. 1. Average annual number of days with glaze ice according to visual observations of weather phenomena for the period 1979–2014 (a); freezing precipitation according to main 3-hour observations for the period 1979–2014 (б); and freezing precipitation according to the INM-CM5 climate model for the period 1979–2014 (в).

Подавляющее количество замерзающих осадков выпадает на ЕТР в холодный период года. На некоторых метеорологических станциях наблюдается до 10 дней в году с замерзающими осадками. Наиболее часто они выпадают на юге страны, а также в Центральном и Приволжском федеральных округах. Небольшое количество замерзающих осадков выпадает на территории Западной Сибири, где повторяемость данного явления составляет не более 2 дней за год. В континентальной части Восточной Сибири и Дальнего Востока замерзающие осадки практически не наблюдаются. На подавляющем числе метеорологических станций, расположенных на побережье северных и дальневосточных морей, наблюдается высокая повторяемость гололеда, в отдельных районах более 30 дней в году (рис. 1б).

На рис. 1в приведена карта среднего годового числа дней с замерзающими осадками по данным модели INM-CM5 для периода с 1979 по 2014 год, полученная с использованием описанной выше методики при пороге осадков 2 мм/сут. Повторяемость замерзающих осадков на территории России, как и по данным наблюдений, распределена неравномерно. Наибольшая частота выпадения замерзающих осадков приурочена к ЕТР, где число дней с замерзающими осадками за год составляет 1–2 дня. На юге Западной Сибири отмечается около 0,25 дней в году с замерзающими осадками, восточнее замерзающие осадки практически не отмечаются. Важно отметить наличие высокой повторяемости замерзающих осадков на побережьях и островах северных и дальневосточных морей России. Можно считать, что это важная особенность успешно воспроизведена моделью INM-CM5.

Частота выпадения замерзающих осадков по станционным наблюдениям в отдельных районах в несколько раз выше, чем рассчитанные значения по данным климатической модели INM-CM5. Главная причина существенных различий состоит в том, что наблюдения на метеорологических станциях проводятся каждые три часа, включая учет атмосферных явлений между сроками и за час до срока измерения, а необходимая для расчетов продукция климатической модели INM-CM5 представлена среднесуточными данными. Замерзающие осадки – это явление, которое происходит на временных масштабах менее суток, среднее время формирования гололеда по данным инструментальных наблюдений составляет 4,5 часа и в 95 % случаев не превышает 14 часов [10]. Это значит, что существенная часть замерзающих осадков не будет улавливаться моделью, так как благоприятные условия их образования размоются в средних суточных значениях параметров температуры и влажности воздуха.

Помимо того, что на количество воспроизведенных дней с замерзающими осадками влияет временной масштаб явления и временное разрешение выходных данных модели, особенно важным является показатель порогового значения осадков. Если пороговое значение осадков небольшое, например 0,2 мм, то модель воспроизводит большое количество замерзающих осадков; если пороговое значение высокое, то критерий становится более жестким, и моделью воспроизводится все меньше рассматриваемого явления.

Важно также отметить, что применяемая методика основана на выявлении осадков, выпадающих при термической стратификации по типу «теплого носа», характерной для выпадения замерзающих дождей. Такая методика не позволяет выявлять существенное количество замерзающих осадков, выпадающих в виде мороси, что также занижает общее количество воспроизведенных явлений [16–21].

Так как в данной работе наибольшую важность представляет не количественная оценка числа дней с замерзающими осадками, а изменение их пространственного распределения в современном и будущем климате, пороговое значение осадков выбиралось подбором наибольшего значения

коэффициента детерминации R^2 между выборками наблюдений и данным модели в узлах сетки, соответствующих положению 521 метеорологической станции.

На рис. 2а представлена зависимость величины коэффициента детерминации между смоделированными с использованием модели INM-CM5 и данными наблюдений от порогового значения суточных осадков. Показано, что для визуальных наблюдений за атмосферными явлениями (случаи гололеда) максимальное значение R^2 достигается при использовании пороговых значений от 0,2 до 0,5 мм/сут и составляет около 0,25. Для основных срочных наблюдений (замерзающие осадки) максимальное значение R^2 составляет около 0,274 при пороговом значении количества осадков 2 мм/сут. Это значение и было выбрано для всех последующих расчетов (рис. 2б). Стоит также отметить, что для воспроизведения гололеда стоило бы выбирать пороговое значение осадков 0,5 мм/сут.

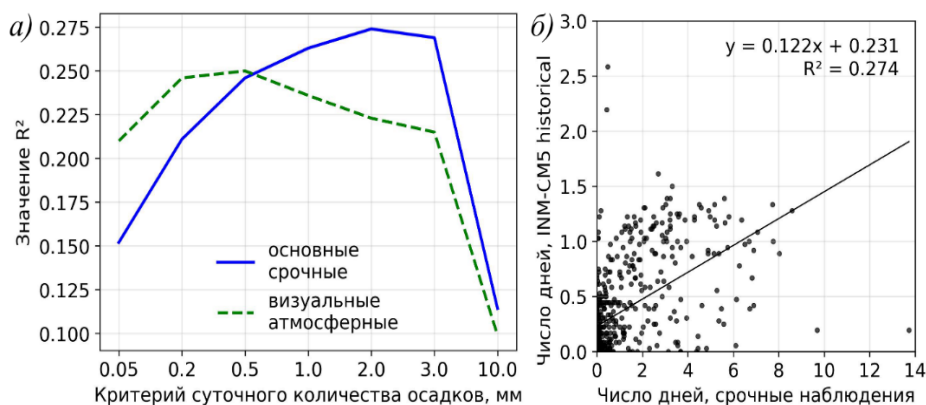


Рис. 2. Зависимость коэффициента детерминации (R^2) между смоделированными и наблюдаемыми данными от порогового значения суточных осадков (а); сравнение числа дней с замерзающими осадками по данным наблюдений и по данным модели INM-CM5 за период с 1979 по 2014 г. при пороговом значении осадков 2 мм/сут (б).

Fig. 2. Dependence of the coefficient of determination (R^2) between simulated and observed data on the threshold value of daily precipitation (а); comparison of the number of days with freezing precipitation according to observations and the INM-CM5 model for the period 1979–2014 at a precipitation threshold of 2 mm/day (б).

По данным климатической модели INM-CM5 было получено среднее годовое число дней с замерзающими осадками для периода с 2015 по 2100 г. (рис. 3). Согласно всем используемым в данной работе сценариям (SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5), относительно современного периода ожидается увеличение среднего числа дней с замерзающими осадками за год. В пределах средней полосы ЕТР замерзающие осадки будут наблюдаться до 4 дней в году, что приблизительно в 2 раза чаще, чем за современный период.

Согласно каждому из рассмотренных сценариев, наибольшее среднегодовое число дней на территории России с замерзающими осадками располагается в разных частях страны. При сценариях SSP1-2.6 и SSP2-4.5 можно выделить два пространственных максимума повторяемости замерзающих осадков с частотой 3–4 дня в году. Первый из них – регионы, располагающиеся на северо-западе страны: Смоленская, Тверская и Новгородская области, второй максимум – юг Приволжского федерального округа: Саратовская, Самарская и Оренбургская области (рис. 3а, б).

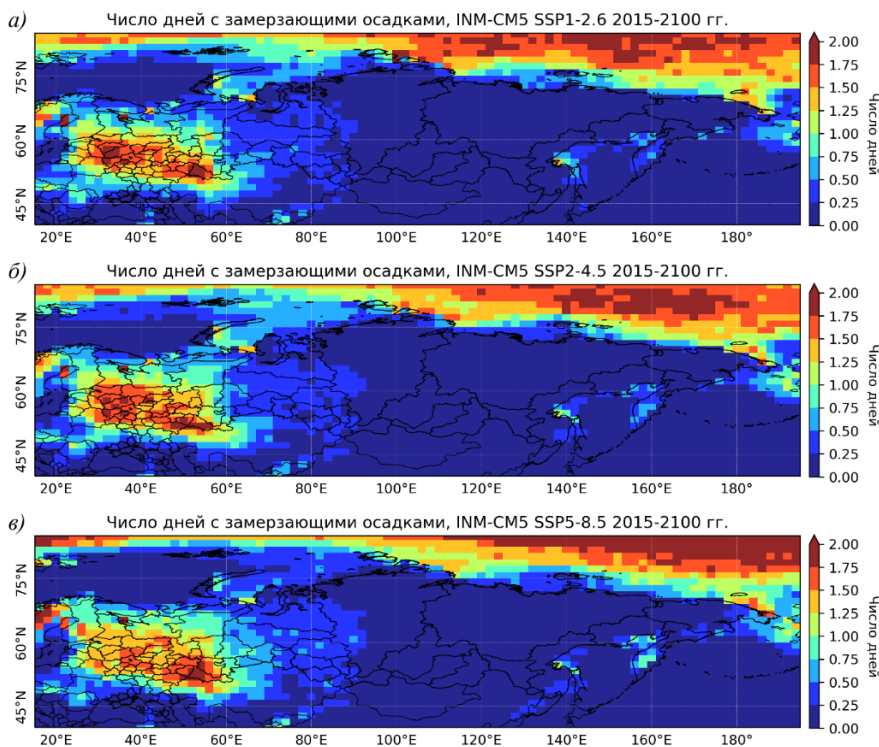


Рис. 3. Среднее годовое число дней с замерзающими осадками за период с 2015 по 2100 г. по данным климатической модели INM-CM5 для сценариев SSP1-2.6 (а); SSP2-4.5 (б); SSP5-8.5 (в).

Fig. 3. Average annual number of days with freezing precipitation for the period 2015–2100 according to the INM-CM5 climate model for scenarios SSP1-2.6 (а); SSP2-4.5 (б); and SSP5-8.5 (в).

При сценарии SSP5-8.5 выделяется один максимум, сместившийся на восток – в район Оренбургской области и республики Башкортостан (рис. 3в). Также при жестком сценарии SSP5-8.5 проявляются области увеличения повторяемости (более 0,5 дней в году) замерзающих осадков на территории Западной Сибири. На большей части территории Восточной Сибири и Дальнего Востока существенных изменений по сравнению

с современным периодом не ожидается вследствие малой повторяемости явления в абсолютных значениях.

Получен прогноз изменения средней годовой повторяемости дней с замерзающими осадками в период с 2015 по 2100 г. по данным различных сценариев климатической модели INM-CM5 (рис. 4). Области, в которых тренды числа дней с замерзающими осадками являются достоверными для 5%-ного уровня значимости, обозначены штриховкой.

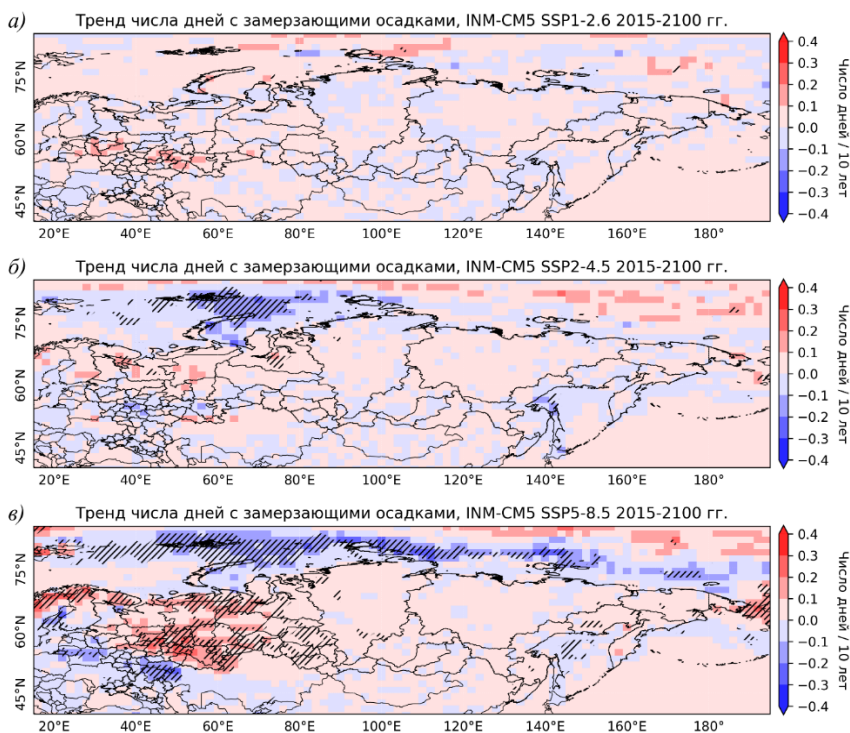


Рис. 4. Значение линейного тренда числа дней за 10 лет с замерзающими осадками за период с 2015 по 2100 г. по данным климатической модели INM-CM5 для сценариев SSP1-2.6 (а); SSP2-4.5 (б); SSP5-8.5 (в).

Fig. 4. Value of the linear trend in the number of days with freezing precipitation per decade for the period 2015–2100 according to the INM-CM5 climate model for scenarios SSP1-2.6 (a); SSP2-4.5 (b); SSP5-8.5 (b).

Для сценария SSP1-2.6 значения тренда не значимые на всей территории России (рис. 4а). Это связано с тем, что сценарий SSP1-2.6 не предполагает значительных изменений температуры воздуха и количества выпадающих осадков. При сценарии SSP2-4.5 данные модели INM-CM5 показывают уменьшение числа дней с замерзающими осадками в районе Земли Франца-Иосифа, северной части Новой Земли, а также северной части акватории Карского моря. В первую очередь это связано со значительным ростом температуры приземного слоя и, как следствие, снижением

повторяемости условий, при которых морозящие осадки замерзают при соприкосновении с холодной поверхностью. При сценарии SSP5-8.5 для большей части ЕТР тренды оказались статистически значимыми (рис.4в). При этом на юге России ожидается сокращение числа дней с замерзающими осадками. Это является очередным подтверждением предположения о смещении на север зоны, в пределах которой наблюдаются замерзающие осадки.

По данным климатической модели INM-CM5 было получено среднее годовое число дней с замерзающими осадками для конца XXI века – с 2071 по 2100 г. (рис. 5). Согласно всем используемым в данной работе сценариям (SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5), относительно современного периода на большей части ЕТР ожидается увеличение среднего числа дней с замерзающими осадками.

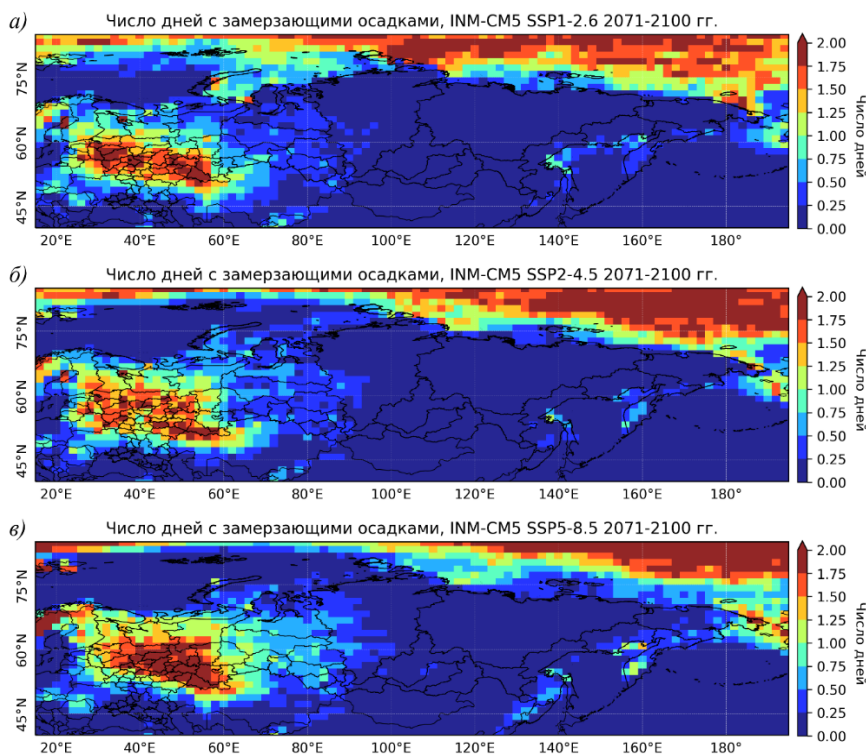


Рис. 5. Среднее годовое число дней с замерзающими осадками за период с 2071 по 2100 г. по данным климатической модели INM-CM5 для сценариев SSP1-2.6 (а); SSP2-4.5 (б); SSP5-8.5 (в).

Fig. 5. Average annual number of days with freezing precipitation for the period 2071–2100 according to the INM-CM5 climate model for scenarios SSP1-2.6 (a); SSP2-4.5 (б); SSP5-8.5 (в).

Отметим некоторые особенности рассматриваемого периода по сравнению с периодом осреднения с 2015 по 2100 г. При сценариях SSP2-4.5 и SSP5-8.5 к концу XXI века ожидается более высокая повторяемость замерзающих осадков на территории Поволжья и юге Урала, где ранее это явление было редким [8]. Также сценарий SSP5-8.5 указывает на существенное увеличение повторяемости на территории Западной Сибири. При рассмотрении сценария SSP5-8.5 можно отметить увеличение числа дней с замерзающими осадками на территории полуострова Камчатка, а также на территории Хабаровского и Приморского краев. Такой прогноз указывает на высокую вероятность формирования ледяных штормов, подобных эпизоду, произошедшему в ноябре 2020 года [5, 9].

Для наибольшей наглядности прогнозируемых изменений рассчитана разность среднего годового числа дней с замерзающими осадками между периодами 2071–2100 и 1979–2014 гг. для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5 (рис. 6).

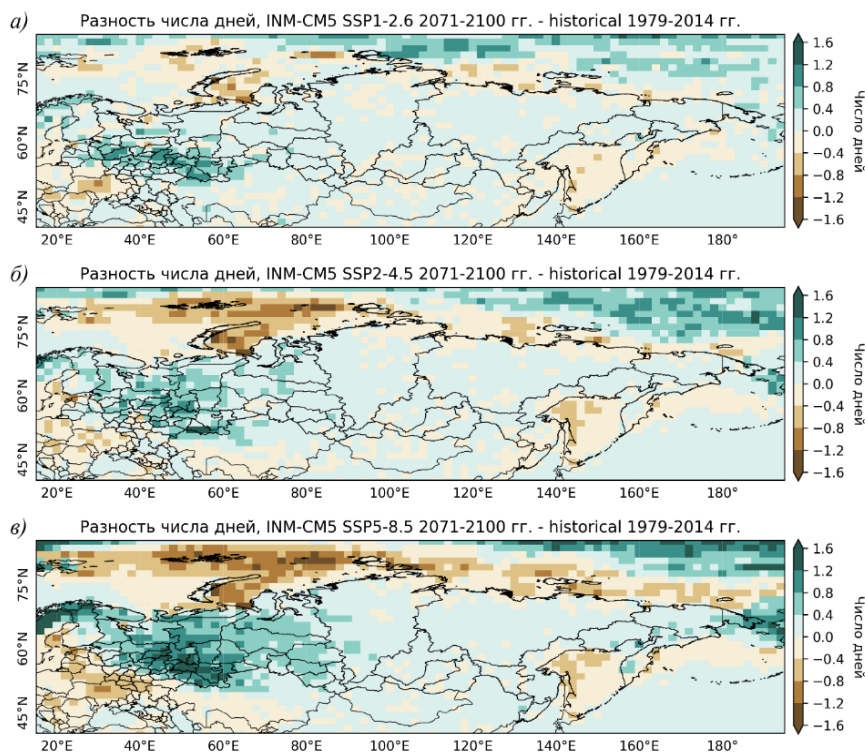


Рис. 6. Разность среднего годового числа дней с замерзающими осадками за период с 2071 по 2100 г. и за период с 1979–2014 г. по данным климатической модели INM-CM5 для сценариев SSP1-2.6 (а); SSP2-4.5 (б); SSP5-8.5 (в).

Fig. 6. Difference in the average annual number of days with freezing precipitation between the periods 2071–2100 and 1979–2014 according to the INM-CM5 climate model for scenarios SSP1-2.6 (a); SSP2-4.5 (б); and SSP5-8.5 (в).

Основные черты пространственных изменений схожи для всех рассмотренных сценариев. При сценарии SSP5-8.5 наибольшее сокращение числа дней с замерзающими осадками ожидается на юге Центрального федерального округа: в Брянской, Курской, Белгородской и Воронежской областях. Уменьшение числа дней ожидается на территориях, расположенных вблизи Северного Ледовитого океана, особенно сильное (более 1 дня за год) – в районе Карского моря при реализации сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Также уменьшение числа дней ожидается в Охотском море и Сахалинской области (рис. 6в).

Увеличение числа дней с замерзающими осадками ожидается на ЕТР севернее лесостепной зоны. С увеличением радиационного форсинга ожидается расширение области роста числа дней с замерзающими осадками на север и на восток. Так, при сценарии SSP5-8.5 ожидаются существенные различия числа дней на территории севера ЕТР и Западной Сибири. Наибольшая разность числа дней с замерзающими осадками за рассматриваемые периоды ожидается в Приволжском федеральном округе при сценарии SSP5-8.5 и составит более 1,5 дней за год.

Так как в данной статье рассматриваются результаты, которые сильно зависят от принятого критерия количества выпадающих осадков и других параметров модели, то полезно дополнительно рассмотреть относительные изменения повторяемости числа дней с замерзающими осадками на территории России (рис. 7).

Рассмотрим относительное изменение числа дней с замерзающими осадками за период конца XXI века и современного периода. При сценариях SSP2-4.5 и SSP5-8.5 ожидается существенное – более чем в 4 раза сокращение замерзающих осадков на территории прибрежной Арктики и морей Тихого океана. Такое же существенное сокращение ожидается на юге России в степных черноземных регионах. Что касается прогнозируемого увеличения повторяемости, то особенно ярко оно проявляется на территории Западной Сибири, Красноярского края и Чукотского АО, где ожидается увеличение повторяемости более чем в 5 раз.

Обсуждение результатов

В работе представлена первая попытка воспроизведения климатологии замерзающих осадков на территории России в современном и будущем климате на основании данных модели INM-CM5. Результаты климатических прогнозов имеют значимую стохастическую компоненту, в связи с этим в ходе работы рассматривались различные сценарии будущего климата. Для оценки достоверности результатов рассмотрим результаты вычислений по самому жесткому сценарию SSP5-8.5. Данные модели INM-CM5 имеют шаги по времени и пространству, большие по сравнению с некоторыми другими моделями, участвующими в проекте CMIP6, имеющими шаг по времени до 3 часов и шаг горизонтальной сетки менее 1°. Еще большие различия проявляются при сравнении данных модели INM-CM5

с реанализом ERA5 [26], имеющим шаг по времени 1 час и $0,25^\circ$ по пространству. Несмотря на значительно бóльшие шаги сетки используемая модель воспроизводит пространственное распределение замерзающих осадков на территории России подобно реанализу ERA5. Это подтверждает, что данные INM-CM5 можно использовать для оценки климатических рисков, связанных с образованием отложений гололеда.

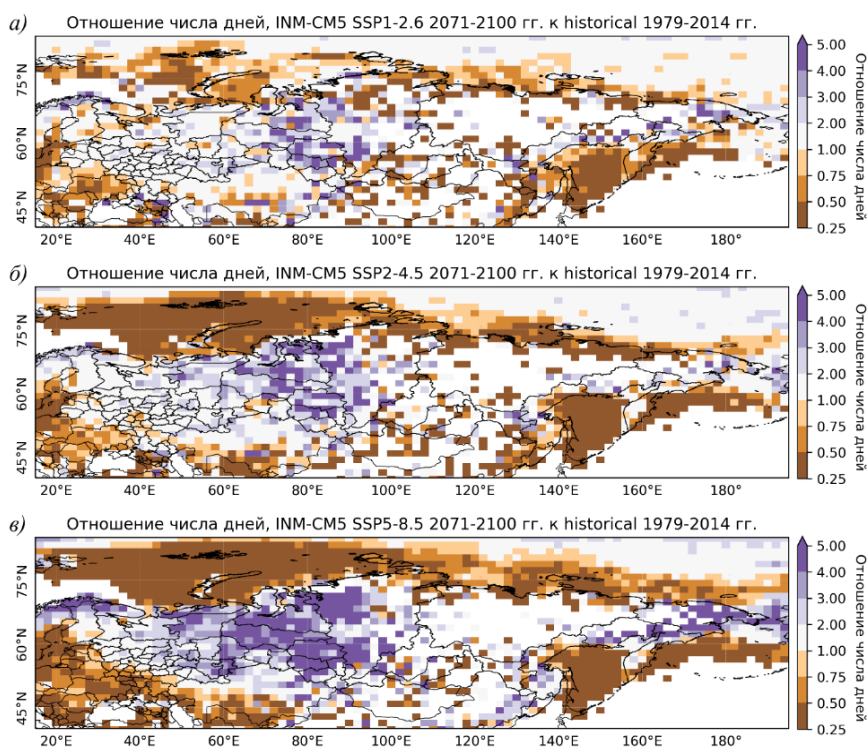


Рис. 7. Отношение среднего годового числа дней с замерзающими осадками за период с 2071 по 2100 г. к периоду с 1979 по 2014 г. по данным климатической модели INM-CM5 для сценариев SSP1-2.6 (а); SSP2-4.5 (б); SSP5-8.5 (в).
Fig. 7. Ratio of the average annual number of days with freezing precipitation for the period 2071–2100 to that for 1979–2014 according to the INM-CM5 climate model for scenarios SSP1-2.6 (a); SSP2-4.5 (б); SSP5-8.5 (в).

Рассмотрим соответствие полученных данных ранее выполненным исследованиям. Учитывая современную величину эмиссии CO_2 , можно сделать вывод о том, что удержание потепления климата в пределах $1,5^\circ\text{C}$ невозможно [25, 31]. В таком случае реализация климатического сценария SSP1-2.6 выглядит крайне маловероятной. В связи с этим, в данной статье основное внимание уделяется результатам работы, полученным для сценария SSP2-4.5 и сценария SSP5-8.5.

В Докладе об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 г. [6] и научной публикации [1] представлены тенденции современных изменений характеристик гололеда на территории России. Отмечается статистически значимое увеличение числа дней с гололедом на территории северо-востока и юго-востока Восточно-Европейской равнины, а также на севере лесной зоны Западной Сибири и на Дальнем Востоке южнее 50° с. ш. в период с 1984 по 2024 г. Отдельные ожидаемые тенденции подтверждаются результатами ранее проведенных региональных исследований. Так, например, ранее было получено увеличение повторяемости числа дней с гололедом на территории Северо-Западного федерального округа в период с 1986 по 2022 г. [13]. Автор используемой в данной статье методики Kämägäinen с коллегами также получили статистически значимый положительный тренд числа дней в северной части ЕТР по данным ансамбля из семи климатических моделей [29]. В целом, данные наблюдений хорошо согласуются друг с другом и показывают тенденцию к смещению на север области наибольшей повторяемости замерзающих осадков и гололеда.

Рассмотрим возможные причины ожидаемых изменений. В первую очередь стоит обратить внимание на изменение количества выпадающих осадков на территории России. В период с 1976 до 2020 г. отмечалось увеличение среднего годового количества осадков на северной части ЕТР и уменьшение осадков на южной части ЕТР [14]. Основной вклад в эти изменения вносили летние осадки, а наиболее важные, с точки зрения формирования гололеда, зимние осадки имели достаточно неоднородную картину изменений. В статьях, посвященных прогнозу изменения количества выпадающих осадков, ожидается увеличение количества осадков в средней полосе и на севере России и уменьшение в степной зоне юга России [22, 35]. Это одна из причин ожидаемых изменений повторяемости замерзающих осадков, так как сумма замерзающих осадков зависит от их общего количества.

Помимо осадков, существенное влияние на формирование замерзающих осадков оказывает термическая структура тропосферы. Причиной сокращения повторяемости замерзающих осадков на юге России может являться уменьшение продолжительности холодного периода. На севере ЕТР, Урале и Западной Сибири, наоборот, потепление приведет к большей повторяемости случаев адвекции теплого и влажного тропического воздуха на выхолаженный континент, что увеличит повторяемость термической структуры тропосферы по типу «теплого носа», приводящей к выпадению замерзающих дождей. Стремительный рост приземной температуры воздуха в Арктике приведет к существенному (в несколько раз) сокращению числа дней с замерзающими осадками и гололедом на побережье Северного Ледовитого океана России вследствие ослабления термического контраста холодной поверхности суши и теплого морского воздуха в переходные сезоны года.

Рассматриваемые в данной статье результаты являются первой попыткой оценить изменение характеристик замерзающих осадков на территории России в XXI веке по данным российской климатической модели INM-CM5. Верификация полученных результатов по данным основных срочных и визуальных наблюдений показала, что климатическую модель INM-CM5 можно использовать для оценки опасных явлений гололеда на территории России. В дальнейшем планируется продолжение исследования опасных явлений на территории России с привлечением данных других климатических моделей с применением ансамблевого подхода.

Заключение

В ходе работы впервые была проведена оценка повторяемости замерзающих осадков в XX и XXI вв. на территории России с использованием данных климатической модели INM-CM5. Для территории России по данным основных срочных наблюдений и визуальных наблюдений за атмосферными явлениями были получены карты среднего числа дней с замерзающими осадками и гололедом для периода с 1979 по 2014 г. Для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5 климатической модели INM-CM5 было получено пространственное распределение среднего числа дней с замерзающими осадками за периоды с 2015 по 2100 г. и с 2071 по 2100 г. Также было получено распределение абсолютных и относительных различий количества дней с замерзающими осадками в период с 2071 по 2100 г. и современного периода 1979–2014 годов.

Сравнение общего количества замерзающих осадков по данным модели INM-CM5 с данными наблюдений за современный период с 1979 по 2014 г. показало, что модель воспроизводит основные черты распределения замерзающих осадков на территории России. При сопоставлении данных INM-CM5 о количестве смоделированных случаев замерзающих осадков с данными наблюдений на 521 метеорологической станции наибольший коэффициент детерминации R^2 составил 0,274 для замерзающих осадков и 0,25 для гололеда. Существенные различия с данными наблюдений и невысокие значения коэффициентов детерминации связаны с тем, что используемый метод выявления замерзающих осадков рассматривает только классический механизм с наличием слоя таяния (стратификации по типу «теплого носа»), из-за чего значительное количество случаев замерзающих осадков, выпадающих в полностью холодной атмосфере, не воспроизводится.

Анализ результатов воспроизведения замерзающих осадков с использованием данных модели INM-CM5 для различных климатических сценариев показал, что наибольшие изменения в характеристиках рассматриваемых явлений ожидаются при использовании сценария SSP5-8.5. Показано, что увеличение повторяемости замерзающих осадков на территории России ожидается на севере ЕТР, Западной Сибири и части Чукотского АО. Наибольшая разность среднего годового чисел дней с замерзающими

осадками в периоды 2071–2100 и 1979–2014 гг. ожидается в Приволжском АО и составит более 1,5 дней. Наибольшее увеличение повторяемости замерзающих осадков ожидается в Западной Сибири и Красноярском крае – более чем в 5 раз, уменьшение – в районах островов и побережий Северного Ледовитого океана, а также Берингова и Охотского морей. Разность к концу XXI века по сравнению с современным периодом составит более 1 дня в году, то есть в отдельных районах увеличится более чем в 5 раз.

Благодарности. Авторы статьи выражают благодарность создателям архива данных расчетов по модели Земной системы ИВМ РАН. 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 authors of the article would like to thank the creators of the INM RAS Earth system model calculation data archive. 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. Аржанова Н.М., Коришнова Н.Н. Мониторинг гололедно-изморозевых отложений на территории России // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2023. № 4 (390). С. 138-153. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-4-138-153 EDN: JVGXPJ
2. 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/basic-parameters/>
3. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Александрова Т.М., Коришнова Н.Н. Описание массива данных по атмосферным явлениям на метеорологических станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных. 2015. №. 2015620081 <http://meteo.ru/data/atmospheric-phenomena/>
4. Володин Е.М., Гришун А.С. Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5 // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2020. Т. 56, № 3. С. 255-266. DOI: 10.31857/S0002351520030128 EDN: PSNSGD
5. 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 EDN: GZAEMK
6. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. М.: Росгидромет, 2025. 104 с.
7. Жилина И.Ю. Потепление в Арктике: возможности и риски // *Экономические и социальные проблемы России*. 2021. № 1 (45). С. 66-87. DOI: 10.31249/espr/2021.01.04 EDN: GSPTRV
8. Калинин Н.А., Смородин Б.Л. Редкое явление замерзающего дождя в Пермском крае // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 8. С. 27-35.
9. 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 EDN: VAKIBW

10. Леонов И.И., Аржанова Н.М. Метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложений на территории России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2023. Т. 9, № 1. С. 107-126. DOI: 10.21513/2410-8758-2023-1-107-126 EDN: EAHNDOT
11. Леонов И.И., Соколичина Н.Н., Лаврентьева А.И. Замерзающие осадки на Европейской территории России в 1979–2022 гг. и их воспроизведение реанализом ERA5 // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2024. № 4. С. 109-127. DOI: 10.37162/2618-9631-2024-4-109-127 EDN: RBVJXC
12. РД 52.04.563-2002. Инструкция «Критерии опасных метеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения».
13. 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. EDN: XOVKCQ
14. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. Росгидромет. СПб.: Научное издание, 2022. 676 с.
15. Филатов Н.Н. и др. Изменения и изменчивость климата европейского Севера России и их влияние на водные объекты // *Арктика: экология и экономика*. 2012. № 2. С. 80-93.
16. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. I. Аэропорты московского аэроузла // *Метеорология и гидрология*. 2003. № 6. С. 40-58.
17. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. II. Аэропорт Минеральные Воды // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 2. С. 27-42.
18. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. и др. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. III. Аэропорт Одесса // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 9. С. 5-18.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. Dai A., Zhao T., Chen J. Climate change and drought: a precipitation and evaporation perspective // *Current Climate Change Reports*. 2018. Vol. 4, no. 3. P. 301-312. DOI: 10.1007/s40641-018-0101-6 EDN: VHOEPU
23. Forbes R. et al. Towards predicting high-impact freezing rain events // *ECMWF Newsletter*. 2014. Vol. 141. P. 15-21.
24. 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 EDN: WWDXZJ
25. Hausfather Z., Peters G. P. Emissions – the 'business as usual' story is misleading // *Nature*. 2020. Vol. 577, no. 772. P. 618-620. DOI: 10.1038/d41586-020-00177-3 EDN: FWEUYR
26. 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 EDN: DKXYTO
27. Jeong D.I., Cannon A.J., Zhang X. Projected changes to extreme freezing precipitation and design ice loads over North America based on a large ensemble of Canadian regional climate model simulations // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2019. Vol. 19, no. 4. P. 857-872. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-2018-395>

28. 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 EDN: YWYNAV
29. Kämäräinen M. 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, no. 23. P. 13291-13304. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018JD029131>
30. Kendall M. Rank correlation measures. London: Charles Griffin, 1975. 202 p.
31. Lamboll R.D. et al. Assessing the size and uncertainty of remaining carbon budgets // *Nature Climate Change*. 2023. Vol. 13, no. 12. P. 1360-1367. DOI: 10.1038/s41558-023-01848-5 EDN: WMTRXM
32. Mann H.B. Nonparametric tests against trend // *Econometrica: Journal of the Econometric Society*. 1945. P. 245-259. DOI: 10.2307/1907187.
33. O'Neill B.C. et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6 // *Geoscientific Model Development*. 2016. Vol. 9, no. 9. P. 3461-3482.
34. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V. et al. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // *Climate Dynamics*. 2017. Vol. 49. P. 3715-3734. DOI: 10.1007/s00382-017-3539-7 EDN: XNCPEA
35. Zhang W. et al. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world // *Science Advances*. 2021. Vol. 7, no. 31. P. eabf8021. DOI: 10.1126/sciadv.abf8021 EDN: VGCQVN
36. Zerr R. J. Freezing rain: An observational and theoretical study // *Journal of Applied Meteorology*. 1997. Vol. 36, no. 12. P. 1647-1661.

References

1. Arzhanova N.M., Korshunova N.N. Monitoring gololedno-izmorzevykh otlozhenii na territorii Rossii [Monitoring of glaze-ice on the territory of Russia]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2023, no. 4(390), pp. 138-153. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-4-138-153 [in Russ.].
2. Bulygina O.N., Veselov V.M., Razuvaev V.N., Alexandrova T.M. Opisaniye massiva srochnykh dannykh ob osnovnykh meteorologicheskikh parametrakh na stantsiyakh Rossii [Description of an array of urgent data on the main meteorological parameters at stations in Russia]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh no. 2014620549. Available at: <http://meteo.ru/data/basic-parameters/> [in Russ.].
3. Bulygina O.N., Veselov V.M., Alexandrova T.M., Korshunova N.N. Opisaniye massiva dannykh po atmosferynym yavleniyam na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii [Description of an array of data on atmospheric phenomena at meteorological stations in Russia]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh, 2015, no. 2015620081. Available at: <http://meteo.ru/data/atmospheric-phenomena/> [in Russ.].
4. Volodin E.M., Gritsun A.S. Simulation of possible future climate changes in the 21st century in the INM-CM5 climate model. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, vol. 56, no. 3, pp. 218-228. DOI: 10.1134/S0001433820030123.
5. Gurvich I.A. et al. Ledyanoi shtorm v Primor'e 18-19 noyabrya 2020 goda [Ice storm in Primorye on November 18–19, 2020]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of 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.].
6. Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2024 god [Report on climate features in the Russian Federation for 2024]. Moscow, Rosgidromet, 2025, 104 p. [in Russ.].
7. Zhilina I.Yu. Potepleniye v Arktike: vozmozhnosti i riski [Warming in the Arctic: opportunities and risks]. *Ekonomicheskie i sotsial'nyye problemy Rossii [Economic and social problems of Russia]*, 2021, no. 1 (45), pp. 66-87. DOI: 10.31249/espr/2021.01.04 [in Russ.].
8. Kalinin N.A., Smorodin B.L. Redkoe yavlenie zamerzayushchego dozhdyia v Permskom krae [Unusual phenomenon of freezing rain in Perm Krai]. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, no. 8, pp. 521-528. DOI: doi.org/10.3103/S1068373912080031

9. Leonov I.I., Sokolikhina N.N. Usloviya formirovaniya ledyanogo shtorma vo Vladivostoke v noyabre 2020 goda [Formation conditions of an ice storm in Vladivostok in November 2020]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy Hydrometeorological Research and Forecasting*, 2021, no. 4(382), pp. 69-83. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-4-69-83 [in Russ.].

10. Leonov I.I., Arzhanova N.M. Meteorologicheskie usloviya obrazovaniya gololedno-izmorzevykh otlozhenii na territorii Rossii [Meteorological conditions for the formation of ice accretions in Russia]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and Applied Climatology]*, 2023, vol. 9, no. 1, pp. 107-126. DOI: 10.21513/2410-8758-2023-1-107-126 [in Russ.].

11. Leonov I.I., Sokolikhina N.N., Lavrenteva A.I. Zamerzayushchie osadki na Evropeiskoi territorii Rossii v 1979-2022 gg. i ikh vosproizvedenie reanalizom ERA5 [Freezing precipitation in European Russia in 1979-2022 and its reproduction by the ERA5 reanalysis]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, no. 4, pp. 109-127. DOI: 10.37162/2618-9631-2024-4-109-127 [in Russ.].

12. RD 52.04.563-2002. Instruktsiya «Kriterii opasnykh meteorologicheskikh yavlenii i porjadok podachi shtormovogo soobshcheniya» [Guidance document 52.04.563-2002. Instruction "Criteria for hazardous meteorological phenomena and the procedure for submitting a storm message"] [in Russ.].

13. Sarkova G.V., Lavrenteva A.I., Tkacheva E.S. Regional'nye osobennosti povtoryaemosti gololeda na severe evropeiskoi 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.].

14. Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii [The third assessment report on climate change and its consequences in the Russian Federation]. V. M. Kattsov (Ed.). St. Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Publ., 2022, 676 p. [in Russ.].

15. Filatov N.N. et al. Izmeneniya i izmenchivost' klimata evropeiskogo Severa Rossii i ikh vliyaniye na vodnye ob'ekty [Changes and variability of the climate of the European North of Russia and their impact on water bodies]. *Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: Ecology and Economy]*, 2012, no. 2, pp. 80-93 [in Russ.].

16. Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R. Conditions of freezing precipitation at some airports in Russia and the CIS. I. Airports of the Moscow air hub. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2003, no. 6, pp. 28-43.

17. Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R. Usloviya vypadeniya zamerzayushchikh osadkov v nekotorykh aeroportakh Rossii i SNG. II. Aeroport Mineral'nye Vody [Conditions of freezing precipitation at some airports in Russia and the CIS. II. Mineralnye Vody Airport]. *Meteorologiya i gidrologiya [Russian Meteorology and Hydrology]*, 2005, no. 2, pp. 27-42 [in Russ.].

18. Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R. et al. Conditions of freezing precipitation at some airports in Russia and the CIS. III. Odessa Airport. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2005, no. 9, pp. 1-10.

19. Shakina N.P., Skriptunova E.N., Zav'yalova A.A. Conditions of freezing precipitation at some airports in Russia and the CIS. IV. Nizhny Novgorod Airport. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2007, vol. 32, no. 7, pp. 431-440 [in Russ.].

20. Shakina N.P., Khomenko I.A., Ivanova A.R., Skriptunova E.N. Obrazovanie i prognozirovaniye zamerzayushchikh osadkov: obzor literatury i nekotorye novye rezul'taty [Formation and forecasting of freezing precipitation: a literature review and some new results]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiiskoi Federatsii [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation]*, 2012, no. 348, pp. 130-161 [in Russ.].

21. Shakina N.P., Khomenko I.A., Ivanova A.R., Skriptunova E. N. Usloviya obrazovaniya zamerzayushchikh osadkov v evropeiskoi Rossii i katastroficheskii gololed v dekabre 2010 g. [Conditions for the formation of freezing precipitation in European Russia and the catastrophic ice cover in December 2010]. *Turbulentnost', dinamika atmosfery i klimata: Trudy Mezhdunarodnoi*

konferentsii, posvyashchennoi pamyati akademika A. M. Obukhova [Turbulence, atmospheric dynamics and climate: Proceedings of the International Conference dedicated to the memory of Academician A.M. Obukhov]. Moscow, GEOS publ., 2014, pp. 412-423 [in Russ.].

22. Dai A., Zhao T., Chen J. Climate change and drought: a precipitation and evaporation perspective. *Current Climate Change Reports*, 2018, vol. 4, no. 3, pp. 301-312. DOI: 10.1007/s40641-018-0101-6.

23. Forbes R. et al. Towards predicting high-impact freezing rain events. *ECMWF Newsletter*, 2014, vol. 141, pp. 15-21.

24. 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, pp. 045007. DOI: 10.1088/1748-9326/11/4/045007.

25. Hausfather Z., Peters G.P. Emissions – the 'business as usual' story is misleading. *Nature*, 2020, vol. 577, no. 772, pp. 618-620. DOI: 10.1038/d41586-020-00177-3.

26. 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.

27. Jeong D.I., Cannon A.J., Zhang X. Projected changes to extreme freezing precipitation and design ice loads over North America based on a large ensemble of Canadian regional climate model simulations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 857-872. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-2018-395>

28. 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.

29. Kämäräinen M. 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, no. 23, pp. 13291-13304. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018JD029131>

30. Kendall M. Rank correlation measures. London, Charles Griffin, 1975. 202 p.

31. Lamboll R.D. et al. Assessing the size and uncertainty of remaining carbon budgets. *Nature Climate Change*, 2023, vol. 13, no. 12, pp. 1360-1367. DOI: 10.1038/s41558-023-01848-5.

32. Mann H.B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1945, pp. 245-259. DOI: 10.2307/1907187.

33. O'Neill B.C. et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 2016, vol. 9, no. 9, pp. 3461-3482.

34. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V. et al. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5. *Climate Dynamics*, 2017, vol. 49, pp. 3715-3734. DOI: 10.1007/s00382-017-3539-7.

35. Zhang W. et al. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world. *Science Advances*, 2021, vol. 7, no. 31, pp. eabf8021. DOI: 10.1126/sciadv.abf8021.

36. Zerr R.J. Freezing rain: An observational and theoretical study. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, vol. 36, no. 12, pp. 1647-1661.

Поступила 08.11.2025; принята в печать 17.03.2026
Submitted 08.11.2025; accepted for publication 17.03.2026.