

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-44-63>

УДК 551.509

**Анализ условий образования
и особенностей прогнозирования
ледяного дождя и гололёда
в московском регионе**

Т.Г. Дмитриева, Е.В. Васильев

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
tdsin@mecom.ru, syno@inbox.ru*

Рассмотрены условия образования ледяного дождя и гололёда, методы их прогноза, а также представлен анализ отдельных случаев, отмечавшихся в московском регионе в холодные периоды 2023–2024 гг. Проанализированы подходы к оперативному прогнозу этих явлений с имеющимся современным набором информации, в том числе с использованием результатов численного прогноза моделей ICON-Ru, COSMO-Ru2.2 и COSMO-Ru6 с высоким пространственно-временным разрешением. Предложены рекомендации оперативным синоптикам и алгоритм прогноза гололёдных явлений на период до 3 суток на примере московского мегаполиса.

Ключевые слова: прогноз ледяного дождя и гололёда, московский мегаполис, холодный период года, продукция численных моделей с высоким пространственно-временным разрешением

**Analysis of formation environments
and prediction features of freezing rain
and glaze in the Moscow region**

T.G. Dmitrieva, E.V. Vasil'ev

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
tdsin@mecom.ru, syno@inbox.ru*

Formation environments of freezing rain and glaze, methods for their forecasting are considered. The analysis of the cases of these phenomena observed in the Moscow region in the cold seasons of 2023–2024 is performed. Approaches to operational forecasting of the events using the available modern set of information, in particular, the results of the high-resolution ICON-Ru, COSMO-Ru2.2, and COSMO-Ru6 numerical weather prediction models are analyzed. Recommendations for operational forecasters and an algorithm for forecasting freezing rain and glaze for a period up to 3 days are proposed by the example of the Moscow region.

Keywords: forecast of freezing rain and glaze, Moscow, cold season, products of high-resolution numerical weather prediction models

Введение

Ледяной дождь – это один из видов переохлажденных, замерзающих осадков, выпадающих на поверхность Земли [4, 6], часто приводит к образованию гололёда. Гололёд, согласно [4, 6, 7, 10], относится к гололёдно-изморозевым отложениям, т. е. к твердым осадкам, образующимся на поверхности земли и на предметах. Эти аномальные природные явления создают угрозу нормальному функционированию некоторых отраслей народного хозяйства и транспортно-логистической системы в первую очередь мегаполисов. Осадки в виде ледяного дождя оказывают негативное влияние на растительность, электросети, транспорт и инфраструктуру, опасны для жизнедеятельности и здоровья граждан. По требованию Правительства Москвы ледяной дождь включен в перечень опасных гидрометеорологических явлений для мегаполиса.

В публикации 2012 года [11] дан подробный обзор состояния знаний о механизмах и условиях образования и выпадения переохлажденных осадков за 10-летний период, алгоритмах их прогнозирования. Приведены алгоритмы распознавания типа осадков с точки зрения моделирования. Проанализирован случай интенсивного гололёда на Европейской территории России 25–26 декабря 2010 года для выявления механизмов образования замерзающих осадков.

Ниже приведен краткий обзор зарубежных публикаций по проблеме прогноза ледяного дождя и гололёда.

Краткий обзор зарубежных публикаций по проблеме прогноза ледяного дождя и гололёда

Случаи ледяного дождя и гололёда в холодный и переходные периоды года, помимо центра и юга Европейской территории России, наиболее распространены в Северной Европе и особенно в Северной Америке (Канада, север США). Например, в США ледяной дождь отмечается в 24 % случаев всех зимних явлений погоды [13]. Соответственно, наиболее активные исследования проблемы образования и прогноза гололёдных явлений проводились в этой стране [14–18].

Следует отметить, что в настоящее время на территории США, помимо сети традиционных синоптических контактных наблюдений, усилиями NOAA организована дополнительная плотная сеть автоматических метеостанций, оснащенная несколькими сотнями автоматических датчиков гололёда (обледенения), которые проводят наблюдения в 5-минутном режиме и позволяют получить различные параметры гололёдно-изморозевых отложений: толщину отложений на приподнятой горизонтальной поверхности, эквивалентную радиальную толщину на приподнятой поверхности, эквивалентную диаметральную толщину льда на приподнятой поверхности, толщину льда на горизонтальной поверхности Земли [13]. Благодаря

развитой сети наблюдений за гололёдом, США обладает огромным потенциалом по изучению условий его возникновения и прогнозу.

Существуют различные методики прогноза ледяного дождя (в том числе вероятностные для различных градаций сумм осадков), толщины гололёдно-изморозевых отложений (на основе традиционных метеорологических параметров, измеряемых на наблюдательных сетях) [13–15, 18]. В различных регионах проводятся исследования случаев ледяного дождя и гололёда, связанных с различными воздушными массами, синоптическими ситуациями, характеристиками ветра и температуры [13]. Проводятся также исследования по определению характерных для случаев ледяного дождя и гололёда параметров: минимальной температуры и толщины холодного приземного слоя, максимальной температуры и толщины теплого слоя, в котором происходит таяние гидрометеоров перед попаданием в холодный приземный слой, характеристик устойчивости над инверсией, скорости и направления ветра у поверхности Земли на поверхностях 850 и 700 гПа [13, 18]. В [16, 17] приводятся типичные диапазоны изменения упомянутых параметров и их пороговые значения для определения типов осадков. В каждом алгоритме учитываются определенные градации и составляются вероятностные прогнозы.

В целом, система прогноза переохлажденных осадков/гололёда в зарубежных странах включает:

1. Прогноз необходимых параметров по численной модели атмосферы (выбранные наборы предикторов для разных исследований): количество и интенсивность осадков, скорость ветра, вертикальный профиль температуры воздуха и температуры точки росы и др.

2. Алгоритм определения типа осадков (например, по ледности, т. е. содержанию ледяной фракции).

3. Модель нарастания льда (определение толщины гололёдных отложений: например, на основе данных о плотности воды и льда, водности, скорости ветра, температуре точки росы и др.).

Алгоритмы для пунктов 2 и 3 обычно получают эмпирико-статистическим путем на основе анализа рядов наблюдений за переохлажденными осадками/гололёдом в рассматриваемых регионах.

Отечественные методы прогноза гололёдных явлений

В 60–70-х гг. XX в. в СССР были созданы следующие методы прогноза гололёдных явлений:

– метод Р.А. Ягудина [10, 12], основанный на сочетании прогнозируемой температуры воздуха у поверхности Земли и высоты нулевой изотермы и использующий графические номограммы для прогноза гололёда и его интенсивности. Это наиболее распространенный до сих пор синоптический метод;

– метод обобщенного портрета для численного прогноза гололёда (авторы – А.Н. Багров, А.И. Снитковский) [1], основанный на предикторах: температура воздуха у поверхности Земли, температура воздуха на уровне 850 гПа, суммарный дефицит точки росы у поверхности Земли и на уровне 850 гПа, лапласиан температуры воздуха на уровне 850 гПа, скорость ветра у поверхности Земли, разность скорости ветра у поверхности Земли и на уровне 850 гПа (по аэрологической диаграмме и картам погоды). В настоящее время метод не используется в оперативной практике;

– метод обобщенного портрета В.Н. Ванника (АН СССР) [5], суть которого состоит в том, что из множества метеорологических элементов погоды можно составить вектор-предиктор в n -мерном евклидовом пространстве. Задача прогноза гололёда заключается в разделении множества векторов-предикторов на два класса (присутствия и отсутствия гололёда), разделение производится с помощью гиперплоскости, метод реализуется для ЭВМ; зависит от точности численных прогнозов полей давления, температуры и влажности воздуха; наибольшее внимание уделяется прогнозу гололёда при температуре воздуха у поверхности Земли от -7 до $+4$ °С. Метод в настоящее время не используется в оперативной практике.

Не получили пока широкого применения в оперативной практике современные методы:

1) Метод автоматизированного прогноза гололёдных явлений СИБНИГМИ [2, 8]:

– цель – вероятностная оценка наличия/отсутствия необходимых условий образования гололёда;

– основа – ЧПП в оперативном режиме по модели COSMO с шагом сетки 13,2 км и выходные поля глобальной модели GFS (NCEP) $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, скачиваемые по ftp-протоколу;

– оперативные выборки строятся для каждой метеостанции (МС);

– значения параметров выбираются в ближайших узлах сетки;

– для определения явления гололёда выбираются значения толщины гололёдного отложения и явления погоды, образующие гололёд;

– всего 39 предикторов (температура поверхности почвы, осадки, температура воздуха у поверхности Земли, температура точки росы, дефицит точки росы, температура смоченного термометра, давление, уровни – поверхность Земли, 950, 925, 850, 500 гПа);

– предиктанты – морось, замерзающий дождь, образующие гололёд; дождь со снегом; морось с дождем;

– разработана дополнительная типизация гололёда и гололедицы по условиям их образования (9 типов);

– используются данные в коде КН-01 для 430 МС за 5 лет.

Метод сложно использовать на практике, так как его оперативные испытания показали большое количество ложных тревог и не очень высокую предупредительность (63–66 %). Кроме того, он требует сложной программной реализации и автоматизации процесса. Метод не внедрен в оперативную практику подразделений Росгидромета.

2) *Прогноз гололёдных явлений и максимальной толщины гололёдных отложений* (авторы – Р.Ю. Игнатов, К.Г. Рубинштейн, Ю.И. Юсупов) [3, 9]:

– использована выходная продукция модели WRF-ARW (шаг сетки 12 км, 31 вертикальная сигма-поверхность) для различных регионов России;

– возможность численного прогноза факта возникновения гололёда по результатам анализа концентрации гидрометеоров в нижней тропосфере – факт отсутствия/наличия;

– прогноз максимальной толщины гололёдных отложений более сложен, чем альтернативный прогноз явления;

– расчетные данные: по анализу типа осадков и приземной температуры рассчитано образование наледи с помощью видоизмененной схемы Рамера.

Метод не внедрен в оперативную практику Росгидромета.

Анализ условий образования гололёдных явлений на примере московского региона в холодные сезоны 2023–2024 гг.

Известно, что гололёд бывает фронтальным и внутримассовым в зависимости от места расположения зоны гололёда относительно связанных с ним барических образований и активных фронтальных разделов [10]. Внутримассовый гололёд образуется в теплых секторах циклонов или на западной и северной периферии стационарных антициклонов с морозящими осадками, а также в результате оседания капель адвективного тумана [10]. Фронтальный гололёд образуется в зоне теплых фронтов и у вершины теплого сектора активного циклона. Подробно классические описания необходимых и благоприятных условий образования гололёда описаны в [10].

Условиями возникновения гололёда являются:

1. Переохлажденный дождь, морось, туман или низкая слоистая облачность в различном их сочетании.

2. Мощные слои инверсии в пограничном слое атмосферы.

3. Температура воздуха у поверхности Земли от -3 до $+0,5$ °C, на уровне 850 гПа от -5 до $+5$ °C.

4. Температура воздуха на нижней границе первого от поверхности Земли слоя инверсии от -8 до $-0,5$ °C.

5. Суммарный дефицит точки росы в слое от поверхности Земли до 850 гПа $3-5$ °C и менее.

6. Очаг теплого воздуха на поверхности 850 гПа.

7. Умеренные и сильные ветры в пограничном слое атмосферы.

Проведенный анализ случаев ледяного дождя и гололёда в московском регионе в зимние сезоны 2023–2024 гг. показал, что можно расширить градацию вероятной температуры воздуха у поверхности Земли при гололёдообразовании в п. 3, а именно: от $-7,1$ до $+0,6$ °C, в отдельных случаях

в центре Москвы до 2 °С. Остальные условия возникновения явлений в целом остаются без изменений: ледяные дожди и гололёды отмечались при наличии мощных слоев инверсии в пограничном слое атмосферы (п. 2), очагов теплого влажного воздуха на карте АТ-850 (температура в некоторых случаях поднималась до 6 °С) с низкими дефицитами точки росы (пп. 5–6), умеренных и сильных ветров в пограничном слое атмосферы (в основном в пределах 8–15 м/с, п. 7).

В п. 4 также можно расширить градацию температуры воздуха по нижнему пределу, однако с точки зрения оперативного прогноза этот пункт можно считать не очень показательным, так как само наличие слоев инверсии в пограничном слое атмосферы в передней части циклонов при адвекции тепла уже повышает вероятность образования гололёдных отложений. Имеется ввиду, что, например, прогностический зонд по модели UKMO доступен синоптикам по основным параметрам только на стандартных изобарических поверхностях без учета особых точек, соответственно, не все слои инверсии температуры воздуха могут быть представлены. Более подробно распределение основных параметров атмосферы со всеми слоями инверсии и изотермии температуры воздуха в пограничном слое атмосферы лучше рассчитывается по прогностическим численным моделям с высоким пространственно-временным разрешением (COSMO-Ru с шагом сетки 2 и 6 км) и представляется на диаграммах с результатами расчетов (сайт <https://special.meteoinfo.ru/unit/moskva/prognozy/multimodelnyj-prognoz/aerologicheskie-diagrammy>).

В табл. 1 приведены 40 случаев ледяного дождя и гололёда по московскому региону, перечислены по месяцам случаи данных явлений и сопутствующие им параметры атмосферы (температура воздуха у поверхности Земли и на поверхности 850 гПа, скорость ветра на высоте 10 м и в пограничном слое трения (на высотах ~600–1500 м), а также соответствующая синоптическая обстановка у поверхности Земли.

Анализ табл. 1 показывает, что холодные сезоны 2023 и 2024 гг. практически не отличались между собой по количеству случаев гололедных явлений в московском регионе (18 и 22 случая соответственно), но отличались месяцы с их наибольшим количеством. Для холодного сезона 2023 г. наибольшее количество случаев (10) отмечалось в январе, причем сильные морозы (-27...-20 °С) наблюдались только в первой декаде месяца, а вторая и третья декады были подвержены преимущественно влиянию активной циклонической деятельности, при которой гололёды наблюдались на теплых атмосферных фронтах и фронтах окклюзии с колебаниями температуры воздуха от -5 до +1 °С, что благоприятно для образования гололёдных отложений. Гололёды отмечены также на периферии антициклона, но всего 2 дня.

В холодном сезоне 2024 г., напротив, в январе преобладали низкие температуры воздуха, когда большую половину месяца температурный минимум держался в пределах -20...-15 °С, местами до -31 °С. Потеплело только в третьей декаде января, сохранив зимнее тепло, приносимое атлантическими и средиземноморскими циклонами вместе с ледяными дождями

и гололёдами в первой и третьей декаде февраля. Однако максимум данных явлений пришелся на конец года – «теплый» декабрь, когда было отмечено 14 случаев, 6 из которых наблюдались на периферии антициклона.

Таблица 1. Случаи ледяного дождя и гололёда с соответствующими данными наземных метеостанций и радиозондирования на уровне 850 гПа в холодные периоды 2023–2024 гг.

Table 1. The cases of freezing rain and glaze with the corresponding data of ground-based weather stations and 850 hPa radiosonde data in the cold season of 2023–2024

Дата	T _з , °C	T ₈₅₀ , °C	V _з , м/с	V ₈₅₀ , м/с	Синоптическая ситуация у поверхности Земли
Январь 2023 г. (10 дней)					
03.01 \triangle	-0.9 ÷ -0.1	-0.7	0–4	6–20	ТС, ЮЗ передняя часть ложбины
14.01 \triangle	-3.3 ÷ -2.3	-2.3 ÷ -1.1	1–6/10	7–13	ТС, ЮВ передняя часть ложбины
16.01	-4.6 ÷ -3.5	-7.1	3–6/11	14–19	ЮВ передняя часть ложбины, ФО
17.01	-3.5 ÷ -3.4	-8.7	2–7/10	8–14	ЮВ передняя часть ложбины, ТФ
19.01 \triangle	-3.2 ÷ -0.4	0.8	3–4	20–30	ЮВ передняя часть ложбины, ТФ средиземноморского Ц
26.01	-5.0 ÷ -1.9	0.8	1–6/10	10–14	ЮЗ периферия АЦ
27.01	-4.6 ÷ -2.5	-3.7	1–6/10	11–15	ЮЗ периферия АЦ
28.01	-3.9 ÷ -1.3	-8.7	0–5	1–7	СВ передняя часть южного Ц
29.01	-3.5	-11.7	3	5–10	СВ передняя часть южного Ц
30.01	-3.3 ÷ -3.2	-10.7	2-6	5–10	СВ часть южного Ц, ФО
Февраль 2023 г. (2 дня)					
09.02	-3.8 ÷ -2.2	-9.1	1-3	4-10	СВ периферия Ац; передняя часть ложбины, ФО
28.02	-3.5 ÷ -1.9	-5.9	7–15	12–20	ЮЗ передняя часть ложбины, ФО
Март 2023 г. (1 день)					
12.03 \triangle	-2.1 ÷ -1.4	2.0	7–12	13–25	ТС, ЮВ передняя часть ложбины, ТФ
Октябрь 2023 г. (3 дня)					
28.10	-1.7 ÷ -0.1	-2.5 ÷ + 0.8	2–6/10	2–9	ТС южного Ц, ТФ, ФО
29.10	-1.2 ÷ -0.3	-3.1	3–5/10	8–9	ЮЗ часть южного Ц, ФО
30.10	-1.7 ÷ -0.2	-5.5	3–5	1–5	ЮВ передняя часть ложбины, ТФ
Ноябрь 2023 г. (1 день)					
27.11 \triangle	-2.1 ÷ +0.6	-6.1	2–3, 8–13	9–18	ТФ южного Ц
Декабрь 2023 г. (1 день)					
18.12	-0.5 ÷ +2.0	-5.7	2	10–13	передняя часть ложбины ФО
Январь 2024 г. (1 день)					
24.01	-0.4 ÷ -0.1	-6.9	4–6	8–15	передняя часть ложбины, ФО

Февраль 2024 г. (6 дней)					
01.02 \triangle	-1.3 ÷ -1.1	0.4	4–6	6–9	передняя часть ложбины, ФО
12.02 \triangle	-7.1 ÷ -1.7	-1.7 ÷ 0.0	4–5	3–6	передняя часть ложбины, ТФ
13.02 \triangle	-5.3 ÷ -4.6	-1.7	5–7	5–10	передняя часть ложбины, ТФ
25.02 \triangle	-1.0 ÷ 0.0	-1.5	4–10	10–21	ЮЗ периферия АЦ, ТФ средиземноморского Ц
26.02 \triangle	-2.0 ÷ -0.6	0.6	1–7	5–17	ЮЗ периферия АЦ, ТФ средиземноморского Ц
27.02	-3.7	1.8	3	8–13	ЮЗ периферия АЦ, ТФ средиземноморского Ц
Ноябрь 2024 г. (1 день)					
24.11	-4.0 ÷ 0.0	-7.9	0-5	10–12	Ю часть ложбины
Декабрь 2024 г. (14 дней)					
3.12	-1.0 ÷ 0.0	1.4 ÷ 2.2	4–7	5–15	ЮЗ периферия АЦ
4.12	-1.4 ÷ 0.0	-4.3	0–5, 10–12	4–8	ЮЗ периферия АЦ
6.12	-6.0	-8.1	4–7	7–15	ЮЗ периферия АЦ
8.12 \triangle	-5.0 ÷ -1.0	-2.1	2–7	6–12	ЮЗ периферия АЦ
9.12 \triangle	-3.0 ÷ 0.0	-1.5	0–5	6–8	ЮЗ периферия АЦ
15.12	-5.0 ÷ -4.0	-9.7 ÷ -6.7	0–7	8–12	передняя часть ложбины, ТФ
19.12 \triangle	-7.1 ÷ -5.0	-5.3	1–8	6–13	передняя часть ложбины, ТФ
20.12	-6.2 ÷ -0.6	-1.1	2–5	6–12	передняя часть ложбины, ТФ
23.12	-3.0 ÷ -2.0	-1.3	1–2	6–8	ФО южного Ц
26.12	-1.0 ÷ 0.0	-5.3 ÷ +3.2	3–4	4–8	передняя часть ложбины, ФО
27.12	0.0	-1.3 ÷ 6.2	2–3	3–8, 8–12	передняя часть ложбины, ТФ
28.12	0.0	-6.3	1–2	3–5	СВ периферия АЦ
29.12	-1.3 ÷ 0.0	-2.3	3-6	5–9	передняя часть ложбины, ФО
30.12	-1.0 ÷ 0.0	1.0	2–7, 10–11	14–17	передняя часть ложбины, ТС

Примечание. \triangle – ледяной дождь в московском регионе; ФО – фронт окклюзии; ТФ – теплый фронт; Ц – циклон; АЦ – антициклон; ТС – теплый сектор циклона; T_3 – температура воздуха у поверхности Земли, °С; T_{850} – температура воздуха на поверхности 850 гПа, °С; V_3 – скорость ветра у поверхности Земли с учетом данных аэропортов, м/с; V_{850} – скорость ветра в приземном слое трения (от уровня 925 гПа до 850 гПа, м/с); если в графах T_{850} и V_{850} указаны градации, значит, рассматриваются случаи ледяного дождя и гололёда за ночь и день с учетом температуры на уровне 850 гПа и ветра в слое трения за срок зондирования 03 и 15 ч МСК.

Можно выделить (см. табл. 1) наиболее благоприятные для гололёдообразования приземные температуры воздуха по московскому региону: преобладающую градацию для самого московского мегаполиса от -3 до 0 °С (в табл. 1 не приводится разделение температур для московского мегаполиса и Московской области) и более расширенную по нижнему пределу градацию температур для области -7...-5 °С. Значения температуры

в пограничном слое атмосферы (до 1,5 км) при этом могут изменяться в широком диапазоне $-12...+6$ °С при наличии мощных слоев инверсии, начинающихся преимущественно от высоты поверхностей 950–925 гПа (~600–800 м). Градация преобладающего приземного ветра составляет 2–7 м/с, иногда с порывами до 10–11 м/с, причем для московских аэропортов случаи ледяного дождя и гололёда зачастую наблюдались при повышенном (относительно городского мегаполиса) фоне ветра с порывами до 13 м/с. В пограничном слое атмосферы процессы гололёдообразования также могут наблюдаться при большом разнообразии значений скорости ветра: от совсем слабого (1–4 м/с) до сильного, характерного для струйного течения нижних уровней (25–30 м/с), однако эти случаи все-таки достаточно редки (согласно табл. 1 – всего 2 случая за холодный период 2023 года).

Анализ данных фактических случаев ледяного дождя и гололёда в московском регионе позволяет выделить некоторые тенденции и набор необходимых параметров, присущих как всем случаям этих явлений, так и конкретно случаям ледяного дождя, а также наиболее характерные отличия, способные дать синоптику понимание в вопросе прогноза именно ледяного дождя, который для московского мегаполиса внесен в категорию опасного явления (ОЯ).

При этом стоит отметить, что случаи ледяного дождя за холодные периоды 2023–2024 гг. были незначительными и несопоставимыми по интенсивности и причиненному ущербу с явлением ледяного дождя, наблюдавшимся 25–26.12.2010. Тогда слой намерзшего льда достигал 2,5 см. Были повалены или погибли около 50 тысяч деревьев, произошли аварийные отключения электроэнергии. Анализ аэрологической диаграммы показал наличие мощного слоя тепла на высоте около 600 м протяженностью около 1000 м с максимальной температурой до 3,6 °С, тогда как приземная температура воздуха составляла -4.5 °С. Снежинки на высоте, попадая в теплый слой воздуха, таяли, а достигнув поверхности Земли – замерзали, образуя корку льда на всех поверхностях, деревьях, проводах и т. п. Причиной этого катастрофического явления явился выход на Европейскую территорию России обширной средиземноморской депрессии с двойной системой теплых атмосферных фронтов и последующим похолоданием.

Интересно сравнить случай сильного ледяного дождя 25–26.12.2010 (случай 1) с ситуацией 27.12.2024 (случай 2), когда по московскому региону отмечались только гололёды, хотя ситуация в нижней тропосфере при распределении температуры воздуха, влажности и ветра по высотам могла привести к выпадению и ледяного дождя. В табл. 2 приведено сравнение этих двух случаев.

На первый взгляд, в случае 2 максимальная температура воздуха в слое инверсии была выше (6.2 °С), чем в случае 1 (3,6 °С), однако при сравнении других показателей становятся понятными условия, благоприятные для

выпадения сильного ледяного дождя и наблюдавшиеся в случае 1, включая:

- наличие очень мощного слоя инверсии температуры (около 1000 м);
- значительная отрицательная температура воздуха у поверхности Земли ($-4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- высокая влажность в самом слое инверсии (т. е. наличие теплого и влажного воздуха в непосредственной близости от поверхности Земли);
- инверсия температуры воздуха, начинавшаяся с высоты порядка 500 м, а затем – резкий переход к отрицательным температурам воздуха до поверхности Земли (т. е. в данном слое происходило таяние снега и резкое замерзание внешней оболочки образовавшихся капель воды с сохранением жидкого состояния внутри ядра капли, которая по достижении какой-либо поверхности разбивалась и образовывала ледяную корку);
- слабый ветер у земли и в приземном слое трения, что являлось дополнительным благоприятным фактором;
- высота нижнего слоя инверсии, располагавшаяся близко от поверхности Земли (от ~ 500 м).

Таблица 2. Сравнительные характеристики вертикального распределения параметров атмосферы по данным радиозондирования за 15 ч МСК 25.12.2010 и за 03 ч МСК 27.12.2024

Table 2. The comparative characteristics of the vertical distribution of the atmospheric parameters according to the radiosonde data for 15:00 Moscow time on December 25, 2010 and 03:00 on December 27, 2024

Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$		ΔH , м	$\text{H}_{\text{инв}}$, м	Относительная влажность, %		Скорость ветра, м/с	
T_z	T_c			P_z	P_c	V_z	V_c
25.12.2010 (случай 1)							
-4.5	3.6	980	~ 500	79	84-85	1	6-9
27.12.2024 (случай 2)							
0.2	6.2	769	~ 850	84	36-92	3	10-11

Примечание. T_z , P_z , V_z – значения параметров у поверхности Земли; T_c , P_c , V_c – значения параметров в слое от 928 до 841 гПа; ΔH – мощность слоя инверсии и изотермии; $\text{H}_{\text{инв}}$ – высота нижнего слоя инверсии.

В случае 2 слой инверсии при более высокой температуре начинался выше от поверхности Земли, в нем преобладал сухой воздух, а наиболее значимым отличием являлась положительная температура воздуха у поверхности Земли, не способствующая сильному намерзанию переохлажденных капель.

Соответственно, анализ фактической приземной информации МС и данных радиозондирования для случаев ледяного дождя позволил выделить наличие следующих необходимых условий для прогноза явления:

1. Температура воздуха у поверхности Земли в диапазоне $-6\dots-2$ °С, а в пределах «старого» города – 0 °С, т. е. с повышением верхнего предела градации на $2-3$ °С, особенно для МС, находящихся в центре города; а на окраине московского региона был отмечен случай и при $+1$ °С (24.02.2024 на МС Дмитров). Возможно, что иногда отмечаются случаи неправильного определения явления «ледяной дождь», который наблюдатели на метеостанциях путают с «ледяной крупой». Ледяная крупа имеет другую природу возникновения [4, 6], главное в которой – выпадение ледяных прозрачных крупинок с непрозрачным ядром (которые трудно раздавить) из кучево-дождевых облаков. Обычно это происходит в переходный период (весной и осенью).

2. Наличие мощного (не менее 700 м) влажного слоя теплого воздуха с положительной температурой в нижней тропосфере, начинающегося с высоты не ниже 600 м и переходящего в слой холодного воздуха с отрицательной температурой до самой поверхности Земли.

Заметим, что для возникновения явления «гололёд» слабой и умеренной интенсивности достаточно наличия небольших слоев инверсии, иногда нескольких и с отрицательной температурой воздуха в нижнем слое трения. Необходимо отметить, что не всегда при составлении прогноза синоптик может распознать по прогностическим данным о вертикальном распределении температуры воздуха вероятность образования ледяного дождя, так как зачастую имеются погрешности численного расчета (в большинстве случаев до 2 °С, но может быть и более в зависимости от прогнозируемой синоптической ситуации). Поэтому такой анализ прогностической информации достаточно сложен и требует наличия в первом приближении не более, чем за двое-трое суток, необходимой прогностической информации о стратификации температуры по численным моделям с высоким разрешением (например, COSMO-Ru с шагом 2 и 6 км).

Дополнительно в качестве одного из современных наиболее эффективных подходов к прогнозу ледяного дождя и гололёда можно рекомендовать использование продукции Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), представляемой в виде карты фазы осадков и метеограмм, уточняющих ее в вероятностной форме. Опыт использования этой продукции показывает, что даже при незначительной вероятности наличия фазы переохлажденных осадков (порядка $20-30$ %) и небольшой вероятности фазы ледяного дождя (около 10 %) возможно их возникновение в отдельных районах прогнозируемой территории. При этом подобный прогноз гололёда чаще всего подтверждается с заблаговременностью $2-3$ суток. Ситуация при прогнозе ледяного дождя несколько сложнее и требует уточнения как минимум за сутки или 12 ч, а иногда и за несколько часов до прогнозируемого явления, по возможности с использованием данных профиломеров (для московского мегаполиса доступны наблюдения по 6 профиломерам, установленным в различных районах).

Далее предложен алгоритм оперативного прогноза ледяного дождя и гололёда на примере московского региона.

Алгоритм прогноза ледяного дождя и гололёда на период до 3 суток на примере московского региона

Оперативный прогноз ледяного дождя и гололёда по территории ЕТР на сегодняшний день для синоптиков Росгидромета доступен с заблаговременностью до 2–3 суток при наличии расчетов прогностических мезомасштабных численных моделей, представленных в виде прогностического зонда (вертикального распределения прогностических значений температуры и влажности воздуха, направления и скорости ветра), диаграмм (метеограмм) изменения указанных параметров в приземном слое и на поверхностях до 500 гПа, в картографическом виде (карты моделей высокого разрешения Icon-Ru, COSMO-Ru6 и COSMO-Ru2). По картографической продукции моделей ICON-Ru и COSMO-Ru6 предварительная оценка вероятности гололёда может быть сделана с заблаговременностью до 5 суток.

Алгоритм прогноза ледяного дождя и гололёда с учетом фазы осадков можно представить следующим образом:

- оценка синоптического положения, способствующего образованию смешанных фаз осадков и, соответственно, вероятности образования гололёда по прогностическим приземным картам и прогностическому зонду;

- оценка вероятных зон наличия переохлажденных осадков, способствующих образованию гололёда и ледяного дождя по картографической продукции региональных моделей (ICON-Ru13) (рис. 1, слева), в том числе с высоким разрешением COSMO-Ru6 (рис. 1 и 2, справа) и COSMO-Ru2 (рис. 2, слева) согласно приведенной шкале.

Обратим внимание, что примеры на рис. 1 и 2 показывают, как модель с большим разрешением уточняет и конкретизирует более общую информацию моделей меньшего разрешения: COSMO-Ru6 с разрешением 6 км (рис. 1, справа) уменьшает зону смешанных осадков, уточняя ее относительно модели ICON-Ru13 (рис. 1 слева), а COSMO-Ru2 с разрешением 2 км (рис. 2, слева) конкретизирует относительно COSMO-Ru6 вид переохлажденных осадков, показывая зоны замерзающих осадков, образующих гололёд;

- прогноз необходимых параметров по метеограмме численных моделей атмосферы высокого разрешения (COSMO-Ru6 и COSMO-Ru2): количество и интенсивность осадков, горизонтальное распределение температуры воздуха и точки росы в приземном слое, температуры воздуха на поверхности 850 гПа, скорости ветра у поверхности Земли. Дан пример (рис. 3, справа) счета модели COSMO-Ru2 от 00 ч ВСУ 26.10.2024, где по превышению температуры воздуха на уровне 850 гПа над приземной температурой воздуха по графику можно прогнозировать вероятность образования переохлажденной фазы осадков. Вид осадков на метеограмме в синих и зеленых оттенках (по шкале смешанная фаза осадков) подтверждает наличие осадков смешанной фазы. Приземная карта погоды с фронтальным анализом дает характеристику синоптического положения,

способствующего образованию гололёда на теплом атмосферном фронте в обширной его зоне порядка 800 км (рис. 3, слева).

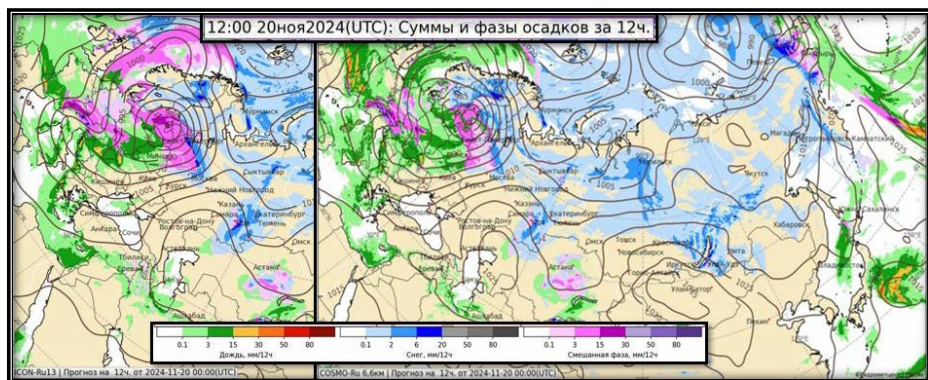


Рис. 1. Фрагменты карт «Суммы и фазы осадков» моделей ICON-Ru13 (слева) и COSMO-Ru6 (справа) от счета 00 ч ВСВ 20.11.2024. Фазы осадков приведены по цветной шкале, сиреневая зона – смешанные осадки.

Fig. 1. The fragments of «Precipitation Totals and Phases» maps of the ICON-Ru13 (left) and COSMO-Ru6 (right) models from 00:00 UTC on February 12, 2024. The precipitation phases are given on the scale, the lilac zone is the probability of freezing precipitation.

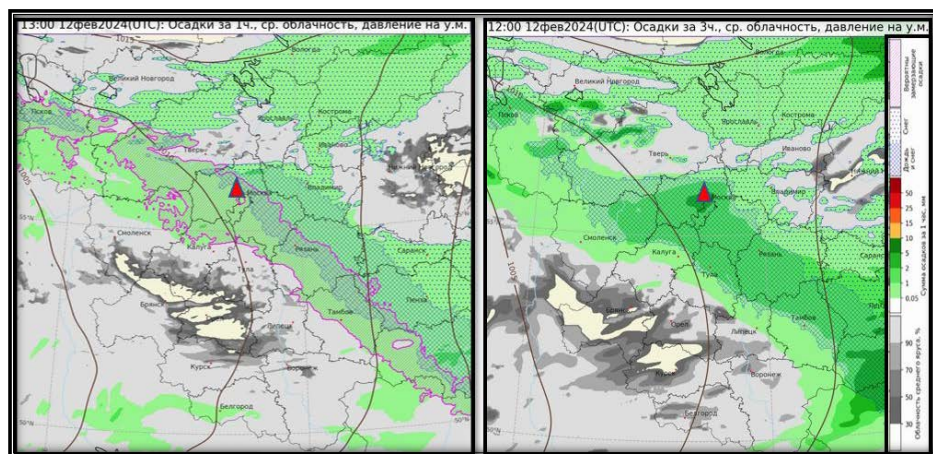


Рис. 2. Фрагменты карт «Осадки, облачность, давление над у.м.» с зонами фаз осадков моделей COSMO-Ru2 (слева) и COSMO-Ru6 (справа) от счета 00 ч ВСВ 12.02.2024. Фазы осадков приведены по шкале, сиреневая зона – вероятность замерзающих осадков.

Fig. 2. The fragments of the «Precipitation, Clouds, Sea-level Pressure» maps with the precipitation phase zones of the COSMO-Ru2 (left) and COSMO-Ru6 (right) models from 00:00 UTC on February 12, 2024. The precipitation phases are given on the scale, the lilac zone is the probability of freezing precipitation.

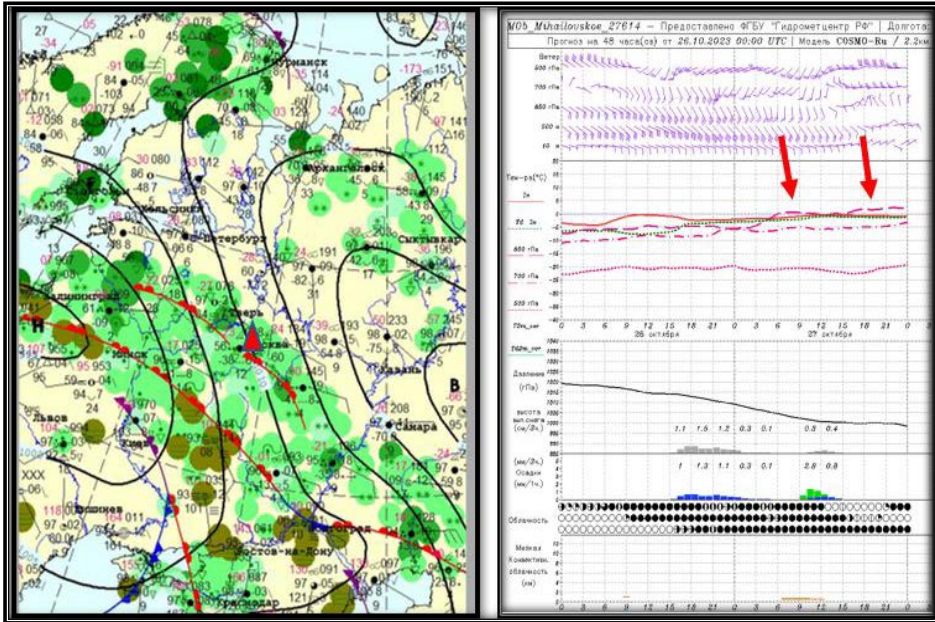


Рис. 3. Пример случая гололёда 27.10.2023: кольцевая карта погоды за 03 ч ВСВ с активным тёплым атмосферным фронтом на ЕТР (слева) и фрагмент метеограммы модели COSMO-Ru2 от счёта 00 ч ВСВ 26.10.2023 с вероятностью образования гололёда в области превышения температуры воздуха на уровне 850 гПа над приземной температурой.

Fig. 3. The case of glaze on October 27, 2023: the weather chart for 03:00 UTC with the active atmospheric front over European Russia (left) and the fragment of the COSMO-Ru2 model meteorogram from 00:00 UTC on October 26, 2023 with the probability of glaze in the zone of exceeding of 850 hPa air temperature over surface air temperature.

Далее рекомендуется переходить к продукции (доступной синоптикам Росгидромета) официальной численной модели ECMWF для прогноза зон с вероятным типом осадков, в том числе образующих ледяной дождь и гололёд, представленной на сайте https://charts.ecmwf.int/products/medium-precipitation-type?base_time=202303240000&projection=opencharts_europe&valid_time=202303251800 в виде карты и метеограммы с расшифровкой типа осадков в вероятностной форме:

1. По карте типов осадков (рис. 4, слева) определяем регион с соответствующим типом осадков на сроки прогноза; цветом выделен фазовый состав (или тип) осадков, прогнозируемых в регионе/пункте прогноза (розовый и красный цвет – тип замерзающих осадков).

2. Вводим в строку «окна» необходимый пункт прогноза для вывода метеограммы с расчетными параметрами условий образования гололёда, представленными на графиках (температура воздуха у поверхности Земли, скорость ветра, количество осадков и балл общей облачности по срокам), пример метеограммы показан на рис. 5.

3. В верхнем левом «окне» страницы находим строку «тип осадков» и по приведенной (сверху) цветовой шкале с типом осадков на метеограмме находим вероятность (в %) появления замерзающих осадков на прогнозируемый срок (рис. 4, справа). Практическое использование данного метода прогноза показало, что даже небольшая вероятность наличия этой фазы на метеограмме может свидетельствовать о реальных условиях образования замерзающих осадков на территории прогноза (местами или в отдельных районах).

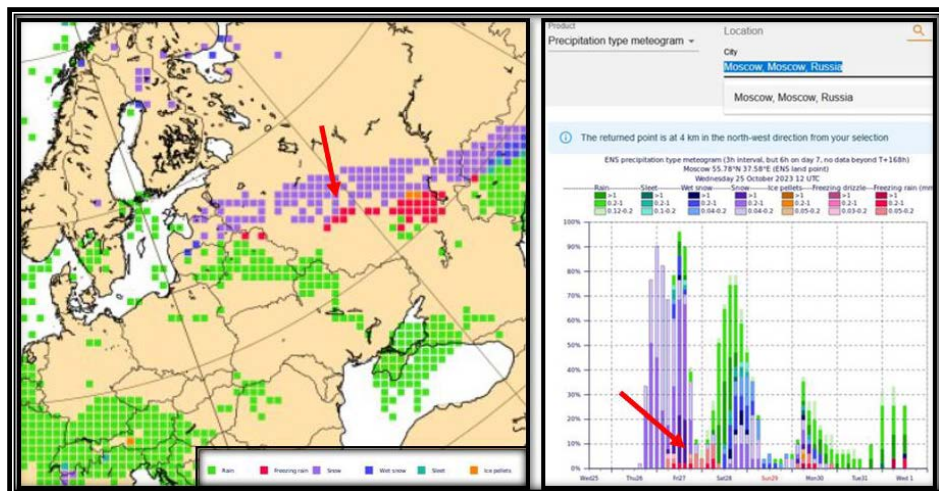


Рис. 4. Фрагменты продукции модели ECMWF с прогнозом типа осадков на 27.10.2023 от счета 00 ч ВСВ 26.10.2023: в картографическом виде (слева) и на метеограмме с вероятностью по шкале до 100 % (справа). Розовый и красный цвет – замерзающие осадки.

Fig. 4. The fragments of the ECMWF products with the forecast of precipitation type for October 27, 2023 from 00:00 UTC on October 26, 2023: the map (left) and the meteorogram with the probability on the scale up to 100% (right). The pink and red color is freezing precipitation.

На рис. 4 приведен пример прогноза гололёда по московскому региону на 27.10.2023 от счета 00 ч ВСВ 26.10.2023 по вышеизложенной последовательности использования прогностической информации. На диаграмме (рис. 4, справа) видно, что существует вероятность (не более 10 %) образования замерзающих осадков в виде мороси и дождя с интенсивностью до 1 мм/ч и вероятностью образования ледяного дождя не более 2 %. По факту гололёд отмечался «в отдельных районах», так как прогнозировалась небольшая его вероятность. При вероятности более 50 %, особенно при типе «замерзающий дождь» (ярко-красный цвет), увеличивается вероятность образования ледяного дождя, площадь распространения гололёда и его интенсивность, что ведет к опасным отложениям, и, соответственно, необходимо выпускать штормовое предупреждение для ситуации в московском мегаполисе в градации ОЯ.

Рассмотрим на примере московского региона прогноз явления ледяного дождя по указанным выше прогностическим моделям, который опасен образованием гололёда сильной интенсивности.

На рис. 5 показаны фрагменты визуализации фактических данных, подтверждающих положительные условия для возникновения явления «ледяной дождь» 12.02.2024: приземная карта погоды за 09 ч ВСВ с фронтальным анализом, подтверждающим нахождение московского региона в зоне активного теплого атмосферного фронта с фактическими гололёдными отложениями (слева); данные радиозондирования по п. Долгопрудный за 12 ч ВСВ (рис. 5, посередине), где по вертикальному распределению температуры воздуха видно наличие столба теплого воздуха (с температурой от 0 до 2.3 °С) на уровне высоты 850 гПа до уровня 928 гПа (706 м), а далее до поверхности Земли – отрицательных температур, т. е. наличие слоя инверсии температуры воздуха; подтверждающие это данные профилемера (рис. 5, справа).

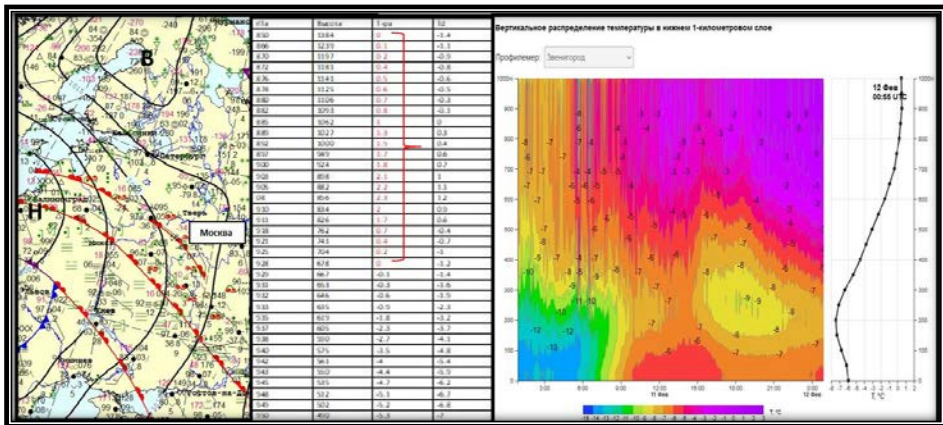


Рис. 5. Фрагменты фактических данных за 12.02.2024 г.: приземная карта погоды с фронтальным анализом за 09 ч ВСВ (слева), данные наблюдений фактического радиозондирования атмосферы в п. Долгопрудный за 12 ч ВСВ (посередине), данные профилемера в п. Звенигород (справа).

Fig. 5. The fragments of observational data for February 12, 2024: the surface weather chart with frontal analysis for 09:00 UTC (left), radiosonde data from the Dolgoprudny station for 12:00 UTC (middle), the temperature profiler data in Zvenigorod (right).

Прогностическая карта модели с высоким разрешением COSMO-Ru2 (см. рис. 2, слева) демонстрирует наличие зоны переохлажденных замерзающих осадков. Таким образом, можно сделать вывод о значительной вероятности образования ледяного дождя и гололёда.

Далее с помощью продукции численной модели ECMWF уточняем: – сначала визуальное пространственное распределение и тип переохлажденных осадков (рис. 6, слева);

- далее количественные характеристики приземных метеорологических параметров, способствующих образованию гололёда по метеограмме (приземная температура воздуха, скорость ветра, количество осадков) (по метеограмме на рис. 6, справа);
- тип, количество и вероятность переохлажденных осадков (по диаграмме на рис. 6, справа).

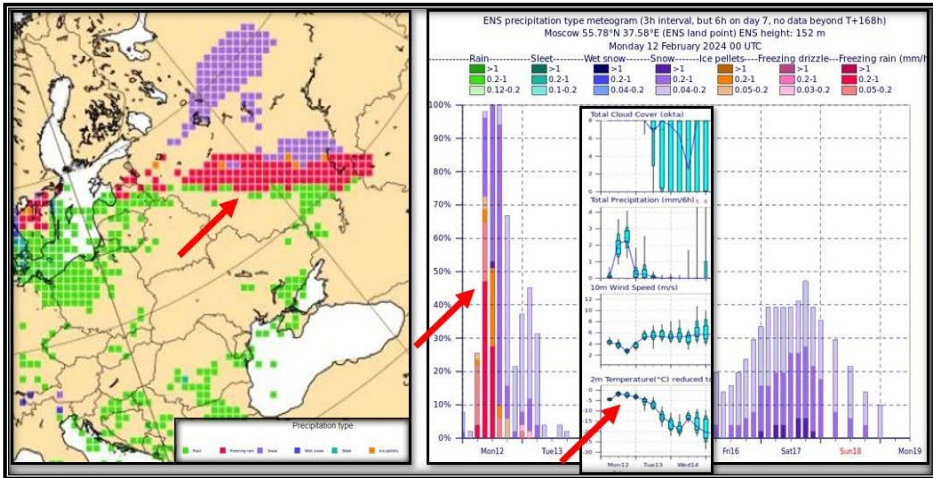


Рис. 6. Фрагменты продукции ECMWF по прогнозу фаз осадков на 12.02.2024 от счета 00 ч ВСВ: в картографическом виде (слева) и на метеограммах с вероятностью по шкале до 100 % (справа – основная) с метеопараметрами (вставка). Розовый и красный цвет – замерзающие осадки.

Fig. 6. The fragments of the ECMWF products with the forecast of precipitation phases for February 12, 2024 from 00:00 UTC: the map (left) and the meteograms with the probability on the scale up to 100% (right) with the meteorological parameters (inset). The pink and red color is freezing precipitation.

На карте видна существующая вероятность замерзающих осадков (ледяного дождя) с вероятностью ~47 % и интенсивностью около 1 мм/ч и ледяной крупы (порядка 70 %), что говорит о необходимости включения в прогноз явления «ледяного дождя» и «гололёда».

Далее при уточнении прогноза на 12 ч – конкретизация времени приближения к пункту прогноза зоны осадков теплого атмосферного фронта и необходимость выпуска штормового предупреждения, возможно, в градации ОЯ, так как для московского мегаполиса явление «ледяной дождь» признано опасным.

Представленный алгоритм прогнозирования ледяного дождя и гололёда предполагает использование всего спектра доступных в настоящее время для синоптиков Росгидромета выходных данных численного моделирования разной детализации, в том числе моделей с высоким разрешением, их адаптацию к различным регионам прогнозирования с учетом локальных особенностей, а также поиск систематических ошибок

моделирования в конкретном регионе и их минимизацию. Для повышения качества оценки ситуации, удобства восприятия и оперативности использования прогностической и фактической информации рекомендуется сконцентрировать ее на едином специализированном сайте для синоптиков Росгидромета с авторизованным доступом <https://special.meteoinfo.ru/>.

Выводы

Анализ случаев выпадения ледяного дождя и отложения гололёда в холодные периоды 2023–2024 гг. при сравнении со случаем выпадения сильного ледяного дождя 25–26.12.2010, результатов расчетов прогнозов численных моделей с высоким разрешением и модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) по прогнозу типа осадков показал сложность прогнозирования ледяного дождя и сильного гололёда.

Для прогноза рассмотренных явлений в оперативном режиме рекомендуется использовать всю имеющуюся базовую информацию с учетом корректировок на основе данных современных моделей и подходов, а также особенностей местных климатических условий, способных влиять на гололёдообразование. В качестве консультативной информации рекомендуется использовать проверенные и показавшие хорошую оправдываемость известные доступные прогностические материалы зарубежных погодных веб-ресурсов.

Настоятельно рекомендуется проведение методической учебы с наблюдательной сетью с уточнением и определением понятия гололёдных отложений, различий между видами зимних осадков (снег, снежная крупа, снежные зерна, ледяная крупа, ледяной дождь).

Что касается применения зарубежного опыта разработки методов диагноза и прогноза переохлажденных осадков/гололёда в России, основным препятствием является недостаточный объем рядов инструментальных наблюдений за этими явлениями, а также отсутствие автоматизированных методов, принятых Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета.

Необходимо развивать сеть наблюдений за гололёдом в подразделениях Росгидромета с учетом региональных особенностей условий образования данных явлений и совершенствовать алгоритм прогноза в отечественных численных моделях.

Список литературы

1. Багров А.Н., Снитковский А.И. Применение метода обобщенного портрета для численного прогноза гололёда // Труды Гидрометцентра СССР. 1974. Вып. 149. С. 3–13.
2. Здерева М.Я., Токарев В.М., Хлучина Н.А., Воробьева Л.П. Оперативная технология краткосрочного прогноза гололедных явлений на территории Урало-Сибирского региона // Труды Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института. 2023. № 108. С. 112–121. http://sibnigmi.ru/documents/Trudy_108_DOI.pdf#page=112.
3. Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г., Юсупов Ю.И. Численные эксперименты по прогнозу гололедных явлений // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 9. С. 735–741.

4. Методическое письмо ГГО № 30 от 30.08.2021 «О метеорологических условиях в период выпадения ледяных дождей». СПб., 2021. 6 с.
5. *Вапник В.Н., Червоненкис А.Я.* Теория распознавания образов. М.: Наука, 1974. 415 с.
6. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Часть I Л.: Гидрометеоиздат, 1985 С. 118-120.
7. РД 52.27.724-2019. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. 66 с.
8. Отчет о результатах оперативных испытаний «Метод и технология краткосрочного прогноза гололедных явлений на территории Урало-Сибирского региона (ФБГУ «СибНИГМИ», М.Я. Здерева) за период 2020–2022 гг.». Новосибирск, 2021. 4 с. http://sibnigmi.ru/documents/Trudy_108_DOI.pdf#page=112.
9. Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю., Юсупов Ю.И., Титов Д.Е. Использование теплобалансного метода для прогнозирования гололедно-изморозевых отложений на проводах воздушных линий электропередачи // Энергия Единой Сети, 2018: № 2 (37). С. 43-50.
10. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды: Часть I. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. С. 545-548.
11. *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.
12. *Язудин Р.А.* Рекомендации к прогнозу гололеда на юго-востоке Западной Сибири // Труды ЗСРНИГМИ. 1977. Вып. 30. С. 68-69.
13. *Rauber R.M., Olthoff L.S., Ramamurthy M.K., Miller D., Kunkel K.E.* A Synoptic Weather Pattern and Sounding-Based Climatology of Freezing Precipitation in the United States East of the Rocky Mountains // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2001. Vol. 40, no. 10. P. 1724-1747. DOI: 10.1175/1520-0450(2001)040<1724:ASWPAS>2.0.CO;2.
14. Cortinas J.V.Jr., Brill K. F., Baldwin M.E. Probabilistic Forecasts of Precipitation Type https://www.researchgate.net/publication/266347591_PROBABILISTIC_FORECASTS_OF_PREC.
15. *DeGaetano A.T., Belcher B.N., Spier P.L.* Short-Term Ice Accretion Forecasts for Electric Utilities Using the Weather Research and Forecasting Model and a Modified Precipitation-Type Algorithm // Wea. Forecasting. 2018. Vol. 23. P. 838-853. https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/23/5/2008waf2006106_1.xml#i1520-0434-23-5-838-Ramer1.
16. *Musilek P., Arnold D., Lozowski E.P.* An Ice Accretion Forecasting System (IAFS) for Power Transmission Lines Using Numerical Weather Prediction // SOLA. 2009. Vol. 5. P. 025-028. <https://doi.org/10.2151/SOLA.2009-007>.
17. *Sanders K.J., Barjenbruch B.L.* Analysis of Ice-to-Liquid Ratios during Freezing Rain and the Development of an Ice Accumulation Model // Wea. Forecasting. 2016. Vol. 31, no. 4. P. 1041-1060. <https://doi.org/10.1175/waf-d-15-0118.1>.
18. *Sanders K.J., Gravelle C., Gagan J., Graves C.* Characteristics of Major Ice Storms in the Central United States // J. Operational Meteorol. 2013. Vol. 1, no. 10. P. 100-113. <http://dx.doi.org/10.15191/nwajom.2013.0110>.

References

1. *Bagrov A.N., Snitkovskiy A.I.* Primenenie metoda obobshchennogo portreta dlya chislenogo prognoza gololeda. *Trudy Gidrometcentra SSSR*, 1974, Vol.149, pp. 3-13 [in Russ.].
2. *Zdereva M.Ya., Tokarev V.M., Hluchina N.A., Vorob'eva L.P.* Operativnaya tekhnologiya kratkosrochnogo prognoza gololednyh yavleniy na territorii Uralo-Sibirskogo regiona. *Trudy Sibirskogo regional'nogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo institute*, 2023, no. 108, pp. 112-121. http://sibnigmi.ru/documents/Trudy_108_DOI.pdf#page=112 [in Russ.].
3. *Ignatov R.Y., Rubinshtein K.G., Yusupov Y.I.* Numerical Experiments on Forecasting Glaze Phenomena. *Atmos Ocean Opt.*, 2020, vol. 33, pp. 682-689. DOI: 10.1134/S1024856020060202.

4. Metodicheskoe pis'mo GGO № 30 ot 30.08.2021 «O meteorologicheskikh usloviyah v period vypadeniya ledyanykh dozhdhey». Saint Petersburg, 2021, 6 p. [in Russ.].
5. Vapnik V.N., Chervonenkis A.Ya. Teoriya raspoznavaniya obrazov, Moscow, Nauka publ., 1974, 415 p. [in Russ.].
6. Nastavlenie gidrometeorologicheskim stanciyam i postam. Vyp. 3, Chast' I, Leningrad, Gidrometeoizdat publ, 1985, pp. 118-120 [in Russ.].
7. RD 52.27.724-2019 Nastavlenie po kratkosrochnym prognozam pogody obshchego naznacheniya. 66 s. [in Russ.].
8. Otchet o rezul'tatah operativnykh ispytaniy «Metod i tekhnologiya kratkosrochnogo prognoza goleodnykh yavleniy na territorii Uralo-Sibirskogo regiona (FBGU «SibNIGMI», M.YA. Zdereva) za period 2020–2022 gg.». Novosibirsk, 2021. 4 s. Available at: sibnigmi.ru/documents/Trudy_108_DOI.pdf#page=112 [in Russ.].
9. Rubinshtein K.G., Ignatov R.Y., Yusupov Yu.I. The forecast of ice-frost deposits on the wires of the Air Lines (VL) using the heat-balance method. *Energiya Edinoy Seti [Energy of Unified Grid]*, 2018, vol. 37, no. 2, pp. 43-50 [in Russ.].
10. Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody: Chast' I. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, pp. 545-548 [in Russ.].
11. Shakina N.P., Skriptunova Ye.N., Ivanova A.R., Vetrova Ye.I. Possibilities for low cloud ceiling forecasting at the aerodroms in the former European USSR on the basis of numerical model output data. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2012, vol. 348, pp. 130-161 [in Russ.].
12. Yagudin R.A. Rekomendacii k prognozu goleoda na yugo-vostoke Zapadnoy Sibiri. *Trudy ZSRNIGMI*, 1977, vol. 30, pp. 68-69 [in Russ.].
13. Rauber R.M., Olthoff L.S., Ramamurthy M.K., Miller D., Kunkel K.E. A Synoptic Weather Pattern and Sounding-Based Climatology of Freezing Precipitation in the United States East of the Rocky Mountains. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 2001, vol. 40, no. 10, pp. 1724-1747. DOI: 10.1175/1520-0450(2001)040<1724:ASWPAS>2.0.CO;2.
14. Cortinas J.V.Jr., Brill K. F., Baldwin M.E. Probabilistic Forecasts of Precipitation Type https://www.researchgate.net/publication/266347591_PROBABILISTIC_FORECASTS_OF_PREC
15. DeGaetano A.T., Belcher B.N., Spier P.L. Short-Term Ice Accretion Forecasts for Electric Utilities Using the Weather Research and Forecasting Model and a Modified Precipitation-Type Algorithm. *Wea. Forecasting*, 2018, vol. 23, pp. 838-853. Available at: https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/23/5/2008waf2006106_1.xml#i1520-0434-23-5-838-Ramer1.
16. Musilek P., Arnold D., Lozowski E.P. An Ice Accretion Forecasting System (IAFS) for Power Transmission Lines Using Numerical Weather Prediction. *SOLA*, 2009, vol. 5, pp. 025-028. DOI: 10.2151/SOLA.2009-007.
17. Sanders K.J., Barjenbruch B.L. Analysis of Ice-to-Liquid Ratios during Freezing Rain and the Development of an Ice Accumulation Model. *Wea. Forecasting*, 2016, vol. 31, no. 4, pp. 1041-1060. DOI: 10.1175/waf-d-15-0118.1.
18. Sanders K.J., Gravelle C., Gagan J., Graves C. Characteristics of Major Ice Storms in the Central United States. *J. Operational Meteorol.*, 2013, vol. 1, no. 10, pp. 100-113. DOI: 10.15191/nwajom.2013.0110.

Поступила 19.02.2025; одобрена после рецензирования 04.06.2025;
принята в печать 18.06.2025.

Submitted 19.02.2025; approved after reviewing 04.06.2025;
accepted for publication 18.06.2025.