

# ОБРАЗОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАМЕРЗАЮЩИХ ОСАДКОВ: ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

*Н.П. Шакина<sup>1</sup>, И.А. Хоменко<sup>2</sup>, А.Р. Иванова<sup>1</sup>, Е.Н. Скриптунова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации*

<sup>2</sup> *Государственный экологический университет, Одесса, Украина*  
*chakina@mecom.ru, innchom@mail.ru, ivanova@mecom.ru, skript@mecom.ru*

## Введение

В зимний и переходные сезоны года в атмосфере средних и полярных широт, а также в горных районах может накапливаться переохлажденная сконденсированная или талая вода и удерживаться в переохлажденном состоянии достаточно длительное время. Переохлажденные капли, превысившие размер облачных элементов, под действием силы тяжести выпадают и, испытывая на своем пути различные фазовые превращения, достигают поверхности земли в виде твердых, жидких или смешанных осадков.

При наличии отрицательных температур у поверхности и на малых высотах наиболее опасным видом осадков являются переохлажденный дождь или морось, за которыми следуют смешанные осадки (дождь или изморозь со снегом). Эти виды осадков образуют ледовые отложения на незащищенных поверхностях. Значительно менее опасными и разрушительными являются твердые осадки: снег, ледяной дождь, снежная крупа и снежные зерна.

Взвешенные в воздухе переохлажденные капли, не достигшие размеров капель осадков, также могут вызывать образование ледовых отложений. Скопление таких капель в нижнем слое известно как туман с отложением изморози.

Выделяют два типа обледенения, обусловленные наличием переохлажденных капель: обледенение в облаках и туманах (in-cloud icing) и обледенение в осадках (precipitation icing). Первый тип обледенения генерирует в основном кристаллическую и зернистую изморозь, второй – гололед и накопление мокрого снега. Однако, вообще говоря, как гололед, так и зернистая изморозь могут образовываться при обоих типах обледенения [1, 32]. Кристаллическая изморозь и мокрый снег считаются наименее опасными видами отложений, поскольку они редко создают критические нагрузки на линии электропередач, ветви деревьев и пр. Наибольшую опасность представляет гололед.

В настоящей статье дается обзор современного состояния знаний о механизмах и условиях образования и выпадения переохлажденных капель, способов прогнозирования

соответствующих типов осадков, а также приводятся некоторые современные данные о климатических характеристиках таких осадков. Представлен краткий анализ случая катастрофического гололеда на территории Европейской России 25–26 декабря 2010 года.

### **Данные о географическом распределении повторяемости переохлажденных осадков и гололедно-изморозевых явлений**

Выпадение переохлажденных осадков, отложение изморози наблюдается всюду в умеренных и высоких широтах обоих полушарий Земли, а также в горных районах более низких широт, при наличии отрицательных температур. Описаны случаи таких явлений в Испании, Алжире, Южной Африке, Новой Зеландии, Латинской Америке. Сравнительно хорошо исследованы условия выпадения переохлажденных осадков в Северной Америке (США и Канада). Рассмотрим основные результаты, относящиеся к климатологии переохлажденных осадков.

Согласно [19], умеренные и сильные переохлажденные осадки (дождь и морось) наблюдаются в 24 % случаев всех зимних погодных условий в континентальных США, причем половина этих случаев классифицируется как ice storm (ледяной шторм) на основе оценки причиненных повреждений либо наличия отложений льда 0,25 дюйма (0,64 см) или более. Позже [22] на основе базы данных наземных наблюдений на 988 станциях этой же территории за период 1948-2000 гг. было исследовано географическое распределение повторяемости переохлажденных осадков, с максимумом в штатах Нью-Йорк и Пенсильвания и вторичными максимумами на Среднем Западе, на востоке Аппалачских гор и на севере Тихоокеанского побережья. В годовом ходе максимальное число дней с переохлажденным дождем наблюдается в декабре и январе (более половины всех случаев). На распределении повторяемости сказываются локальные эффекты больших городов, гор, Великих озер [14, 23, 26]. В частности, в окрестностях мегаполисов отмечено уменьшение повторяемости переохлажденных осадков и укорочение периода года, в который они наблюдаются (в Нью-Йорке и Чикаго – на 1–2 месяца, по сравнению с окружающей сельской местностью). Эти изменения относят за счет влияния городского острова тепла.

В целом климатологию переохлажденных осадков в США можно считать наиболее изученной; ей посвящено много детальных работ, включая хорошо документированные конкретные случаи использованием новейших технических средств [45, 56]. По данным наблюдений с хорошим временным разрешением [29], обнаружен выраженный суточный ход повторяемости переохлажденных дождя и мороси с максимумом около времени восхода солнца и минимумом около времени его захода. Представляют интерес и такие данные: замерзающие осадки обычно продолжаются недолго, однако 5, 11 и 15 % случаев ледяных

зерен, замерзающего дождя и замерзающей мороси, соответственно, продолжаются более 4 ч. При этом замерзающие осадки в подавляющем большинстве случаев не связаны с конвективной неустойчивостью [49].

Исследования в этом направлении очень актуальны и для Канады, куда циклонические возмущения в зимнее время приносят осадки в виде снега, мокрого снега, замерзающего и обычного дождя, причем разные типы осадков выпадают в соседствующих областях с переходной зоной шириной от 10 до 100 км. Замечено [53], что имеются характерные условия перехода от снега к ледяному дождю и затем к замерзающему дождю. В переходной зоне могут наблюдаться одновременно более одного типа осадков, но замерзающие дождь и морось при этом не наблюдаются одновременно с другими типами осадков. Пространственная изменчивость повторяемости замерзающих осадков очень велика, а температура у земли чаще всего бывает слабо отрицательной, и после выпадения замерзающего дождя или замерзающей мороси сохраняется таковой в течение 10 и 25 ч соответственно.

В Западной и Центральной Европе, согласно [21], сообщения о замерзающих осадках содержатся в 0,5–1 % всех телеграмм в коде SYNOP. Наиболее часто замерзающие осадки наблюдаются с декабря по февраль, преимущественно в более континентальном климате (Германия, Центральная Европа – Венгрия, Хорватия, Босния). Ледяные зерна встречаются гораздо реже, чем замерзающие дождь и морось.

На территории России и бывшего СССР в целом распределение замерзающих осадков и мороси изучалось по данным о толщине отложений [1–3, 7–10, 24]. Регулярные наблюдения за гололедными отложениями проводились в течение длительного периода (и проводятся в настоящее время) на метеорологических станциях, где установлены т. наз. гололедные станки (провода сечением 5 мм, натянутые в двух взаимно перпендикулярных направлениях на высоте 2 м). Из последних работ отметим [16], где представлены данные о повторяемости и изменчивости явлений по регионам: Арктика, Европейская часть СССР, Закавказье, Средняя Азия, Сибирь и Дальний Восток. Распределение замерзающих осадков очень неравномерно, причем в направлении с юго-запада на восток и северо-восток их повторяемость, в общем, убывает.

Более детальные результаты для отдельных пунктов (московские аэродромы, Минеральные Воды, Одесса, Нижний Новгород) представлены в [7–10] на основе аэродромных наблюдений с высоким (30 мин) временным разрешением. В целом же по России и СНГ климатические характеристики замерзающих осадков, их географическое распределение, связь со стратификацией температуры и влажности, с характером облачности изучены недостаточно.

Кроме уже упоминавшихся выше наблюдений за гололедными отложениями, данные метеорологических станций о явлениях в срок наблюдения и в последний час дают определенную информацию о наличии и интенсивности переохлажденных осадков. Упоминавшиеся выше аэродромные наблюдения, в особенности совместно с радиозондированием, обеспечивают возможность наиболее детального анализа. Эти наблюдения в виде телеграмм в коде METAR поступают в Гидрометцентр России, где после декодирования хранятся в специальной базе данных (созданной в Отделе авиационной метеорологии Гидрометцентра) и пригодны для компьютерной обработки.

Так, на основе базы данных аэродромных наблюдений за 10-летний период можно оценить повторяемость явлений, которые в той или иной мере могут быть причиной отложений льда или мокрого снега. Результаты такой оценки приведены в табл. 1 и 2 для 45 городов европейской части бывшего СССР по следующим явлениям, соответствующим цифрам кода КН-01:

- 49 – сплошной туман с осаждением изморози;
- 56 – слабая замерзающая морось;
- 57 – умеренная или сильная замерзающая морось;
- 66 – слабый замерзающий дождь;
- 67 – умеренный или сильный замерзающий дождь;
- 68 – дождь или морось со снегом, слабые;
- 69 – дождь или морось со снегом, умеренные или сильные;
- 83 – ливневый дождь со снегом, слабый;
- 84 – ливневый дождь со снегом, умеренный или сильный.

Из перечисленных явлений наиболее опасными считаются замерзающие морось и дождь (коды 56, 57, 66, 67), образующие гололед. Остальные, согласно опубликованным данным, не представляют серьезной опасности. Однако в некоторых работах при оценке максимально возможных отложений время, в течение которого наблюдались эти явления, если они чередовались с замерзающими дождем или моросью, включается в период нарастания отложений.

В табл. 1 представлены число случаев перечисленных выше явлений и общее число наблюдений на каждой станции за 10-летний период, а в табл. 2 – суммарные повторяемости замерзающих осадков (дождя и мороси) по месяцам. На рис. 1 дано распределение повторяемости замерзающих осадков (в сумме дождя и мороси) по территории в январе. Из табл. 1 можно видеть, что абсолютный максимум числа случаев замерзающих осадков имеет место в Минеральных Водах, за которыми следуют Саратов и Волгоград (более 1200 случаев за 10 лет) и Ростов-на-Дону (1013 случаев). Меньше всего случаев зарегистрировано в Сочи

(ни одного случая за 10 лет), Мурманске (51 случай замерзающего дождя и ни одного случая мороси), Махачкале (12 случаев), Салехарде (82), Ханты-Мансийске (88); менее 200 случаев отмечено в Майкопе, Анапе, Одессе, С.-Петербурге.

Максимум повторяемости замерзающих осадков в Минеральных Водах, как показано в [8], обусловлен особенностями географического положения и ветрового режима этого пункта. Гололед (обычно морось) наблюдается при типичных для холодного периода восточных ветрах, когда воздух от Каспийского моря поднимается по склону к Северному Кавказу, образуя низкую облачность.

На рис. 1 помимо локальных особенностей (резко повышенная повторяемость, кроме Минеральных Вод, в Ставрополе и Ростове-на-Дону) видим область с увеличенной, в сравнении с окружением, повторяемостью, протянувшуюся от Саратова и Волгограда к Воронежу, Москве, Минску и далее к Вильнюсу. Севернее этой полосы замерзающие осадки наблюдаются реже, но в Нижнекамске и Сыктывкаре обнаруживается снова увеличение их повторяемости.

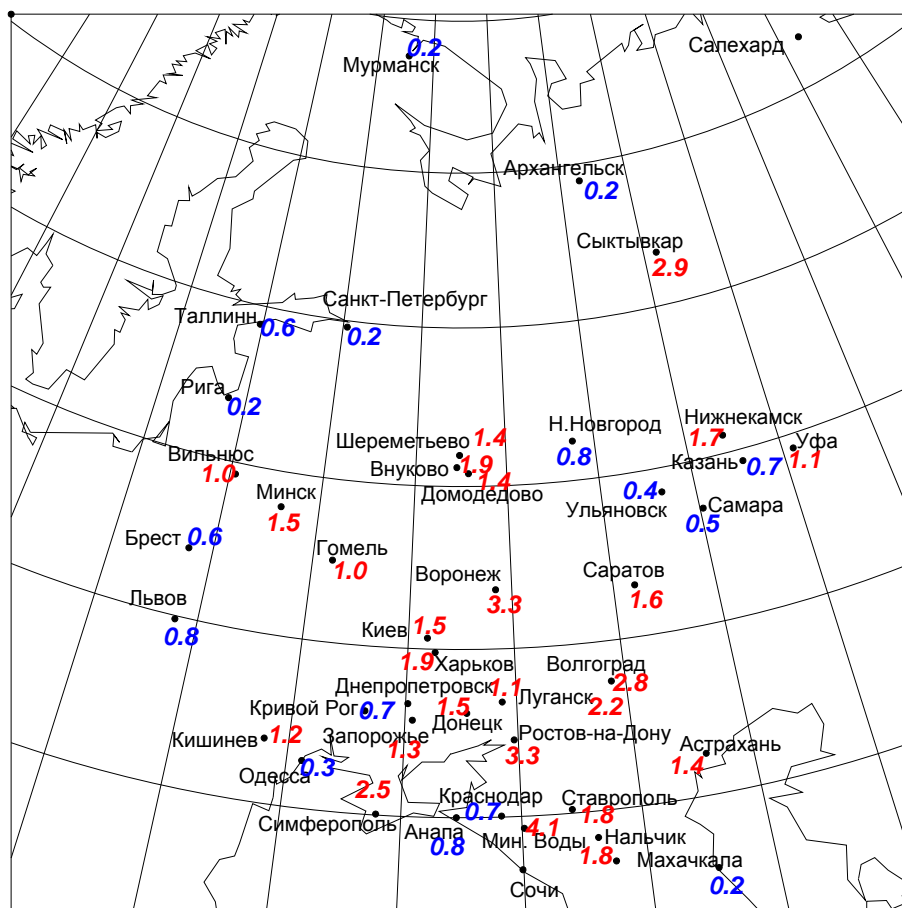


Рис. 1. Географическое распределение повторяемости (%) замерзающих осадков в январе.

Обратим внимание на характер регистрируемых явлений. В Минеральных Водах это преимущественно слабая замерзающая морось, в Волгограде и Саратове – умеренная и

сильная, в Ростове-на-Дону больше всего случаев слабого замерзающего дождя. В Салехарде из 82 случаев – 45 умеренных и сильных замерзающих дождей, аналогичная ситуация и в Ханты-Мансийске. Больше всего явлений, кодируемых цифрой 67 – в Сыктывкаре (375 из общей суммы 782 случаев замерзающих осадков). Не следует, однако, абсолютизировать эти различия: они отражают не только реальные особенности режима осадков, но и в большой степени – субъективные критерии наблюдателей или принятые на станции положения. Так, иногда приходится встречаться с такой местной установкой: замерзающие осадки следует регистрировать только при отрицательной температуре воздуха на высоте 2 м; если же она выше нуля, то замерзающих осадков не может быть. На самом деле при очень слабо положительных температурах (0,2–0,3 °С) замерзающие осадки наблюдаться могут, если приземный слой ниже нулевой изотермы очень тонок, падающие переохлажденные капли не успевают прогреться в нем, а подстилающая поверхность при этом может иметь отрицательную температуру, так что выпадающие капли будут замерзать.

Из табл. 2 видно, что гололед в северной части области наблюдается с октября по май (Салехард, Сыктывкар) или по апрель (Архангельск, Ханты-Мансийск), в средней полосе обычно с ноября или октября по март, на некоторых аэродромах в южной части области (Днепропетровск, Краснодар, Анапа) – с декабря по март. В Махачкале эти явления отмечены только в январе и феврале. В Минеральных Водах повторяемость гололеда в течение всех зимних месяцев превышает 4 %. В некоторых других пунктах повторяемость превышает 3 % (Ставрополь, декабрь; Воронеж и Ростов-на-Дону, январь) и 2% (Минск, Воронеж, Волгоград, декабрь; Сыктывкар, Симферополь, Луганск, Волгоград, январь; Волгоград, Саратов, Воронеж, февраль). В остальных пунктах и в остальные месяцы года повторяемость замерзающих осадков менее 2 %, а в большинстве клеток таблицы – и менее 1 %.

Приведенные данные показывают, что замерзающие осадки – явление вообще редкое, что создает большие трудности прогнозирования. Алгоритмы прогнозирования опираются на физические представления о процессах, формирующих переохлажденные осадки.

### **Современные представления об условиях и механизмах образования замерзающих осадков**

Начиная с работы [13], широко известен так называемый классический механизм образования переохлажденных (замерзающих) осадков [4, 20, 35, 44, 46]: если внутри облака лежит ограниченной толщины слой с положительной температурой, то снежинки, падающие из верхней, холодной части облака, тают при попадании в этот теплый слой и превращаются в капли, которые затем выпадают в нижележащий холодный слой и приобретают отрицательную температуру (т. е. становятся переохлажденными); падая затем на холодную

подстилающую поверхность, они замерзают и образуют гололед. Этот процесс в англоязычной научной литературе иногда обозначается как “melting process”. Исследователи, анализирувавшие температурную стратификацию в облаках в периоды выпадения замерзающих осадков, нередко обнаруживали такие теплые слои внутри облаков (слой инверсии температуры, имеющий вид «теплого носа» на кривой температурной стратификации), чаще всего в случаях замерзающего дождя, а не мороси [30, 33, 43, 50]. Однако такая стратификация обнаруживается далеко не во всех случаях замерзающих осадков и даже не в их большинстве. Очень часто во всем облачном слое температура отрицательна.

По результатам исследования конкретных случаев позже был предложен альтернативный механизм: замерзающие осадки могут формироваться в результате столкновения и слияния облачных капель при слабо отрицательной температуре [17]. Этот механизм получил название «процесса переохлажденного теплого дождя» (supercooled warm rain process). В названии подчеркивается тот факт, что капли являются переохлажденными в течение всего времени их роста.

Этот процесс привлек внимание исследователей, в том числе из-за его связи с обледенением самолетов – из облаков с отрицательной температурой выпадает в основном переохлажденная морось, а именно она особенно опасна для самолетов. Исследование географического распределения этого явления затруднено тем фактом, что замерзающая морось часто наблюдается в облаках и под облаками, но при этом на земле ее не обмечают. Было показано [17], что при наличии замерзающей мороси управляемость самолета ухудшается намного сильнее, чем при наличии замерзающего дождя. Быстрое отложение льда на поверхности самолета при выпадении замерзающей мороси может привести к катастрофе [44].

Исследование условий выпадения замерзающих осадков в различных физико-географических условиях показало, что определенный процент случаев замерзающего дождя и в особенности замерзающей мороси наблюдается в ситуациях, когда в атмосфере нет слоев с положительной температурой. В [37] получено, что такие ситуации составляют около 30 % всех случаев замерзающих осадков на территории США, для которых имелись данные радиозондирования. Отсюда делался вывод, что эти замерзающие осадки образовались в результате действия механизма «теплого переохлажденного дождя». Анализ микрофизических процессов в облаках привел авторов [37] к выводу, что процесс переохлажденного теплого дождя может иметь место, если температура вершины облака (cloud top temperature – СТТ) удовлетворяет неравенству  $0 > \text{СТТ} > -10 \text{ } ^\circ\text{C}$ . В [49] исследован сравнительный вклад обоих механизмов на материале 25-летнего ряда наблюдений

замерзающих осадков в США. Оказалось, что процесс переохлажденного теплого дождя явно имел место в 47 % случаев: облака либо были целиком холодными (т. е.  $T < 0$  °С везде), либо только вершины облаков были теплыми ( $STT > 0$  °С), что не удовлетворяет определению классического механизма. Облака при этом характеризовались малой вертикальной мощностью, а выпадающие осадки представляли собой замерзающую морось. Настоящий классический процесс, при котором  $STT < -10$  °С и имеется теплый слой внутри облака, встречался в 25 % от всего времени наблюдения, причем выпадал замерзающий дождь, а облака были более мощными.

По другим данным процентное соотношение двух механизмов оказывается иным. Так, в [38] приводятся материалы исследований для Денвера, где процент радиозондов, не обнаруживших теплых слоев при переохлажденных осадках, достигает 83. Над другими районами средних широт процент случаев замерзающих осадков, выпадающих в «неклассических» условиях, колеблется в широких пределах. Так, в Европе [21] отсутствие теплых слоев в облаке отмечено в 30–40 % случаев. Аналогичные результаты получены в [54], по данным наблюдений в Канаде, но процент отсутствия теплых слоев на северных станциях более высок (до 53 %). В России [7–10] доля случаев замерзающих осадков, выпадающих из холодных облаков, сильно варьирует, в общем возрастая с запад на восток и с юга на север – от 74 % в Москве до 83 % в Нижнем Новгороде и 96 % в Минеральных Водах. В то же время в Одессе доля случаев отсутствия теплых слоев относительно невысока (48 %), а доля случаев хорошо выраженного классического механизма составляет 23 %. Во всех проанализированных пунктах при наличии теплого слоя внутри облака, т. е. классического механизма «таяния», выпадали замерзающие дожди, а не морось. Более высокий процент таких случаев в Одессе авторы [9] относят за счет повышенной повторяемости средиземноморских воздушных масс с относительно высокими температурой и влажностью.

Таким образом, предложены два основных механизма образования замерзающих осадков. В [34, 50] указывается также, что возможны какие-либо промежуточные варианты. В целом следует отметить, что хотя процесс образования замерзающих осадков есть процесс микрофизический, однако реализация того или иного механизма зависит от свойств воздушных масс, прежде всего от профиля температуры и вертикальной мощности облаков. Имеется ряд попыток выяснения такого рода зависимостей по материалам наблюдений. Так, в [15] при совместном анализе условий выпадения замерзающих осадков и обледенения самолетов было установлено, что в конкретных районах США повторяемость замерзающих осадков поровну распределена между арктическим воздушными массами и воздушными массами восточного побережья США, в других воздушных массах их повторяемость пренебрежима. Аналогичный анализ для другого региона США выполнен в [49]. В [34]



изучены распределения СТТ для каждого из следующих типов осадков: снег, дождь, замерзающие дождь и морось СТТ определялась по данным ИСЗ GOES (яркостная температура) и параллельно по данным радиозондирования, при анализе которых облачным считался слой, в котором относительная влажность превосходила 87 %. Было обнаружено, что только градация осадков «слабый снег» имеет одномодальное распределение яркостной температуры верхней границы облаков; умеренный и сильный снег, дождь, замерзающие дождь и морось обнаруживают две моды с максимумами около  $-16$  и от  $-35$  до  $-50$  °С.

Можно считать установленным, что классический механизм ответственен лишь за определенную долю случаев замерзающих осадков. Именно этот механизм, однако, взят за основу разработчиками численных моделей, в которых прогнозируется в числе прочего и тип осадков [42, 51, 52, 57, 58]. Аргументом в пользу такого выбора считается тот факт, что именно классический механизм реализуется в случаях наиболее интенсивных и опасных замерзающих дождей.

По-видимому, магистральным направлением прогнозирования типа осадков является прогнозирование полей температуры, влажности и осадков с помощью численных моделей, а затем, с помощью встроенных в модель схем постпроцессинга, реализация того или иного алгоритма распознавания типов осадков. Иногда используются несколько алгоритмов, что позволяет формировать ансамбли моделей. Ниже рассмотрены наиболее употребительные алгоритмы определения типа осадков.

### **Алгоритмы определения типа осадков**

Прогнозирование типа осадков (снег, дождь, мокрый снег, замерзающий дождь, ледяные зерна) производится с помощью программ постпроцессинга, реализующих тот или иной алгоритм определения типа осадков после того, как в рамках численной модели предсказано наличие осадков.

В разное время было предложено несколько алгоритмов такого рода. По времени публикации первым следует считать алгоритм «толщины слоя» [41, 58] – тип осадков предлагалось определять по данным о высоте поверхностей 1000, 850 и 700 гПа:

- снег выпадает, если толщина слоя 850–700 гПа меньше или равна 1540 м;
- дождь выпадает, если толщина слоя 1000–850 гПа больше 1310 м или если толщина слоя 850–700 гПа больше 1560 м и при этом температура смоченного термометра у земли  $T_w > 0$  °С; если  $T_w \leq 0$  °С, то выпадает замерзающий дождь;
- ледяные зерна (ice pellets) выпадают, если толщина слоя 850-700 гПа лежит в интервале (1540, 1560 м].

Данный алгоритм работает лишь в том случае, когда имеются реальные (не экстраполированные) данные о высотах трех изобарических поверхностей. Если же, как это часто бывает при выпадении осадков, давление у земли ниже 1000 гПа – алгоритм неприменим. Это ограничивает возможности его использования.

Алгоритм Реймера [48] использует данные о давлении  $p$ , температуре  $T$ , относительной влажности  $RH$  и температуре смоченного термометра  $T_w$  для разделения условий выпадения снега, дождя, замерзающего дождя, ледяных зерен и смешанных осадков:

- если на нижнем уровне (у земли)  $T_w \geq 2$  °C, ожидается дождь;
- если у земли  $T_w \leq 2$  °C и на остальных уровнях  $T_w < -6,6$  °C, ожидается снег.

В остальных случаях определяется уровень генерации осадков как верхняя граница самого нижнего из слоев, в которых  $RH > 90$  % при толщине этого слоя не менее 16 гПа. Если на этом уровне  $T_w < -6,6$  °C, а на остальных уровнях  $T_w < 0$  °C, то считается, что все гидрометеоры являются кристаллами, и ожидается снег.

Когда гидрометеоры падают с уровня генерации, они могут таять при соответствующей стратификации  $T_w$ . Ледяная фракция ( $I$ ) гидрометеоров определяется из формулы

$$\frac{dI}{d \ln p} = \frac{0^\circ \text{C} - T_w}{E},$$

где  $E = E' \cdot RH$ . Эмпирически найдено на большом статистическом материале  $E' = 0,045$  °C. Величина  $I$  меняется от 0 (жидкие капли) до 1 (кристаллы). Окончательное решение о типе осадков принимается на основании следующих правил по значениям  $I$  и  $T_w$  на самом нижнем уровне:

- если  $I > 0,85$ , ожидаются ледяные зерна;
- если  $I = 1$ , ожидается снег;
- если  $I < 0,04$  и  $T_w < 0$  °C у земли, ожидается замерзающий дождь;
- если  $I < 0,04$  и  $T_w \geq 0$  °C – ожидается дождь;
- если  $0,04 \leq I \leq 0,85$  и  $T_w < 0$  °C у земли, то ожидаются смешанные осадки, часть из которых – замерзающий дождь; если же  $T_w \geq 0$  °C, замерзающих осадков не ожидается.

Алгоритм ВТС (Baldwin, Treadon, Contorno) [12] предназначен для распознавания типов осадков по наблюдаемому или предсказанному вертикальному распределению температуры и влажности. Этот алгоритм в настоящее время используется в службе погоды США совместно с ETA-моделью. Идея алгоритма состоит в анализе вертикальной стратификации слоев, проходимых падающим гидрометеором, и определении возможностей его таяния или замерзания. Теплые и холодные слои определяются через площадь между нулевой изотермой и кривой  $T_w(z)$ , где  $z$  – высота.

Далее определяется начальное состояние гидрометеоров (переохлажденная вода или лед). Уровень генерации осадков считается лежащим в верхнем «насыщенном» слое ( $T - T_d < 6$  °С). Рассчитывается площадь между изотермой  $-4$  °С и  $T_w$  до высоты поверхности 500 гПа и площадь между изотермой  $0$  °С и  $T_w$  приземного теплого или холодного слоев. Если минимальная в насыщенном слое  $T_w > -4$  °С и температура у земли  $T_0 > 0$  °С, ожидается дождь; он также ожидается при  $T_0 > 0$  °С и если площадь между  $-4$ °С и  $T_w$  превышает 3000 град·м, а площадь между  $0$  °С и  $T_w$  в нижнем слое толщиной 150 гПа превышает  $-3000$  град·м или если толщина приземного теплого слоя больше  $-50$  град·м.

Алгоритм Бургуэна [18] сходен с изложенным в [12] и определяет условия таяния или замерзания гидрометеоров. Рассчитываются площади между нулевой изотермой и наблюдаемой положительной температурой («энергия таяния», ЭТ) и между нулевой изотермой и наблюдаемой отрицательной температурой («энергия замерзания») на стандартной тефиграмме. Тип осадков определяется по соотношению энергий таяния и замерзания:

- если энергия таяния в приземном слое больше или равна 5 Дж/кг или доступная энергия таяния в промежуточном теплом слое (т. е. в теплом слое над приземным холодным слоем) менее 2 Дж/кг, ожидается снег;

- если энергия таяния лежит в интервале от 5,6 до 13,2 Дж/кг, то ледяные и растаявшие гидрометеоры равновероятны и случайным образом диагностируется снег или дождь;

- если в приподнятом слое энергия таяния менее 2 Дж/кг и приземная энергия таяния более 13,2 Дж/кг, то ожидается дождь;

- если снег не ожидается и энергия замерзания менее величины  $46 + 0,66 \cdot \text{ЭТ}$ , то ожидается замерзающий дождь при  $T_0 < 0$  °С и дождь при  $T_0 \geq 0$  °С;

- если энергия замерзания превышает величину  $66 + 0,66 \cdot \text{ЭТ}$  и энергия таяния у земли меньше или равна 5,6 Дж/кг, ожидаются ледяные зерна;

- если значения энергии таяния у земли лежат между 5,6 и 13,2 Дж/кг, то ледяные зерна и дождь равновероятны, и выбор производится случайным образом;

- если энергия замерзания лежит в промежутке между величинами  $46 + 0,66 \cdot \text{ЭТ}$  и  $66 + 0,66 \cdot \text{ЭТ}$ , то равновероятны замерзающий дождь и ледяные зерна, и решение принимается случайным образом.

Алгоритм CSTPS (Czys, Scott, Tang, Przybylinski, Sabones) [30] предназначен для разделения ледяных зерен и замерзающего дождя путем определения доли льда в единичном сферическом гидрометеоре.

Тип осадков вначале определяется путем расчета времени, в течение которого ледяная сфера сохраняется в теплом слое, и времени, необходимого для полного таяния этой сферы.

Отношение этих двух времен,  $\tau$ , служит для разграничения условий существования типов осадков: если  $\tau = 0$ , таяние отсутствует, если  $\tau = 1$ , гидрометеор полностью тает. Время сохранения определяется путем деления глубины теплого слоя на конечную скорость падения гидрометеора (считая воздух покоящимся). Время полного таяния определяется из баланса между выделением скрытого тепла при таянии и скоростью передачи тепла через жидкую оболочку гидрометеора. Для определения времени таяния используются три характеристики приподнятого теплого слоя: средняя толщина, среднее давление и средняя температура смоченного термометра. Предлагаются следующие решающие правила:

- если  $0 < \tau < 1$  при любом  $T_0$  (где  $T_0$  – приземная температура или минимальная температура смоченного термометра), ожидаются ледяные зерна;
- если  $\tau > 1$ ,  $T_0 = 0$  °С, ожидается замерзающий дождь;
- если  $\tau > 1$ ,  $T_0 > 0$  °С, ожидается дождь;
- если нет слоя таяния ( $\tau = 0$ ), ожидается снег.

Алгоритм Кортинаса и др. [28], как и CSTPS, основан на определении условий полного таяния гидрометеора при его падении через теплый слой. Основное отличие от метода CSTPS состоит в том, что характеристики теплого слоя не используются, а вместо них для оценки скорости таяния ледяной сферы такого же диаметра, как в CSTPS, используются кривые состояния ниже 500 гПа:

- при любом  $T_0$  ожидаются ледяные зерна, если лед еще сохранялся, когда частица достигла нижней границы слоя таяния;
- если частица полностью растаяла, а у земли  $T_0 \leq 0$  °С, то ожидается замерзающий дождь;
- если  $T_0 > 0$  °С, то ожидается дождь;
- если слой таяния отсутствует, ожидается снег.

Данный алгоритм не имел оперативного применения ввиду вычислительной неэкономичности.

Таковы основные опубликованные алгоритмы определения типов осадков. В литературе встречаются модификации этих алгоритмов, в особенности наиболее часто используемого алгоритма Реймера. Вопрос, насколько результаты определения типа осадков зависят от конкретного принятого алгоритма, решался путем тестирования на материале радиозондов (а не модельных прогнозов, которые содержат собственные ошибки). Такого рода наиболее подробные результаты, полученные в университете Оклахомы (США), были представлены на ежегодном митинге Национальной метеорологической ассоциации США [28] и опубликованы на сайте [36]. Тестирование выполнялось на выборке 1828 радиозондов, выпущенных при приземной температуре ниже 5 °С и при наличии осадков, в том числе 387 случаев

замерзающего дождя. Алгоритм толщины слоя не удалось сопоставить с другими, поскольку в 65 % случаев давление у земли было ниже 1000 гПа. Для него оценки получены по уменьшенной выборке. Результаты представлены в альтернативном и вероятностном виде. Альтернативное определение типа осадков оказалось наиболее успешным для дождя и снега, менее успешным (но практически значимым) для замерзающего дождя и наименее успешным для ледяных зерен, но для всех типов осадков результаты лучше случайных. Ни один из алгоритмов не показал явного превосходства, но алгоритм Реймера признан несколько лучшим. Комбинация алгоритмов, использованная для формирования ансамбля, оказалась полезной.

Более поздние данные о верификации алгоритмов определения типа осадков находим в [55]: приведенные выше 5 алгоритмов (кроме алгоритма толщины слоя) использовались в комбинации с различными численными моделями и различными начальными условиями для этих моделей. Таким образом, формировался ансамбль, который и использовался для прогноза типа осадков. Снова был подтвержден вывод, что дождь и снег прогнозируются вполне успешно, замерзающий дождь – с практически значимой, но невысокой успешностью, а прогноз ледяных зерен в целом неудачен.

Дальнейшее продвижение находим в [31], где, в сочетании с моделью WRF, для определения типа осадков применена модификация алгоритма Реймера. Модификация состоит в более полном учете стратификации самого нижнего слоя. Именно, вводится «ледяная фракция на уровне замерзания»:

$$I_{FL} = \sum_{k=1}^K dI,$$

где  $K$  – число модельных атмосферных уровней ниже самой нижней нулевой изотермы;  $I$  – ледяная фракция в долях единицы на каждом уровне.

Если исходный алгоритм Реймера предсказывает замерзающий дождь, то именно этот тип осадков и прогнозируется. Кроме того, замерзающий дождь следует ожидать, если  $0 < I_{FL} \leq 0,1$ ,  $T_0 \leq 0$  °C. В остальных случаях сохраняется тот тип осадков, какой предсказывался оригинальным алгоритмом Реймера. Пороговые значения  $I_{FL}$  получены эмпирически.

Оригинальный алгоритм Реймера недооценивает повторяемость замерзающего дождя. Модифицированный алгоритм предсказывает намного больше наблюдавшихся случаев, но все же недооценка сохраняется. Еще одна модификация алгоритма Реймера предложена в [47].

Из изложенного заключаем, что решение об использовании того или иного алгоритма определения типа осадков следует принимать в зависимости от свойств используемой

прогностической модели и с учетом особенностей режима осадков различных типов на территории, для которой дается прогноз. Учитывая имеющийся международный опыт, целесообразно больше внимания уделить алгоритму Реймера. Вместе с тем нельзя упускать из виду, что этот алгоритм, включая и его модификации, ориентирован на выявление условий, когда реализуется классический механизм формирования замерзающих осадков вследствие таяния снежинок в теплом слое. То же относится к алгоритмам Бургуэна, CSTPS и Кортинаса. Алгоритм ВТС не требует наличия слоя таяния и допускает выпадение замерзающего дождя при слабо отрицательной температуре ( $> -4$  °C); таким образом, он должен распознавать по крайней мере часть случаев действия механизма переохлажденного теплого дождя. Оценка эффективности каждого из представленных алгоритмов постпроцессинга применительно к конкретным физико-географическим условиям должна производиться путем тестирования на материале наблюдений в этих условиях.

### **Альтернативные методы прогноза замерзающих осадков**

Методы прогноза, альтернативные по отношению к основанным на применении описанных выше алгоритмов, исторически являются первыми: они развивались еще задолго до появления современных численных моделей, обеспечивающих приемлемую точность прогноза осадков, и представляли собой синоптико-статистические или чисто синоптические наборы правил и рекомендаций, позволяющих выделять участки атмосферных полей с повышенной вероятностью выпадения определенного типа осадков. На современном этапе такие методы сохранили определенное значение и продолжают привлекать интерес главным образом применительно к прогнозу замерзающих осадков. Причиной является тот факт, что именно замерзающие осадки прогнозируются с помощью алгоритмов определения типа осадков наименее успешно (не считая ледяных зерен, прогноз которых не имеет большого значения).

Альтернативные методы прогноза замерзающих осадков опираются на статистические связи между определенными характеристиками погодных систем синоптического масштаба и повторяемостью замерзающих осадков. Не останавливаясь на ранних работах этого направления у нас и за рубежом, отметим только несколько работ, появившихся после 2000 года.

В работе [50] была проведена (вручную) классификация синоптических ситуаций и воздушных масс на 25-летней выборке приземных карт погоды, что позволило выделить классы «архетипических» погодных систем, в которых повторяемость замерзающих осадков на территории континентальных США наибольшая. В течение следующих нескольких лет интенсивно развивались схемы автоматизированной типизации синоптических процессов.

Эти схемы успешно применялись для решения задач о переносе примесей и о влиянии погоды на здоровье населения. Одна из схем такого рода была разработана для целей типизации синоптических ситуаций и воздушных масс, в которых чаще всего наблюдаются замерзающие осадки [25]. После проведения типизации, дальнейшим шагом к прогнозу было применение логистического регрессионного анализа для каждого типа ситуаций. Работа была выполнена применительно к условиям международного аэропорта Оттава (Канада) на материале ежечасных наблюдений в этом пункте (1958–2001 гг.) совместно с данными объективного анализа и реанализа с 6-часовым разрешением. Выделенные типы согласуются с ранее найденными в [50]. Результаты проверки на независимой выборке показали хорошую успешность прогноза эпизодов замерзающего дождя продолжительностью не менее часа, которые и наносят наибольший экономический ущерб. Менее интенсивные процессы (замерзающая морось, кратковременный замерзающий дождь) не удастся надежно предсказать таким методом.

В качестве еще одного примера метода альтернативного прогноза укажем разработку, выполненную авторами настоящей статьи в 2002 году, а позднее (2006 г.) представленную на съезде Европейского союза по наукам о Земле [39, 40]. На материале данных дневников погоды на нескольких аэродромах России и Украины авторы провели оригинальную объективную классификацию синоптических ситуаций, а в качестве других предикторов замерзающих осадков использовали предложенный в [5, 6] фронтальный параметр, адвекцию температуры на поверхности 850 гПа и температуру воздуха у земли. Прогноз формулировался в вероятностной форме, причем пороговая вероятность выбиралась с учетом неравнозначности потерь от ложных тревог и непредсказанных явлений. Было отмечено, что интенсивные замерзающие осадки (дожди) прогнозируются более успешно, чем малоинтенсивные (морось). Расчеты на независимых данных показали в целом практически значимую успешность прогноза замерзающих осадков в пунктах и удовлетворительную точность пространственной локализации зон гололеда.

Представляется, что прогноз альтернативными методами может быть полезен в комплексе с прямыми методами определения типа осадков, учитывая сложность идентификации замерзающих осадков и особую опасность этого явления.

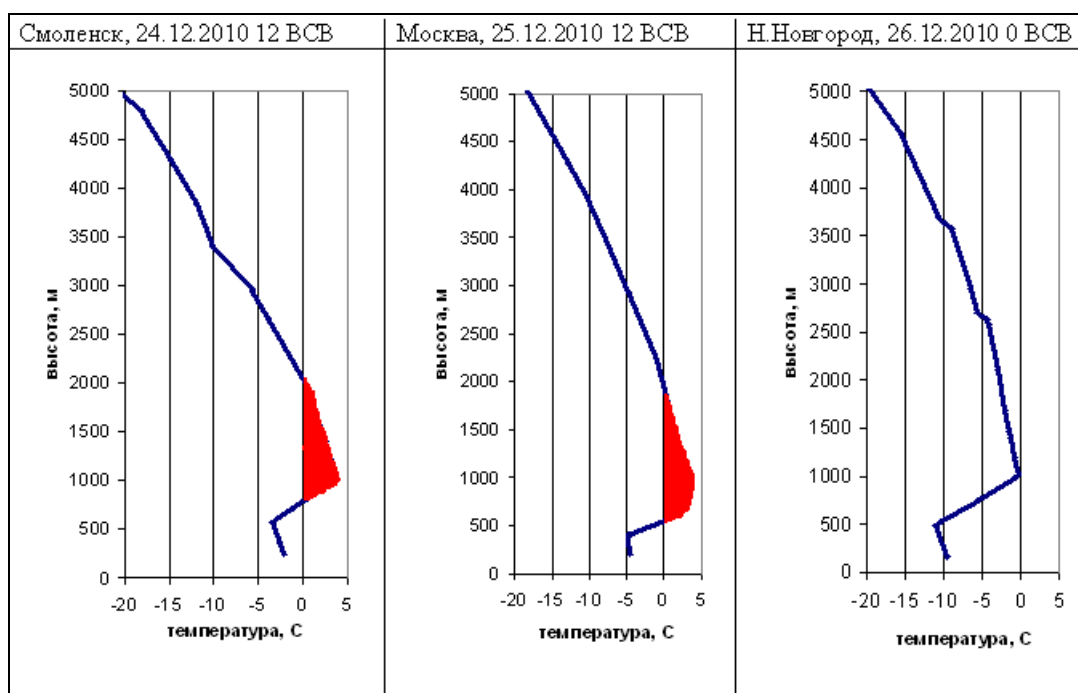
### **Обсуждение механизмов образования замерзающих осадков на примере случая интенсивного гололеда 25–26 декабря 2010 г.**

Памятный всем недавний эпизод сильнейшего гололеда, охватившего обширную территорию – от Прибалтики до Поволжья – был обусловлен выпадением замерзающего дождя из облачной системы южного циклона. Явление одновременно или почти

одновременно наблюдалось в Московской, Смоленской, Тверской, Нижегородской и частично Владимирской областях. Единовременно выпало до 33 мм осадков на площади 30 тыс. кв. км при температуре воздуха у земли от  $-1$  до  $-8$  °С.

Выпавшие осадки вызвали гололедные отложения. Падение деревьев и зависание обледенелых ветвей на линии электропередач явились основными причинами массовых отключений электроэнергии.

Данный эпизод позволяет выявить некоторые типичные черты процессов такого рода. На рис. 2 представлены кривые изменения с высотой температуры воздуха (по данным радиозондирования) в период выпадения замерзающих осадков: в 12 ч ВСВ 24 декабря в Смоленске, 25 декабря в 12 ч ВСВ в Москве (Долгопрудный), 26 декабря в 00 ч ВСВ в Нижнем Новгороде. На первых двух температурных профилях виден мощный слой положительных температур (заштрихован) толщиной около полутора километров. В Нижнем Новгороде профиль температуры похож на предыдущие – имеется мощный инверсионный слой, но температура в нем не поднимается выше 0 °С. Инверсионный слой представляет собой поток более теплого воздуха (пришедшего с Атлантического океана), поднимающийся над нижележащим более холодным воздухом.



**Рис. 2. Вертикальные профили температуры для случаев выпадения замерзающих осадков в декабре 2010 г. Красным обозначен слой положительных температур.**

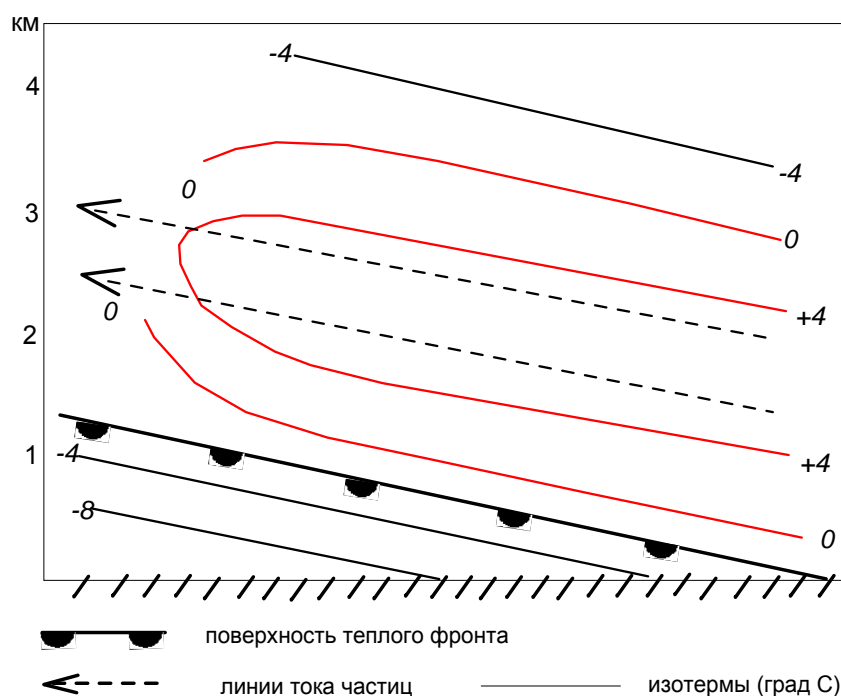
Пока этот теплый воздух в слое инверсии и над ним имеет положительную температуру, мы, очевидно, наблюдаем случай реализации классического механизма образования



замерзающих осадков вследствие таяния снежинок, падающих сверху в теплый слой и затем охлаждающихся ниже 0 °С в нижележащем холодном слое, после чего они выпадают в виде переохлажденных капель и замерзают. Так выглядит механизм явления в Смоленске и в Москве.

В Нижнем Новгороде теплый слой существует, но он не является слоем таяния: температура в нем не поднимается выше 0 °С. Можно полагать, что замерзающие осадки здесь образуются по схеме «все холодное» – по типу переохлажденного теплого дождя. Однако можно высказать некоторые соображения, связанные с сугубо трехмерным характером адвекции теплого воздуха над поверхностью теплого фронта.

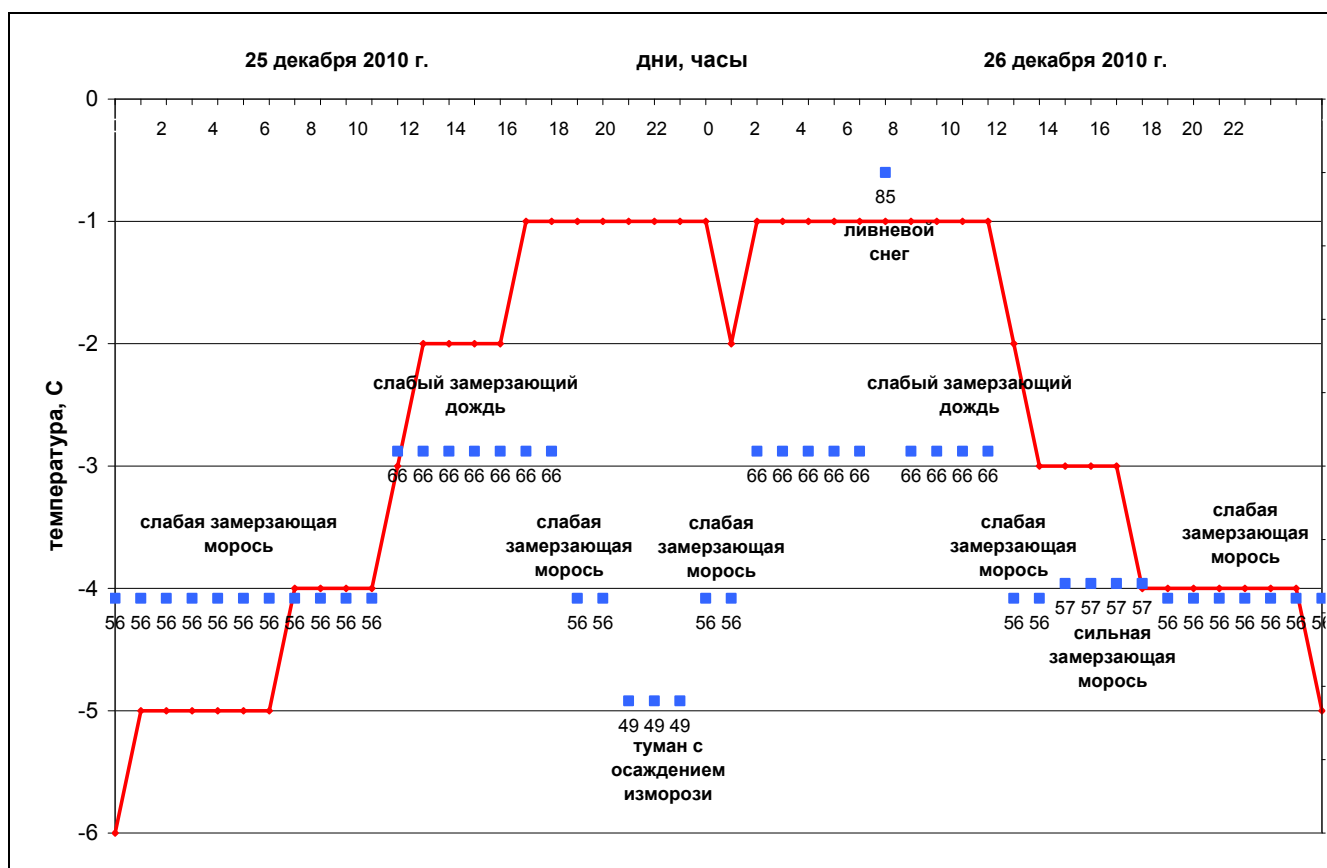
На рис. 3 схематически показан поперечный к фронту вертикальный разрез атмосферы: под фронтальной поверхностью лежит холодный ( $T < 0$  °С) воздух, а над ней – восходящий поток теплого воздуха, заполненный облаками. Траектории воздушных частиц в потоке надфронтального теплого воздуха (теплой несущей полосы) показаны стрелками. По мере подъема воздух охлаждается из-за расширения и трансформации, и облачные капли выносятся из «теплого носа» в воздух с отрицательной температурой. Здесь они переохлаждаются и выпадают в виде замерзающего дождя или замерзающей мороси.



**Рис. 3. Схема восхождения теплого воздуха над теплым фронтом в циклоне.**

В реальных условиях облачная система фронта и поле температуры включают мезомасштабные и микромасштабные особенности, и поэтому характер и интенсивность выпадающих осадков меняются со временем по мере прохождения фронта. Это хорошо

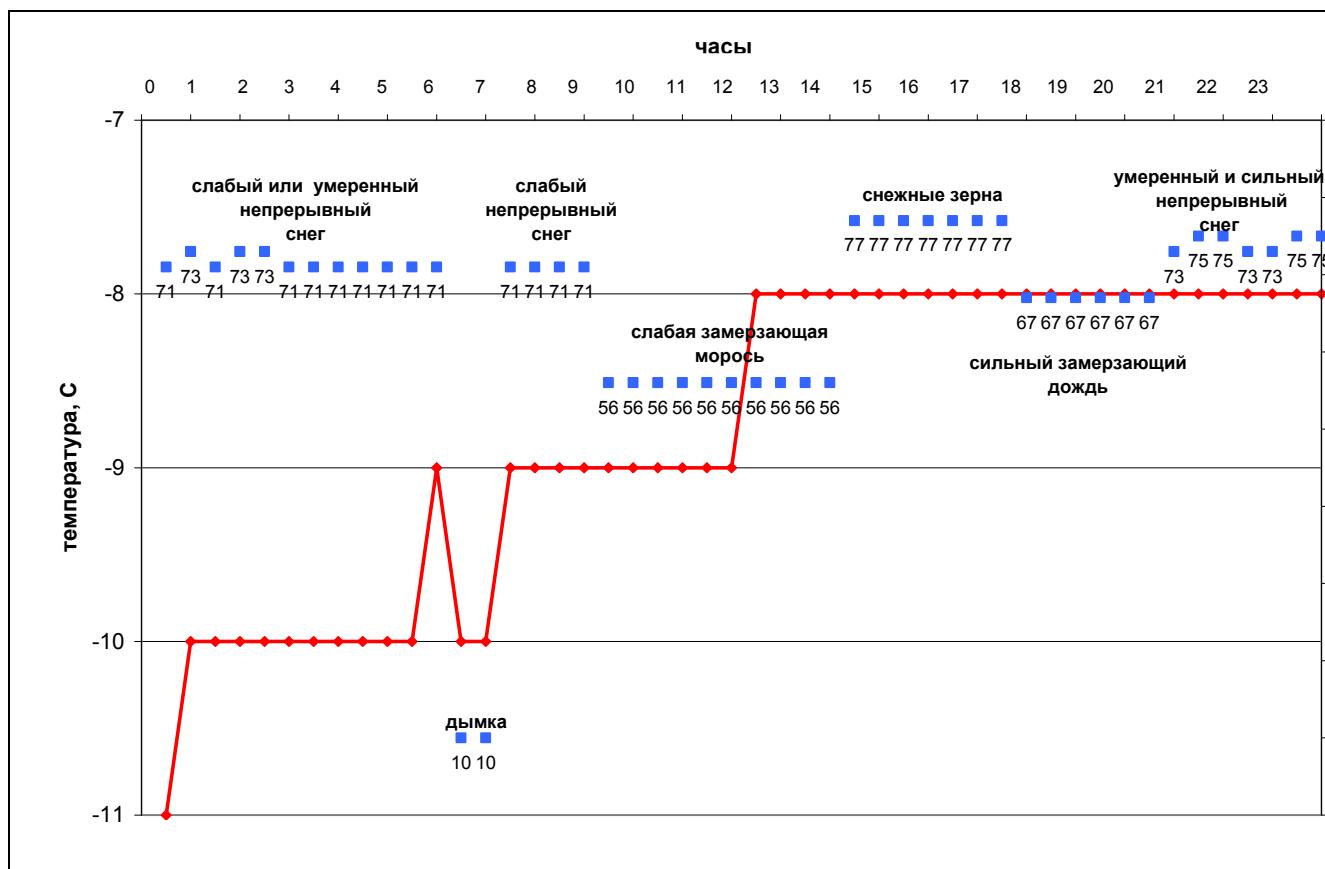
видно на рис. 4, где представлен временной ход температуры и осадков в аэропорту Внуково: по мере повышения температуры (с прохождением теплого фронта) наблюдатель отмечал слабую замерзающую морось, слабый замерзающий дождь, затем туман с осаджением изморози, снова замерзающую морось, затем в течение пяти сроков слабый замерзающий дождь, один срок – ливневый снег, снова четыре срока – слабый замерзающий дождь, затем слабая (два срока), сильная (четыре срока) и снова слабая замерзающая морось. В целом в течение почти двух суток непрерывно наблюдались осадки, способные вызвать отложения льда, хотя их интенсивность и микрофизические характеристики менялись. Температура при этом росла в первую половину периода, затем оставалась почти постоянной в течение девятнадцати сроков (напомним, что в телеграммах METAR ее значения указывались с точностью до целых градусов); пункт в это время находился в теплом секторе циклона, после чего началось похолодание, связанное с прохождением холодного фронта.



**Рис. 4. Временной ход температуры у земли в целых градусах Цельсия согласно коду METAR (линия) и типов осадков с указанием кода КН-01 явления по данным ежедневных наблюдений в Москве 25–26 декабря 2010 г.**

В Нижнем Новгороде (рис. 5) наблюдаем смену типов осадков при более низких температурах у земли ( $-8^{\circ}\text{C}$  и ниже). Теплого сектора у земли не прослеживается, - по-видимому, вследствие окклюдирования циклона. Можно полагать, что наблюдавшиеся с 9.30

до 14.00 ч ВСВ и с 18.00 до 20.30 ч ВСВ слабая замерзающая морось и сильный замерзающий дождь, соответственно, выпадали из вытесненного наверх теплого (но, как видно из данных радиозондирования за 12.00 ч ВСВ, имеющего отрицательную температуру) воздуха.



**Рис. 5.** Временной ход температуры у земли в целых градусах Цельсия согласно коду METAR (линия) и типов осадков с указанием кода явления КН-01 по данным ежедневных наблюдений в Нижнем Новгороде 26 декабря 2010 г.

Чрезвычайно яркий и интересный эпизод, привлеченный здесь в качестве иллюстрации и заслуживающий более подробного анализа, демонстрирует изменения интенсивности и типа осадков, вызывающих отложения льда, и возможность выпадения не только замерзающей мороси, но и замерзающего дождя, как при наличии, так и в отсутствие слоев с положительной температурой над пунктом наблюдений.

### Заключение

Обсуждено современное состояние знаний о механизмах, климатических характеристиках и способах прогнозирования замерзающих осадков, вызывающих гололед, а

также других видов смешанных и твердых осадков, часто наблюдающихся в близких условиях. Статья содержит кроме обзора опубликованных работ по указанным направлениям также некоторые новые результаты, полученные авторами.

Замерзающие осадки – по-видимому, наиболее опасный и разрушительный тип осадков – наблюдаются всюду в умеренных и высоких широтах, а также в горных районах более низких широт. Климатология замерзающих осадков изучается, прежде всего, в связи с проблемами обледенения самолетов и отложений льда на линиях связи и дорогах. Она сравнительно хорошо изучена в условиях континента Северной Америки (где это явление отличается относительно высокой повторяемостью и интенсивностью), Западной и Центральной Европы. Распределение повторяемости и условия выпадения замерзающих осадков на обширной территории России изучены недостаточно. В последнее время появились работы, основанные на сетевых измерениях и на учащенных наблюдениях погоды на аэродромах; в этих работах представлены локальные особенности режима замерзающих осадков в отдельных пунктах и регионах, указывающие на большую роль местных условий, при определенной тенденции уменьшения повторяемости явления с удалением вглубь континента. Авторы статьи приводят некоторые данные о повторяемости явления по наблюдениям на территории европейской России (в среднем за год и по месяцам): помимо локально резко повышенной повторяемости в Минеральных Водах, а также в Ставрополе и Ростове-на-Дону выделена область повышенной повторяемости от Саратова и Волгограда к Воронежу, Москве, Минску и далее к Вильнюсу.

Прогнозирование замерзающих осадков основано на представлениях о формирующих их процессах. Основным является широко известный «классический» механизм образования замерзающих осадков, предполагающий наличие в облаке ограниченного слоя с положительной температурой («теплого слоя»). Снежинки, выпадающие из верхней, холодной части облака, тают в этом теплом слое и выпадают в нижележащий, тоже холодный слой в виде капель, которые становятся переохлажденными и замерзают, падая на холодную поверхность. Такой механизм реализуется чаще всего в случаях замерзающего дождя, а не мороси.

Для объяснения того факта, что большое число случаев замерзающих осадков (от 30 до 83 %, по данным разных авторов) наблюдается в отсутствие теплых слоев, позже был предложен альтернативный механизм, предполагающий укрупнение облачных переохлажденных капель при слабо отрицательной температуре. Таким путем образуется чаще всего переохлажденная морось.

Магистральным направлением прогнозирования замерзающих осадков следует считать следующее: в численной прогностической модели прогнозируются поля температуры,

влажности и осадков, а затем реализуется тот или иной алгоритм распознавания типа осадков в зависимости от деталей стратификации температуры и влажности. Обычно алгоритмы такого рода разграничивают условия выпадения снега, дождя, замерзающего дождя или мороси и ледяных зерен. В статье детально изложены наиболее известные или употребительные из алгоритмов, предложенных для указанной цели, вместе с опубликованными результатами их тестирования, показавшими, что идентификация типа осадков оказывается наиболее успешной для дождя и снега, менее успешной (но практически значимой) – для замерзающего дождя и наименее успешной – для ледяных зерен (прогноз которых, впрочем, имеет наименьшее значение). Признано полезным комбинирование алгоритмов, используемое для формирования ансамблей.

Подчеркнем, что алгоритмы этого рода ориентированы главным образом на выявление условий, когда реализуется классический механизм образования замерзающих осадков.

Оценка эффективности того или иного алгоритма распознавания типа осадков в конкретном регионе должна производиться путем тестирования на местном материале наблюдений.

Сохраняют свое значение и методы прогнозирования замерзающих осадков (исторически более ранние), опирающиеся на статистические связи между определенными характеристиками погодных систем синоптического масштаба и повторяемостью явления. Интерес к таким методам поддерживается тем фактом, что именно замерзающие осадки прогнозируются с помощью упомянутых выше алгоритмов распознавания недостаточно успешно.

Изменения (в пространстве и во времени) характера, интенсивности и типа осадков, вызывающих отложение льда, и возможность выпадения не только замерзающей мороси, но и замерзающего дождя, как при наличии, так и в отсутствие слоев с положительной температурой над пунктом наблюдений, проиллюстрированы на примере эпизода интенсивного гололеда 25–26 декабря 2010 г. на территории европейской России. Высказаны соображения о возможности образования переохлажденных капель во фронтальной облачной системе в результате их переноса в потоке надфронтального воздуха, который по мере подъема и трансформации приобретает отрицательную температуру (хотя остается более теплым, чем выше – и нижележащие слои). Такая модификация «классического механизма» с учетом трехмерности процесса (а не только стратификации в облаке над пунктом наблюдения), как полагают авторы, расширяет существующие представления об условиях образования замерзающих осадков.

### Список использованных источников

1. *Воробьев В.И.* Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 616 с.
2. *Зверев А.С.* Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 711 с.
3. *Раевский А.Н.* О распространении гололеда на территории Украины // Труды УкрНИГМИ. – 1961. – Вып. 29. С. 50–62.
4. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 702 с.
5. *Шакина Н.П., Калугина Г.Ю., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р.* Субъективный и объективный анализ атмосферных фронтов. 1. Объективные характеристики фронтов, проведенных синоптиками // Метеорология и гидрология. – 1998. – № 7. – С. 19–30.
6. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р.* Объективный анализ атмосферных фронтов и оценка его эффективности // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 7. – С. 5–16.
7. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р.* Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. 1. Аэропорты московского аэроузла // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 6. – С. 40–58.
8. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р.* Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России СНГ. II. Аэропорт Минеральные Воды // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 2. – С. 27–41.
9. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Хоменко И.А., Хоменко Г.В.* Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. III. Аэропорт Одесса // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 9. – С. 5–18.
10. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Завьялова А.А.* Условия выпадения осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. IV. Аэропорт Нижний Новгород // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 7. – С. 25–39.
11. ASOS ice accretion algorithm development, winter 1998-1999. Final rept. US National Weather Service (W/OSO14x1), 1999. – 14 p.
12. *Baldwin M., Treadon R., Contorno S.* Precipitation type prediction using a decision tree approach with NMCs mesoscale eta model // Preprints, 10<sup>th</sup> Conf. on Numerical Weather Prediction, Portland, OR, AMS1994. – P. 30–31.
13. *Bennetts W.J.* The sleet storm in Northern New York, March 25–27 // Mon. Weather. Rev. – 1913. – Vol. 41. – P. 372–373.
14. *Bernstein B.C.* Regional and local influences on freezing drizzle, freezing rain, and ice pellets // Weather and Forecasting. – 2000. – Vol. 1. – P. 485–508.
15. *Bernstein B.C., Omeron T.A., Politovich M.K., McDonough F.* Surface weather features associated with freezing precipitation and severe in-flight icing // Atmos. Res. – 1998. – Vol. 46. – P. 57–73.
16. *Bezrukova N.A., Jeck R.K., Khilali M. F., Minina L.S., Naumov A.Ya., Stulov E.A.* Some statistics of freezing precipitation and rime for the territory of the former USSR from ground-based weather observations // Atmos. Res. – 2006. – Vol. 82. – P. 203–221.

17. *Bochieri J.R.* The objective use of upper level soundings to specify precipitation type // *Mon. Weather Rev.* – 1980. – Vol. 108. – P. 596–603.
18. *Bourgouin P.* A method to determine precipitation type // *Weather and Forecasting.* – 2000. – Vol. 15. – P. 583–592.
19. *Branick M.L.* A climatology of significant winter-type weather events in the contiguous United States // *Weather Forecast.* – 1997. – Vol. 13. – P. 193–207.
20. *Brooks C.F.* The nature of sleet and how it is formed // *Mon. Weather Rev.* – 1920. – Vol. 48. – P. 69-73.
21. *Carriere J.M., Lainard C., Le Bot C., Robart F.* A climatological study of surface freezing precipitation in Europe // *Meteorol. Appl.* – 2000. – Vol. 7. – P. 1-10.
22. *Chagnon S.A., Karl T.R.* Temporal and spatial variation of freezing rain in the contiguous United States: 1948–2000 // *J. Appl. Meteorol.* – 2003. – Vol. 42. – P. 1302–1315.
23. *Chagnon S.A.* Urban modification of freezing rain events // *J. Appl. Meteorol.* – 2003. – Vol. 42. – P. 863–870.
24. *Chakina N.P.* Winter storms in Russia // *Storms. Vol. I.* – London, Routledge, 2000. – P. 506 -525.
25. *Cheng C.S., Auld H., Li G., Klaassen J., Tugwood B., Li Q.* An automated synoptic typing procedure to predict freezing rain: an application to Ottawa, Ontario, Canada // *Weather Forecast.* – 2004. – Vol. 19. – P. 751–768.
26. *Cortinas J.* A climatology of freezing rain in the Great Lakes region of North America // *Mon. Weather Rev.* – 2000. – Vol. 128. – P. 3574–3588.
27. *Cortinas J., Baldwin M., Brill K.*: The precipitation-type algorithm experiment at the HPC and the SPC // *National Weather Association Annual Meeting. Presentations.* – 2001.
28. *Cortinas J.V., Jr., Brill K.F., Baldwin M.E.* A statistical evaluation of five precipitation-type algorithms for use in operational forecasting. Part I: Basics and implementations // *Preprints, 16<sup>th</sup> Conf. on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, Orlando, FL., AMS, 2002.* – P. 140–145.
29. *Cortinas J.V., Robbins C.C., Bernstein B.C., Strapp J.W.* An analysis of freezing rain, freezing drizzle, and ice pellets across the United States and Canada: 1976–90 // *Weather and Forecasting.* – 2004. – Vol. 19. – P. 377–390.
30. *Czys R.R., Scott R.W., Tang K.C., Przybylinski R.W., Sabones M.E.* A physically based, non-dimensional parameter for discriminating between locations of freezing rain and sleet // *Weather and Forecasting.* – 1996. – Vol. 11. – P. 591–598.
31. *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 // *Weather and Forecasting.* – 2008. – Vol. 23. – P. 878–853.
32. Atmospheric icing of power networks. Springer / Farzaneh M., Ed. – 2008. – 381 p.
33. *Forbes G.S., Anther R.A., Thomson D.W.* Synoptic and mesoscale aspects of an Appalachian ice storm associated with cold-air damming // *Mon. Weather Rev.* – 1987. – Vol. 115. – P. 564-591.

34. *Hanna J.W., Schultz D.M., Irwing A.R.* Cloud-top temperature for precipitating winter clouds // *J. Appl. Meteorol. Clim.* – 2008. – Vol. 47. – H. 351-359.
35. *Henry A.J.*: The great glaze storm of 21–23 February 1922 in the upper lake region: Discussion of general conditions // *Mon. Weather Rev.* – 1922. – Vol. 50. – P. 77-82.
36. [http://www.comet.ucar.edu/outreach/abstract\\_final/0010128.htm](http://www.comet.ucar.edu/outreach/abstract_final/0010128.htm).
37. *Huffman G.J., Norman G.A., Jr.* The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation // *Mon. Weather Rev.* – 1988. – Vol. 116. – P. 2172-2182.
38. *Jeck R.* Representative values of icing-related variables aloft in freezing rain and freezing drizzle // *Tech. Rep. DOT/FAA/AR-TN95-119*, US Dept. Transport., FAA Technical Center, Atlantic City, New Hersey. – 1996. – 18 p.
39. *Khomenko I.A., Ivanova A.R., Chakina N.P., Skriptunova E.N., Zavyalova A.A.* Freezing precipitation in Russia and the Ukraine // *Adv. Geosci.* – 2007. – Vol. 10. – P. 25–29.
40. *Khomenko I.A., Ivanova A.R., Chakina N.P., Skriptunova E.N., Zavyalova A.A.* Freezing precipitation in Russia and the Ukraine: conditions of formation and an approach to probabilistic forecasting // *EGU General assembly, Vienna, 02-07 April 2006.* – P. 288.
41. *Keeter K., Cline J.* The objective use of observed and forecast thickness values to predict precipitation type in North Carolina // *Weather and Forecasting.* – 1991. – Vol. 6. – P. 456–469.
42. *Lackmann G.M., Keeter K., Lee L.G., Ek m.B.* Model representation of freezing and melting precipitation: implications for winter weather forecasting // *Weather Forecast.* – 2002. – Vol. 17, No. 5. – P. 1016–1033.
43. *Martner B.E., Snider J.B., Zamora R.J., Byrd G.P., Niziol T.A., Joe P.I.* A remote sensing view of a freezing rain storm // *Mon. Weather Rev.* – 1993. – Vol. 121. – P. 2562–2577.
44. *Marwitz J., Politovich M., Bernstein B., Ralph F., Neiman R., Ashendon R., Bresch J.* Meteorological conditions associated with the ATR 72 aircraft accident near Rosenlawn, Indiana, on 31 October 1994 // *Bull. American Meteorol. Soc.* – 1997. – Vol. 78. – P. 41–52.
45. *Matrosov S.* A method to estimate vertically integrated amounts of cloud ice and liquid and mean rain rate in stratiform precipitation from radar and auxiliary data // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* – 2009. – Vol. 48. – P. 1398–1410.
46. *Meisinger C.L.* The precipitation of sleet and the formation of glaze in the eastern United States, January 20 to 25, 1920, with remarks on forecasting // *Mon. Weather Rev.* – 1920. – Vol. 48. – P. 73–80.
47. *Pytlak P., Musilek P., Lozowski E., Arnold D.* Evolutionary optimization of an ice accretion forecasting system. – *Mon. Weather Rev.* – 2010. – Vol. 138. – P. 2913–2929.
48. *Ramer J.*: An empirical technique for diagnosing precipitation type from model output // *Preprints, 5<sup>th</sup> International Conf. on Aviation Weather Systems, Vienna, VA, AMS, 1993.* – P. 227–330.
49. *Rauber R.M., Olthoff L.S., Ramamurthy M.K., Kunkel K.E.* Further investigation of a physically based, non-dimensional parameter for discriminating between locations of freezing rain and ice pellets // *Weather and Forecasting.* – 2001. – Vol. 16. – P. 185–191.



50. *Rauber R.M., Ramamurthy M.K., Tokay A.* Synoptic and mesoscale structure of a severe freezing rain event: The St.-Valentine's day ice storm // *Weather and Forecasting.* – 1994. – Vol. 9. – P. 183-208.
51. *Reisner J., Rasmussen R.M., Bruintjes R.T.* Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model // *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* – 1998. – Vol. 134. – P. 1071–1107.
52. *Theriault J.M., Stewart R.E.* A parameterization of the microphysical processes forming many types of winter precipitation // *J. Atmos. Sci.* – 2010. – Vol. 67. –P. 1492–1508.
53. *Stewart R.E., Tiu D.T., Chung K.K., Hudak D.R., Lozowski E.P., Oleskiw M., Shepard B.E., Szeto K.K.*: Weather conditions associated with the passage of precipitation type transition regions over eastern Newfoundland // *Atmos.–Ocean.* – 1995. – Vol. 33. – P. 25–53.
54. *Strapp J., Stuart R., Isaac G.*: A Canadian climatology of freezing precipitation, and a detailed study using data from St. John's, Newfoundland // *FAA Internat. Conf. Aircraft In-flight Icing*, Springfield, Virginia, 6-8 May, 1996/
55. *Wandishin M.S., Baldwin M.E., Mullen S.L., Cortinas J., Jr.* Short-range ensemble forecasts of precipitation type // *Weather and Forecasting.* – 2005. – Vol. 20. – P. 609–626.
56. *Westbrook C.D., Illingworth A.J., O'Connor F.J., Hogan R.J.* Doppler radar measurements of oriented planar ice crystals falling from supercooled and glaciated layer clouds // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* – 2010. –Vol. 136 (646). – P. 260–276.
57. *Unterstrasser S., Zangl L.G.* Cooling and melting precipitation in Alpine valleys: an idealized numerical modeling study // *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* – 2006. – Vol. 132. – P. 1489–1508.
58. *Zerr R.J.* Freezing rain: an observational and theoretical study // *J. Appl. Meteorol.* – 1997. – Vol. 36, No. 12. – P. 1647–1661.

*Поступила в редакцию 3.09.2012 г.*

**Число наблюдаемых случаев осадков в виде замерзающих дождя и мороси, дождя или мороси с снегом и тумана с осаждением изморози на станциях (аэродромах) за период 2001-1010 гг.**

Станции	Код явления по КН-01									Общ. число набл.
	49	56	57	66	67	68	69	83	84	
Мурманск	374	0	0	47	4	128	31	2992	369	159020
Архангельск	590	14	33	83	75	238	160	980	462	115360
Салехард	689	1	28	8	45	211	225	770	180	136666
Сыктывкар	416	43	53	311	375	52	231	283	564	122023
Х.-Мансийск	113	0	12	30	46	329	168	531	93	118169
Таллинн	603	256	104	56	17	259	137	72	44	149223
С.-Петербург	178	42	23	67	2	666	187	506	99	170754
Рига	416	195	40	42	25	1098	278	362	206	172699
Вильнюс	1814	322	104	186	88	1419	699	297	201	169027
Минск	1336	603	103	177	27	198	49	197	25	171211
Н.Новгород	657	119	84	85	34	641	354	422	112	157378
Казань	238	3	163	45	276	203	2212	182	48	163305
Москва	888	299	63	347	96	188	220	117	8	172227
Ульяновск	487	58	99	152	71	839	321	458	81	148212
Нижнекамск	849	744	41	98	6	155	285	51	5	155025
Уфа	419	52	241	58	218	986	708	225	164	170286
Самара	1410	124	85	96	39	1958	1554	428	456	170375
Брест	192	24	38	12	29	303	252	11	9	63020
Гомель	614	142	50	99	44	128	89	644	329	116099
Киев	1028	297	34	270	49	664	51	664	161	167822
Львов	1312	196	24	99	12	751	168	919	408	170297
Кривой Рог	1082	186	7	148	11	315	130	225	38	168884
Кишинев	1220	147	29	252	153	105	28	755	321	156745
Одесса	865	34	26	76	12	72	6	90	45	162588
Симферополь	1513	336	101	207	68	7	6	65	23	171172
Воронеж	582	289	348	119	119	65	138	76	738	108964
Саратов	2665	89	966	95	76	170	164	57	4	171740
Харьков	921	472	13	220	9	390	151	661	357	167918
Днепропетровск	1605	133	148	173	38	51	22	66	25	167083
Донецк	2549	337	62	216	20	36	9	14	6	170236
Луганск	1598	526	70	282	33	27	5	97	13	166564
Волгоград	2983	854	103	215	46	73	33	82	69	168212
Запорожье	1028	112	132	156	42	3	3	63	38	143881
Ростов-на-Дону	1154	367	155	440	51	29	3	116	163	169148
Астрахань	841	303	176	63	13	60	11	17	3	165994
Краснодар	1190	55	47	118	19	37	5	478	310	167612
Ставрополь	1802	48	808	105	6	9	2	52	5	154282
Анапа	41	15	3	106	17	69	26	132	43	130106
Майкоп	211	63	26	65	9	12	9	40	10	94241
Мин. Воды	1708	2133	61	76	12	130	0	269	18	171563
Сочи	0	0	0	0	0	0	0	164	15	166575
Нальчик	1592	305	26	3	0	8	1	42	2	62676
Махачкала	90	3	5	4	0	26	11	2	0	57525

## Повторяемость (%) замерзающих осадков (коды КН-01 56, 57, 66, 67)

на станциях (2001-2010 гг.) по месяцам

Станции	Повторяемость (%) по месяцам (1–12)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Мурманск	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
Архангельск	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,9	0,3
Салехард	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1	0,0
Сыктывкар	2,9	0,6	0,4	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,5	2,0
Х.-Мансийск	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0
Таллинн	0,6	0,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,8	1,0
С.-Петербург	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2
Рига	0,2	0,7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,9
Вильнюс	1,0	1,8	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,8
Минск	1,5	1,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	2,6
Н.Новгород	0,8	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,8
Казань	0,7	0,8	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,7	1,9
Москва	1,4	1,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	1,5
Ульяновск	0,4	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,5	1,6
Нижекамск	1,7	0,9	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,5	1,9
Уфа	1,1	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,2	0,9
Самара	0,5	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	1,0
Брест	0,6	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,6
Гомель	1,0	1,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,8
Киев	1,5	1,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,2
Львов	0,8	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,6
Кривой Рог	0,7	0,7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,9
Кишинев	1,2	1,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,2
Одесса	0,3	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
Симферополь	2,5	0,9	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	1,3
Воронеж	3,3	2,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	2,7
Саратов	1,6	2,2	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,7	2,0
Харьков	1,9	0,8	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,5
Днепропетровск	1,1	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5
Донецк	1,5	0,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	1,9
Луганск	2,2	1,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	2,4
Волгоград	2,8	2,3	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	2,9
Запорожье	1,3	0,9	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	1,3
Ростов-на-Дону	3,3	1,2	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	2,1
Астрахань	1,4	0,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,3
Краснодар	0,7	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
Ставрополь	1,8	1,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,4	3,0
Анапа	0,8	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
Майкоп	0,7	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,9
Мин. Воды	4,1	4,8	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	4,8
Сочи	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Нальчик	1,8	1,5	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	1,1
Махачкала	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0