



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

На тему: «Анализ условий образования ледяного дождя»

Исполнитель Капарис Елена Юрьевна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Волобуева Ольга Васильевна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

« 09 » июня 2025 г.

Санкт-Петербург  
2025

## Содержание

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	3
ГЛАВА 1. ПОНЯТИЕ ЛЕДЯНОГО ДОЖДЯ .....	6
1.1 Ледяной дождь, его отличия от замерзающих осадков и ледяной крупы.....	6
1.2 Механизм образования ледяного дождя .....	8
1.3 Метеорологические условия при выпадении ледяного дождя, его распространение по территории России .....	10
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЕДЯНОГО ДОЖДЯ.....	13
2.1 Формирование архива случаев ледяного дождя по пяти округам России.....	13
2.2 Анализ распределения случаев ледяного дождя по месяцам, годам и по рассматриваемой территории .....	15
2.3 Анализ синоптических ситуаций во время ледяного дождя.....	23
2.4 Анализ данных зондирования .....	26
2.5 Анализ метеорологических условий у земли.....	34
ГЛАВА 3. ОБЗОР СЛУЧАЕВ ЛЕДЯНОГО ДОЖДЯ.....	38
3.1 Обзор случая ледяного дождя 20-21 декабря 2022 года на территории Северо-Западного и Центрального округов .....	38
3.2 Обзор случая ледяного дождя 28-29 декабря 2021 года на территории Ростовской области.....	45
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	51
Список использованных источников.....	54
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	56
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	61
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	62
ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....	63

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВМО – Всемирная метеорологическая организация

ВНИИГМИ-МЦД – Всероссийский Научно-исследовательский институт

Гидрометеорологической Информации – Мировой центр Данных

НГО – Нижняя граница облачности

ПФО – Приволжский федеральный округ

СЗФО – Северо-Западный федеральный округ

СКФО – Северо-Кавказский федеральный округ

ЦФО – Центральный федеральный округ

ЮФО – Южный федеральный округ

## ВВЕДЕНИЕ

Ледяной дождь – неблагоприятное метеорологическое явление, которое представляет собой капли, покрытые ледяной коркой вследствие попадания из теплого слоя воздуха в холодный слой у поверхности земли. Это явление тесно связано с гололедом и гололедицей. Так, последствия ледяного дождя могут принести огромный экономический ущерб, особенно энергетической и транспортной отраслям, в том числе авиации – обледенение воздушных судов может привести к катастрофе. Один из последних крупнейших случаев ледяного дождя – случай 25-26 декабря 2010 года на территории Центральной России, в том числе Московской области. Ситуация была близка к катастрофической, зона гололеда в следствие ледяных дождей покрыла большие площади, был нанесен огромный экономический ущерб. После этой ситуации ледяной дождь стали рассматривать подробнее. Однако в настоящее время он недостаточно изучен, поэтому вопрос его исследования актуален.

Целью данной работы является проанализировать метеорологические условия образования ледяного дождя на территории пяти округов России: Северо-Западного, Центрального, Приволжского, Южного и Северо-Кавказского.

Были поставлены следующие задачи:

- 1) провести обзор литературы по данной теме;
- 2) собрать архив данных по ледяному дождю с 1 января 2000 года по 31 декабря 2023 года по пяти федеральным округам Европейской территории России: Северо-Западному, Центральному, Приволжскому, Южному и Северо-Кавказскому;
- 3) выявить из полученных сроков с ледяным дождем отдельные случаи исходя из времени наблюдения и синоптической ситуации;
- 4) проанализировать распределение случаев ледяного дождя по месяцам и по годам, по рассматриваемой территории;

- 5) проанализировать повторяемость определенных синоптических ситуаций по округам за период с 1 ноября 2020 года по 31 декабря 2023 года;
- 6) проанализировать распределение температуры воздуха с высотой при ледяном дожде в Северо-Западном округе и в Южном и Северо-Кавказском округах за период с 1 ноября 2020 года по 31 декабря 2023 года;
- 7) проанализировать метеорологические условия у земли во время ледяного дождя в тех же округах за тот же период;
- 8) сделать обзор двух случаев ледяного дождя.

## ГЛАВА 1. ПОНЯТИЕ ЛЕДЯНОГО ДОЖДЯ

### 1.1 Ледяной дождь, его отличия от замерзающих осадков и ледяной крупы

Ледяной дождь – твердые осадки в виде мелких прозрачных ледяных шариков, имеющих диаметр от 1 до 3 мм, внутри которых может оставаться незамерзшая вода [1]. Он образуется, когда капля при падении попадает из теплого слоя воздуха в холодный, находящийся у поверхности земли. В нем она либо замерзает полностью, либо покрывается ледяной коркой. Во втором случае при падении на поверхность корка может разбиться, а оставшаяся вода мгновенно замерзает и образуется гололед. Ледяной дождь входит в перечень неблагоприятных метеорологических явлений.

Существуют другие виды осадков, с которыми ледяной дождь может быть спутан. Это замерзающие (переохлажденные) осадки и ледяная крупа. Замерзающий дождь – жидкие атмосферные осадки, капли которых попадают на поверхность в переохлажденном состоянии и при контакте с ней замерзают [2]. В Российском гидрометеорологическом словаре ледяной дождь приравнивается к замерзающему. Ледяная крупа – твердые осадки в виде прозрачных ледяных крупинок с шарообразной или неправильной формой и с диаметром до 3 мм. В отличие от ледяного дождя крупа имеет непрозрачное ядро, нужно приложить некоторое усилие, чтобы ее раздавить и она отскакивает от твердых поверхностей [1].

В иностранных источниках нет отдельного понятия именно для ледяного дождя. На сайте ВМО даются определения для замерзающего или переохлажденного дождя (*freezing rain, supercooled rain*) и ледяной крупы (*ice pellets*). Замерзающий дождь – дождь, при котором температура капель ниже 0°C, при контакте с поверхностью капли могут замерзнуть. Ледяная крупа – прозрачные ледяные шарики с диаметром менее 5 мм сферической или неправильной формы. Они образуются из дождевых капель, реже снежинок,

которые при выпадении из облака попадают в теплый слой и тают полностью или частично, а затем капли попадают в слой воздуха с температурой ниже 0°C, замерзают и падают на поверхность в замерзшем состоянии. Эти ледяные шарики трудно раздавить, при падении они отскакивают от поверхности с характерным звуком [3]. Понятие ледяной крупы в иностранных источниках пересекается с понятием ледяного дождя и ближе всего к нему по смыслу. Механизм образования ледяной крупы и ледяного дождя один – необходим слой теплого воздуха на высоте, в нижележащем холодном слое капли замерзают, однако шарики ледяной крупы замерзают полностью, нелегко давятся и отскакивают от поверхности, а капли ледяного дождя могут быть и полностью замерзшими, и лишь покрытыми ледяной коркой, которая разбивается при падении. Перечисленные характеристики для ледяной крупы указаны и в определении ледяной крупы в Наставлении. В русскоязычных источниках механизм образования ледяной крупы отличается – внутри находится непрозрачное снежное ядро, вокруг которого при падении намерзают переохлажденные капли, образуя прозрачную ледяную оболочку. Таким образом, в иностранных источниках определяют только замерзающие осадки и ледяную крупу, которая пересекается с понятиями ледяного дождя и ледяной крупы в русскоязычных источниках.

В авиационных кодах METAR, SPECI, TAF для ледяного дождя используется то же обозначение, что для замерзающего – FZRA. Ледяная крупа кодируется буквами PL. До 2015 года существовало буквенное обозначение PE (ice pellets) для ледяного дождя и крупы. В синоптическом коде КН-01 для ледяного дождя используется число 79 при описании явлений погоды в срок наблюдений, символ для наноски – равносторонний треугольник с точкой в центре.

## 1.2 Механизм образования ледяного дождя

Для образования ледяного дождя необходим слой воздуха с положительной или слабо отрицательной температурой на высоте до 1-2 км и с толщиной в несколько сотен метров, температура поверхности при этом отрицательная, реже – слабо положительная [4]. Капли, попадая из теплого слоя воздуха (в жидком состоянии при температуре выше  $0^{\circ}\text{C}$  или переохлажденном при температуре ниже  $0^{\circ}\text{C}$ ) в слой воздуха у поверхности земли с отрицательной температурой, начинают замерзать и покрываться ледяной коркой. Такие условия характерны для следующих синоптических ситуаций: теплый фронт, фронт окклюзии, теплый участок на холодном фронте с волнами перед холодным антициклоном. На рисунке 1.1 изображена схема образования разных типов осадков при прохождении теплого фронта. В слое воздуха с положительными температурами выпадает дождь, при движении в сторону холодного воздуха перед фронтом появляются замерзающие осадки, за ними ледяной дождь – когда слой воздуха с отрицательной температурой достаточно большой, чтобы на каплях успевала образоваться ледяная корка. Затем ледяной дождь переходит в снег, выпадающий в слое воздуха с отрицательными температурами.

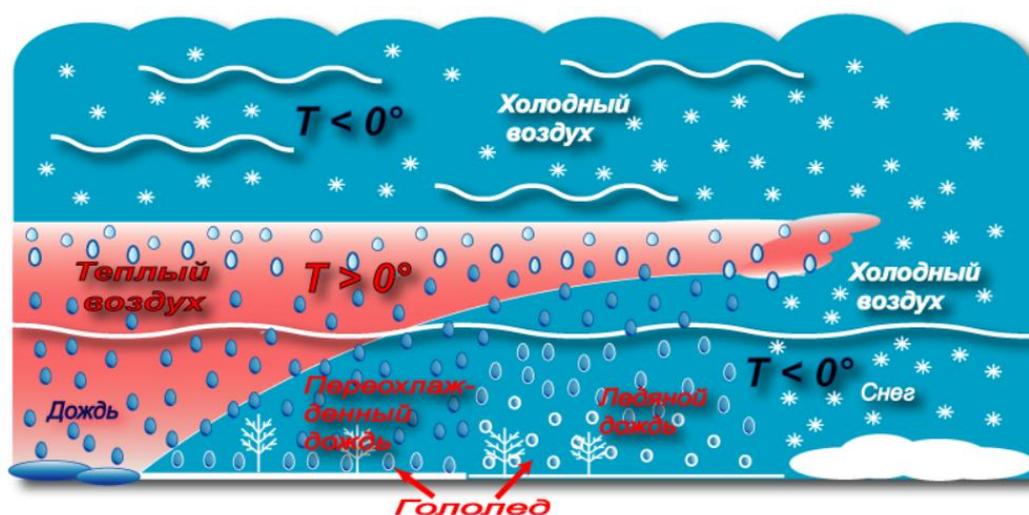


Рисунок 1.1 – Схема образования осадков разных фаз на теплом фронте [5]

Таким образом, в зонах осадков теплого фронта существует закономерность, при которой снег переходит в ледяной дождь, а он в свою очередь в замерзающий дождь. В переходной зоне могут выпадать несколько видов осадков [6]. На рисунке 1.2 представлен реанализ осадков по моделям ICON и EURAD за 21 декабря 2022 года, срок 15 UTC. Этот случай иллюстрирует, что действительно зона замерзающих осадков (отмечены восклицательными знаками) часто является переходной зоной между дождем и снегом (отмечен белыми точками). Ледяной дождь моделью не дается, но он должен наблюдаться в зоне замерзающих осадков или между ней и зоной снега. В данном случае в этот срок ледяной дождь был зафиксирован в северной части зоны замерзающего дождя.

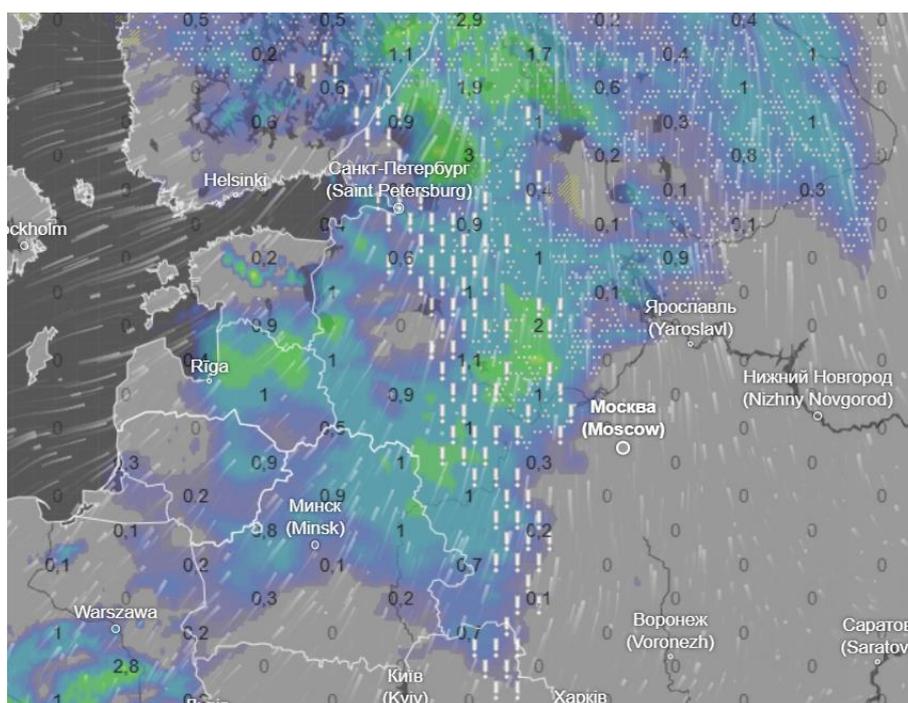


Рисунок 1.2 – Зона замерзающих осадков за 21.12.2022 15 UTC, модель ICON и EURAD

Для замерзающих осадков можно выделить два механизма образования. Первый – классический, при нем в атмосфере существует теплый слой воздуха, капли попадают в нижележащий слой с отрицательной температурой и, переохлажденные, падают на поверхность. Ледяной дождь образуется таким же образом, но холодный слой у поверхности земли должен быть больше, чтобы

капля успела покрыться ледяной коркой. Второй механизм образования носит название «процесс переохлажденного теплого дождя» (supercooled warm rain process). В атмосфере отсутствует теплый слой, замерзающие осадки формируются при слабо отрицательной температуре вследствие столкновения и слияния облачных капель, находясь в переохлажденном состоянии весь период своего роста. Доля замерзающих осадков, которые образуются без теплого слоя на высоте, довольно высока: в исследованиях для аэропортов Москвы, Нижнего Новгорода и Минеральных Вод доля таких случаев выше 70%, для Одессы она составляет 48%, в Европе – от 30 до 40%. В численных моделях при прогнозе фаз осадков в основном учитывается именно классический механизм, подразумевающий наличие теплого слоя воздуха. Существуют алгоритмы прогноза, которые прогнозируют замерзающие осадки и при слабо отрицательной температуре на высоте. Прогноз дождя и снега по существующим алгоритмам реализуется успешно, замерзающих осадков – менее успешно, но значимо, прогноз ледяной крупы осуществляется с наименьшей оправдываемостью [6]. Так как алгоритмы прогноза фазы осадков разрабатывались за рубежом, где не выделяется понятие ледяного дождя, то конкретно это явление моделями не прогнозируется, а близкая к нему ледяная крупа прогнозируется с наименьшей успешностью относительно остальных видов осадков. Исследования замерзающих осадков проводятся более подробно за рубежом, особенно актуальны они для территории США, где это довольно частое явление. Для территории России вопрос исследования и прогнозирования замерзающих и других схожих видов осадков, в том числе ледяного дождя, изучен недостаточно.

### 1.3 Метеорологические условия при выпадении ледяного дождя, его распространение по территории России

Один из крупнейших случаев ледяного дождя на территории России произошел 25-26 декабря 2010 года в Московской, Тверской, Нижегородской и

ряде других областей Центральной России. Вследствие продолжительного ледяного дождя приостановили работу аэропорты Москвы Домодедово и Шереметьево из-за обрыва проводов линий электропередач и нехватки антиобледенительной жидкости для воздушных судов, более 400 рейсов было отменено. Ситуация для наземного транспорта была почти катастрофической: множество автомобилей было повреждено, задерживались поезда пригородных маршрутов и поезда дальнего следования, наблюдались перебои в работе метро, были человеческие жертвы. Несколько сотен тысяч человек в ряде областей Центральной России после выпадения ледяного дождя остались без электроэнергии [4]. Данный случай обладал тремя особенностями: имел место мощный вынос теплого воздуха со Средиземного и Черного морей на центр Европейской территории России; ледяные дожди продолжались двое суток – циклон, принесший осадки, смещался медленно из-за резкой меридиональной направленности высотной фронтальной зоны над данной территорией; гололедные отложения после ледяных дождей сохранялись до двух недель, усугубляя тяжелые последствия для энергетической отрасли [7]. После этого случая было выпущено несколько обзоров данной ситуации, началось более активное изучение ледяного дождя.

В 2021 году было выпущено Методическое письмо ГГО № 30 «О метеорологических условиях в период выпадения ледяных дождей» для улучшения качества наблюдений, проводимых на метеорологических станциях, так как ледяной дождь мог быть спутан с другими видами осадков – замерзающим дождем и ледяной крупой. Обобщенные результаты относятся к станциям из различных климатических зон, анализировались данные с 2010 по 2020 гг. [8]. Перечисляются следующие характерные метеорологические условия:

- 1) температура воздуха обычно имеет значение в диапазоне от 2°C до -5°C, среднее значение составляет -2°C;
- 2) высокая относительная влажность воздуха: около 90%;

- 3) падение атмосферного давления за последние 3 часа в среднем на 4 гПа;
- 4) скорость ветра как правило лежит в пределах от 2 до 7 м/с;
- 5) средняя высота нижней границы облачности 300-500 м, наиболее частые формы облаков – разорванно-дождевые и слоисто-дождевые, также часто наблюдаются слоисто-кучевые и высокослоистые;
- 6) продолжительность явления обычно не более одного часа;
- 7) одновременно могут выпадать другие твердые, жидкие и смешанные осадки, ливневые или обложные [8].

На Европейской территории России ледяные дожди в основном выпадают в Южном, Северо-Кавказском, Приволжском федеральных округах, на юге Центрального. Также это явление наблюдается на территории Северо-Западного и Уральского округов, для Сибирского и Дальневосточного округов это более редкое явление. На Дальнем Востоке случаи выпадения ледяного дождя могут иметь настолько серьезные последствия и масштаб, что к ним можно применить термин «ледяной шторм», который часто наблюдается на территории США. Подобный беспрецедентный случай произошел в ноябре 2020 года в Приморском крае – нарастание гололедных отложений длилось почти двое суток и на станции Владивосток их толщина достигала 28 мм [9].

## ГЛАВА 2. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЕДЯНОГО ДОЖДЯ

### 2.1 Формирование архива случаев ледяного дождя по пяти округам России

Были сформированы архивы с наблюдаемыми случаями ледяного дождя для пяти федеральных округов России – Северо-Западного, Центрального, Приволжского, Южного и Северо-Кавказского – за период с 1 января 2000 года по 31 декабря 2023 года. Данные были взяты из архива ВНИИГМИ-МЦД – 8-срочные наблюдения атмосферных явлений [10]. Из списка доступных станций были отобраны станции, располагающиеся в рассматриваемых округах. Списки метеорологических станций для пяти округов представлены в приложении А. В полученных архивах имеются следующие данные: наименование станции (было прописано исходя из индексов станций), индекс станции, год, месяц, день, срок, номер явления, шифр явления, интенсивность, время начало и время конца явления по UTC. Номер явления – номер наблюдаемого явления, отсчитываемый с конца предыдущего срока. Шифр явления представляет собой число от 1 до 82, ледяной дождь шифруется числом 51. Интенсивность указана по визуальным наблюдениям: 0 – слабая, 1 – умеренная, 2 – сильная. Время начала и конца явления указано с точностью до минуты в формате часов и минут (например, 13:05 – 13 часов 5 минут). Если явление длилось до срока, во время него и после, новое время начала ставилось, равное сроку. Например, ледяной дождь длился с 12:30 до 16:30, в этот промежуток попадал срок 15 часов, тогда время начала и конца будет записано в архив следующим образом: 12:30 – 15:00, 15:00 – 16:30, первая запись относится к сроку 15, вторая – к сроку 18. Для разной интенсивности указывались отдельные время начала и конца. Если явление наблюдалось с 21:00 до 0:00 одних суток, оно будет отнесено к сроку 0 уже следующих суток.

Из полученных данных со всеми явлениями по округам с помощью системы управления базами данных Access, способной обрабатывать большие

объемы информации, из всех сроков были отобраны сроки с ледяным дождем, имеющим код 51. Дальнейший анализ данных производился в программе Excel. Для каждой станции для удобства по индексу было прописано название и принадлежность к субъекту России в скобках.

На каждой станции сроки были объединены в одни случаи, исходя из времени и даты наблюдения, при необходимости анализировались синоптические карты. Затем случаи с разных станций были объединены в одни случаи с учетом их расположения и синоптической ситуации. Архивы синоптических карт для всей территории России от Росгидромета имелись с ноября 2020 по декабрь 2023. С 2015 до 2020 года на картах обрезались южные территории. Также для анализа были использованы архивные карты с сайта Wetter.3de [11], на которых просматривались все территории, кроме части Приволжского округа, и результаты реанализа по моделям ECMWF, ICON, EURAD на сайте Ventusky [12]. В таблице 2.1 приведены количество станций и случаев для каждого региона.

Таблица 2.1 – Количество станций и случаев ледяного дождя по округам

Округ	Кол-во станций	Кол-во случаев
Северо-Западный	62	311
Центральный	31	207
Приволжский	43	304
Южный и Северо-Кавказский	42	274
Всего:	178	1096

При дальнейшем анализе оказалось, что в Южном и особенно в Северо-Кавказском округах было относительно мало станций (25 в ЮФО и 17 в СЗФО). При анализе данных зондирования последний округ было невозможно рассматривать отдельно, так как несмотря на то, что там имеются аэрологические станции, в необходимый временной период на них не фиксировался ледяной дождь. Так, Южный и Северо-Кавказский округа в данной работе

рассматривались вместе, в дальнейшем будем называть их южным регионом. Архивы для данных округов были объединены после этапа выявления отдельных случаев. Суммарное количество случаев в таблице отображает сумму рассмотренных случаев отдельно в каждом округе, но не учитывает ситуации, когда один случай мог наблюдаться одновременно в нескольких округах.

Была рассчитана продолжительность явления на каждой станции с учетом того, что время начала и конца явления прерывалось, если явление попадало на срок наблюдения, и что для разной интенсивности фиксировалось свое время начала. Полученная продолжительность – суммарная продолжительность явления на одной станции во время одного случая, без учета интенсивности. В таблице 2.2 представлены средние значения продолжительности для рассматриваемых регионов.

Таблица 2.2 – Средняя продолжительность ледяного дождя по округам

Округ	Средняя продолжительность, ч, мин
Северо-Западный	1:26
Центральный	1:30
Приволжский	1:32
Южный и Северо-Кавказский	1:57

Средняя продолжительность ледяного дождя – около полутора часов во всех регионах, кроме южного – там средняя продолжительность составила почти 2 часа.

## 2.2 Анализ распределения случаев ледяного дождя по месяцам, годам и по рассматриваемой территории

Наибольшее число случаев наблюдалось в Северо-Западном округе – 311, в то же время он намного больше остальных округов по площади. Чтобы примерно оценить частоту случаев ледяного дождя в каждом регионе, введем

коэффициент К, равный числу случаев, поделенному на площадь региона в 100 000 км<sup>2</sup>. Полученные результаты представлены в таблице 2.3:

Таблица 2.3 – Оценка частоты ледяного дождя по округам

Округ	Площадь, км <sup>2</sup>	Площадь, 100 000 км <sup>2</sup>	Число случаев	Коэффициент К, 1/100000 км <sup>2</sup>
СЗФО	16 861 972	168,61972	311	1,84
ЦФО	650 205	6,50205	207	31,84
ПФО	1 036 975	10,36975	304	29,32
ЮФО и СКФО	618 260	6,1826	274	44,32

Полученный коэффициент показывает среднее число случаев на 100 000 км<sup>2</sup>. Можно увидеть, что в Северо-Западном округе ледяной дождь наблюдается намного реже, чем в других регионах, а чаще всего – на территории Южного и Северо-Кавказского округов. На территории Центрального и Приволжского округов он наблюдается практически с одной частотой и эти значения намного больше, чем для Северо-Западного округа.

С помощью программы QGIS было визуализировано распределение количества случаев на каждой станции, результат представлен на рисунке 2.1. Отдельным фрагментом вынесен архипелаг Земля Франца-Иосифа, на острове Хейса расположена геофизическая полярная обсерватория имени Э. Кренкеля, она имеет широту 80°. Можно увидеть две области с наибольшим числом случаев ледяного дождя. Первая область лежит около полосы Москва – Оренбург, в эту область попадают следующие станции (при движении с северо-запада на юго-восток): Вологда, Москва, Рязань, Конь-Колодезь (Липецкая обл.), Безенчук (Самарская обл.), Росташа (Саратовская обл.), Оренбург – на них зафиксировано более 30 случаев – и другие станции. Вторая область расположена в западной части Южного округа, у побережья Азовского моря. Более 30 случаев наблюдалось в Таганроге и Гиганте (Ростовская обл.), также в этом регионе заметна концентрация станций с числом случаев от 20 до 29. При выносе теплых влажных воздушных масс с Черного или Средиземного морей и при

отрицательной температуре поверхности в переходные сезоны здесь повышенная вероятность прохождения ледяного дождя.



Рисунок 2.1 – Распределение количества случаев ледяного дождя на станциях

Также выделяются две станции с количеством случаев более 30 в Нижнем Поволжье – Эльтон (Волгоградская обл.) и Астрахань.

Были получены графики распределения случаев ледяного дождя по месяцам и по годам в четырех регионах. На рисунке 2.2 представлен годовой ход случаев ледяного дождя для Северо-Западного округа. Основной период выпадения ледяных дождей на Северо-Западе России – с октября по декабрь, максимальное число случаев приходится на ноябрь – 64 за 24 года. Именно в эти месяцы на данной территории создаются условия для ледяного дождя – холодная поверхность и возможная адвекция теплого воздуха, например, связанная с атлантическими циклонами, что может привести к появлению инверсионного слоя в атмосфере.

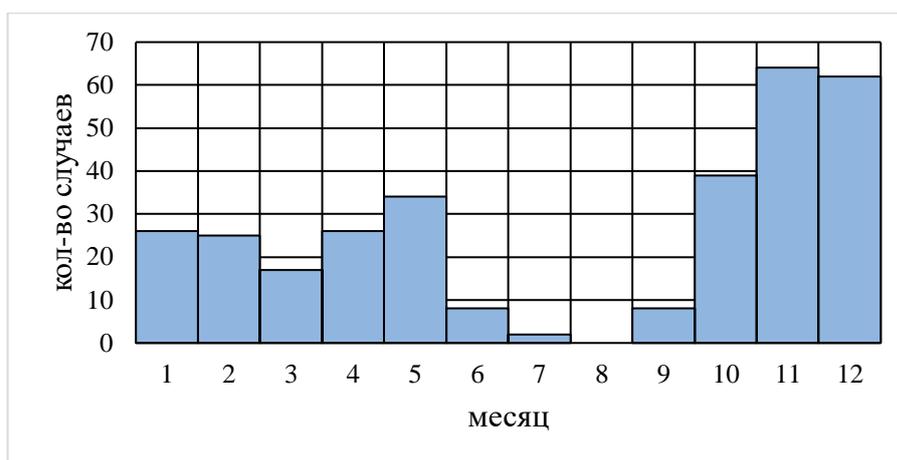


Рисунок 2.2 – Годовой ход количества случаев ледяного дождя в Северо-Западном округе

Небольшой максимум в апреле и мае обусловлен случаями на северных станциях – в данном округе большой разброс станций по широтам. Наблюдалось 2 случая ледяного дождя в июле – на самой северной станции (им. Э.Т. Кренкеля, ГМО, широта 80°) и на станции с континентальным климатом (Усть-Вымь, Коми, широта 62°). В июне наблюдалось 8 случаев на станциях севернее 65°. Ни одного случая не зафиксировано в августе. На рисунке 2.2 представлено распределение случаев ледяного дождя на Северо-Западе России по годам.

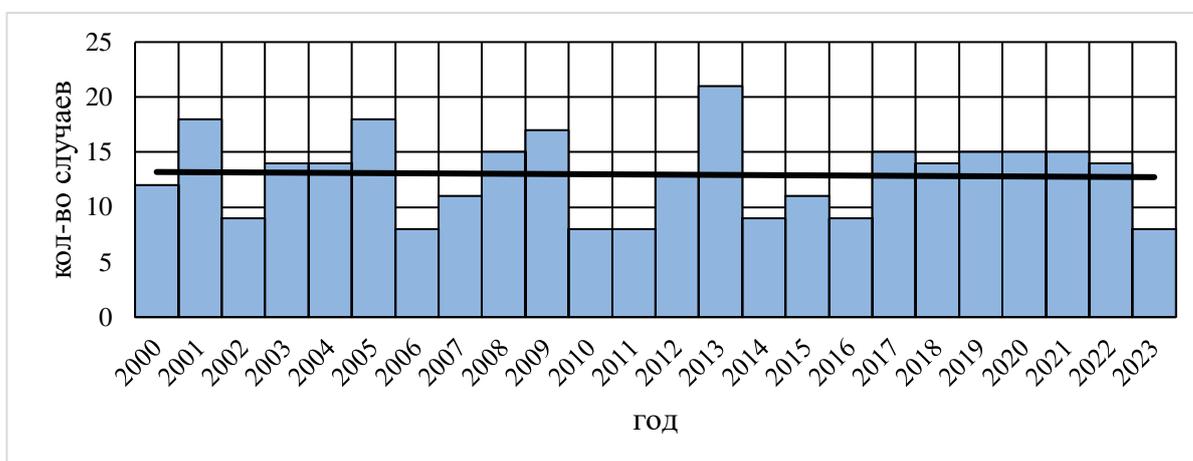


Рисунок 2.3 – Распределение случаев ледяного дождя по годам в Северо-Западном округе

По проведенному линейному тренду можно сказать, что за 24 года количество случаев практически не изменилось. До 2017 года можно видеть, что ход количества случаев имеет выраженные максимумы (2001, 2005, 2009 и 2013)

и минимумы (2002, 2006, 2010 и 2014). Начиная с 2017 года количество случаев за год практически не меняется.

Распределение случаев по месяцам для Центрального округа представлено на рисунке 2.4.

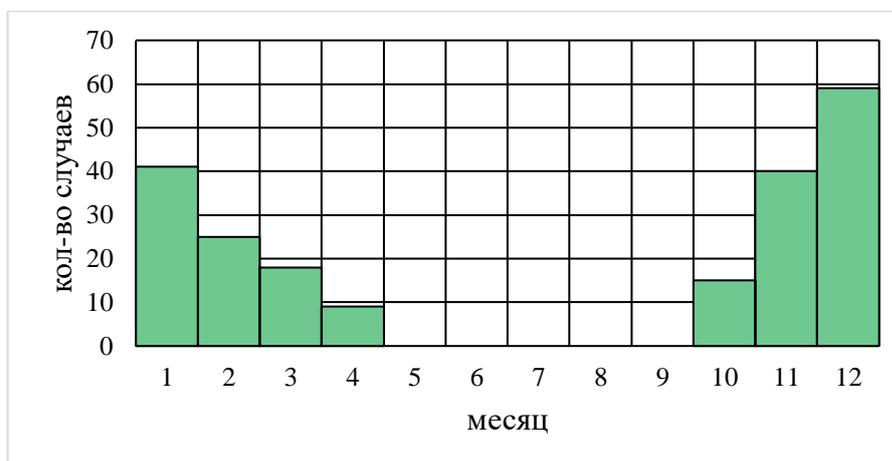


Рисунок 2.4 – Годовой ход количества случаев ледяного дождя в Центральном округе

В Центральном округе ледяной дождь уже не наблюдался в мае и в летние месяцы, как на Северо-Западе, а также это явление не фиксировалось в сентябре. Основной период выпадения ледяных дождей в Центральной России – с ноября по январь, максимум случаев приходится на декабрь – 59, в ноябре и январе количество случаев составило 40 и 41 соответственно. Наименьшее число случаев наблюдается в апреле – 9. По сравнению с Северо-Западным округом месяц, на который приходится максимум случаев, и в общем трехмесячный период выпадения ледяных дождей сдвинулись на 1 вперед, так как на более южных широтах поверхность охлаждается позже, чем на более северных.

Было получено распределение случаев ледяного дождя по годам в Центральной России (рисунок 2.5). В данном регионе линейный тренд более выражен – можно сказать, за 24 года число случаев ледяного дождя увеличилось. Отдельные максимумы наблюдались в 2005, 2009, 2010, 2016, 2019 и 2022 годах. Наибольшее число наблюдалось в 2022 за счет большого числа случаев в ноябре.

Минимумы случаев фиксировались в 2003, 2008, 2011, 2015, 2017 и 2020 годах.

Минимальное количество случаев в 2008 году – 3 случая.

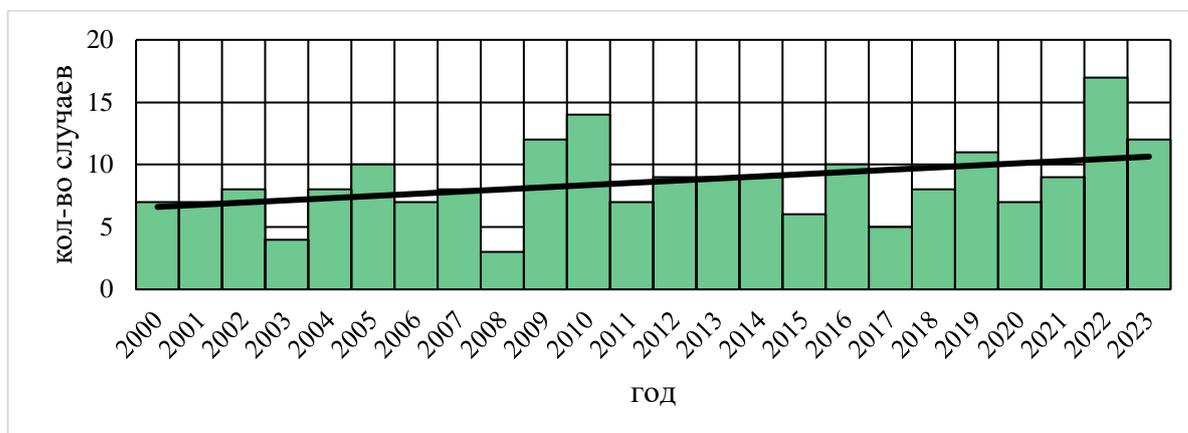


Рисунок 2.5 – Распределение случаев ледяного дождя по годам в Центральном округе

Полученный для Приволжского округа годовой ход представлен на рисунке 2.6:

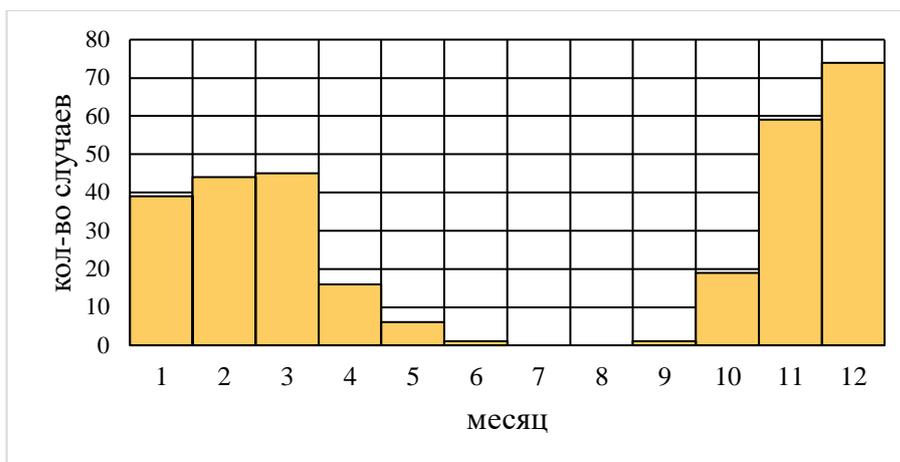


Рисунок 2.6 – Годовой ход количества случаев ледяного дождя в Приволжском округе

Основной период выпадения ледяных дождей в Приволжье – ноябрь-декабрь, максимум случаев приходится на декабрь – 74. С января по март так же фиксируется достаточно большое и практически равное число случаев – 39, 44 и 45 соответственно. В этом регионе уже фиксируются случаи в мае и 1 случай в июне – на станции Бисер (Пермский край), которая расположена глубоко внутри континента. Не было зафиксировано ни одного случая за 24 года в июле и августе.

Распределение случаев ледяного дождя по годам в Приволжском округе изображено на рисунке 2.7. По линейному тренду можно судить, что число случаев ледяного дождя в этом регионе увеличилось за период с 2000 по 2023 год. Отдельные максимумы можно увидеть у 2004, 2009, 2010, 2015, 2019, 2021 и 2023 годов. Наибольшее число случаев – в 2021 и 2023 годах – по 21 случаю за год. Минимумы случаев приходятся на 2003, 2007, 2011, 2017 и 2020 года.

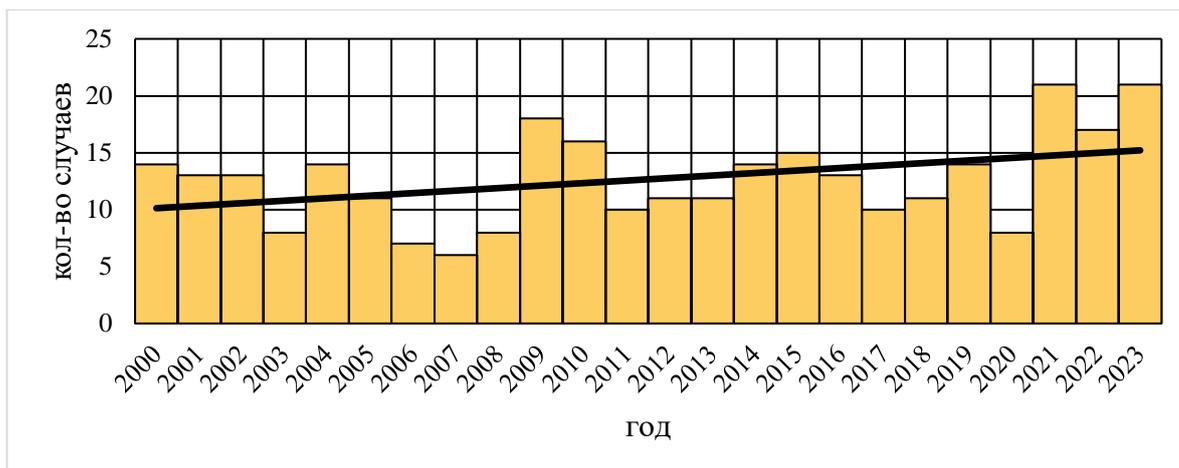


Рисунок 2.7 – Распределение случаев ледяного дождя по годам в Приволжском округе

На рисунке 2.8 представлено распределение числа случаев в течение года для Южного и Северо-Кавказского округов. Основной период выпадения ледяных дождей на юге России – в декабре и январе.

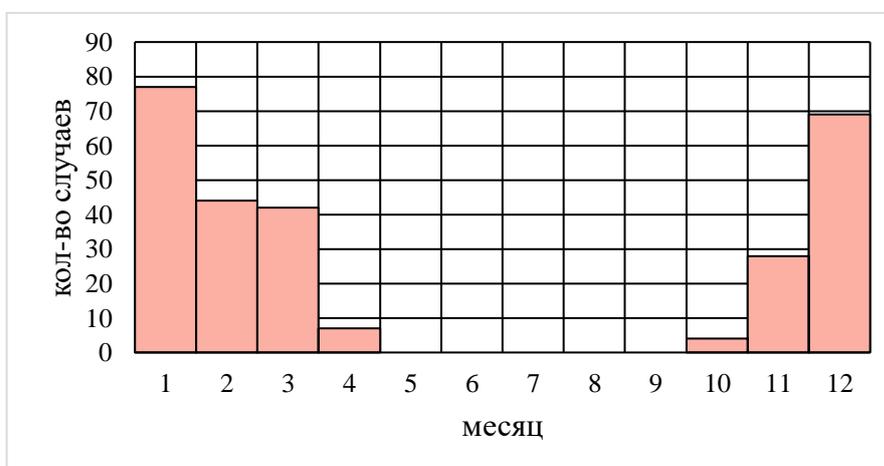


Рисунок 2.8 – Годовой ход количества случаев ледяного дождя в Южном и Северо-Кавказском округах

Максимум случаев приходится на январь – 77 случаев за 24 года. Так же относительно большое количество случаев фиксируется в феврале и марте – 44 и 42 соответственно. В апреле и октябре число случаев резко уменьшается. Ни одного случая ледяного дождя не зафиксировано с мая по сентябрь.

Для Южного региона России полученное распределение по годам отображено на рисунке 2.9.

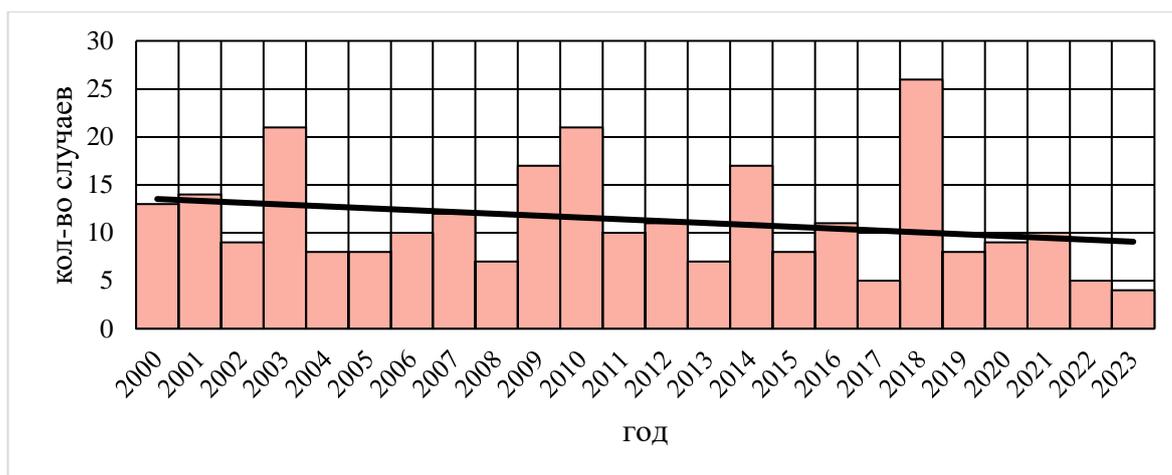


Рисунок 2.9 – Распределение случаев ледяного дождя по годам в Южном и Северо-Кавказском округах

Исходя из линейного тренда можно сказать, что число случаев в этом регионе уменьшается в отличие от Центрального и Приволжского округов. В данном регионе видны хорошо выраженные максимумы случаев ледяного дождя в 2003, 2009, 2010, 2014 и 2018 годах. Наибольшее число случаев приходится на 2018 год – 26. Отдельные минимумы наблюдаются в 2002, 2004, 2005, 2008, 2013, 2015, 2017 и 2023 годах. Наименьшее число случаев в 2023 году – 4.

Таким образом, можно сделать общий вывод о временном и пространственном распределении случаев ледяного дождя на рассматриваемой территории России. Чаще всего это явление наблюдается на юге России – в Южном и Северо-Кавказском округах, реже всего – в Северо-Западном. Проанализировав распределение случаев по месяцам, можно сказать, что в общем на данной территории ледяной дождь чаще всего наблюдается в ноябре и декабре. При движении на юг период выпадения ледяных дождей, как и месяц, в

который фиксируется максимум случаев, сдвигаются вперед: в СЗФО период с октября по декабрь с максимумом в ноябре, в ЦФО – с ноября по январь с максимумом в декабре (сдвиг на 1 месяц вперед), в ПФО – так же с ноября по декабрь с максимумом в декабре, однако большое число случаев наблюдается и с января по март, в ЮФО и СКФО – с декабря по январь с максимумом в январе, а также большое число случаев в феврале и марте. Это связано с тем, что чем южнее широта, тем позже температура поверхности переходит через 0°С при переходе к зимнему сезону и тем раньше температура переходит через 0°С в сторону положительных температур при переходе к летнему сезону. Так, условия для ледяного дождя – холодная подстилающая поверхность и адвекция тепла на высоте – в южных регионах наблюдаются в более поздние весенние месяцы, чем в северных.

Также по полученным данным можно выделить зависимость времени выпадения ледяного дождя от степени континентальности климата – чем глубже в континент, тем в более теплый месяц относительно обычного периода можно зафиксировать ледяной дождь. Единичные случаи в нетипичные месяцы были зафиксированы на станциях, расположенных глубоко в континенте. Например, случай в июле в СЗФО (Усть-Вымь, Коми), 1 случай в июне в ПФО (Бисер, Пермский край) и 1 случай в сентябре (Кушнаренково, Башкортостан).

### 2.3 Анализ синоптических ситуаций во время ледяного дождя

Для анализа синоптических ситуаций был взят период с 1 ноября 2020 года по 31 декабря 2023 года – за этот период имелся архив синоптических карт Росгидромета для всей территории России. Было определено, сколько случаев приходится на каждую ситуацию. Для Северо-Западного округа результаты представлены в таблице 2.4. Преобладающие синоптические ситуации при ледяном дожде для данного региона – прохождение теплого фронта и фронта окклюзии – по 13 и 19 случаев соответственно. Наиболее частая ситуация – прохождение теплого фронта.

Таблица 2.4 – Повторяемость синоптических ситуаций для ледяного дождя в Северо-Западном округе

Синоптическая ситуация	Количество случаев
Теплый фронт	19
Фронт окклюзии	13
Верхний теплый фронт	2
Теплый сектор	2
Теплый участок на холодном фронте с волнами	2
Холодный фронт	2
Тыл циклона	2
Седловина	1
Теплый фронт с волнами	1

Под теплым фронтом с волнами здесь подразумевается случай, когда в течение нескольких дней над территорией Европейской России располагался устойчивый антициклон, а западные регионы подвергались влиянию фронтовой зоны, которая упиралась в антициклон. Она представляла собой медленно смещающийся теплый фронт, ледяной дождь периодически наблюдался на фронте и на теплых участках волн, которые отделялись от теплого фронта холодным участком, а затем снова переходили в теплый фронт (случай 21.02-24.02 2021 года).

В таблице 2.5 представлены синоптические ситуации, которые наблюдались при ледяном дожде в Центральном округе.

Таблица 2.5 – Повторяемость синоптических ситуаций для ледяного дождя в Центральном округе

Синоптическая ситуация	Количество случаев
Теплый фронт	26
Фронт окклюзии	7
Теплый участок на холодном фронте с волнами	6
Верхний теплый фронт	1
Теплый сектор	1
Северо-западная часть гребня	1

В Центральном регионе в отличие от Северо-Западного различие по количеству случаев хорошо видно. Наиболее часто в данном регионе это явление наблюдается при прохождении теплого фронта. Чаше по сравнению с Северо-

Западным округом начинают появляться случаи на теплом участке холодного фронта с волнами.

Результаты для Приволжского округа отображены в таблице 2.6. В данном регионе практически равное количество случаев ледяного дождя фиксировалось при прохождении теплого фронта и фронта окклюзии. Преобладает фронт окклюзии – зафиксировано 24 случая, что на один случай больше, чем при теплом фронте.

Таблица 2.6 – Повторяемость синоптических ситуаций для ледяного дождя в Приволжском округе

Синоптическая ситуация	Количество случаев
Фронт окклюзии	24
Теплый фронт	23
Теплый участок на холодном фронте с волнами (холодный фронт с волнами)	6
Теплый сектор	5
Верхний теплый фронт	1
Вторичный холодный фронт (тыл циклона)	1
Холодный фронт	1

В таблице 2.7 представлены синоптические ситуации при ледяном дожде для Южного и Северо-Кавказского округов.

Таблица 2.7 – Повторяемость синоптических ситуаций для ледяного дождя в Южном и Северо-Кавказском округе

Синоптическая ситуация	Количество случаев
Теплый участок на холодном фронте с волнами (холодный фронт с волнами)	12
Теплый фронт	9
Фронт окклюзии	4
Тыл циклона	1
Юго-западная периферия антициклона	1
Холодный участок холодного фронта с волнами	1

В отличие от других регионов наиболее частая ситуация при ледяном дожде – теплый участок холодного фронта с волнами. В этом регионе довольно часто можно увидеть фронт с несколькими волнами при наличии севернее поля

высокого давления. Меньше случаев фиксировалось на теплом фронте (9) и еще меньше на фронте окклюзии (4).

Таким образом, на рассматриваемой территории наиболее частыми синоптическими ситуациями при ледяном дожде являются теплый фронт (44% случаев во всех регионах), фронт окклюзии (27%) и теплая волна на фронте (15%), последняя ситуация преобладает на юге России (43% случаев в ЮФО и СКФО). При данных процессах наблюдается адвекция тепла, на высоте в атмосфере формируется необходимый для ледяного дождя инверсионный слой, в котором температура повышается с высотой.

#### 2.4 Анализ данных зондирования

Данные зондирования анализировались за тот же период, что синоптические ситуации – с ноября 2020 года по декабрь 2023 года – для двух регионов – Северо-Западного и Южного (ЮФО и СКФО). Данные регионы были выбраны, так как в первом большое количество станций, в том числе проводящих аэрологические наблюдения, а во втором наблюдалась наибольшая частота случаев ледяного. Также эти регионы были выбраны, чтобы посмотреть, есть ли различия в условиях образования ледяного дождя в северных и южных широтах России. В Южном регионе анализ проводился за счет аэрологических станций Южного округа, в Северо-Кавказском были доступны данные на станции Махачкала, но на ней в рассматриваемый период не было зафиксировано случаев ледяного дождя. Списки станций, по которым проводился анализ, расположены в приложении Б.

Данные зондирования брались из архивов аэрологических наблюдений на сайте University of Wyoming [13]. Зондирование проводится только два раза в сутки – в 0 и 12 часов по UTC. На станциях, для которых есть данные зондирования, отбирались случаи для анализа – из двух сроков брался ближайший к сроку с ледяным дождем. Если разница сроков составляла несколько часов (от 3 до 6 часов), а синоптическая ситуация за это время сильно

менялась, данный случай не анализировался. Так, в Северо-Западном регионе не было взято 7 случаев ледяного дождя, по одному из них имелось 2 станции с аэрологическими наблюдениями. Всего для анализа было отобрано 27 сроков, из которых 24 – отдельные случаи. В Южном регионе не анализировались 2 случая, в одном из них несмотря на близкий к 12 часам срок не имелось данных в архиве. Для этого региона анализировалось 12 сроков, из них отдельных случаев – 10.

Кривые стратификации рассматривались на наличие инверсий и их перехода через 0°C, так как для ледяного дождя нужен теплый слой воздуха, чтобы капли в нем могли растаять и позже замерзнуть. В случае без перехода через 0°C капли могли находиться в переохлажденном состоянии. Были рассчитаны мощность инверсий в градусах и в метрах, их вертикальный градиент температуры. Для случаев с переходом через 0°C была рассчитана толщина слоя воздуха с положительной температурой.

Результаты определения вида кривой стратификации для случаев ледяного дождя для Северо-Западного и Южного регионов представлены в таблицах 2.8 и 2.9 соответственно.

Таблица 2.8 – Виды распределения температуры с высотой в случаях ледяного дождя для Северо-Западного региона

Распределение температуры воздуха с высотой	Кол-во случаев
Приподнятая инверсия с переходом через 0°C	12
Приподнятая инверсия без перехода через 0°C	7
Приподнятая инверсия в слое выше 0°C	1
2 приподнятые инверсии без перехода через 0°C	4
2 инверсии с переходом и без перехода через 0°C	1
Температура понижается с высотой	1
В целом температура понижается с высотой	1
Всего сроков	27
Всего отдельных случаев	24

Для Северо-Западного региона были получены более разнообразные результаты из-за числа сроков, в 1 случае наблюдалась инверсия, лежащая полностью в слое положительных температур; в другом случае температура

понижалась с высотой. Для одного случая вид кривой был определен как «в целом понижается с высотой» – в отличие от прошлого случая кривая не шла равномерно на убывание, а имела несколько слоев инверсий и изотермии, но их толщина не превышала 146 м.

Таблица 2.9 – Виды распределения температуры с высотой в случаях ледяного дождя для Южного региона

Распределение температуры воздуха с высотой	Кол-во случаев
Приподнятая инверсия с переходом через 0°C	7
Приподнятая инверсия без перехода через 0°C	2
2 приподнятые инверсии с переходом через 0°C	2
2 приподнятые инверсии без перехода через 0°C	1
Всего сроков	12
Всего отдельных случаев	10

В обоих регионах наблюдались только приподнятые инверсии, приземных не было выявлено. В Северо-Западном 2 срока не имели инверсий, для них продолжительность ледяного дождя составила 32 мин и 7 мин, оба раза фиксировалась слабая интенсивность.

Для инверсий с переходом через 0°C и без были посчитаны средняя продолжительность явления, количество случаев разной интенсивности (0 – слабая, 1 – умеренная, 0;1 – обе степени интенсивности наблюдались примерно равное количество времени при непрерывном ледяном дожде) и градиент в инверсиях. Результаты представлены для двух регионов в таблицах 2.10 и 2.11. В Северо-Западном регионе в одном случае имели место обе инверсии одновременно, для них в столбцах с градиентом не указано среднее значение.

В Северо-Западном регионе наблюдалось практически равное количество сроков с инверсиями с переходом через 0°C и без – 12 и 11 соответственно, а в Южном количество сроков с переходом через 0°C (9 сроков) заметно больше, чем без (3 срока). Это объясняется тем, что при образовании инверсий южные потоки на высоте для Южного региона приходят с более южных и теплых широт, чем южные потоки для Северо-Западного региона. Так, при отрицательной или слабо

положительной температуре у земли на юге на высоте температура чаще переходит через 0°C, чем на северо-западе.

Таблица 2.10 – Характеристики явления и градиент инверсии для разных видов инверсий в Северо-Западном регионе

Распределение температуры воздуха с высотой	Кол-во сроков	Продолжительность, ч, мин			Интенсивность			Градиент, °C/100м		
		ср.	макс.	мин.	0	1	0;1	ср.	макс.	мин.
Инверсии с переходом через 0°C	12	1:21	3:59	0:15	8	3	1	1,9	3,5	0,4
Инверсии без перехода через 0°C	11	1:29	3:53	0:05	8	3		1,0	1,7	0,5
Наблюдались обе инверсии	1	0:26			1				1,7	0,4
Инверсия полностью в слое положительных температур	1	0:19			1			0,5		

Таблица 2.11 – Характеристики явления и градиент инверсии для разных видов инверсий в Южном регионе

Распределение температуры воздуха с высотой	Кол-во сроков	Продолжительность, ч, мин			Интенсивность			Градиент, °C/100м		
		ср.	макс.	мин.	0	1	0;1	ср.	макс.	мин.
Инверсии с переходом через 0°C	9	1:34	5:57	0:05	7	1	1	1,4	2,5	0,7
Инверсии без перехода через 0°C	3	0:35	1:17	0:10	2	0	1	0,7	1,0	0,2

По результатам для Северо-Западного региона можно сделать вывод, что продолжительность и интенсивность ледяного дождя не зависит от того, достигала ли температура на высоте положительных значений. Средняя продолжительность для обоих видов инверсий практически равна – 1 ч 21 мин для инверсий с переходом через 0°C и 1 ч 29 мин для инверсий без перехода. Остальных видов инверсий наблюдалось всего по одному случаю, для срока с двумя разными инверсиями продолжительность составила 26 мин, для срока с

инверсией полностью в слое положительных температур – всего 19 мин. Интенсивность ледяного дождя в большинстве сроков была слабой, сильной (обозначенной числом 2) не наблюдалось, умеренная интенсивность фиксировалась в малом числе сроков. Разные виды инверсий все же были проанализированы на предмет интенсивности явления, возможно, все немногочисленные случаи с умеренной интенсивностью отнеслись бы к одному конкретному виду инверсии. Для Северо-Западного региона для обоих видов инверсии наблюдалось по 8 сроков слабой и по 3 срока умеренной интенсивности, для инверсии с переходом через 0°C имел место 1 случай с обоими степенями интенсивности примерно в равном соотношении по времени (слабая – 1 ч 45 мин, умеренная – 1 ч 20 мин, 31.12.2020, Вологда).

В Южном регионе сроков с инверсиями без перехода через 0°C всего 3, но для них средняя продолжительность меньше, чем для сроков с переходом через 0°C, она составила 35 мин, что в 1,5 раза меньше, чем для инверсий с переходом (продолжительности для этих 3 сроков составили 10 мин, 19 мин и 1 ч 17 мин). Интенсивность явления, как и в Северо-Западном регионе, не зависит от вида инверсии.

В обоих регионах средние градиенты в инверсиях с переходом через 0°C в 2 раза больше, чем в инверсиях без перехода. В Северо-Западном регионе они составили 1,9 °C/100 м и 1,0 °C/100 м соответственно, для Южного – 1,4 °C/100 м и 0,7 °C/100 м. То есть, при переходе через 0°C температура повышалась с высотой более резко, чем в случае без перехода. В таких ситуациях наблюдался мощный приток тепла на высоте, температура этой воздушной массы была намного больше, чем температура воздушной массы у земли, поэтому из-за большого контраста наблюдался большой градиент между воздушными массами, а максимальная температура на высоте достигала положительных значений.

Были проанализированы эти же характеристики, но по синоптическим ситуациям, чтобы выявить возможные закономерности. Результаты для двух регионов представлены в таблицах 2.12 и 2.13. Количество случаев на теплом

фронте составило 12, на фронте окклюзии – 6, остальных ситуаций было малое количество и по ним нельзя сделать выводы.

Таблица 2.12 – Характеристики ледяного дождя и инверсий по синоптическим ситуациям для Северо-Западного региона

Синоптическая ситуация	Кол-во случаев	Продолжительность, ч, мин			Интенсивность			Градиент, °С/100м		
		ср.	макс.	мин.	0	1	0;1	ср.	макс.	мин
Теплый фронт циклона	12	1:25	3:59	0:15	8	3	1	1,6	3,9	0,4
Фронт окклюзии	6	1:15	3:53	0:05	4	1		1,3	2,0	0,8
Теплый участок на холодном фронте с волнами	2	1:07	1:42	0:32	2	0			0,8	0,8
Холодный фронт	1	0:07			1	0		Темп. понижается с высотой		
Теплый сектор циклона	1	0:52			1	0		1,5		
Седловина	1	1:06			0	1		2,1		
Теплый фронт с волнами	1	0:55			1	0		0,9		

Для теплого участка на холодном фронте с волнами в одном случае температура понижалась с высотой, а во втором наблюдалось 2 инверсии – с переходом через 0 °С и без – для обеих градиент составил 0,8 °С/100 м, поэтому эти значения указаны в столбцах максимальных и минимальных значений, а среднее значение для двух инверсий одновременно не рассчитывалось.

Для Северо-Западного региона для двух самых частых ситуаций снова не обнаружилось зависимости между синоптической обстановкой и продолжительностью и интенсивностью явления. Для теплого фронта и фронта окклюзии продолжительность практически равна – 1 ч 25 мин и 1 ч 15 мин соответственно. Градиент в инверсиях также схож, но для теплого фронта его среднее значение выше на 0,3 °С/100 м. В Южном регионе наиболее частые ситуации в рассматриваемый период – теплый фронт и теплая волна на холодном фронте, их наблюдалось равное количество. Продолжительность ледяного дождя на теплом фронте почти в 2 раза больше, чем на теплой волне (1 ч 55 мин и 58

мин соответственно). Это объясняется тем, что при прохождении теплого фронта зона осадков покрывает более обширные территории, чем при теплой волне, соответственно ледяной дождь был более продолжительным.

Таблица 2.13 – Характеристики ледяного дождя и инверсий по синоптическим ситуациям для Северо-Западного региона

Синоптическая ситуация	Кол-во случаев	Продолжительность, ч, мин			Интенсивность			Градиент, °С/100м		
		ср.	макс.	мин.	0	1	0;1	ср.	макс.	мин.
Теплый участок на холодном фронте с волнами	4	0:58	2:41	0:19	4	0	1	1,3	2,5	0,2
Теплый фронт циклона	4	1:55	5:57	0:05	3	1	1	1,3	2,3	0,7
Фронт окклюзии	1	1:17			1			0,6		
Холодный участок холодного фронта с волнами	1	0:10			1			1,0		

Интенсивность явления, как и в Северо-Западном регионе, не зависит от синоптической ситуации. Средний градиент в инверсиях для обеих ситуаций равен 1,3 °С/100 м. Примечателен случай, произошедший при нетипичной синоптической ситуации – на холодном участке фронта с волнами. Ледяной дождь имел слабую интенсивность и длился всего 10 минут.

В таблице 2.14 отображены средние характеристики для данных зондирования в двух регионах: температура у поверхности земли ( $T_3$ ), максимальная температура на высоте ( $T_{\text{макс.}}$ ), она же верхняя граница инверсии, высота максимальной температуры, температура на нижней границе инверсии ( $T_{\text{ниж.}}$ ), мощность инверсии в °С, высота нижней границы инверсии, мощность инверсии в метрах, градиент в инверсиях, высота перехода температуры через 0°С от отрицательных значений к положительным (ниж.) и от положительных к отрицательным (верх.), толщина слоя с температурой  $T$  выше 0°С.

Можно увидеть, что температуры у земли, температуры на верхней и нижней границах инверсий в Южном регионе выше, чем в Северо-Западном. Это объясняется тем, что на юге в целом выше температуры, а на высоте они выше за счет более теплых южных воздушных масс. Для двух регионов мощность инверсий в градусах (около 6,0 °С) и метрах (около 500 м), а также градиент в инверсиях (1,4 °С/100 м и 1,2 °С/100 м соответственно) практически не различаются, то есть, эти характеристики не зависят от широты – натекание теплого воздуха на холодный при ледяном дожде с образованием инверсии происходит в среднем с равной интенсивностью в обоих регионах. Высота нижней границы инверсии в Южном регионе в среднем располагается немного ниже, чем в Северо-Западном (519 и 692 м соответственно), а высота верхней границы в обоих регионах около 1100 м (1174 и 1053 м для Северо-Западного и Южного).

Таблица 2.14 – Характеристики распределения температуры с высотой для Северо-Западного и Южного регионов

Характеристика	СЗФО			ЮФО, СКФО		
	ср.	макс.	мин.	ср.	макс.	мин.
T <sub>з</sub> , °С	-3,7	1,2	-9,4	-2,6	3,6	-10,4
T макс., °С	-0,8	4,6	-14,3	1,4	5,2	-2,1
Высота T макс., м	1174	2498	148	1053	1853	349
T ниж., °С	-6,9	0,2	-15,9	-4,6	-0,5	-14,1
Мощность инв., °С	6,1	11,7	0,6	6,0	15,7	1,4
Высота T ниж., м	692	2188	25	519	1523	141
Мощность инв., м	483	1288	31	534	1243	208
Градиент, °С/100 м	1,4	3,9	0,4	1,2	2,5	0,2
Переход через 0°С (ниж.), м	892	1837	326	691	1286	331
Переход через 0°С (верх.), м	1566	2151	1038	1548	2442	564
Толщина слоя с T выше 0°С, м	675	1322	213	856	1520	181

Последние 3 характеристики для инверсий с переходом через 0 °С рассчитывались для другого числа случаев – 12 и 9 для Северо-Западного и Южного регионов. Средняя толщина слоя воздуха с положительными температурами в Южном регионе выше, чем в Северо-Западном практически на 200 м – на более низких широтах адвекция тепла на высоте более выраженная и,

соответственно, теплый слой воздуха будет мощнее. Нижний переход через 0 °С в Южном регионе начинается раньше, чем во втором регионе, так же, практически на 200 м, это говорит о более высоких температурах наступающей теплой воздушной массы по сравнению с Северо-Западным регионом. Высота верхнего перехода через 0 °С в обоих регионах около 1500 м (1566 и 1548 м для Северо-Западного и Южного регионов).

Можно сделать вывод, что в Южном регионе наблюдаются более выраженные инверсии из-за более высоких температур у земли и на высоте, а южные потоки приносят более теплый воздух, чем южные потоки для Северо-Западного региона. Нижняя граница инверсий немного ниже по сравнению с Северо-Западным регионом, а в случаях с переходом температуры через 0 °С переход происходит раньше, и слой воздуха с положительными температурами больше.

## 2.5 Анализ метеорологических условий у земли

Анализ метеорологических характеристик проводился для Северо-Западного и Южного регионов за тот же период и для тех же станций, что при анализе данных зондирования. В таблице 2.15 представлены результаты расчета средних характеристик: температура у земли ( $T_3$ ), нижняя граница облачности (НГО), барическая тенденция за прошедшие 3 часа (тенд. Р), относительная влажность воздуха, скорость ветра.

Таблица 2.15 – Метеорологические характеристики во время выпадения ледяного дождя

Характеристика	СЗФО			ЮФО, СКФО		
	среднее	макс.	мин.	среднее	макс.	мин.
$T_3$ , °С	-3,6	0,5	-10,2	-2,6	3,3	-10,4
НГО, м	388	800	150	550	1000	100
Тенд. Р, гПа	-1,2	1,6	-4,4	-0,8	0,7	-2,0
Отн. влажность, %	91	100	77	84	98	54
Скорость ветра, м/с	3	5	1	5	11	1

Полученные средние значения укладываются в рамки характерных метеорологических условий, описанных в 1 главе. Средняя температура воздуха лежит в пределах от 2 °С до -5°С, среднее значение для Южного региона выше, чем для Северо-Западного на 1,0 °С. НГО близка к указанному ранее диапазону 300-500 м, при этом в Южном регионе средняя НГО выше. Барическая тенденция отрицательная, но меньше по модулю, чем написанная ранее (4 гПа), в обоих регионах практически равная. Ледяной дождь связан с адвекцией тепла на теплом фронте, фронте окклюзии или теплой волне, соответственно давление будет понижаться. Относительная влажность около 90 %, в Южном регионе она несколько ниже, чем в Северо-Западном. Средняя скорость ветра небольшая, от 2 до 7 м/с.

Была рассчитана повторяемость сопутствующих явлений для двух регионов (процент от всех сроков – 27 для Северо-Западного и 12 для Южного), результаты отображены в таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Сопутствующие явления

Явление	СЗФО		ЮФО, СКФО	
	Кол-во сроков	Повторяемость, %	Кол-во сроков	Повторяемость, %
Гололед	19	70	8	67
Снег	5	19	2	17
Гололедица	4	15	3	25
Дымка	2	7	3	25
Мокрый снег	2	7	-	-
Дождь	1	4	2	17
Мгла	-	-	1	8
Туман просвечивающий	-	-	1	8

Наиболее частое явление – гололед, он наблюдается в обоих регионах почти в 70% случаев. Также вместе с ледяным дождем фиксировались снег, гололедица (только совместно с гололедом), дымка, мокрый снег (только в Северо-Западном регионе), дождь, мгла и туман просвечивающий (последние 2

– только в Южном регионе). Можно увидеть, что в Южном регионе повторяемость снега и дождя одинакова и имеет относительно высокую повторяемость, в то время как в Северо-Западном регионе повторяемость снега больше, чем дождя (19 и 4 % соответственно).

На рисунках 2.10 и 2.11 представлены графики повторяемости форм облачности среднего и нижнего ярусов в % для Северо-Западного и Южного регионов. Для обоих регионов самыми частыми формами являются разорванно-дождевые (Frnb), слоисто-кучевые (Sc), слоисто-дождевые (Ns) и высокослоистые (As). В Южном регионе слоисто-кучевые облака наблюдались заметно чаще, чем высокослоистые, в отличие от Северо-Западного региона. Также в Северо-Западном регионе наблюдались слоистые и кучево-дождевые облака, в Южном – слоистые и высококучевые.

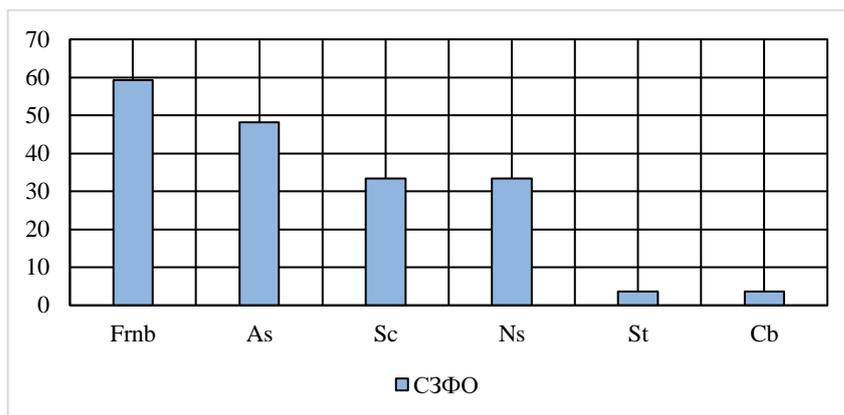


Рисунок 2.10 – Повторяемость форм облачности среднего и нижнего ярусов для Северо-Западного региона, %

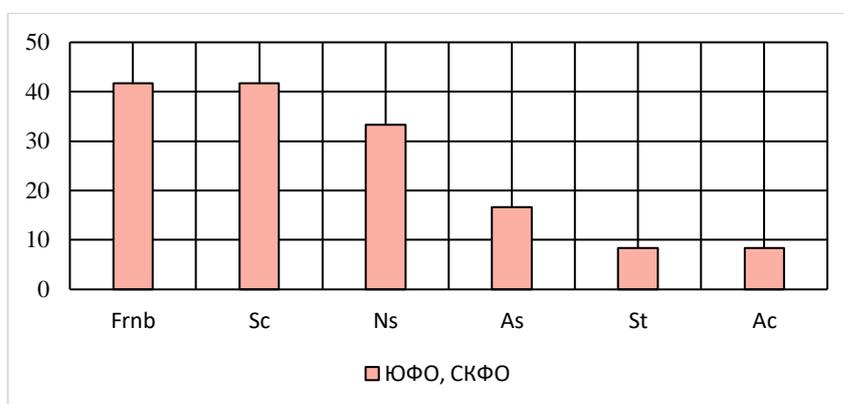


Рисунок 2.11 – Повторяемость форм облачности среднего и нижнего ярусов для Южного региона, %

Были построены графики повторяемости направления ветра для двух регионов, они представлены на рисунках 2.12 и 2.13. В Южном регионе в одно случае фиксировался штиль. Северо-Западный округ имеет большой разброс по станциям, а на ветер у земли могут влиять местные условия, но можно увидеть, что для Северо-Западного региона преобладают южные направления ветра – это характерное направление при адвекции тепла на данной территории, а для Южного – восточные, в этом регионе преобладает эта составляющая ветра перед фронтами циклонов, выходящих с Черного моря, и перед теплой волной, которая чаще всего расположена в зональном направлении.

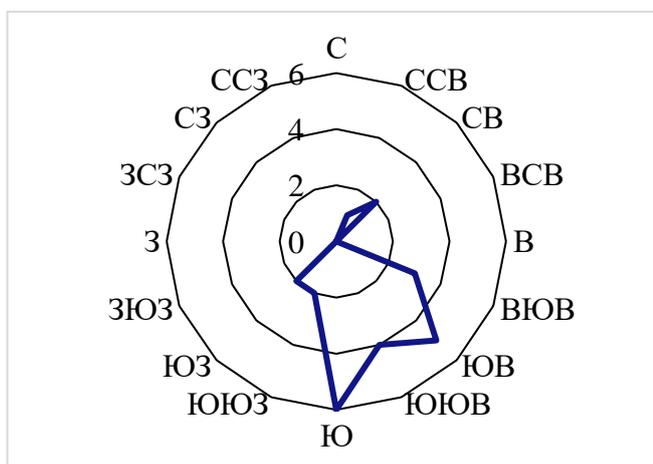


Рисунок 2.12 – Повторяемость направления ветра для Северо-Западного региона

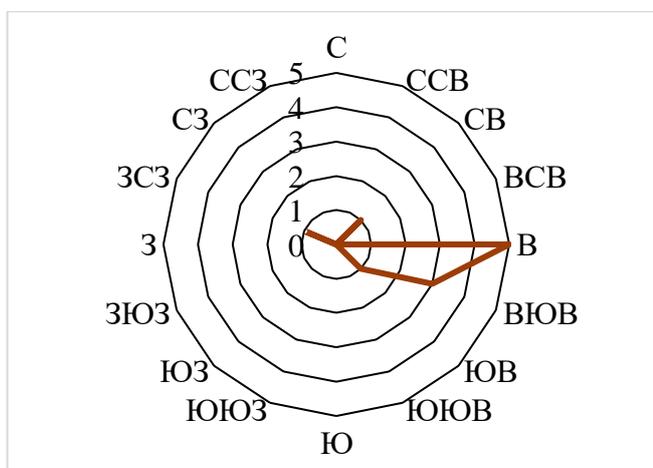


Рисунок 2.13 – Повторяемость направления ветра для Южного региона

## ГЛАВА 3. ОБЗОР СЛУЧАЕВ ЛЕДЯНОГО ДОЖДЯ

### 3.1 Обзор случая ледяного дождя 20-21 декабря 2022 года на территории Северо-Западного и Центрального округов

20-21 декабря 2022 года через Европейскую территорию России проходил атлантический циклон, на теплом фронте которого наблюдалась обширная зона ледяных дождей. На рисунке 3.1 представлена карта приземного анализа от 21 декабря 2022 года за срок 00 UTC.

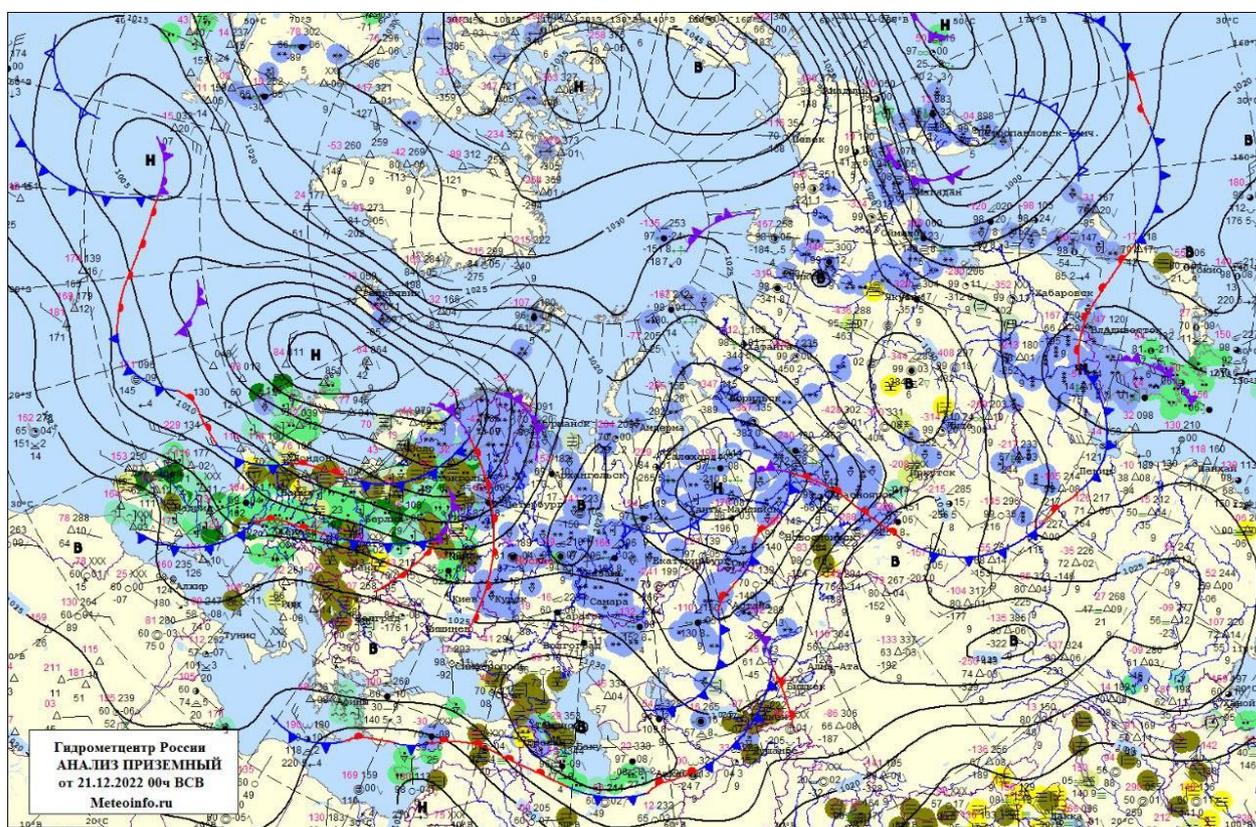


Рисунок 3.1 – Приземный анализ от 21.12.2022 00 UTC

Над северной частью Атлантического океана, Европой и Сибирью располагается барическая депрессия с тремя центрами: первый находится к востоку от Канады над океаном, второй – к северо-западу от Британских островов и третий – над центральной частью Тюменской области, разделенный со вторым небольшой областью высокого давления с центром в районе

Сыктывкара. Со вторым центром связан обширный циклон, получивший имя Франциска. Теплый фронт, сопровождающийся выпадением ледяного дождя, относится именно к этому циклону. Система фронтов лежит в ложбине циклона, у фронта окклюзии начинает формироваться новый центр, который будет виден на приземной карте 22 числа в 12 UTC, но ледяные дожди к этому времени закончатся. Точка окклюзии находится на побережье Швеции вблизи центра Ботнического залива. Линия теплого фронта проходит через Санкт-Петербург, идет западнее Москвы и уходит к Курску. Теплый сектор данного циклона имеет большие контрасты температур, снег сменяется ледяным дождем, моросью и дождем. Как следствие, внутри теплого сектора можно увидеть вторую фронтальную систему с фронтом окклюзии. Циклон смещается на восток, зона ледяного дождя проходит за теплым фронтом и движется на восток вместе с ним. В таблице 3.1 указаны станции, на которых был зафиксирован ледяной дождь, дата (без года), время его начала, конца и продолжительность.

Таблица 3.1 – Время прохождения зоны ледяного дождя по станциям

Станция	Дата	Время начала и конца явления (ч, мин)	Продолжительность (ч, мин)
Великие Луки (Псковская обл.)	20.12	22:00-22:45	0:45
Санкт-Петербург (Ленинградская обл.)	21.12	3:56-4:55, 5:35-8:35	3:59
Петрозаводск (Карелия)	21.12	14:08-15:35	1:27
Паданы (Карелия)	21.12	15:05-15:48	0:43
Переславль-Залесский (Ярославская обл.)	21.12	18:30-23:30	5:00
Коломна (Московская обл.)	21-22.12	23:09-0:34	1:25

Первый ледяной дождь был зафиксирован в Великих Луках Псковской области ночью 20 декабря, затем ночью и утром 21 числа в Санкт-Петербурге, его продолжительность составила почти 4 часа. Днем ледяной дождь был отмечен севернее Санкт-Петербурга – в Петрозаводске и Паданах, к вечеру зона ледяного дождя сконцентрировалась на южной части теплого фронта: он был отмечен в Переславле-Залесском, где его продолжительность составила 5 часов,

и в Коломне. Ледяной дождь сопровождался замерзающими осадками, гололед и гололедица, к которым они привели, создали множество аварийных ситуаций на дорогах, а люди попадали в больницы с травмами. Этот случай отметился обширной зоной ледяного дождя, имеющего большую продолжительность – минимальная продолжительность составила 43 минуты, на двух станциях он длился 4 и 5 часов.

Для анализа метеорологических параметров у земли были выбраны сроки, в которые точно наблюдался ледяной дождь. В Великих Луках был выбран ближайший ко времени начала срок – 21 UTC 20 декабря (ледяной дождь начался в 22:00), для Паданов – 15 UTC (ледяной дождь начался в 15:05). В таблице 3.2 отображены метеорологические параметры на рассматриваемых станциях во время ледяного дождя: температура воздуха  $T$ , НГО, барическая тенденция  $P$ , относительная влажность воздуха  $f$ , направление ветра  $d$ , скорость ветра  $V$ , сопутствующие явления (в течение всего времени выпадения ледяного дождя).

Таблица 3.2 – Метеорологические параметры во время ледяного дождя

Станция	Срок	$T$ , °C	НГО, м	$P$ , гПа	$f$ , %	$d$	$V$ , м/с	Сопутств. явления
Великие Луки (Псковская обл.)	21 (20.12)	-4,7	800	-0,5	92	Ю	1	гололед
Санкт-Петербург (Ленинградская обл.)	6	-3,7	300	-1,5	90	ЮЮВ	2	гололед, гололедица, дымка, дождь
Петрозаводск (Карелия)	15	-4,4	340	-1,8	90	Ю	2	гололед
Паданы (Карелия)	15	-5,9	240	-2,9	93	ЮЮВ	2	гололед
Переславль-Залесский (Ярославская обл.)	21	-2,2	500	-2,6	93	Ю	2	гололед
Коломна (Московская обл.)	0 (22.12)	0,3	400	-2,4	94	Ю	2	гололед, гололедица, дождь

В данном случае ледяной дождь наблюдался в основном при отрицательных температурах от  $-5,9^{\circ}\text{C}$  до  $-2,2^{\circ}\text{C}$ , в Коломне температура была немного выше  $0^{\circ}\text{C}$ . Можно увидеть, что для первых ледяных дождей на станциях Северо-Западного округа температура была ниже, чем для двух станций

Центрального округа, где наблюдались последние ледяные дожди. Это может быть связано с фронтом окклюзии, который внутри теплого сектора смещался к южной части впереди идущего теплого фронта, там и концентрировались оставшиеся к ночи 22 числа ледяные дожди. В Великих Луках НГО составляла 800 м, в Санкт-Петербурге – уже 300 м, на станциях севернее, вблизи точки окклюзии, НГО понизилась до 240 м, на станциях южнее она уже повысилась и составляла 400-500 м. На всех станциях давление за последние 3 часа понижалось, что характерно для прохождения теплого фронта. Минимальное падение фиксировалось при первом ледяном дожде в Великих Луках (-0,5 гПа), максимальное падение – в Паданах, вблизи точки окклюзии (-2,9 гПа), большое падение также было на южных станциях (-2,4 гПа и -2,6 гПа). Влажность воздуха на всех станциях 90% и выше, направление ветра преимущественно южное, скорость ветра – слабая (1-2 м/с). На всех станциях одновременно с ледяным дождем был отмечен гололед, на двух станциях (Санкт-Петербург, Коломна) также наблюдались гололедица и дождь. Этот случай иллюстрирует характерные метеорологические условия во время выпадения ледяного дождя, температура воздуха была в основном отрицательная, на одной станции слабо положительная, фиксировались низкая облачность, падение давления за последние 3 часа, высокая влажность, слабый южный ветер (что характерно для Северо-Западного округа, как было рассчитано ранее), все станции отметили гололед.

Из рассматриваемых станций аэрологические наблюдения доступны для трех станций: Великие Луки, Санкт-Петербург и Петрозаводск. На рисунке 3.2 приведена аэрологическая диаграмма для Петрозаводска от 21 декабря 2022 года 12 UTC. На остальных станциях также наблюдалась инверсия, но не с таким большим градиентом, для Великих Лук и Санкт-Петербурга аэрологические диаграммы вынесены в приложения В и Г соответственно. Были выбраны сроки зондирования, которые ближе всего ко времени наблюдения ледяного дождя. Для Санкт-Петербурга имеются диаграммы за два срока – 00 UTC и 12 UTC 21 декабря (время выпадения ледяного дождя: 3:56-4:55, 5:35-8:35) – до прохождения теплого фронта и после. Инверсия сохранилась, после

прохождения фронта толщина инверсии уменьшилась, но слой воздуха с положительными температурами увеличился.

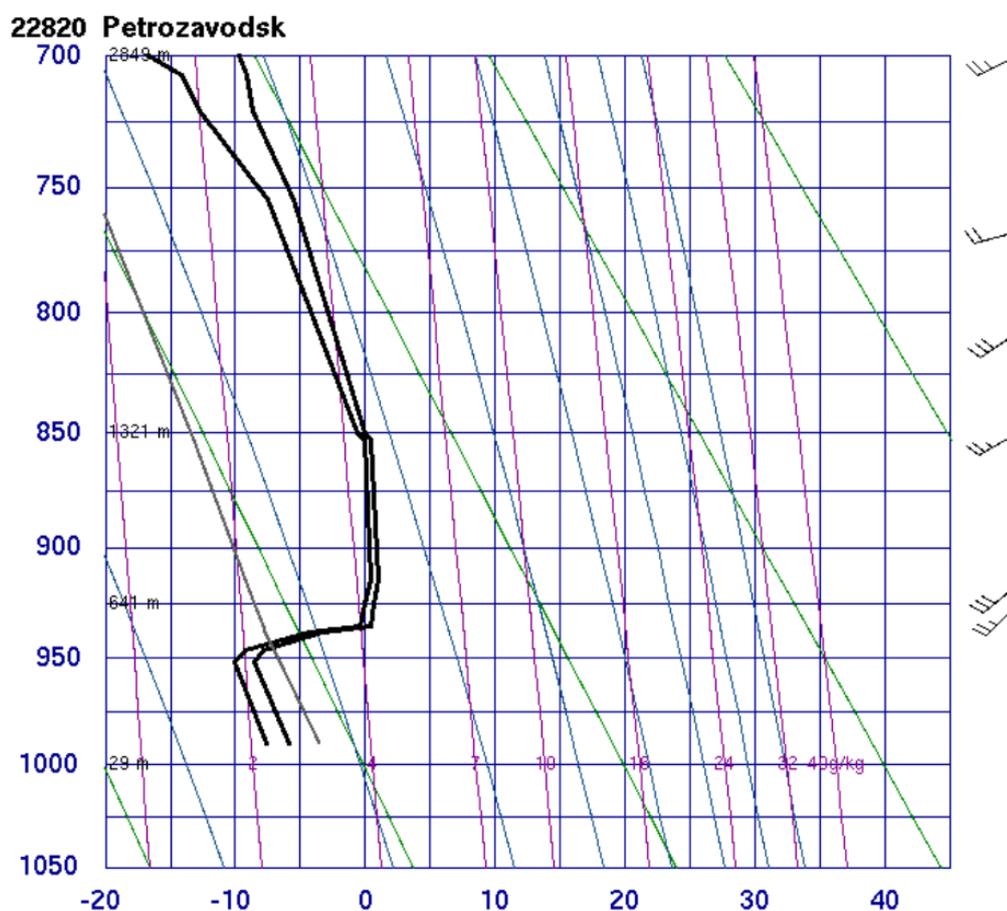


Рисунок 3.2 – Аэрологическая диаграмма для станции Петрозаводск от 21.12.2022 12 UTC

На всех станциях была зафиксирована приподнятая инверсия с переходом через  $0^{\circ}\text{C}$ , характеристики инверсий приведены в таблице 3.3. В Великих Луках наблюдался первый ледяной дождь на теплом фронте, затем он был зафиксирован в Санкт-Петербурге, в 0 UTC теплый фронт был перед пунктом, в 12 UTC уже прошел его, в Петрозаводске наблюдался последний из анализируемых ледяной дождь, на теплом фронте вблизи точки окклюзии. Максимальная температура везде выше  $0^{\circ}\text{C}$ , в Санкт-Петербурге и до, и после фронта она самая высокая, при этом после прохождения теплого фронта достигает  $4,6^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 3.3 – Характеристики инверсий

Характеристика	Великие Луки	Санкт-Петербург		Петрозаводск
	0 UTC	0 UTC	12 UTC	12 UTC
Т макс., °С	0,6	1,2	4,6	1,0
Высота Т макс., м	1549	1390	778	737
Т ниж., °С	-5,1	-9,3	-2,3	-8,5
Мощность инв., °С	5,7	10,5	6,9	9,5
Высота Т ниж., м	261	297	369	414
Мощность инв., м	1288	1093	409	323
Средний градиент, °С/100 м	0,4	1,0	1,7	2,9
Переход через 0°С (ниж.), м	869	1242	436	552
Переход через 0°С (верх.), м	1763	1800	1758	1321
Толщина слоя с Т выше 0°С, м	894	558	1322	769

Высота максимальной температуры (верхней границы инверсии) около полутора километра для ранних случаев, и около 700 м для Санкт-Петербурга после прохождения теплого фронта и для Петрозаводска вблизи точки окклюзии – при приближении теплого фронта теплая воздушная масса напоздает на холодную, максимальная температура на высоте будет наблюдаться все ниже, а затем и у земли заметно повысится. Температура нижней границы инверсии отрицательная, даже для Санкт-Петербурга после теплого фронта. Так, мощность инверсии в градусах в этом случае составляет от 5,7 °С до 10,5 °С, большие значения можно увидеть для Санкт-Петербурга до теплого фронта за счет того, что температура нижней границы инверсии была очень низкой, и для Петрозаводска – на рисунке 3.2 видно, насколько резко повышается температура в слое инверсии. Мощность инверсии в метрах для первых случаев более километра, после прохождения фронта и около точки окклюзии она уже составляет всего 300-400 м. Нижний переход температуры через 0 °С для первых двух сроков наблюдается на высоте 800-1200 м, при наступлении теплого воздуха он фиксируется соответственно уже ниже – на высоте 400-500 м. Верхний переход через 0 °С происходит на высоте около 1800 м на всех станциях, кроме Петрозаводска, который расположен близко к точке окклюзии – там он происходит на высоте около 1300 м. Так, толщина слоя воздуха с

положительными температурами составила в Великих Луках 894 м, в Петрозаводске 794 м, в Санкт-Петербурге до теплого фронта 558 м, а после уже 1322 м.

На анализируемых высотных профилях температуры можно выделить несколько участков инверсий, включающих изотермические слои. В таблице 3.4 для рассматриваемых станций, в том числе для Санкт-Петербурга до и после теплого фронта (т.ф.), приведены максимальная температура участка  $T_{\text{макс.}}$  (для изотермического слоя его постоянная температура), мощность участка в метрах и градиент (для изотермических слоев не указывается).

Таблица 3.4 – Характеристики для различных участков инверсионных и изотермических слоев

Станция	Участок	$T_{\text{макс.}}, ^\circ\text{C}$	Мощность, м	Градиент, $^\circ\text{C}/100 \text{ м}$
Великие Луки	Ниж. инверсия	-0,1	313	1,6
	Изотермич. слой	-0,1	737	
	Верх. инверсия	0,6	812	0,1
Санкт-Петербург до т.ф.	Ниж. инверсия	2,0	101	4,3
	Ср. инверсия	2,6	175	0,3
	Верх. инверсия	4,6	133	1,5
Санкт-Петербург после т.ф.	Ниж. инверсия	-2,3	187	3,7
	Ср. инверсия	-1,3	212	0,5
	Изотермич. слой	-1,3	379	
	Верх. инверсия	1,2	315	0,8
Петрозаводск	Ниж. инверсия	0,4	141	6,3
	Верх. инверсия	1,0	182	0,3

Можно увидеть, что во всех случаях существует нижний слой инверсии с очень большим вертикальным градиентом температуры – в Великих Луках 1,6  $^\circ\text{C}/100 \text{ м}$  (высокий относительно остального участка инверсии), в Санкт-

Петербурге и до, и после фронта сохраняется высокое значение – 4,3 °С/100 м и 3,7 °С/100 м соответственно. Максимальный градиент наблюдался в Петрозаводске – 6,3 °С/100 м.

Так, этот случай ледяного дождя покрывал обширную территорию – он был зафиксирован в четырех областях Северо-Западного и Центрального округов и в республике Карелия – явление было довольно продолжительным, на двух станциях продолжительность составила 4 и 5 часов. На всех станциях был отмечен гололед, температура у земли была в основном отрицательной (от -5,9°С до -2,2°С), на одной станции 0,3°С. На высоте температура везде достигала положительных значений, слой воздуха с температурой выше 0°С имел толщину около 700 м. Нижние участки инверсий для этого случая имели высокие вертикальные градиенты температуры – то есть, разница температур наступающей теплой и впереди расположенной холодной воздушных масс достаточно велика. При прохождении данного теплого фронта наблюдалась интенсивная адвекция тепла на высоте, у земли наблюдались отрицательные значения, что привело к образованию ледяного дождя.

### 3.2 Обзор случая ледяного дождя 28-29 декабря 2021 года на территории Ростовской области

28-29 декабря 2021 года на территории Ростовской области наблюдался продолжительный ледяной дождь. Его зафиксировали на 4 станциях области, в том числе в Ростове-на-Дону. Он привел к образованию гололеда и гололедицы, что сильно ухудшило ситуацию на дорогах. В нескольких новостных источниках сообщается о рекордных пробках в Ростове-на-Дону – уровень заторов весь день по городу 28 числа не опускался ниже 9 баллов, а в утренний и вечерний часы пик достигал 10 баллов.

На рисунке 3.3 представлен фрагмент приземного анализа от 28 декабря 2021 года за 12 UTC. Между двумя фронтальными системами,

располагающимися в Центральной и Юго-Восточной Европе и в Западной Сибири, проходит фронт с волнами, Ростовская область находится под влиянием теплой волны.

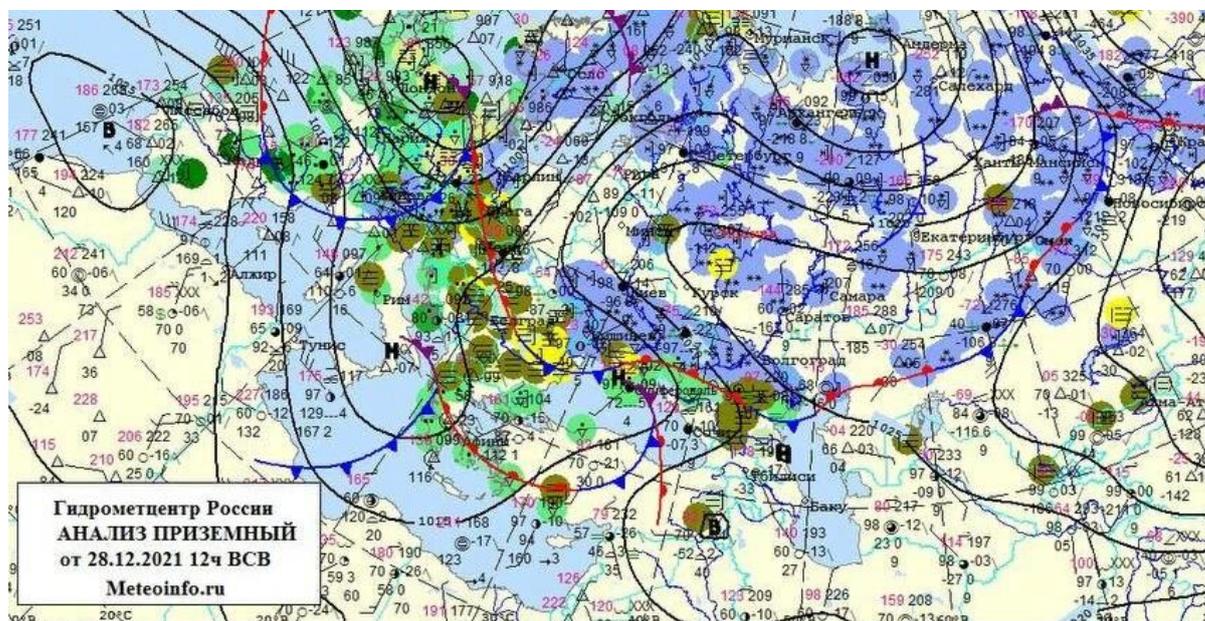


Рисунок 3.3 – Приземный анализ от 28.12.2021 12 UTC

Севернее от нее находится гребень Сибирского антициклона, препятствующий продвижению волны. К ней подходит окклюдированный циклон, сформировавшийся в районе Италии 25 декабря, волна садится на эту фронтальную систему. Уже на следующей карте за 00 UTC 29 декабря (рисунок 3.4) от итальянского циклона останется только фронт окклюзии, а теплая циклон, образовавшийся из теплой волны, уже окклюдируется. В гребне севернее образуется локальный центр высокого давления, в дальнейшем он будет усиливаться и очень медленно уходить на восток, окклюдированная система, влияющая на погоду в Ростовской области, упирается в поле высокого давления и остается практически неподвижной несколько дней. Она продвинется дальше на восток только 31 числа. Это спровоцировало длительные ледяные дожди на данной области. Ледяной дождь наблюдался на теплом фронте циклона, 28-29 числа он медленно продвигался в северном направлении, позже практически не

продвигался до 31 числа, но ледяной дождь после 29 декабря уже не фиксировался.

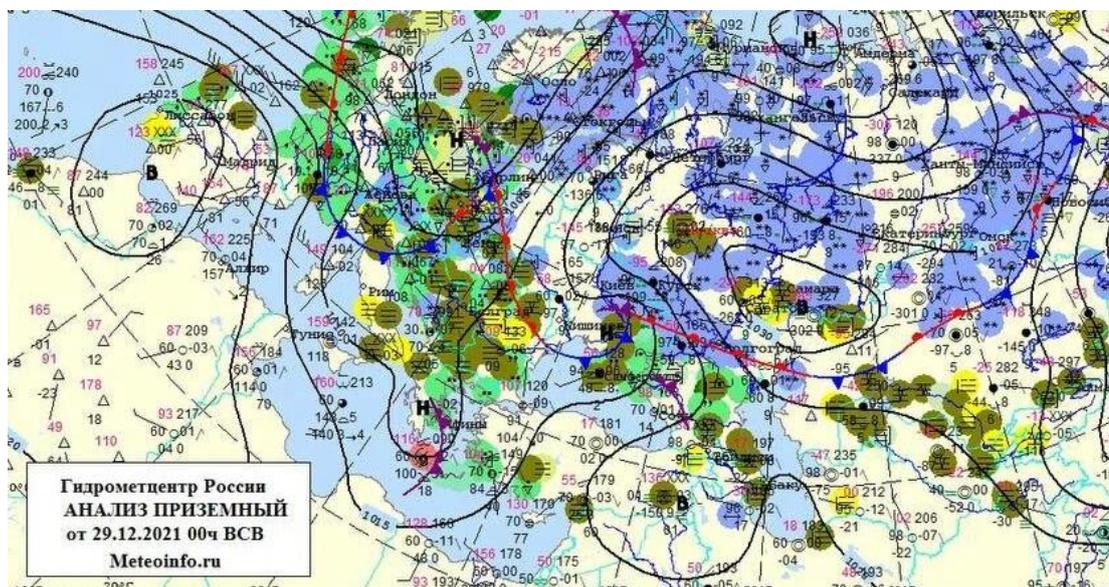


Рисунок 3.4 – Приземный анализ от 28.12.2021 12 UTC

В таблице 3.5 указаны станции, где был зафиксирован ледяной дождь, дата (без года), время и общая продолжительность.

Таблица 3.5 – Время прохождения зоны ледяного дождя по станциям

Станция	Дата	Время начала и конца явления (ч, мин)	Продолжительность (ч, мин)
Ростов-на-Дону (Ростовская обл.)	28.12	7:16-13:13	5:57
Таганрог (Ростовская обл.)	28.12	8:30-11:00, 13:00-13:30	3:00
Цимлянск (Волгодонск) (Ростовская обл.)	29.12	3:31-4:55	1:24
Чертково (Ростовская обл.)	29.12	0:14-0:20, 5:40-7:10, 8:10-8:45, 9:10-10:10, 11:15-13:30	5:26

Утром 28 декабря ледяной дождь был зафиксирован в Ростове-на-Дону и Таганроге, находящемся в 60 км. На обеих станциях он прекратился после 13

часов, общая продолжительность составила почти 6 часов и 3 часа соответственно. Затем ледяной дождь был зафиксирован к востоку от Ростова-на-Дону в Цимлянске ночью 29 числа, там он продлился сравнительно недолго – около полутора часов. Теплый фронт продолжал медленно смещаться, ледяной дождь был зафиксирован в Чертково, расположенном в 240 км севернее Ростова-на-Дону, он длился с полуночи до 13:30 29 числа с перерывами, общая продолжительность составила 5 с половиной часов – в эту половину дня теплый фронт уже практически не смещался, упираясь в антициклон.

В таблице 3.6 отображены метеопараметры, наблюдавшиеся во время ледяного дождя на рассматриваемых станциях. Были выбраны сроки, в которые фиксировался ледяной дождь или ближайšie к его времени выпадения, для двух случаев с продолжительностью более 5 часов было взято по 2 срока.

Таблица 3.6 – Метеорологические параметры во время ледяного дождя

Станция	Дата	Срок	T, °C	НГО, м	P, гПа	f, %	d	V, м/с	Сопутств. явления
Ростов-на-Дону (Ростовская обл.)	28.12	9	-6,4	600	-1,1	92	СВ	2	гололед, снег
		12	-5,2	600	-1,5	92	СВ	3	
Таганрог (Ростовская обл.)	28.12	9	-3,6	300	-1,6	95	СВ	4	гололед
Цимлянск (Волгодонск) (Ростовская обл.)	29.12	0	-3,6	400	-0,5	92	ВСВ	5	гололед
Чертково (Ростовская обл.)	29.12	6	-5,9	500	0,2	96	ВЮВ	5	гололед, метель общая, гололедица, снег ливневый, дымка
		12	-3,5	500	-0,6	97	ВЮВ	4	

Температура воздуха на всех станциях была отрицательной – от -6,4°С до -3,6°С, по мере продвижения теплого фронта температура постепенно повышалась. 28 числа в Ростове и Таганроге НГО составила 600 и 300 м соответственно, 29 числа в Цимлянске – 400 м, в Чертково – 500 м. Давление за прошедшие 3 часа немного падало, в Чертково в срок 6 часов оно падало, затем

повышалось и в итоге было выше, чем 3 часа назад на 0,2 гПа, но далее продолжало падать. Влажность на всех станциях выше 90%, самая высокая – в Чертково – 97%. Ветер имел восточную составляющую (что характерно для Южного региона при выпадении ледяного дождя): 28 числа он имел северо-восточное направление, а по мере развития фронтальной системы поворачивал к юго-восточному. Скорость ветра имела значения от 2 до 5 м/с, в основном 4-5 м/с. На всех станциях был зафиксирован гололед, в Ростове одновременно с ледяным дождем некоторое время шел снег, в Чертково были зафиксированы метель общая (некоторое время после начала ледяного дождя), гололедица, снег ливневый и затем дымка.

Аэрологические наблюдения из данных пунктов доступны только для Ростова-на-Дону. На рисунке 3.5 представлена аэрологическая диаграмма от 28 декабря 2021 года за 12 UTC.

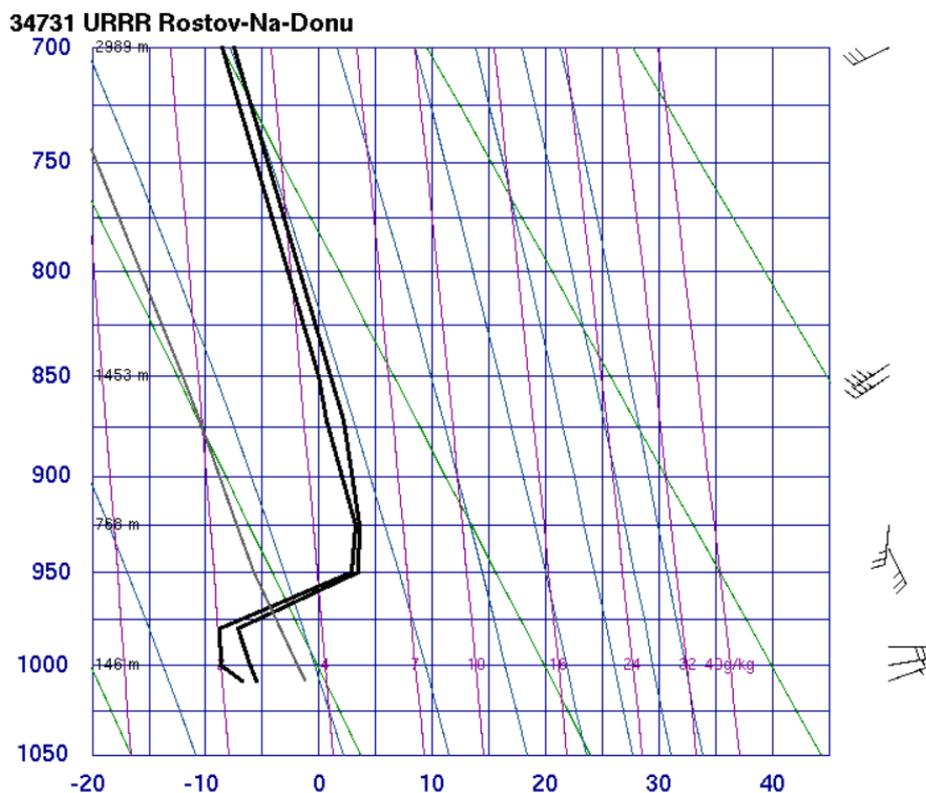


Рисунок 3.5 – Аэрологическая диаграмма для станции Ростов-на-Дону от 28.12.2021 12 UTC

Можно увидеть выраженную приподнятую инверсию, имеется слой воздуха с положительными температурами на высоте. Рассчитанные характеристики данной инверсии представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Характеристики инверсии

Характеристика	Ростов-на-Дону
	12 UTC
Т макс., °С	3,6
Высота Т макс., м	768
Т ниж., °С	-7,1
Мощность инв., °С	10,7
Высота Т ниж., м	304
Мощность инв., м	464
Средний градиент, °С/100 м	2,3
Переход через 0°С (ниж.), м	471
Переход через 0°С (верх.), м	1635
Толщина слоя с Т выше 0°С, м	1164

Температура на высоте доходила до 3,6°С, при этом температура нижней границы инверсии – 7,1°С ниже нуля, так, мощность инверсии составила целых 10,7°С и 464 м. Средний градиент инверсии довольно высок – 2,3°С/100 м. Нижний переход через 0°С произошел на высоте 471 м, а верхний – только на высоте более 1600 м, толщина слоя воздуха с положительной температурой составила 1164 м.

Данный случай отличился продолжительными ледяными дождями вследствие медленного смещения теплого фронта из-за антициклона, стоящего у него на пути. На всех рассматриваемых станциях был зафиксирован гололед, температура у земли (от -6,4°С до -3,6°С) была немного ниже, чем в среднем наблюдается при ледяном дожде, на высоте температура доходила до положительных значений (3,6°С). В этом случае проходила активная адвекция теплого воздуха на высоте – слой воздуха с температурой выше 0°С имел толщину более 1 км, а градиент инверсии был довольно высок (2,3°С/100 м) что говорит о контрастах температур воздушных масс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы была исследована тема «ледяной дождь». Были сформированы архивы по ледяному дождю из базы данных 8-срочных наблюдений атмосферных явлений ВНИИГМИ-МЦД за период с 1 января 2000 года по 31 декабря 2023 года по Северо-Западному, Центральному, Приволжскому, Южному и Северо-Кавказскому федеральным округам. Сроки с ледяным дождем были объединены в случаи в каждом округе, Южный и Северо-Кавказский округа рассматривались вместе. Были получены и проанализированы графики с распределением случаев по месяцам и годам в каждом регионе, повторяемость синоптических ситуаций для случаев ледяного дождя за период с 1 ноября 2020 года по 31 декабря 2023 года. Был проведен анализ данных зондирования для Северо-Западного и Южного с Северо-Кавказским округов, кривые стратификации проверялись на наличие инверсий, были рассчитаны мощность инверсий в градусах и в метрах, их градиент. Были проанализированы метеорологические характеристики у земли в тех же регионах.

На рассматриваемой территории ледяной дождь чаще наблюдается в Южном и Северо-Кавказском округах, реже – в Северо-Западном. Наиболее часто он фиксируется в ноябре и декабре. При этом, при движении на юг период, в течение которого наблюдается большее число случаев, и месяц, на который приходится максимум, сдвигаются в сторону весенних месяцев. Так, на юге России максимум случаев ледяного дождя приходится уже на январь. В среднем число случаев ледяного дождя за 24 года практически постоянно для Северо-Запада, увеличивается в Центральной России и Приволжье и уменьшается на юге России. Наиболее частыми синоптическими ситуациями во время ледяного дождя являются теплый фронт, фронт окклюзии и теплая волна на холодном фронте, причем последняя ситуация преобладает на юге. Эти ситуации в зимнее время могут создать условия для ледяного дождя – наличие более теплого слоя воздуха на высоте при отрицательной температуре поверхности. На юге во время

выпадения ледяных дождей инверсий с переходом через 0°C наблюдалось больше, чем без перехода (9 и 3 случая соответственно), в то время как на северо-западе их число практически равно (12 и 11 случаев). При инверсиях с переходом через 0°C в обоих регионах вертикальные градиенты температуры были в 2 раза выше, чем при инверсиях без перехода. На юге во время инверсий с переходом через 0°C продолжительность ледяного дождя была больше, чем при инверсиях без перехода. Явных закономерностей между распределением температуры с высотой и синоптическими ситуациями не было замечено; на юге продолжительность явления на теплом фронте больше, чем на теплой волне, температуры нижней и верхней границ инверсии там выше, чем на северо-западе. В Южном регионе наблюдаются более выраженные инверсии: нижняя граница инверсий несколько ниже, чем в Северо-Западном регионе, переход температуры происходит через 0 °С раньше, а слой воздуха с положительными температурами имеет большую мощность. Средняя температура у земли в двух регионах слабо отрицательная (-3,6 °С и -2,6 °С), в Южном она выше на 1,0 °С. Средняя НГО – 388 и 550 м для Северо-Западного и Южного регионов соответственно, перед ледяным дождем наблюдается падение атмосферного давления (на 1,2 и на 0,8 гПа), относительная влажность воздуха высокая (91% и 84 %), скорость ветра небольшая (3 м/с и 5 м/с). Наиболее частое сопутствующее явление – гололед, он наблюдается в обоих регионах почти в 70% случаев. Для обоих регионов самыми частыми формами являются разорванно-дождевые (Frnb), слоисто-кучевые (Sc), слоисто-дождевые (Ns) и высокослоистые (As). В Северо-Западном регионе преобладают южные направления ветра у земли, в Южном – восточные.

Были сделаны обзоры двух случаев ледяного дождя: 20-21 декабря 2022 года на территории СЗФО и ЦФО, отличившимся обширной зоной ледяного дождя и его продолжительностью, и 28-29 декабря 2021 года на территории Ростовской области, также имевшего большую продолжительность. Данные случаи иллюстрируют характерные метеорологические условия образования ледяного дождя. При отрицательной температуре у поверхности температура на

высоте достигала положительных значений, слой воздуха с температурой выше  $0^{\circ}\text{C}$  имел толщину до километра (в первом случае), в обоих случаях на нижнем участке инверсии наблюдался высокий вертикальный градиент температуры, что говорит об интенсивной адвекции тепла на высоте и о больших контрастах воздушных масс.

## Список использованных источников

1. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. I. Метеорологические наблюдения на станциях // редактор Г. И. Слабкович. – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – 301 с.
2. Инструктивный материал по кодам METAR, SPECI, TAF [Электронный ресурс]: утв. приказом Росгидромета от 05.03.2015 № 115. – Электрон. текстовые дан. – М., 2015. – Режим доступа : [http://metavia2.ru/help/instruction\\_METAR\\_SPECI\\_TAF.pdf](http://metavia2.ru/help/instruction_METAR_SPECI_TAF.pdf), свободный (дата обращения: 29.03.2025)
3. Всемирная Метеорологическая Организация [Электронный ресурс] : официальный сайт. – Режим доступа : <https://cloudatlas.wmo.int/ru/hydrometeors-other-than-clouds-falling.html>, свободный (дата обращения: 29.03.2025)
4. Ледяной дождь в Москве, Московской области и прилегающих областях центра Европейской территории России 25-26 декабря 2010 года [Электронный ресурс] / А.Д. Голубев, А.М. Кабак, Н.А. Никольская [и др.]. – Электрон. текстовые дан. // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2013. № 349. С. 214–230. – Режим доступа : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20351283>, для авторизир. пользователей (дата обращения: 01.03.2025)
5. Гидрометцентр России [Электронный ресурс] : официальный сайт. – Режим доступа : <https://meteoinfo.ru/mapsynop>, свободный (дата обращения: 10.03.2024)
6. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты [Электронный ресурс] / Н.П. Шакина, И.А. Хоменко, А.Р. Иванова, Е.Н. Скриптунова. – Электрон. текстовые дан. // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2012. № 348. С. 130-161. – Режим доступа : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18724506>, для авторизир. пользователей (дата обращения: 15.03.2025)

7. Метеорологические условия выпадения ледяных дождей 25-26 декабря 2010 г. над центром Европейской части России [Электронный ресурс] / Р.М. Вильфанд, А.Д. Голубев. – Электрон. текстовые дан. // Лед и снег. – 2011. – С. 199-124. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=18249944>, для авторизир. пользователей (дата обращения: 22.03.2025)
8. О метеорологических условиях в период выпадения ледяных дождей [Электронный ресурс] : Методическое письмо ГГО № 30. – Электрон. текстовые дан. // Северо-Западный филиал ФБГУ «Авиаметтелеком Росгидромета» : сайт. – Режим доступа : <http://szf.aviamettelecom.ru/wp-content/uploads/2021/09/Методическое-письмо-ГГО-№30.pdf>, свободный (дата обращения: 15.03.2025)
9. Условия формирования ледяного шторма во Владивостоке в ноябре 2020 года [Электронный ресурс] / И.И. Леонов, Н.Н. Соколихина. – Электрон. текстовые дан. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2021. – С. 69-83. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=47386532>, для авторизир. пользователей (дата обращения: 28.03.2025)
10. Всероссийский Научно-исследовательский институт Гидрометеорологической Информации – Мировой центр Данных [Электронный ресурс] : официальный сайт. – Режим доступа : <http://meteo.ru/>, свободный (дата обращения: 24.05.2025)
11. Wetter3.de [Электронный ресурс] : официальный сайт. – Режим доступа : <https://www.wetter3.de/>, свободный (дата обращения: 23.05.2025)
12. Ventusky [Электронный ресурс] : официальный сайт. – Режим доступа : <https://www.ventusky.com/>, свободный (дата обращения: 28.05.2025)
13. University of Wyoming [Электронный ресурс] : официальный сайт. – Режим доступа : <https://www.uwyo.edu/>, свободный (дата обращения: 22.05.2025)

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Список метеорологических станций для Северо-Западного округа

Номер	Станция	Индекс
1	Им.Э.Т.Кренкеля, ГМО (Архангельская обл.)	20046
2	Малые Кармакулы (Архангельская обл.)	20744
3	Териберка (Мурманская обл.)	22028
4	Колгуев Северный (Ненецкий АО)	22095
5	Янискоски (Мурманская обл.)	22101
6	Мурманск (Мурманская обл.)	22113
7	Святой Нос (Мурманская обл.)	22140
8	Канин Нос (Ненецкий АО)	22165
9	Ковдор (Мурманская обл.)	22204
10	Кандалакша (Мурманская обл.)	22217
11	Краснощелье (Мурманская обл.)	22235
12	Шойна (Ненецкий АО)	22271
13	Индига (Ненецкий АО)	22292
14	Сосновец остров (Мурманская обл.)	22355
15	Калевала (Карелия)	22408
16	Гридино (Карелия)	22422
17	Жижгин (Архангельская обл.)	22438
18	Мезень (Архангельская обл.)	22471
19	Кемь-порт (Карелия)	22520
20	Архангельск (Архангельская обл.)	22550
21	Койнас (Архангельская обл.)	22583
22	Реболы (Карелия)	22602
23	Паданы (Карелия)	22619
24	Онега (Архангельская обл.)	22641
25	Сура (Архангельская обл.)	22676
26	Шенкурск (Архангельская обл.)	22768
27	Сортавала (Карелия)	22802
28	Петрозаводск (Карелия)	22820
29	Вытегра (Вологодская обл.)	22837
30	Каргополь (Архангельская обл.)	22845
31	Няндома (Архангельская обл.)	22854
32	Выборг (Ленинградская обл.)	22892
33	Гогланд (Ленинградская обл.)	22907
34	Великий Устюг (Вологодская обл.)	22981
35	Амдерма (Ненецкий АО)	23022
36	Мыс Константиновский (Ненецкий АО)	23114
37	Нарьян-Мар (Ненецкий АО)	23205
38	Хоседа-Хард (Ненецкий АО)	23219

Продолжение таблицы А.1

39	Елецкая (Коми)	23220
40	Петрунь (Коми)	23324
41	Усть-Цильма (Коми)	23405
42	Усть-Уса (Коми)	23412
43	Ираель (Коми)	23514
44	Усть-Вымь (Коми)	23707
45	Троицко-Печорское (Коми)	23711
46	Сыктывкар (Коми)	23804
47	Койгородок (Коми)	23904
48	Санкт-Петербург (Ленинградская обл.)	26063
49	Белогорка (Ленинградская обл.)	26069
50	Гдов (Псковская обл.)	26157
51	Псков (Псковская обл.)	26258
52	Старая Русса (Новгородская обл.)	26275
53	Пушкинские Горы (Псковская обл.)	26359
54	Великие Луки (Псковская обл.)	26477
55	Советск (Калининградская обл.)	26614
56	Балтийск (Калининградская обл.)	26701
57	Калининград (Калининградская обл.)	26702
58	Железнодорожный (Калининградская обл.)	26706
59	Бабаево (Вологодская обл.)	27008
60	Вологда, Прилуки (Вологодская обл.)	27037
61	Тотьма (Вологодская обл.)	27051
62	Никольск (Вологодская обл.)	27066

Таблица А.2 – Список метеорологических станций для Центрального округа

Номер	Станция	Индекс
1	Бологое (Тверская обл.)	26298
2	Торопец (Тверская обл.)	26479
3	Старица (Тверская обл.)	26499
4	Смоленск (Смоленская обл.)	26781
5	Брянск (Брянская обл.)	26898
6	Красная Гора (Брянская обл.)	26976
7	Трубчевск (Брянская обл.)	26997
8	Кологрив (Костромская обл.)	27164
9	Максатиха (Тверская обл.)	27208
10	Рыбинск, ГМО (Ярославская обл.)	27225
11	Кострома (Костромская обл.)	27333
12	Переславль-Залесский (Ярославская обл.)	27425
13	Можайск (Московская обл.)	27509

Продолжение таблицы А.2

14	Москва, ВДНХ (Московская обл.)	27612
15	Коломна (Московская обл.)	27625
16	Елатьма (Рязанская обл.)	27648
17	Сухиничи (Калужская обл.)	27707
18	Рязань (Рязанская обл.)	27730
19	Плавск (Тульская обл.)	27814
20	Павелец (Рязанская обл.)	27823
21	Тамбов (Тамбовская обл.)	27947
22	Рыльск (Курская обл.)	33166
23	Поныри (Курская обл.)	34003
24	Курск (Курская обл.)	34009
25	Конь-Колодезь (Липецкая обл.)	34026
26	Богородицкое-Фенино (Белгородская обл.)	34110
27	Воронеж (Воронежская обл.)	34123
28	Каменная Степь (Воронежская обл.)	34139
29	Готня (Белгородская обл.)	34202
30	Калач (Воронежская обл.)	34247
31	Валуйки (Белгородская обл.)	34321

Таблица А.3 – Список метеорологических станций для Приволжского округа

Номер	Станция	Индекс
1	Чердынь (Пермский край)	23914
2	Опарино (Кировская обл.)	27083
3	Ветлуга (Нижегородская обл.)	27277
4	Кумены (Кировская обл.)	27296
5	Яранск (Кировская обл.)	27385
6	Нижний Новгород (Нижегородская обл.)	27459
7	Йошкар-Ола (Марий Эл)	27485
8	Казань (Татарстан)	27595
9	Лукоянов (Нижегородская обл.)	27665
10	Порецкое (Чувашия)	27675
11	Краснослободск (Мордовия)	27756
12	Земетчино (Пензенская обл.)	27857
13	Инза (Ульяновская обл.)	27872
14	Пенза (Пензенская обл.)	27962
15	Безенчук (Самарская обл.)	27995
16	Кирс (Кировская обл.)	28009
17	Бисер (Пермский край)	28138
18	Пермь (Пермский край)	28224
19	Дебессы (Удмуртия)	28312
20	Кильмезь (Кировская обл.)	28402
21	Ижевск (Удмуртия)	28411

Продолжение таблицы А.3

22	Сарапул (Удмуртия)	28418
23	Янаул (Башкортостан)	28419
24	Елабуга (Татарстан)	28506
25	Дуван (Башкортостан)	28537
26	Кушнаренково (Башкортостан)	28624
27	Чулпаново (Татарстан)	28704
28	Аксаково (Башкортостан)	28719
29	Уфа (Башкортостан)	28722
30	Стерлитамак (Башкортостан)	28825
31	Росташи (Саратовская обл.)	34059
32	Балашов (Саратовская обл.)	34152
33	Октябрьский городок (Саратовская обл.)	34163
34	Саратов (Саратовская обл.)	34172
35	Ершов (Саратовская обл.)	34186
36	Новоузенск (Саратовская обл.)	34289
37	Александров Гай (Саратовская обл.)	34391
38	Перелюб (Саратовская обл.)	35007
39	Сорочинск (Оренбургская обл.)	35011
40	Зилаир (Башкортостан)	35026
41	Оренбург (Оренбургская обл.)	35121
42	Акбулак (Оренбургская обл.)	35127
43	Домбаровский (Оренбургская обл.)	35233

Таблица А.4 – Список метеорологических станций для Южного округа

Номер	Станция	Индекс
1	Симферополь (Крым)	33946
2	Феодосия (Крым)	33976
3	Керчь (Крым)	33983
4	Урюпинск (Волгоградская обл.)	34240
5	Фролово (Волгоградская обл.)	34356
6	Чертково (Ростовская обл.)	34432
7	Эльтон (Волгоградская обл.)	34476
8	Волгоград (Волгоградская обл.)	34561
9	Верхний Баскунчак (Астраханская обл.)	34579
10	Цимлянск (Волгодонск) (Ростовская обл.)	34646
11	Таганрог (Ростовская обл.)	34720
12	Ростов-на-Дону (Ростовская обл.)	34730
13	Гигант (Ростовская обл.)	34740
14	Ремонтное (Ростовская обл.)	34759
15	Приморско-Ахтарск (Краснодарский край)	34824
16	Элиста (Калмыкия)	34861
17	Яшкуль (Калмыкия)	34866

Продолжение таблицы А.4

18	Астрахань (Астраханская обл.)	34880
19	Краснодар, Круглик (Краснодарский край)	34927
20	Лагань (Калмыкия)	34984
21	Анапа, МГ (Краснодарский край)	37001
22	Туапсе (Краснодарский край)	37018
23	Армавир (Краснодарский край)	37031
24	Сочи (Краснодарский край)	37099
25	Красная Поляна (Краснодарский край)	37107

Таблица А.5 – Список метеорологических станций для Север-Кавказского округа

Номер	Станция	Индекс
1	Ставрополь, АМСГ (Ставропольский край)	34949
2	Минеральные Воды (Ставропольский край)	37054
3	Буденновск (Ставропольский край)	37061
4	Южно-Сухокумск (Дагестан)	37075
5	Тюлений остров (Дагестан)	37089
6	Зеленчукская (Карачаево-Черкесия)	37112
7	Кисловодск (Ставропольский край)	37123
8	Шаджатмаз (Карачаево-Черкесия)	37126
9	Клухорский перевал (Карачаево-Черкесия)	37196
10	Владикавказ (Северная Осетия - Алания)	37228
11	Грозный (Чечня)	37235
12	Гудермес (Чечня)	37244
13	Сулак, высокогорная (Дагестан)	37461
14	Дербент (Дагестан)	37470
15	Буйнакс (Дагестан)	37471
16	Махачкала (Дагестан)	37472
17	Ахты (Дагестан)	37663

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1 – Список станций с аэрологическими наблюдениями для Северо-Западного округа

Номер	Станция	Индекс
1	Им.Э.Т.Кренкеля,ГМО (Архангельская обл.)	20046
2	Малые Кармакулы (Архангельская обл.)	20744
3	Мурманск	22113
4	Кандалакша (Мурманская обл.)	22217
5	Шойна (Ненецкий АО)	22271
6	Кемь-порт (Карелия)	22520
7	Архангельск	22550
8	Петрозаводск	22820
9	Каргополь (Архангельская обл.)	22845
10	Нарьян-Мар (Ненецкий АО)	23205
11	Сыктывкар	23804
12	Санкт-Петербург	26063
13	Великие Луки (Псковская обл.)	26477
14	Вологда, Прилуки	27037

Таблица Б.2 – Список станций с аэрологическими наблюдениями для Южного и Северо-Кавказского округов

Номер	Станция	Индекс
1	Волгоград (Волгоградская обл.)	34561
2	Ростов-на-Дону (Ростовская обл.)	34730
3	Астрахань (Астраханская обл.)	34880
4	Туапсе (Краснодарский край)	37018
5	Махачкала (Дагестан)	37472

ПРИЛОЖЕНИЕ В

26477 ULOL Velikie Luki

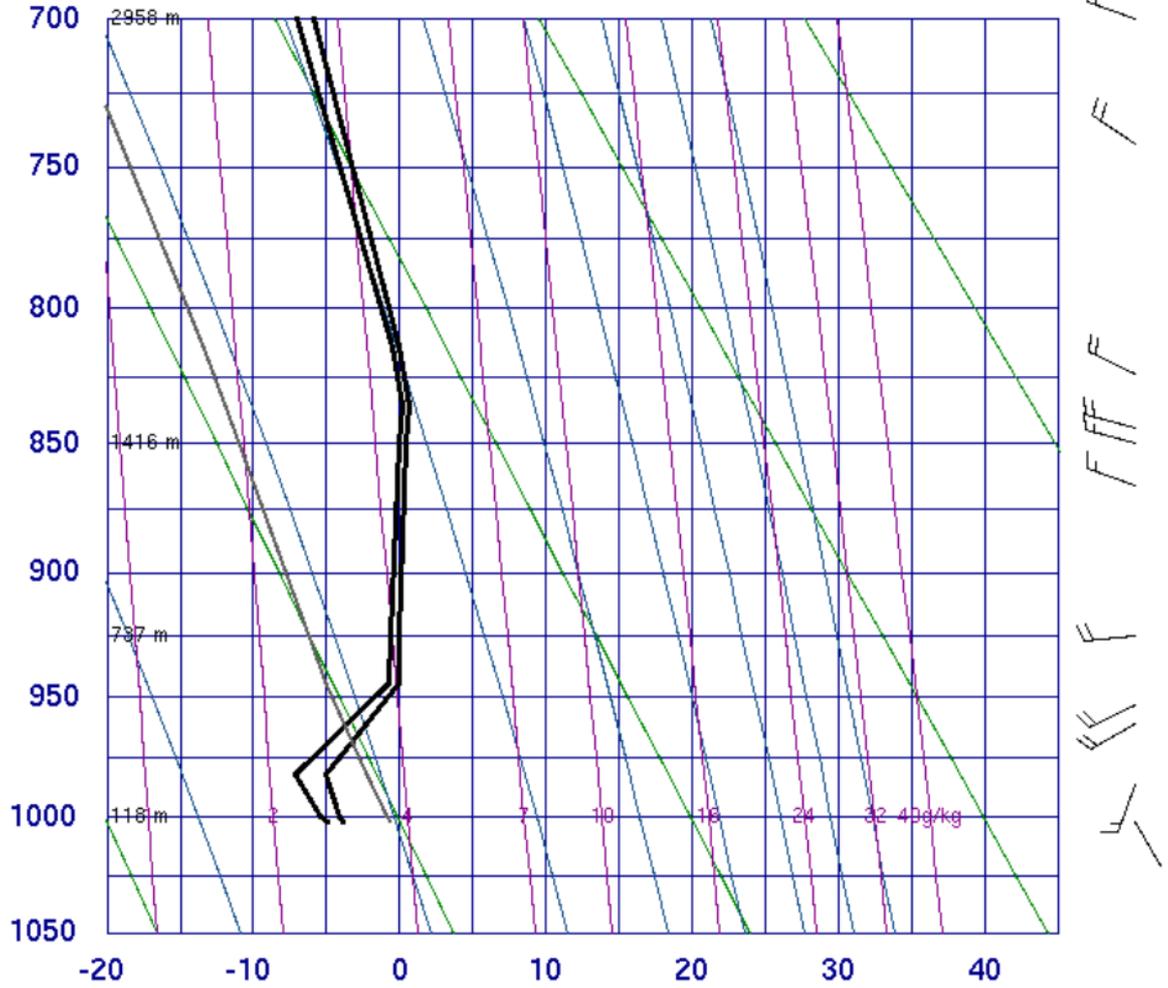


Рисунок В.1 – Аэрологическая диаграмма для станции Великие Луки от 21.12.2022 00 UTC

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

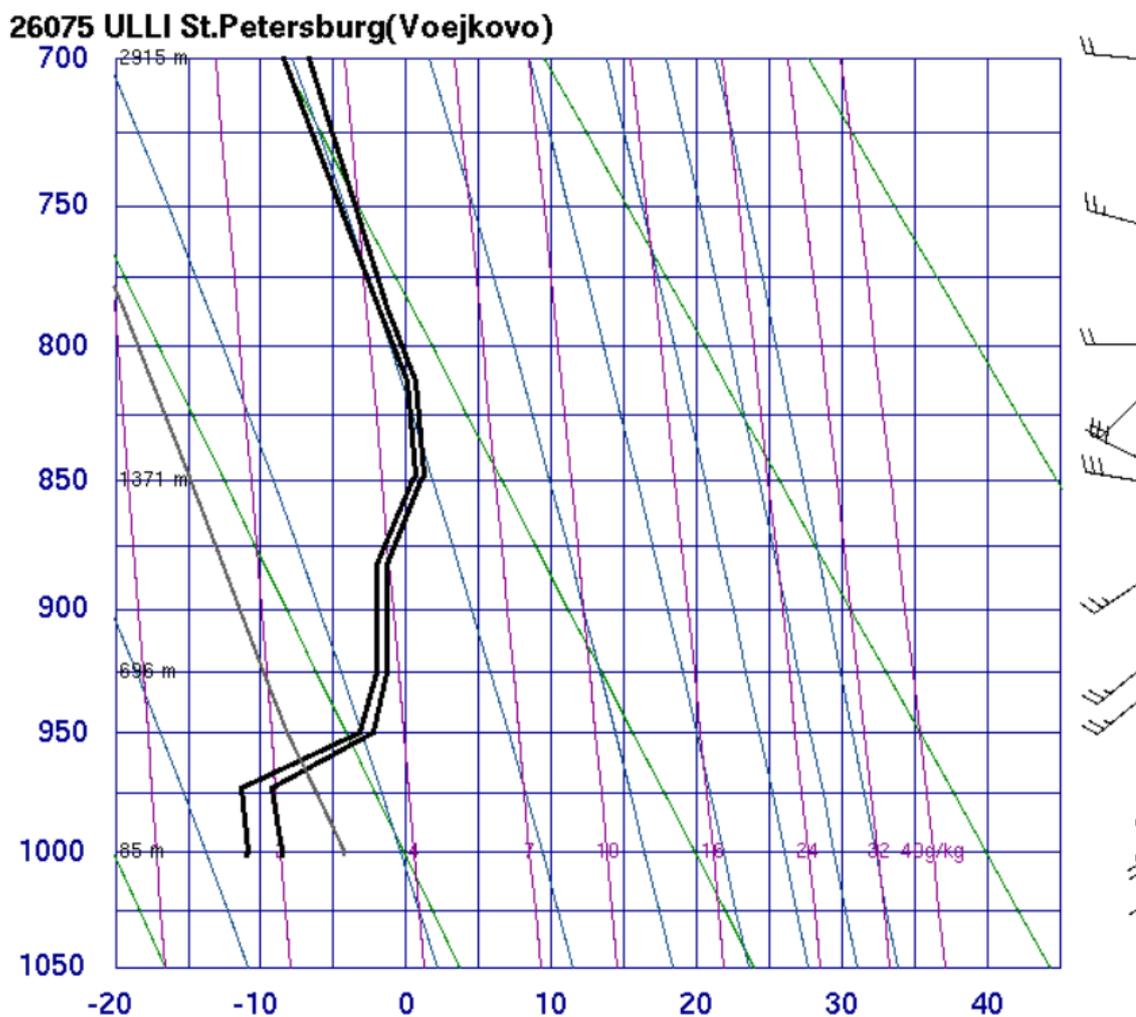


Рисунок Г.1 – Аэрологическая диаграмма для станции Санкт-Петербург от 21.12.2022 00 UTC

26075 ULLI St.Petersburg(Voejkovo)

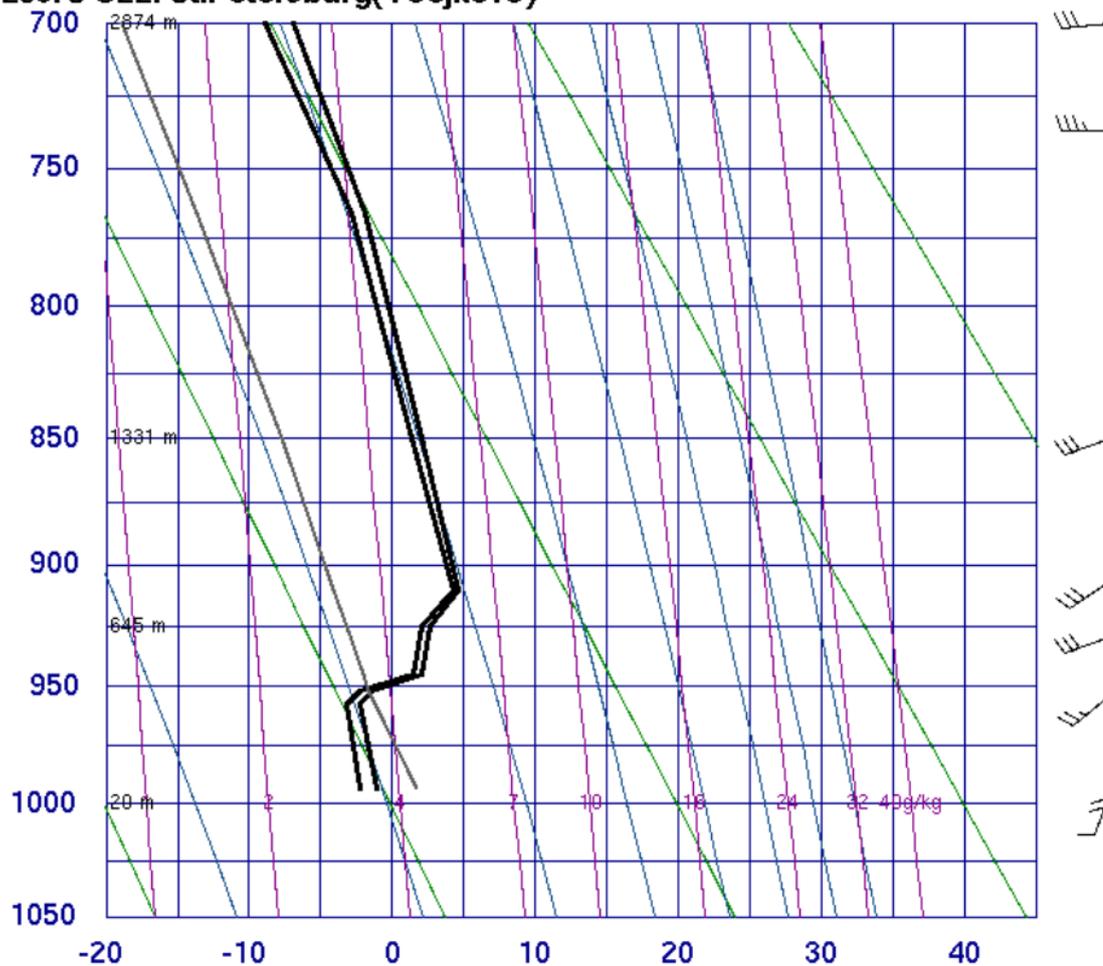


Рисунок Г.2 – Аэрологическая диаграмма для станции Санкт-Петербург от 21.12.2022 12 UTC