



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Оценка условий формирования гололедно-изморозевых отложений в
Ленинградской области»

Исполнитель Кобыляцкий Артем Алексеевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Топтунова Ольга Николаевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой 
(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 04 » июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

Введение.....	5
Глава 1. Виды и условия образования гололёдно-изморозевых отложений.....	8
1.1 Условия образования и виды гололёдно-изморозевых отложений.....	8
1.2 Классификация гололёдно-изморозевых отложений.....	17
1.3 Атмосферные явления, связанные с образованием отложений.....	18
1.4 Синоптические и метеорологические условия формирования отложений.....	19
1.5 Основные методы прогноза явлений.....	21
1.6 Влияние региональных процессов на формирование отложений.....	23
1.7 Особенности, способствующие возникновению отложений в регионе.....	24
Глава 2. Оценка условий формирования гололёдно-изморозевых отложений в Ленинградской области.....	26
2.1 Повторяемость гололёдно-изморозевых отложений в Ленинградской области.....	27
2.2 Метеорологические параметры при образовании отложений.....	29
Глава 3. Оценка типовых синоптических ситуаций для формирования гололёдно-изморозевых отложений на территории Ленинградской области.....	31
3.1 Оценка формирования гололёдно-изморозевых отложений в Санкт-Петербурге.....	32
Случай №1.....	32
Случай №2.....	34
Случай №3.....	36
Случай №4.....	39
Случай №5.....	41
Случай №6.....	43
3.2 Оценка формирования гололёдно-изморозевых отложений в Выборге.....	45
Случай №1.....	45
Случай №2.....	47
3.3 Оценка формирования гололёдно-изморозевых отложений в деревне Ретюнь.....	50
Случай №1.....	50
Случай №2.....	51
3.4 Оценка формирования гололёдно-изморозевых отложений в поселке Лесогорский...	52
Случай №1.....	52
Случай №2.....	54
3.5 Оценка формирования гололёдно-изморозевых отложений в деревне Белогорка.....	55
Случай №1.....	55
Случай № 2.....	56
3.6 Оценка формирования гололёдно-изморозевых отложений в Ломоносове.....	58
Случай №1.....	58

Случай №2	59
3.7 Оценка формирования гололёдно-изморозевых отложений в поселке Сосново	61
Случай №1	61
Случай №2	63
3.8 Анализ отложений мокрого снега на территории Ленинградской области	65
Случай №1	65
Случай №2	66
Случай №3	67
Приложение 1 - Квантильный анализ температур для отложений изморози на исследуемых станциях	72
Приложение 2 - Квантильный анализ температур для отложений гололеда на исследуемых станциях	74
Приложение 3 - Квантильный анализ скорости ветра при отложениях гололёда на исследуемых станциях	77
Приложение 4 - Квантильный анализ скорости ветра при отложениях изморози на исследуемых станциях.....	79
Заключение.....	84
Список использованной литературы.....	86

Введение

Задача мониторинга климата является частью Всемирной климатической программы, выполняемой под эгидой всемирной метеорологической организации (ВМО). Гололёдно-изморозевые отложения (ГИО) являются важным компонентом климатической системы, требующим постоянного наблюдения, поскольку при достижении определенных опасных размеров в сочетании с ветром могут оказывать большое влияние на экономику страны. В последнее время интерес к изучению гололёдно-изморозевых отложений повысился в связи с участвовавшими случаями выпадения ледяных дождей, как в России, так и в других странах. К гололёдно-изморозевым образованиям относятся гололед, изморозь, налипание мокрого снега и отложения замерзшего снега

Синоптическая метеорология (от греч. *synoptikós* – способный всё обозреть), раздел метеорологии, изучающий атмосферные процессы, определяющие условия погоды и их изменения, с целью разработки методов прогноза погоды. Синоптическая метеорология опирается на использование синоптического метода – метода анализа и прогноза атмосферных макропроцессов и условий погоды с помощью синоптических карт, и различных вспомогательных материалов (космических снимков, аэрологических диаграмм, вертикальных разрезов атмосферы и др.). Исследование синоптических процессов и условий погоды с помощью синоптических карт и вспомогательных средств называется синоптическим анализом.

Наличие тех или иных синоптических условий при гололедообразовании находит свое отражение в преобладании определенного вида атмосферных осадков (дождь, морось, туман), а, следовательно, и в преобладании того или иного вида отложений. Если образование зернистой изморози происходит в основном при тумане, то образование гололеда может происходить как при выпадении дождя, так и мороси, или в крупнокапельном тумане.

Кристаллическая изморозь обычно образуется в результате выхолаживания воздуха в антициклонах. Преобладание определенных видов гололёдно-изморозевых отложений зависит, также, и от местных особенностей: близости рек, морей, рельефа и высоты местности над уровнем моря.

Значимость рассматриваемой темы обусловлена тем, что такие метеорологические явления, как гололёд и изморозь, представляют собой опасные природные процессы. Их своевременное прогнозирование имеет большое значение как для сельского хозяйства и транспортной отрасли, так и для повседневной жизни людей. Широкий круг пользователей заинтересован в получении данных о возникновении или исчезновении гололёдно-изморозевых отложений, поэтому Гидрометеорологическая служба должна обеспечивать своевременное информирование и прогнозирование этих явлений.

В связи с этим тема настоящего исследования является значимой, поскольку в нём рассматриваются ключевые факторы, способствующие образованию гололёдно-изморозевых отложений в пределах Ленинградской области.

Объектом исследования выступают явления гололёдно-изморозевых отложений, а предметом — условия их формирования и особенности распределения на территории Ленинградской области.

Цель данной работы – изучить условия образования гололёдно-изморозевых явлений и определить типовые синоптические ситуации, способствующих образованию отложений.

Для реализации поставленной цели решаются следующие задачи:

- рассмотреть виды гололёдно-изморозевых отложений и условия их формирования;
- исследовать влияние метеорологических параметров и выявить самые ключевые;
- рассмотреть физико-географические и климатические особенности Санкт-Петербурга и Ленинградской области;

- определить ключевые атмосферные процессы, которые влияют на образование гололёдно-изморозевых отложений;

- провести классификацию синоптических ситуаций, определить их повторяемость и сезонную изменчивость.

В качестве исходных материалов были использованы метеорологические данные с сайта <https://rp5.ru/>.

С целью повышения качества прогнозирования гололёдно-изморозевых отложений в Ленинградской области было проведено исследование. На основе анализа архивных данных были выбраны семь метеорологических станций в Ленинградской области, на которых имеются данные о гололёдно-изморозевых отложениях за период с 1 января 2019 года по 31 января 2024 года: Выборг, Ломоносов, Сосново, Санкт-Петербург, Лесогорский, Ретюнь и Белогорка.

Теоретическая значимость данной работы заключается в исследовании условий формирования гололёдно-изморозевых отложений с использованием метеорологических данных и методик.

Практическая значимость работы заключается в том, что ее результаты позволили изучить ряд факторов, влияющих на образование гололёдно-изморозевых отложений и разработать алгоритмы их образования с использованием синоптического анализа и современных мезомасштабных численных моделей атмосферы.

В первой главе рассматриваются виды и основные условия формирования гололёдно-изморозевых отложений на территории Ленинградской области. Вторая глава посвящена оценке условий образования гололёдно-изморозевых отложений на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области. В третьей главе рассмотрен анализ типовых синоптических ситуаций образования гололёдно-изморозевых отложений.

Глава 1. Виды и условия образования гололёдно-изморозевых отложений

В первой главе приводятся основные термины, определения, классификации и описание вызывающих обледенение атмосферных явлений.

1.1 Условия образования и виды гололёдно-изморозевых отложений

Атмосферное обледенение понимается как образование льда любого вида на различных поверхностях. Важно различать сами гололёдно-изморозевые отложения и атмосферные явления, которые их вызывают. К таким отложениям относятся гололёд, зернистая и кристаллическая изморозь, мокрый снег, а также смешанные формы.

Процесс формирования явлений происходит за счет воздуха, который соприкасаясь с холодной землёй или объектами, охлаждается до точки росы, и при дальнейшем понижении температуры, избыточный водяной пар оседает на охлаждённых поверхностях. В зависимости от условий могут образовываться разные типы отложений.

Наибольшее прикладное значение из всех видов обледенения имеют гололёд, кристаллическая и зернистая изморозь, мокрый снег.

Гололед – это слой плотного льда, нарастающего на поверхности земли и на предметах преимущественно с наветренной стороны, от намерзания капель переохлажденного дождя или мороси [2, с.10].

Намерзание льда происходит за счёт соударения переохлаждённых частиц воды с охлаждёнными поверхностями, вследствие замерзания формируется слой наледи. Выпадение мелких капель воды образуют матовую наледь. Существует другой путь образования ледяной корки подобной гололёду.

Гололедица – слой льда, образованный смешанными или жидкими осадками (мокрый снег, снег с дождём, дождь, морось), которые выпадая на сильно охлаждённую поверхность застывают наледью.

Гололёд обычно образуется при температурах от 0 до -3 °С, когда переохлаждённые капли дождя, мороси или тумана оседают на поверхности и замерзают.

В отличие от зернистой изморози, эти капли не застывают сразу, а растекаются, сливаются с новыми каплями и постепенно формируют прозрачную ледяную корку под воздействием отрицательной температуры. Этот процесс объясняется умеренным переохлаждением капель и выделением скрытой теплоты при их замерзании. При более сильных морозах гололёд становится менее прозрачным, но сохраняет стекловидную структуру.

В зависимости от синоптических условий гололёд может быть фронтальным, адвективным или радиационного происхождения. Наиболее опасные формы обычно связаны с тёплыми фронтами.

Разные типы гололёда отличаются формой отложений на проводах, а некоторые – и плотностью. Чаще всего наблюдаются следующие разновидности:

- Гребнеобразный;
- Овалообразный;
- Футлярообразный;
- Волнистообразный.

Гололед гребнеобразный — стекловидный слоистый лед с шероховатой поверхностью (рисунок 1.1).

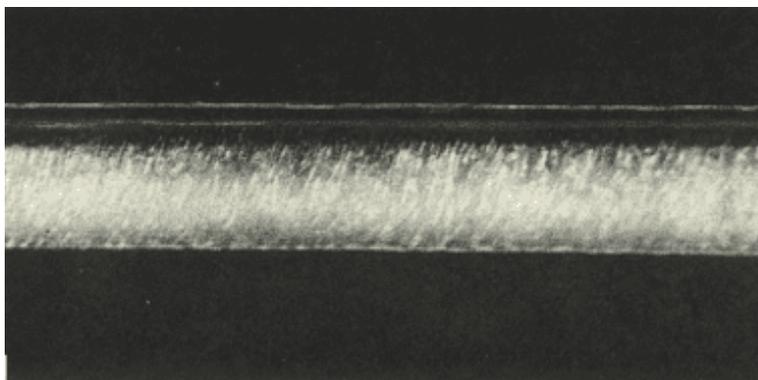


Рисунок 1.1 - Вид гребнеобразного гололеда [1, с.85]

Отложение льда имеет клиновидное поперечное сечение с острыми краями, направленными по ветру. Данный тип гололеда возникает из-за быстрого замерзания мелких переохлажденных капель воды, которые не успевают полностью растечься. Такой тип обледенения формируется при морозящих осадках, густом крупнокапельном (смачивающем) тумане или их сочетании при температуре около -2°C и скорости ветра до 10 м/с.

Гребнеобразный гололед относится к адвективным видам обледенения. В некоторых случаях он может образовываться в зоне слабо выраженных теплых фронтов или фронтов окклюзии теплого типа. Максимальная толщина ледяного отложения нередко достигает 50 мм – 1 см, а его плотность варьируется в пределах $0,7 - 0,9 \text{ г/см}^3$. Данная разновидность гололеда наиболее характерна для возвышенных местностей с высокой повторяемостью адвективных туманов [1, с.25].

Гололед овалообразный — однородный слой плотного стекловидного (прозрачного или матового) льда (рисунок 1.2).

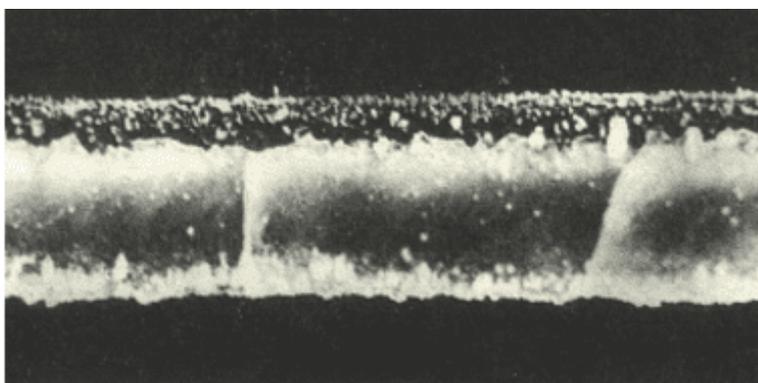


Рисунок 1.2 - Вид овалообразного гололеда [1, с.87]

Поперечный срез ледяного отложения имеет овальную форму. Данный тип гололёда формируется при выпадении мелкого дождя, часто в сочетании с моросью или туманом. Образуется при температуре от $-0,5^{\circ}\text{C}$ до -3°C . Скорость ветра при этом может значительно колебаться от 5 до 17 м/с. Максимальный диаметр отложений до 60 мм. Плотность льда $0,8 - 0,9 \text{ г/см}^3$.

Овалообразный гололёд относится к фронтальным типам обледенения и преимущественно образуется в зонах слабо выраженных тёплых фронтов и на холодных фронтах первого рода [1, с.25].

Гололеды футлярообразный и волнистообразный — весьма плотный стекловидный лед, обычно имеющий гладкую поверхность. Плотность льда около $0,9 \text{ г/см}^3$ (рисунки 1.3 и 1.4).

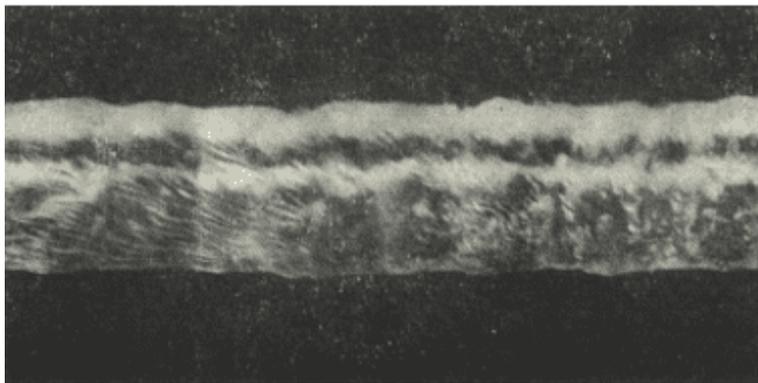


Рисунок 1.3 - Вид футлярообразного гололеда [1, с.90]

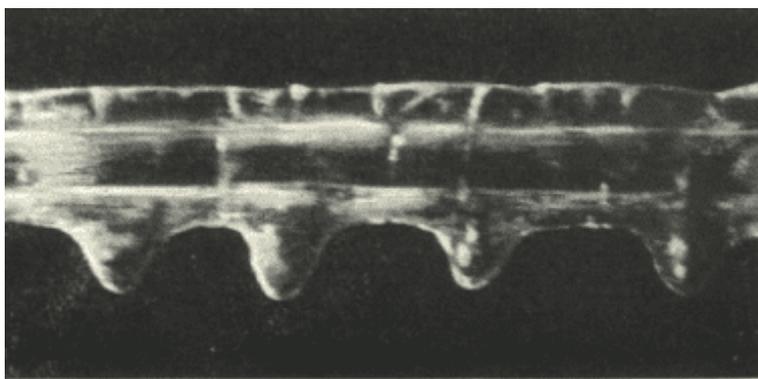


Рисунок 1.4 - Вид волнистообразного гололеда [1, с.94]

Данные типы гололёдных отложений формируются во время выпадения переохлаждённых крупных капель дождя при температурах чуть ниже нуля. Обычно это явление сопровождается ветром со скоростью порядка 10 м/с.

Специфическая волнистая структура образуются из-за того, что часть капель не успевает замерзнуть сразу и стекает вниз. Толщина таких ледяных наслоений доходит до 40 мм, причём лёд очень прочно прилипает к поверхности.

Эти формы гололёда (футлярообразная и волнистообразная) классифицируются как фронтальные и возникают в области чётко выраженных тёплых фронтов [1, с.26].

Зернистая изморозь – снеговидный, рыхлый лед. Образуется в туманную, преимущественно ветреную погоду за счет намерзания переохлажденных капель тумана при температуре от 0 до -10°C, иногда при более низких температурах [2, с.10].

Виды зернистой изморози:

- Пластичная;
- Веерообразная;
- Иголообразная.

Зернистая изморозь иголообразная - отличается от всех остальных разновидностей игольчатым строением (рисунок 1.5).

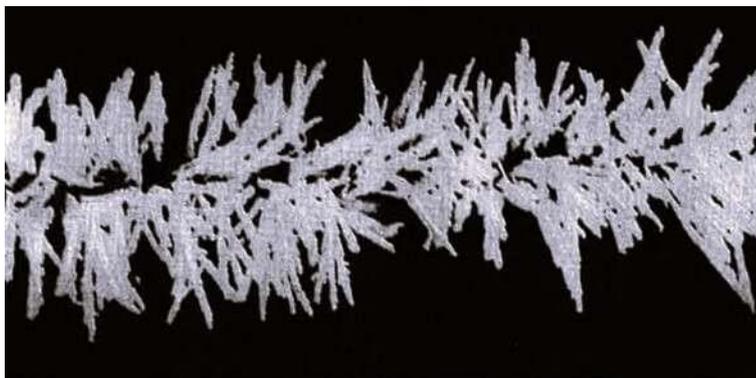


Рисунок 1.5 - Вид иголообразной изморози [1, с.61]

Игольчатая изморозь представляет собой особый вид обледенения, при котором формируются тонкие кристаллы, вытянутые в направлении ветра. Характерной особенностью этого явления служит исключительно низкая плотность отложений, не более 0,08 г/см³. Наиболее благоприятные условия для её образования складываются при наличии дымки или слабого тумана с температурой от -5 до -8°C.

Процесс формирования игольчатой изморози отличается медленным развитием и небольшими размерами кристаллов, что объясняется незначительным содержанием влаги в воздухе.

В районах с частыми случаями обледенения толщина отложений игольчатой изморози может достигать 100 мм и более. Разрушение этих хрупких образований происходит преимущественно под воздействием двух факторов - повышения температуры воздуха и усиления ветра.

По механизму своего образования игольчатая изморозь относится к радиационному типу обледенения [1, с.21].

Веерообразная изморозь — это разновидность кристаллического обледенения, при котором плоские ледяные пластинки располагаются веерообразно или перпендикулярно к поверхности (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 - Вид веерообразной зернистой изморози [1, с.73]

Изморозь формируется преимущественно в условиях тумана при температурах от -3 до -7°C и скорости ветра не более 7 м/с. Плотность ледяных отложений варьируется в пределах $0,1 - 0,3 \text{ г/см}^3$, причем на этот показатель существенно влияют метеорологические условия: при более низких температурах и мелкокапельном тумане структура отложений становится более рыхлой, тогда как увеличение температуры и размера капель приводит к уплотнению изморози. В регионах с частым обледенением толщина отложений может превышать 100 мм.

Наиболее типичным механизмом образования данного вида изморози является радиационное охлаждение приземного слоя воздуха. Значительно реже она возникает при адвекции теплых воздушных масс или в зонах прохождения теплых атмосферных фронтов [1, с.22].

Зернистая изморозь пластинчатая — плотный осадок зернистого слоистого льда светло-белого или серого цвета. Отличить пластинчатую изморозь от мутного гололёда можно по структуре и физическим свойствам ледяных отложений. Гололёд характеризуется единой стекловидной структурой, тогда как пластинчатая изморозь имеет рыхлую слоистую структуру и при механическом воздействии легко крошится.

Формирование пластинчатой изморози происходит в условиях адвективного тумана с высокой влажностью, где размер капель приближается к каплям мороси. Образуется при температуре воздуха от -3 до -5°C и скорости ветра $5 - 10$ м/с.

Этот вид обледенения относится к адвективному типу и возникает при переносе тёплых воздушных масс. Его плотность составляет $0,4 - 0,6$ г/см³ (рисунок 1.7) [1, с.23].

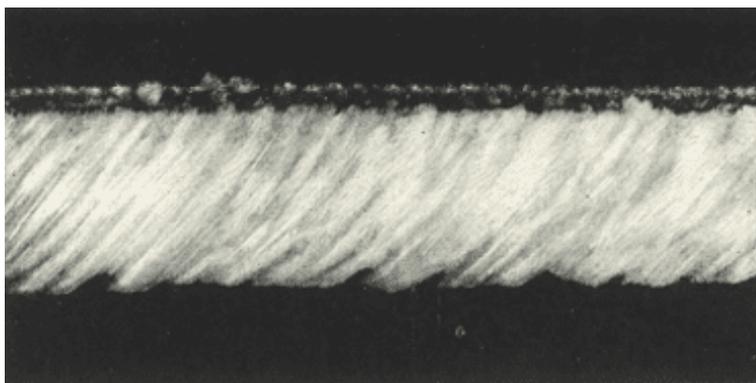


Рисунок 1.7 - Вид пластинчатой зернистой изморози [1, с.77]

Кристаллическая изморозь образует ледяные кристаллы, отличающиеся особой хрупкостью и способностью легко осыпаться при малейшем воздействии.

Наиболее благоприятные условия для формирования складываются в тихую морозную погоду, преимущественно в ночные часы, при температуре

воздуха от -11° до -25°C и практически при полном отсутствии ветра (не более 1 - 2 м/с). Характерной особенностью является образование изморози как при ясном небе, так и в условиях слабой дымки. Максимальная толщина таких отложений может достигать 70 мм, хотя в большинстве случаев составляет 10 - 40 мм.

По своему происхождению кристаллическая изморозь относится к радиационным видам обледенения и формируется в устойчивых воздушных массах континентальных антициклонов [1, с.19].

По внешним признакам и условиям образования кристаллическая изморозь делится на три разновидности:

- Листовидную;
- Пушистую;
- Игольчатую.

Кристаллическая изморозь пушистая — слой, состоящий из мелких, нагроможденных друг на друга кристалликов льда, подобных легкому пушистому снегу (рисунок 1.8).

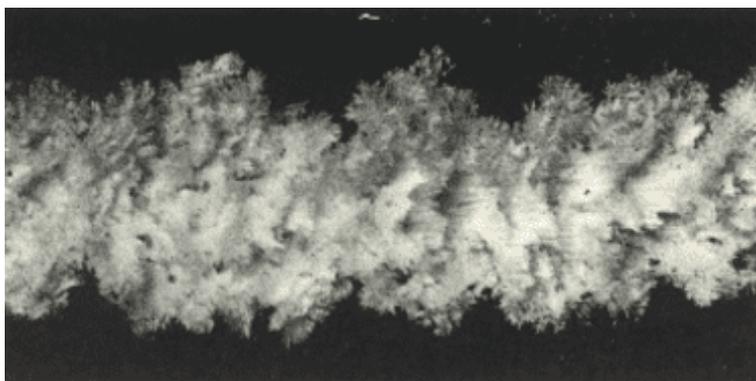


Рисунок 1.8 – Вид пушистой изморози [1, с.59]

Вид пушистой изморози отличается низкой плотностью отложений, составляющей всего $0,01 - 0,05 \text{ г/см}^3$. Это явление преимущественно возникает при температурах от -14° до -25°C в условиях слабого ветра, когда в воздухе сначала появляется дымка, постепенно переходящая в туман.

Характерной особенностью этого вида обледенения является уникальный механизм роста кристаллов. Мельчайшие капельки тумана, испаряясь в непосредственной близости от ледяных кристаллов (из-за разницы давления пара над водой и льдом), обеспечивают постоянное поступление влаги для сублимации. Этот процесс приводит к образованию ледяных структур, которые могут достигать значительных размеров (до 40 мм), сохраняя при этом кристаллическую структуру.

По своему типу пушистая кристаллическая изморозь относится к радиационному обледенению. Наиболее активно она формируется в ночные часы [1, с.20].

Кристаллическая изморозь листовидная — слой кристаллов льда листовидной формы, очень нежной, тонкой структуры (рисунок 1.9).

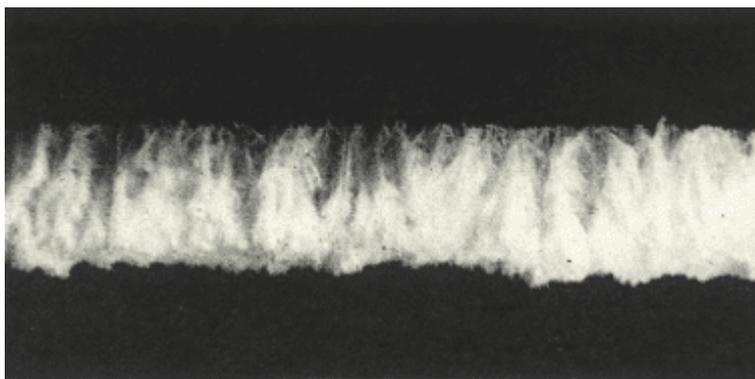


Рисунок 1.9 – Вид листовидной изморози [1, с.54]

Листовидная изморозь образует особый вид отложений с плотностью 0,01 - 0,04 г/см³. Это явление возникает исключительно в ночные часы при сочетании метеорологических условий: безоблачном небе, температуре ниже -11°C и слабом ветре.

Процесс образования листовидной изморози происходит благодаря сублимации и кристаллизации водяного пара.

Отличительными особенностями листовидной изморози являются:

- характерная пластинчатая структура кристаллов;
- способность к быстрому нарастанию (до 40 мм и более);

- непродолжительное время существования.

Это явление представляет собой классический пример радиационного обледенения, полностью зависящего от ночного выхолаживания приземного слоя атмосферы [1, с.19].

Отложение мокрого снега - слой мокрого снега, налипшего на поверхности (гололёдного станка) и сползающий вниз при положительной или близкой к нулю температуре воздуха [2, с.11].

С физической точки зрения мокрый снег представляет собой сложную двухфазную систему, состоящую из ледяных кристаллов и жидкой воды. Его уникальные свойства обусловлены процессом частичного подтаивания снежинок в теплом приземном слое воздуха, в результате чего на их поверхности образуется тонкая водяная пленка. Содержание жидкой и твердой фаз в мокром снеге может значительно варьироваться, что объясняет широкий диапазон его плотности - от рыхлых до плотных форм.

Особую опасность представляет процесс вторичного замерзания. Это приводит к формированию плотного ледяного покрова с принципиально иными физическими свойствами [1, с.12].

К опасным метеорологическим явлениям относят обильные гололёдно-изморозевые отложения, при которых толщина наледи на проводах гололёдной установки достигает как минимум 20 мм для обычного гололеда, 35 мм для мокрого снега и комбинированных отложений, а также 50 мм для зернистой и кристаллической изморози.

1.2 Классификация гололёдно-изморозевых отложений

В научной практике применяются различные методологические подходы к классификации процессов обледенения. Выделяют две основные категории обледенения по локализации их формирования: наземное обледенение и высотное обледенение [2, с.13].

Существует несколько систем классификации обледенения. Согласно одной из них выделяют четыре основных типа [1, с. 16]:

1. Сублимационные отложения (иней, кристаллическая изморозь);
2. Ледяные образования из переохлаждённых капель (гололёд, зернистая изморозь);
3. Накопления мокрого снега;
4. Комплексные многослойные отложения.

Ещё одна классификационная схема основана на механизмах формирования ледяных отложений. В соответствии с ней наземное обледенение делится на два основных вида:

- Первый вид формируется при осадкообразовании (дождь, морось, снег), образуя гололёд или мокрый снег.
- Второй — это внутриоблачное обледенение, развивающееся непосредственно в облаках.

Особое место занимает мокрый снег, который может проявляться в виде гололёдных образований и в форме изморози кристаллической (сублимация водяного пара) или зернистой (замерзание переохлажденных капель в тумане)

Кроме того, отдельно рассматривают простые и сложные гололёдно-изморозевые отложения. Сложные отложения формируются в несколько этапов, при чередовании влияния тумана, мороси и дождя, что приводит к многослойной структуре ледяного слоя. Простые отложения состоят лишь из одного вида ледяных образований.

1.3 Атмосферные явления, связанные с образованием отложений.

Гололёд образуется преимущественно при выпадении переохлаждённых осадков, быстрое замерзание переохлаждённых капель при контакте с холодными поверхностями. Основными видами таких осадков являются замерзающий дождь, ледяной дождь и замерзающая морось.

Замерзающий дождь состоит из переохлаждённых капель, выпадающих при отрицательных температурах. При соприкосновении с поверхностью эти капли мгновенно кристаллизуются, неизбежно образуя гололёдный покров. Особо опасной разновидностью является ледяной дождь, создающий плотный прозрачный ледяной слой значительной толщины.

Замерзающая морось, состоящая из мелких переохлаждённых капель, выпадает при умеренно низких температурах из слоистых облаков или тумана. Этот процесс отличается большей продолжительностью.

Ледяной дождь – твердые осадки, выпадающие при температуре воздуха ниже 0° (чаще всего от 0 до -10° , иногда до -15°). Как атмосферное явления, само по себе не часто вызывает обледенение, так как твердые осадки отскакивают от поверхности. Очень часто термин «ледяной дождь» употребляется для описания всей синоптической ситуации, во время которой образуется гололед.

К отложениям в виде изморози обычно приводят переохлажденные туманы. Переохлажденный туман представляет собой скопление мельчайших капель воды, находящихся в жидком состоянии при отрицательных температурах.

Мокрый снег образуется при температуре воздуха около 0°C и представляет собой частично подтаявшие снежинки. Для таких осадков характерно слипание снежинок в крупные рыхлые хлопья [2, с.13].

1.4 Синоптические и метеорологические условия формирования отложений

По синоптическим признакам образование гололёда подразделяют на два основных вида: фронтальный и внутримассовый.

Внутримассовый гололёд формируется при метеорологических условиях, характерных для западных периферийных зон стационарных антициклонов и тёплых секторов циклонов, где происходит адвекция тёплых воздушных масс. В

данном случае интенсивный перенос тепла выражен значительно слабее [4, с.110].

Образование внутримассового гололёда происходит при выпадении мороси или слабого дождя из слоистых облаков, при отрицательных температурах у земной поверхности (ниже 0°C). Особенностью этого явления является его развитие вне чётких фронтальных разделов, что принципиально отличает его от фронтальных типов обледенения [4, с.111].

Фронтальный гололёд представляет собой опасное метеорологическое явление, способное формироваться на различных типах атмосферных фронтов, наиболее часто наблюдается на тёплых фронтах. Наибольшую опасность представляет гололёд, образующийся в предфронтальной зоне тёплого фронта с резкими температурными контрастами [4, с.110].

Образование зернистой изморози чаще происходит при адвекции теплых воздушных масс на периферии или в центральных частях антициклонов. Развитие кристаллической изморози характеризуется постепенным охлаждением нижних слоев тропосферы в барических гребнях.

Примечательно, что условия образования зернистой изморози аналогичны тем, что вызывают внутримассовый гололёд. Критическим фактором, определяющим тип обледенения (зернистая изморозь или гололёд), выступает размер капель тумана: при диаметре менее 20 мкм формируется зернистая изморозь, тогда как более крупные капли приводят к гололёду.

Кристаллическая изморозь развивается в условиях радиационных и адвективно-радиационных туманов, в условиях малоградиентного барического поля. Такие условия характерны для центральных областей антициклонов, а также для заключительных стадий эволюции циклонов и ложбин.

Формирование гололёдно-изморозевых отложений определяется комплексом метеорологических факторов, среди которых температурный режим, влажность воздуха и ветровые условия играют ключевую роль.

Температура существенно влияет на образование разных типов обледенения. Гололёд образуется в узком диапазоне температур, чаще всего близкой к 0°C. Изморозь образуется при температурах от -20 до -10°C.

Влажность, определяемая дефицитом точки росы, также оказывает существенное влияние. Наиболее благоприятные условия для образования изморози и гололеда происходят при дефиците точки росы менее 2°C. Как правило образование голололедно-изморозевых отложений сопровождается высокой влажностью, не менее 70 - 80 %.

Особое значение имеют ветровые условия, которые различаются в зависимости от типа обледенения и рельефа местности. В горных районах гололёд обычно сопровождается юго-восточными ветрами, на равнинах - восточными. Для изморози характерны западные и северные ветры при зернистой форме, и южные или юго-восточные - при кристаллической. Разрушение ледяных отложений происходит при смене ветрового режима.

Скорость ветра также оказывает воздействие на процесс обледенения. Слабые ветры со скоростью 0 - 2 м/с способствуют образованию кристаллической изморози, умеренные (2 - 7 м/с) – зернистой и гололеда, тогда как сильные ветры (более 7 м/с) препятствуют формированию отложений, унося капли влаги.

1.5 Основные методы прогноза явлений.

Графические способы:

Прогнозирование голололедно-изморозевых отложений требует комплексного анализа синоптической ситуации и метеорологических параметров. Основой методики служит выявление благоприятных условий для обледенения.

Метод Р.А. Ягудина представляет собой наиболее востребованный в оперативной практике графический подход к прогнозированию гололёдных явлений.

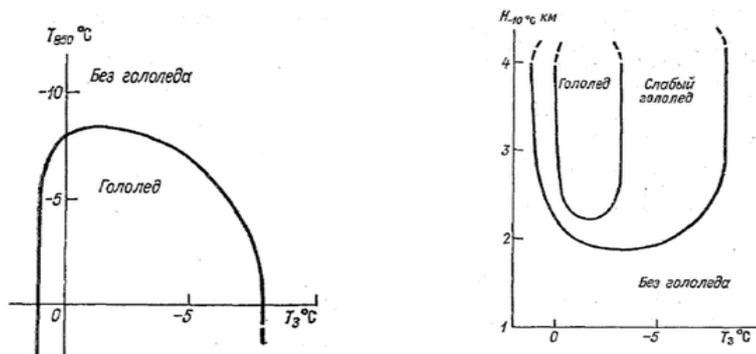


Рисунок 1.10 - Метод Р.А. Ягудина [4, с.113]

Левый график определяет возможность образования гололёда, правый показывает его предполагаемую интенсивность.

Метод учитывает температурные показатели у земли и на высоте 850 гПа, а также положение изотермы -10°C в атмосфере, которую можно проанализировать по аэрологической диаграмме.

Прогноз кристаллической и зернистой изморози осуществляется с использованием графиков на рисунках 1.13 и 1.14. Особенностью зернистой изморози является её формирование при пониженных значениях дефицита влажности по сравнению с кристаллической разновидностью.

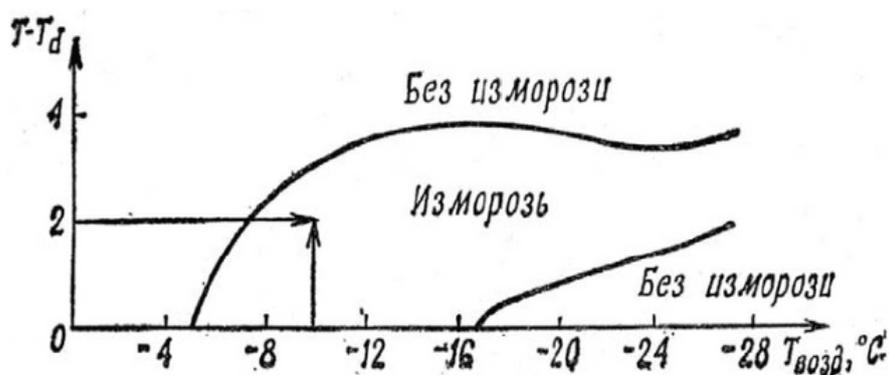


Рисунок 1.12 - График для прогноза кристаллической изморози

[4, с.113]

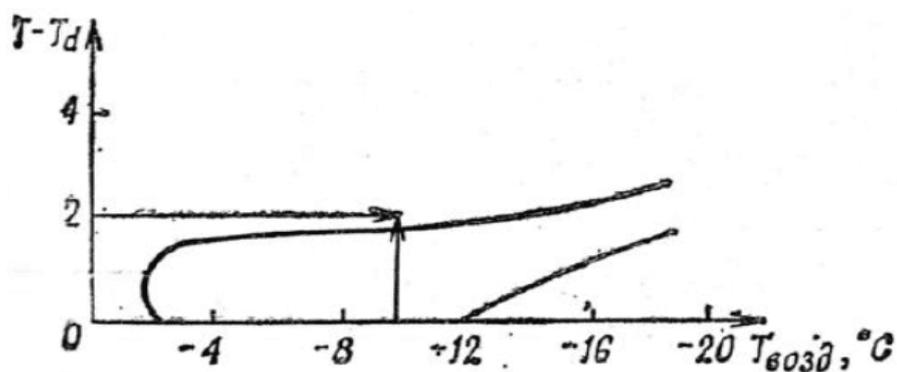


Рисунок 1.13 - График для прогноза зернистой изморози [4, с.114]

1.6 Влияние региональных процессов на формирование отложений

Помимо синоптических процессов, ключевую роль в формировании гололёдно-изморозевых отложений любого типа играют локальные географические факторы, такие как рельеф и микроклиматические условия территории.

На образование отложений гололеда существенное влияние оказывают орографические особенности местности. На увеличение интенсивности гололедообразования влияет характер формы рельефа, а не увеличение абсолютных отметок высот. Наибольшее количество замерзающих осадков выпадает на наветренных склонах, находящихся на пути воздушных потоков.

Внутриоблачное обледенение возникает исключительно в туманах и облаках с переохлаждёнными каплями, сохраняющими жидкое состояние при отрицательных температурах. В отдельных случаях зернистая изморозь может образовываться над нижней границей облаков и выше нулевой изотермы. Поэтому образование зернистой изморози часто происходит вблизи наветренных вершин гор.

Для гололеда и изморози характерно увеличивающиеся с высотой размеры отложений и продолжительность обледенения. Наиболее интенсивные гололёдно-изморозевые отложения наблюдаются во время низкой облачности [2, с.30].

1.7 Особенности, способствующие возникновению отложений в регионе.

В данной работе рассматриваются механизмы образования и распределения гололёдно-изморозевых отложений на примере Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Для данного региона характерен умеренный климат переходного типа - между океаническим и континентальным. Зимы здесь относительно мягкие, а лето умеренно тёплое. Преобладающий перенос воздушных масс осуществляется с запада, юго-запада и северо-запада. Эти потоки, связанные с атлантическими циклонами, приносят повышенную облачность, сильные ветры и влажную погоду, что особенно заметно в весенний и осенний периоды. Зимой такие циклонические вторжения иногда вызывают резкие и кратковременные потепления, тогда как летом приводят к прохладе и повышенной облачности. В регион также проникают воздушные массы с восточного, южного и юго-восточного направлений - сухие континентальные потоки. При антициклональных условиях они приносят ясную погоду с пониженной влажностью: летом устанавливается жара, зимой - сильные морозы. Отдельно следует отметить арктические воздушные массы, поступающие с севера и северо-востока со стороны Карского моря. Сформированные над ледяными просторами, эти потоки характеризуются экстремально низкими температурами и приходят с ясной, почти безветренной погодой, вызывая резкое похолодание.

Таким образом, разнообразие синоптических процессов и частая смена воздушных масс обеспечивают большие межсуточные колебания основных метеопараметров. Разница температур при смене воздушных масс может превышать суточные амплитудные колебания, иногда достигая ± 20 °C или более, что резко меняет структуру осадков и усиливает вероятность резкого образования гололёдно-изморозевых отложений. Изменчивость погодных условий в пределах буквально одних суток делает северо-западный регион

России, включая Ленинградскую область, одним из наиболее сложных для точного прогноза.

Неоднородность природно-климатических условий в области связана с её протяжённостью с запада на восток, наличием разнообразных ландшафтов и близостью крупных водоёмов — Финского залива, Ладожского и Онежского озёр.

В южной части Ленинградской области (Сланцы, Луга, Кинга, Волосово, Гатчина, Тосно) наблюдается более континентальный климатический режим, проявляющийся в сниженном количестве осадков и увеличенной продолжительности солнечного сияния. Зимой температурный фон находится преимущественно в диапазоне $-5...-10$ °С, но при вторжении арктических масс возможно понижение до $-25...-35$ °С.

Восточные районы (Кириши, Волхов, Тихвин, Бокситогорск, Лодейное Поле, Подпорожье) отличаются умеренно континентальным климатом с январскими температурами около -9 °С (на 2 °С холоднее центра области) при годовом количестве осадков 600-800 мм.

Северные территории (Выборг, Приозерск, Всеволожск) характеризуются переходным морским континентальным климатом с февральскими температурами -8 °С и осадками до 700 мм в год.

Санкт-Петербург с пригородами (Кронштадт, Ломоносов, Петродворец, Пушкин, Колпино) имеет атлантико-континентальный климат с активной циклонической деятельностью, преобладанием западных и юго-западных - зимой.

Особое внимание следует уделить рельефу, поскольку наветренная сторона возвышенностей создает благоприятные условия для усиленного образования гололёдно-изморозевых отложений. Резкие и частые перепады погодных условий дополнительно стимулируют процессы замерзания осадков.

Ленинградская область расположена в пределах Восточно-Европейской равнины, что определяет преимущественно равнинный характер её рельефа с высотами 50-150 метров над уровнем моря. Исключение составляет Карельский

перешеек, особенно его северо-западная часть, где рельеф становится более пересечённым с многочисленными скальными выходами и озёрами, что связано с его принадлежностью к Балтийскому кристаллическому щиту. Здесь находится высшая точка перешейка - гора Кивисюрья (203-205 м) возле посёлка Новожилово.

Низменные участки сосредоточены вдоль побережья Финского залива и Ладожского озера, а также в речных долинах: Выборгской, Приозерской, Приладожской и других. Возвышенности представлены Лемболовской, Ижорской, Вепсовской и другими грядами, с максимальной высотой 291 м (гора Гапсельга на Вепсовской возвышенности). Особый интерес представляет Балтийско-Ладожский уступ (глинт) 40 – 60 метровый обрыв протяжённостью свыше 200 км, являющийся берегом древнего моря.

Таким образом, совокупность атлантических и континентальных воздушных масс, частые смены синоптических условий, разнородность ландшафта и близость крупных водоёмов формируют в регионе сложную и изменчивую погоду. Именно такие условия способствуют локализации и усилению процессов гололёдо-изморозевого осадкообразования, особенно в районах с выраженным рельефом и на наветренных склонах возвышенностей.

Глава 2. Оценка условий формирования гололёдно-изморозевых отложений в Ленинградской области.

В этой главе представлены результаты исследования типовых синоптических ситуаций, способствующих формированию гололёдно-изморозевых отложений на северо-западе России. Анализ метеорологических наблюдений с января 2019 года по январь 2024 года позволил выявить ключевые атмосферные механизмы формирования опасных гололёдно-изморозевых явлений. В исследовании детально рассмотрены синоптические процессы,

температурные и ветровые режимы, которые способствуют образованию гололеда, изморози и мокрого снега.

2.1 Повторяемость гололёдно-изморозевых отложений в Ленинградской области

Определение типовых синоптических условий и выявление количественных предикторов в фазе образования и нарастания является важной проблемой, т.к. в различных регионах есть особенности формирования гололёдно-изморозевых отложений, связанные с местными условиями (рельеф местности, наличие крупных водных объектов и т.д.). Отдельной проблемой является прогноз диаметра отложений, особенно в градации опасного явления.

С целью повышения качества прогнозирования гололёдно-изморозевых отложений в Ленинградской области было проведено исследование, основные результаты которого представлены ниже. На основе анализа архивных данных [5] были выбраны семь метеорологических станций в Ленинградской области, на которых имеются данные о гололёдно-изморозевых отложениях за период с 1 января 2019 года по 31 января 2024 года: Выборг, Ломоносов, Сосново, Санкт-Петербург, Лесогорский, Ретюнь и Белогорка.

Анализ типов и повторяемости гололёдно-изморозевых отложений:

Был проведён анализ повторяемости гололёдно-изморозевых отложений по типам. Результаты представлены на рисунке 2.1.

В период с 01.01.2019 по 31.01.2024 года гололёдно-изморозевые отложения наблюдались 1350 раз. Анализ показал, что на выбранных станциях в указанный период чаще всего наблюдались изморозевые отложения (48%), несколько реже — гололёдные отложения (41%). Отложения мокрого снега составили 9% случаев. За исследуемый период изморозевые отложения были зафиксированы 643 раза, гололёдные — 560 раз, отложения мокрого снега — 126 раз, а смешанные отложения — 21 раз.

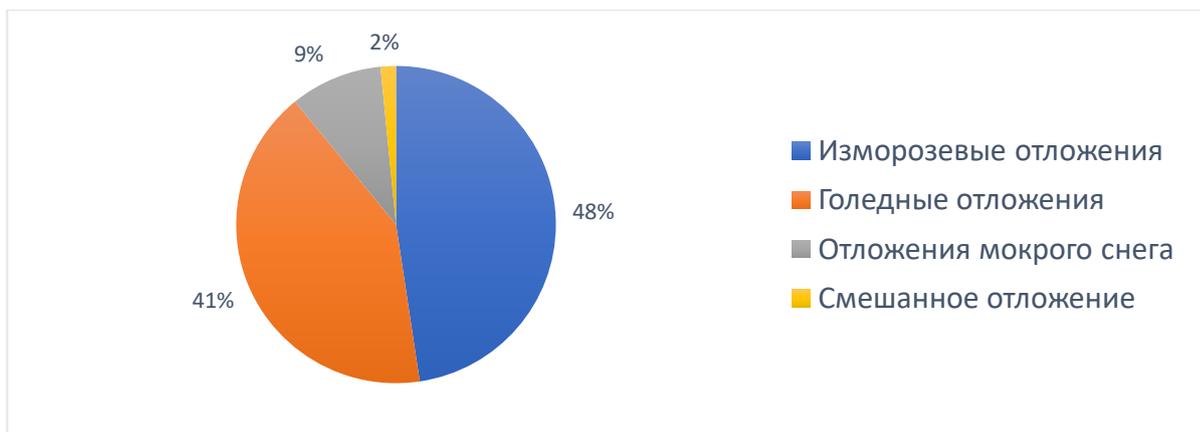


Рисунок 2.1 – Повторяемость гололёдно-изморозевых отложений в Ленинградской области в период с 01.01.2019 по 31.01.2024 года

Проведённый анализ повторяемости гололёдно-изморозевых отложений на исследуемых станциях выявил чёткую дифференциацию в распределении типов отложений. Доминирующими видами являются изморозевые (48% случаев, 643 эпизода) и гололёдные (41%, 560 эпизодов) отложения, суммарно формируя 89% всех зафиксированных явлений или 1203 эпизода. Это свидетельствует о преобладании условий, способствующих образованию кристаллической изморози (низкие температуры, высокая влажность, слабый ветер) и гололёда (переохлаждённые осадки при температурах близких к 0°C).

Отложения мокрого снега, характерные для переходных сезонов с положительными температурами, составили 9% случаев (126 эпизодов), что подчёркивает их меньшую климатическую значимость в регионе. Наименее распространёнными оказались смешанные отложения (21 случай, ~1.5%), возникающие при комбинации нескольких метеорологических факторов.

Полученные данные имеют практическое значение для прогнозирования опасных явлений и планирования противогололедных мероприятий.

2.2 Метеорологические параметры при образовании отложений.

Были рассмотрены основные метеорологические параметры, наблюдавшиеся в момент образования гололёдно-изморозевых отложений. Ключевыми факторами оказались температура, скорость и направление ветра. На основе данных о ветре были построены карты режимов ветра (рисунки 2.2 и 2.3). Анализ карт показал, что образование гололёда и изморози чаще всего происходит при восточных, юго-восточных и южных ветрах, реже — при западных. Разрушение изморози наблюдалось при увеличении скорости ветра. Часто при образовании гололёдно-изморозевых отложений отмечались туманы, дымки и замерзающие осадки.

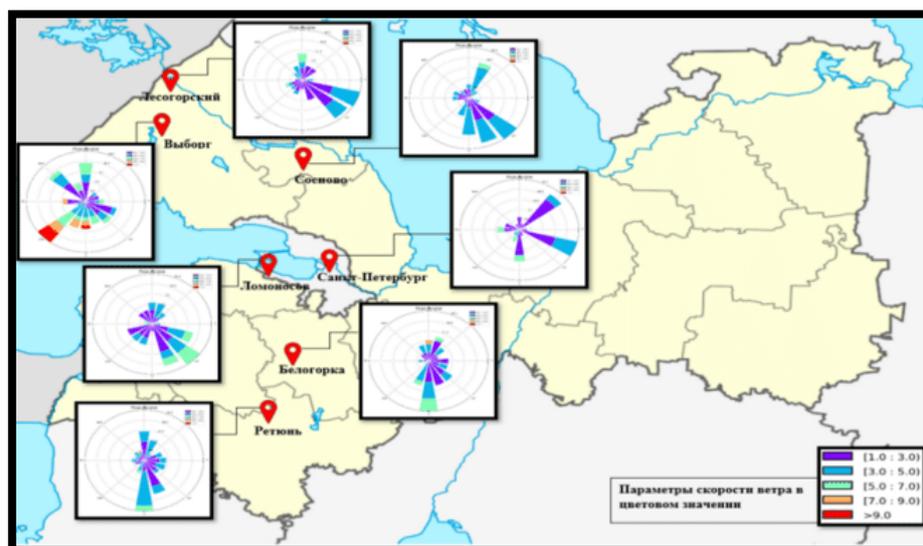


Рисунок 2.2 – Режим ветра для «Гололедных отложений»



Рисунок 2.3 – Режим ветра для «Изморозевых отложений»

Температура воздуха играет определяющую роль в формировании гололёдно-изморозевых отложений.

Применение квантильного метода анализа данных о температуре и скорости ветра с использованием диаграмм "ящик с усами" позволило установить характерные диапазоны метеорологических параметров для разных типов обледенения. В исследовании использовались 25-й и 75-й процентиля для выявления типичных условий образования отложений, а 5-й и 95-й процентиля - для определения граничных значений. На диаграммах размаха ящики соответствуют интервалу между 25-м и 75-м процентилем, внутренняя линия обозначает медиану, а усы показывают диапазон от 5-го до 95-го процентиля, с точками, отмечающими выбросы.

Гололёд преимущественно образуется при температуре от -4 до -1°C и практически не наблюдается при положительных температурах из-за процессов таяния. Для изморози характерен значительно более широкий температурный диапазон от -20 до -10°C .

Скорость ветра также существенно влияет на процесс обледенения: гололёд формируется при средних значениях 3 м/с (чаще всего $1-4$ м/с), тогда как изморозь требует слабого ветра ($0-2$ м/с) и практически никогда не возникает при

скорости более 4 м/с, поскольку сильный ветер препятствует созданию необходимых мезометеорологических условий.

Глава 3. Оценка типовых синоптических ситуаций для формирования гололёдно-изморозевых отложений на территории Ленинградской области

В результате работы с архивом (rp5.ru) были выявлены следующие станции, которые имеют данные о гололёдно-изморозевых отложениях в период с 01.01.2019 по 31.01.2024 года: Выборг, Ломоносов, Сосново, Санкт-Петербург, Лесогорский, Ретюнь и Белогорка (рисунок 3.1)

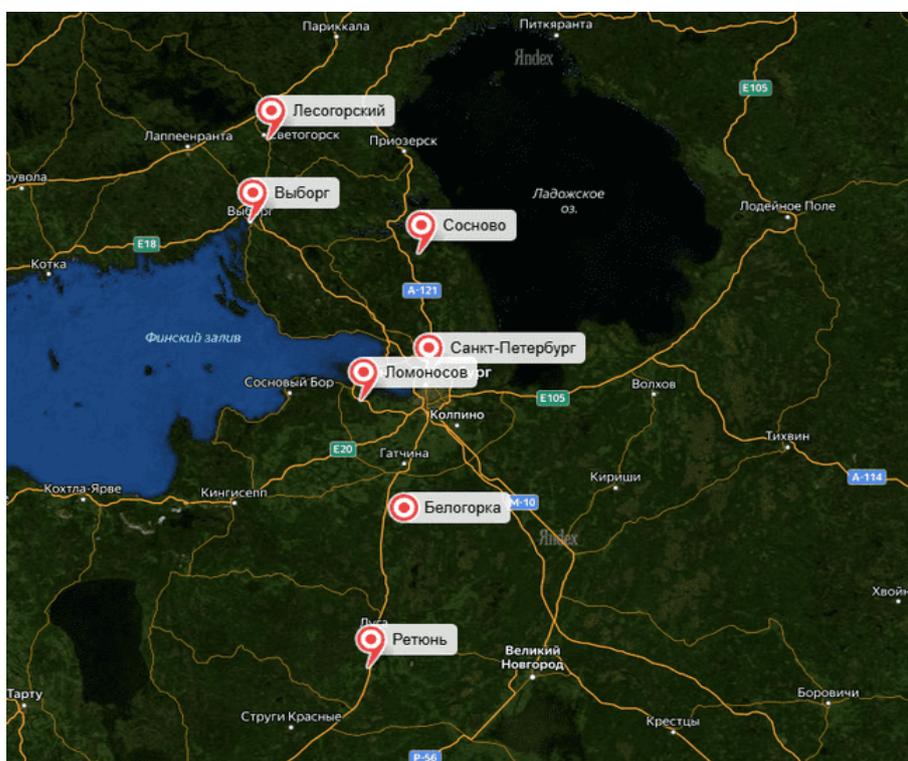


Рисунок 3.1 - Карта местоположения станций.

В рамках исследования процессов формирования гололёдно-изморозевых отложений был проведен анализ типовых синоптических ситуаций на основе данных синоптических карт и результатов радиозондирования атмосферы. Для станций Санкт-Петербург, Выборг, Ретюнь и Лесогорский были отобраны случаи, представляющие наибольшую практическую значимость с точки зрения

опасности возникновения гололёдно-изморозевых явлений. Отбор производился за полные сроки наблюдений в конкретный день. Для станций Белогорка, Ломоносов и Сосново выборка случаев проводилась за определенный срок наблюдений в выбранный день. Дополнительно рассмотрены случаи выпадения мокрого снега в трех локациях Ленинградской области. Анализ включал в себя краткое описание синоптической обстановки и идентификацию ключевых метеорологических параметров, ассоциированных с возникновением гололёдно-изморозевых отложений. В заключение представлено обобщение результатов исследования типовых синоптических ситуаций, способствующих формированию гололёдно-изморозевых явлений на территории Ленинградской области за период с 01.01.2019 по 31.01.2024 гг.

3.1 Оценка формирования гололёдно-изморозевых отложений в Санкт-Петербурге.

Случай №1

21.01.2024

По данным архива в этот день наблюдалась изморозь диаметром 7-9 мм.

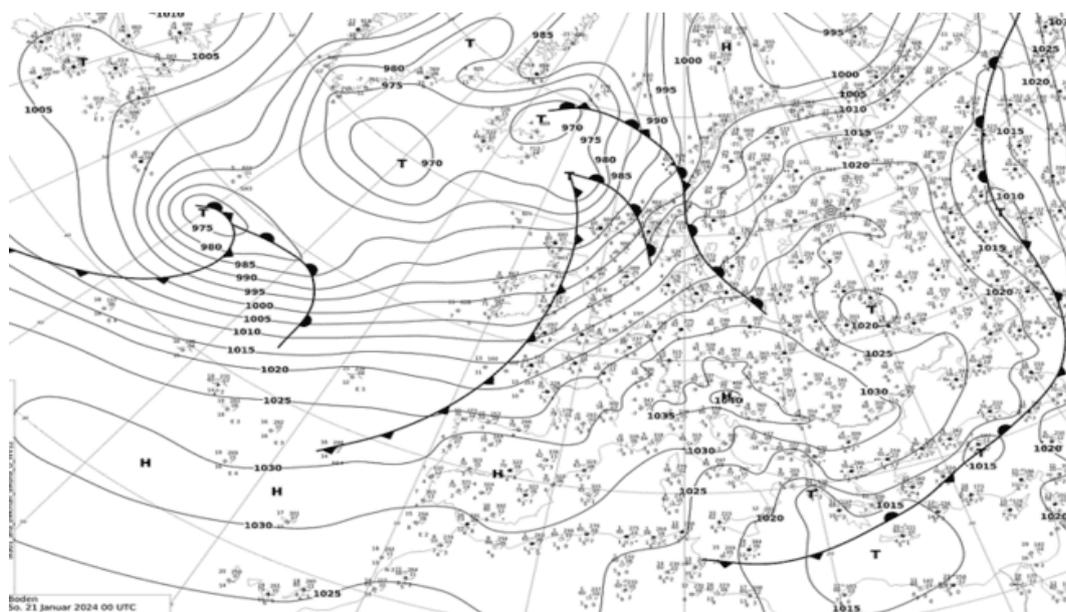


Рисунок 3.2 - Синоптическая карта на 21.01.2024

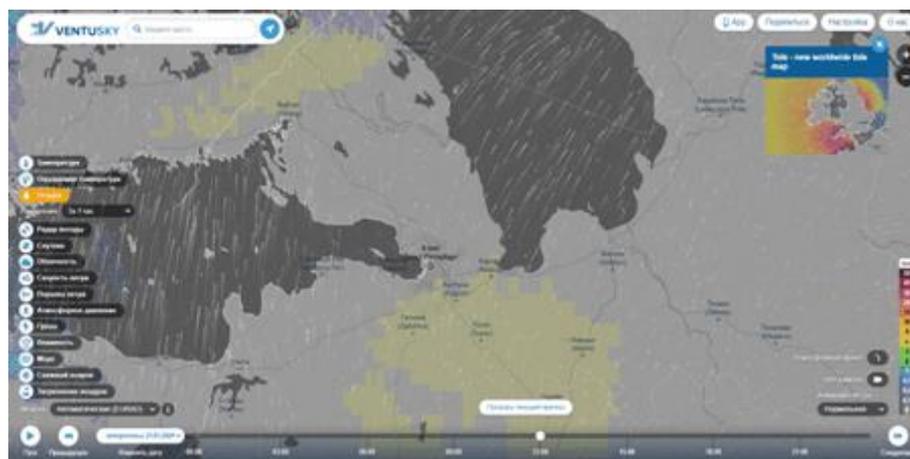


Рисунок 3.3 - Обзор тумана, модель ICON.

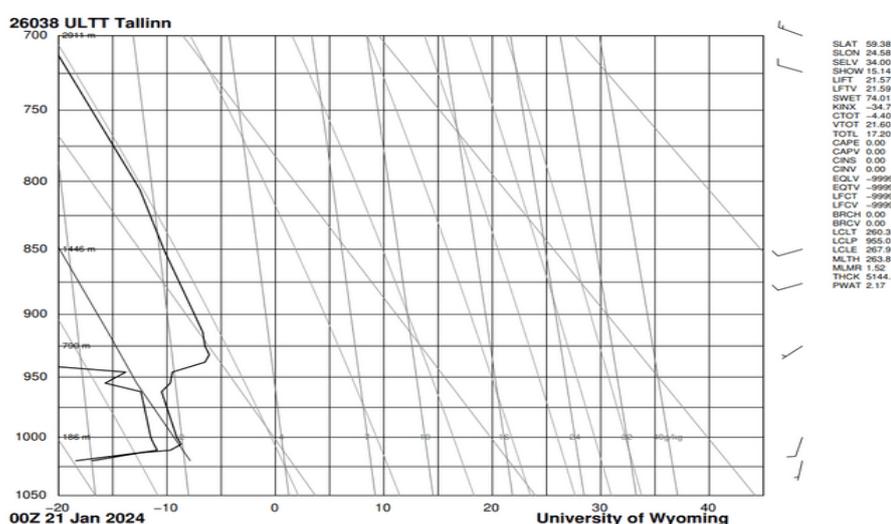


Рисунок 3.4 - Аэрологическая диаграмма за 21.01.2024 00ч.

Анализ возникновения изморози: По архиву в 3:00 наблюдался туман, радиационный.

Санкт-Петербург находится под влиянием антициклона (на гребне) и циклона и в зоне приближающегося теплого фронта.

По данным зондирования атмосферы прослеживается инверсия, которая также способствует нарастанию изморози.

Температура: в течение дня менялась с $-19,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-11,0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Дефицит: от 1 до $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ – подтверждение наличия изморози графическими методами.

Влажность: 90%

Ветер: с 3 до 9 часов штиль, 15 часов - ветер, дующий с юго-юго-востока.

Ветер: слабый, максимум 2 м/с.

Облачность: 10 баллов

Метеорологические условия подтверждают наличие изморози.

Главными синоптическими факторами возникновения изморози являются: туман (приземная инверсия), и благоприятные метеорологические условия.

Случай №2

12.01.2024

Наблюдались: Дымка и снег с перерывами слабый в срок наблюдения.

Диаметр изморозевого отложения составляет 3 мм.

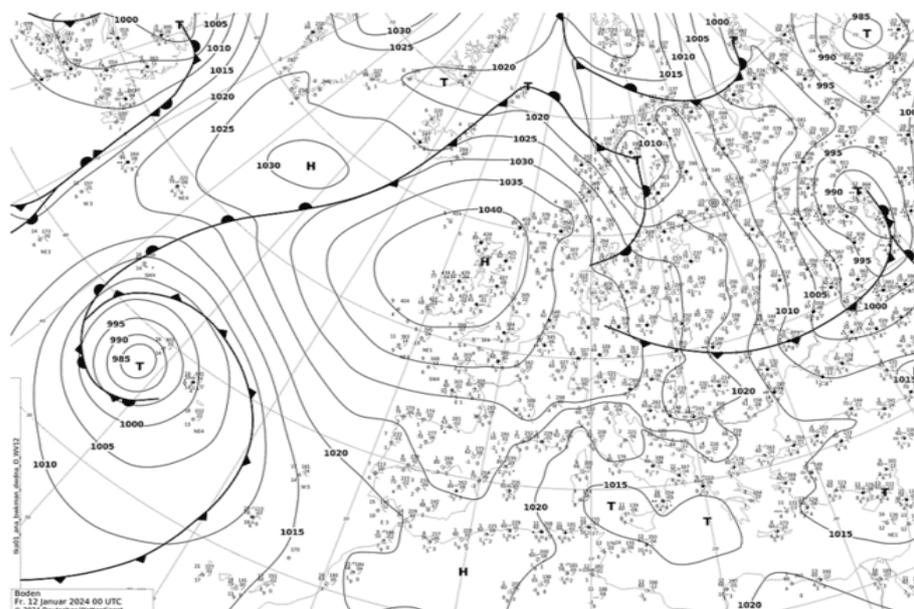


Рисунок 3.5 - Синоптическая карта на 12.01.2024

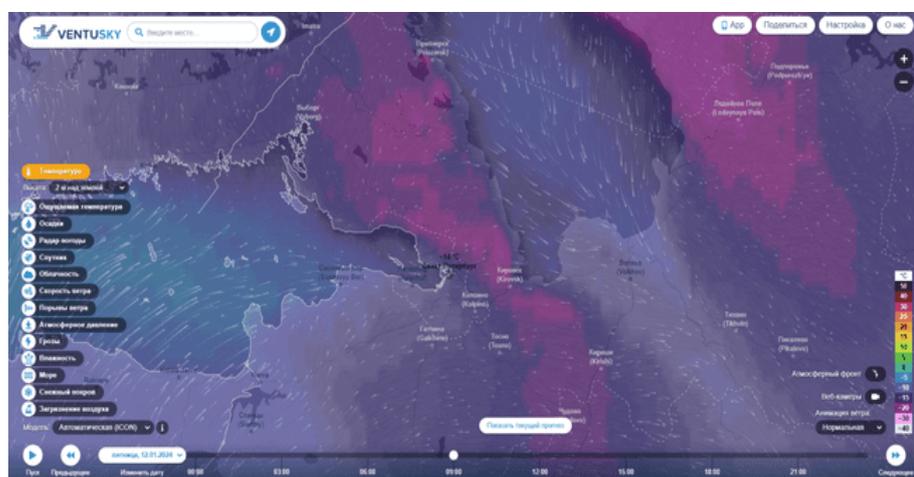


Рисунок 3.6 - Обзор температуры, 2м над землей, модель ICON.

Влажность: 90%

Ветер направление: в 3 часа – ЗСЗ, в 15 часов – ССВ

Ветер скорость: слабый, максимум 2 м/с.

Облачность: преимущественно 10 баллов, в 15 часов – 1 балл

Метеорологические условия подтверждают наличие небольшого отложения изморози.

Главными синоптическими факторами возникновения изморози являются: приземная инверсия, влияние теплого фронта и метеорологические условия.

Случай №3

21.12.2022

Наблюдались: Дождь незамерзающий с перерывами слабый в срок наблюдения. Диаметр отложения при гололеде составляет 4 мм и Ледяная крупа. Диаметр отложения при гололеде составляет 1 мм.

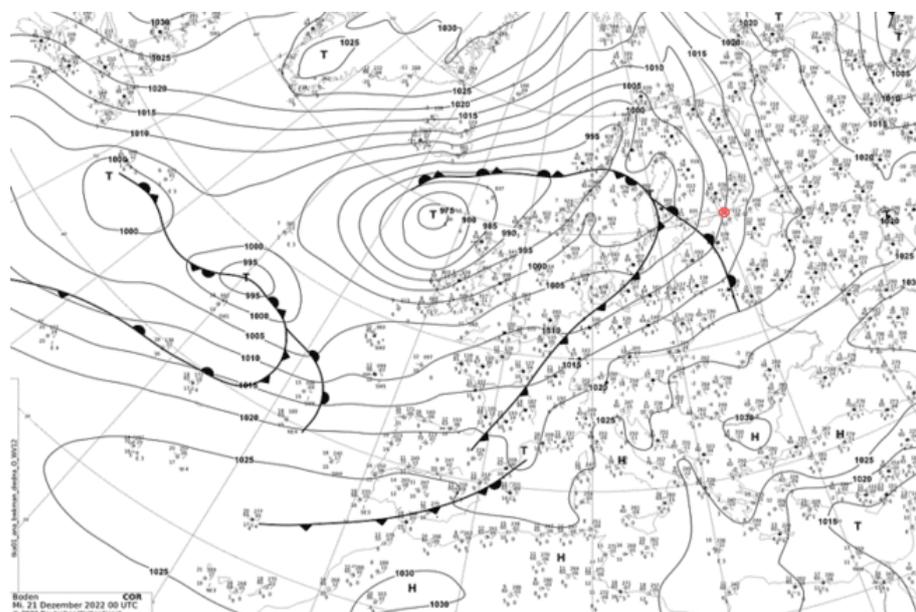


Рисунок 3.9 - Синоптическая карта за 21.12.2022

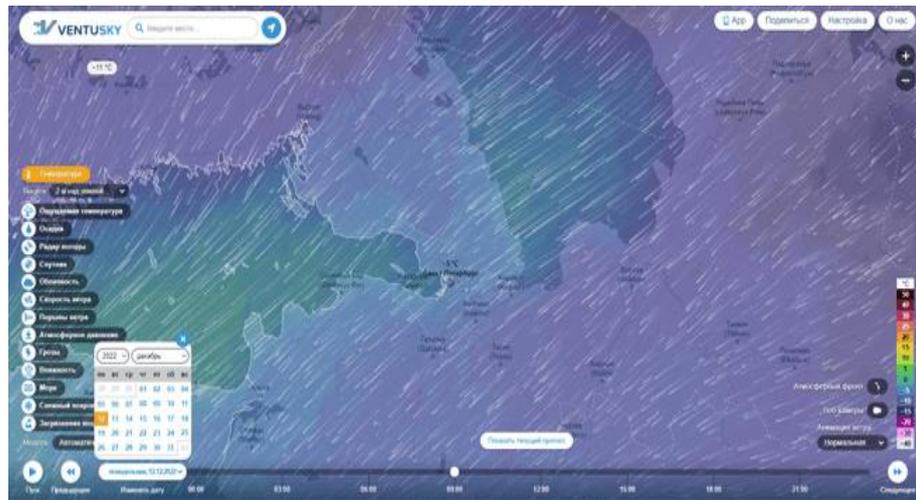


Рисунок 3.10 - Обзор температуры, 2м над землей, модель ICON.

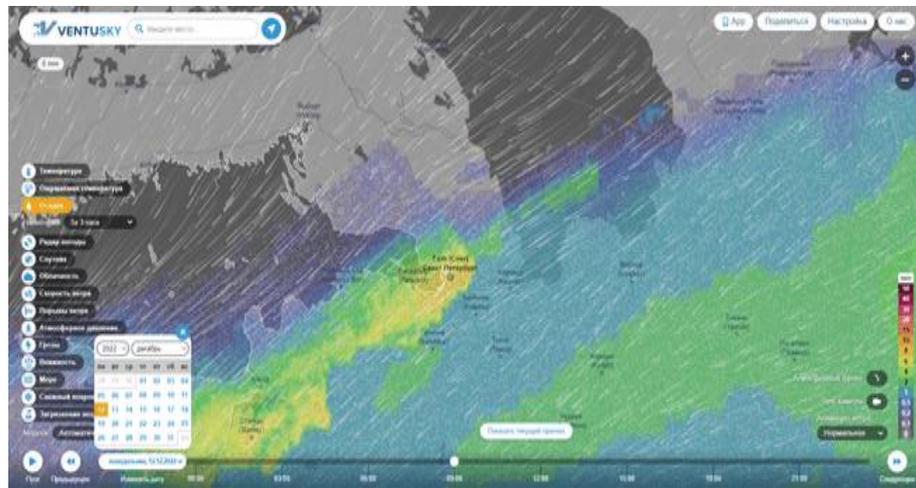


Рисунок 17. Обзор осадков, модель ICON.

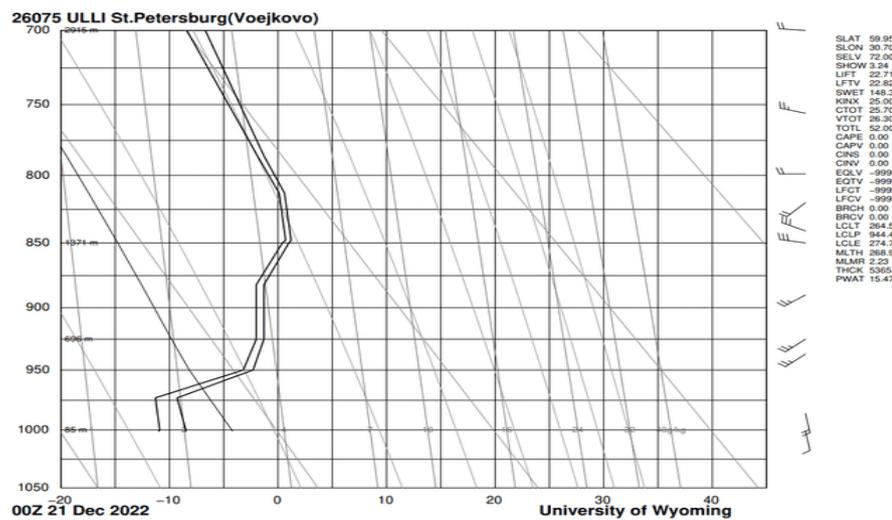


Рисунок 3.11 - Аэрологическая диаграмма за 21.12.2022 00ч.

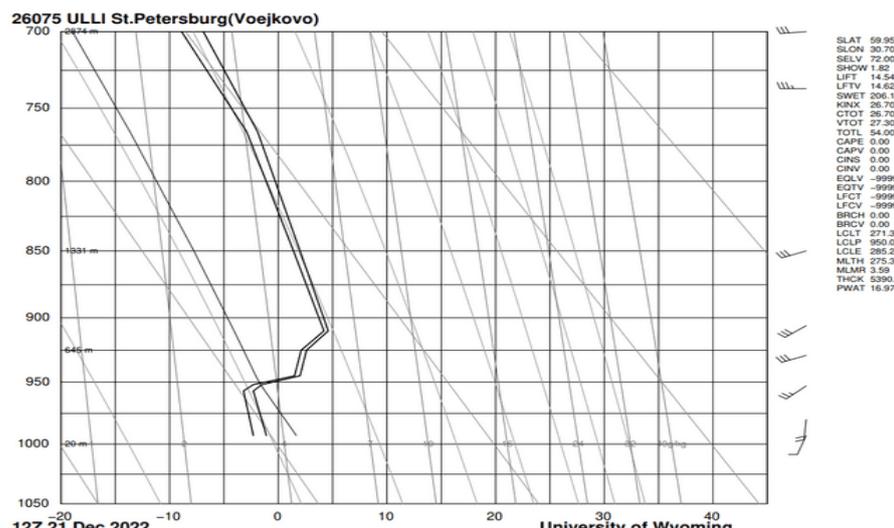


Рисунок 3.12 - Аэрологическая диаграмма за 21.12.2022 12ч.

Синоптическая ситуация: Санкт-Петербург находится на периферии циклона, в ложбине. В зоне действия теплого фронта.

Результаты зондирования показывают наличие инверсии и ледяного дождя в пределах 1-2 км. В архиве данных указаны такие осадки как: ледяная крупа (в 9:00) и незамерзающий дождь (в 15:00).

Температура: в течение менялась с °С -3,7 до 0,5 °С

Дефицит: в пределах 1,2 – 1,4 °С – подтверждает наличие гололеда графическими методами.

Влажность: 90%

Ветер направление: ЮЮВ

Ветер скорость: слабый, 2 м/с.

Облачность: 10 баллов.

Метеорологические условия подтверждают наличие небольшого отложения гололеда.

Главными синоптическими факторами возникновения гололеда являются: наличие ледяного дождя (инверсии), влияние теплого фронта, периферия циклона.

Случай №4

10.12.2021

Наблюдалась алмазная пыль (с туманом или без него). Диаметр изморозевого отложения составляет 2 мм.

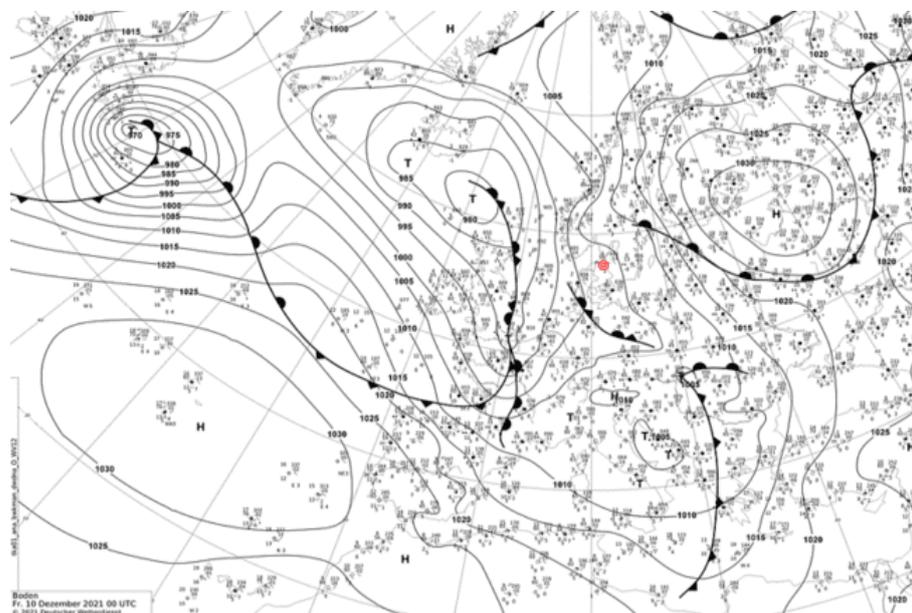


Рисунок 3.13 - Синоптическая карта за 10.12.2021

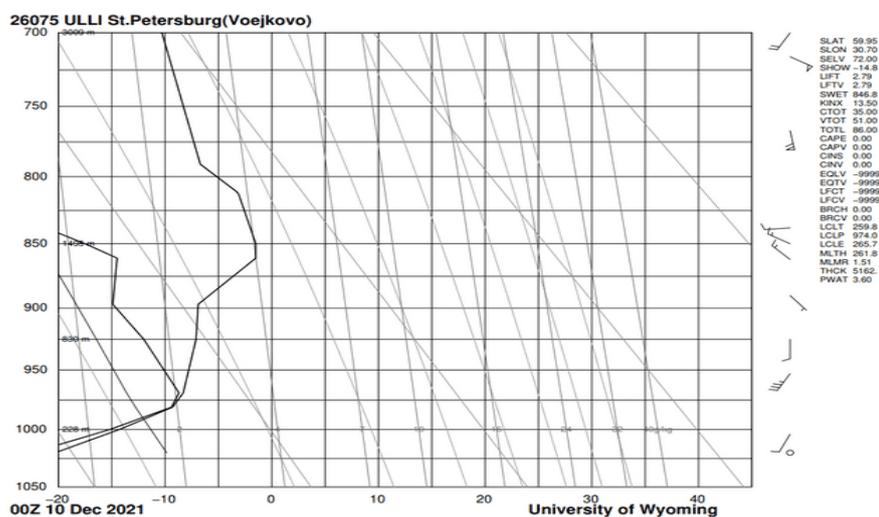


Рисунок 3.14 - Аэрологическая диаграмма за 10.12.2021 00ч

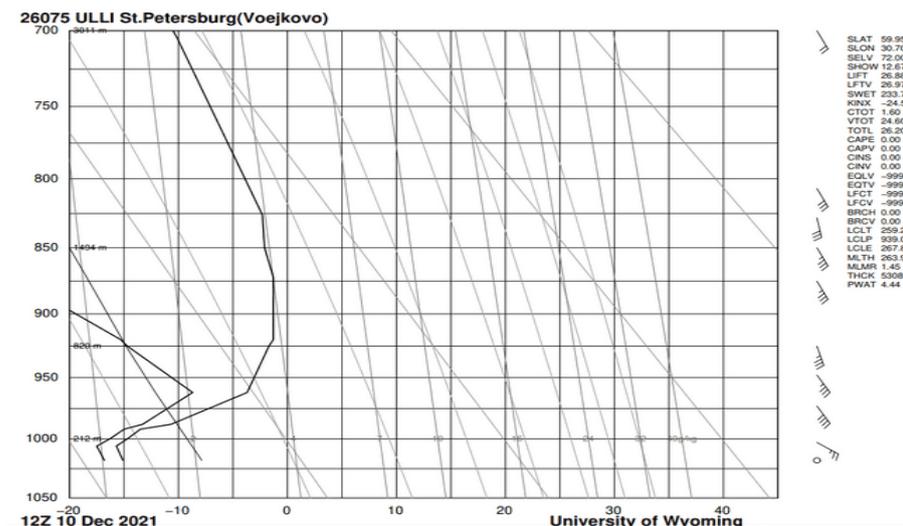


Рисунок 3.15 - Аэрологическая диаграмма за 10.12.2021 12ч

Синоптическая ситуация: Санкт-Петербург находится под влиянием фронта окклюзии. На периферии циклона и в гребне.

Аэрологическое зондирование: наличие инверсии в приземном слое – подтверждение возникновения тумана.

Температура: в течение менялась с °C -15,9 до -12,0 °C

Дефицит: в пределах 1,5 – 2,3 °C – подтверждает наличие изморозевого отложения графическими методами.

Влажность: 80%

Ветер направление: в 3:00 – штиль, с 9 до 15 часов – восточное направление.

Ветер скорость: слабый, от 0 до 1 м/с.

Облачность: в 9:00 – 2-3 балла, преимущественно 10 баллов.

Метеорологические условия подтверждают наличие небольшого отложения изморози. Наблюдается такое явление как алмазная пыль, способствующая образованию изморози.

Главными синоптическими факторами возникновения изморози являются: наличие инверсии, влияние фронта окклюзии и благоприятные метеорологические условия.

Случай №5

27.03.2021

Наблюдался туман или ледяной туман, небо видно, ослабел за последний час. Диаметр отложения при гололеде составляет 1 мм.

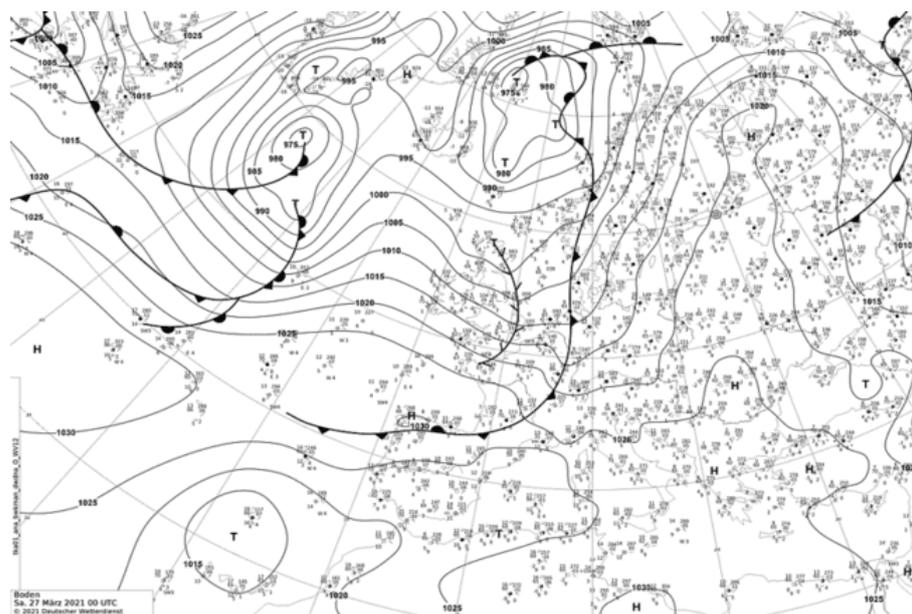


Рисунок 3.16 - Синоптическая карта за 27.03.2021



Рисунок 3.17 - Обзор тумана, модель ICON.

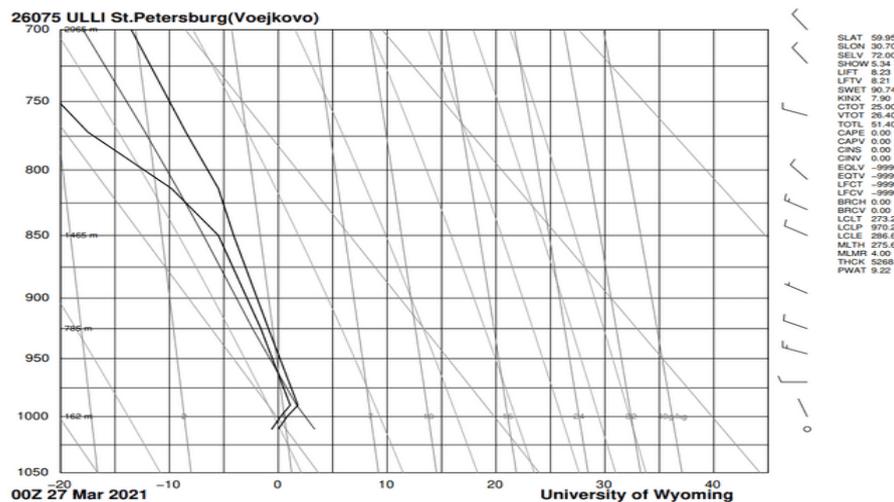


Рисунок 3.18 - Аэрологическая диаграмма за 27.03.2021 00ч

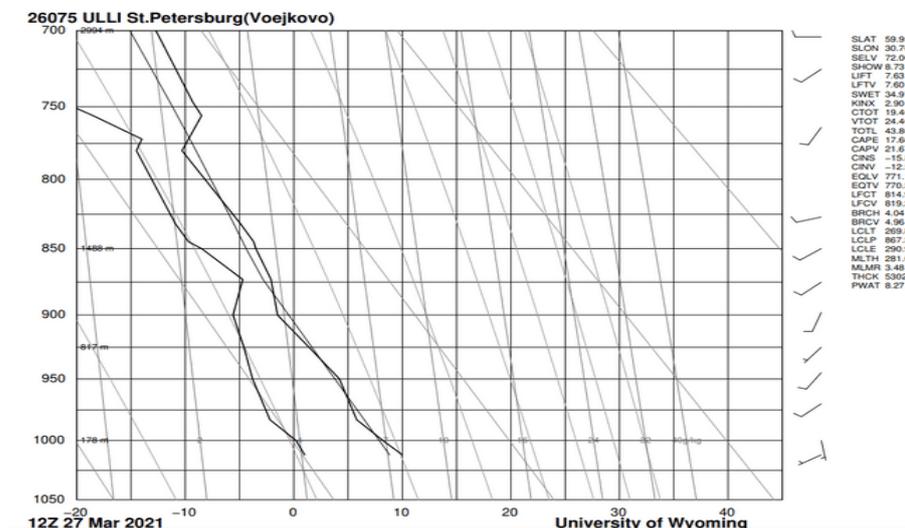


Рисунок 3.19 - Аэрологическая диаграмма за 27.03.2021 12ч

Синоптический анализ: Санкт-Петербург находится в зоне гребня антициклона, вблизи центра его действия. Зона холодного фронта действует на пункт. В области города, по данным с метеостанций, наблюдается туман.

По зондированию атмосферы наблюдается инверсия, которая способствует образованию тумана.

Температура: в 18:00 составляла 0,1 °C

Дефицит: 0,2 °C – подтверждает наличие гололеда графическим методом.

Влажность: 99%

Ветер направление: Штиль, безветрие.

Ветер скорость: 0 м/с.

Облачность: Облаков нет.

По метеоусловиям образование тумана можно подтвердить. Отложение гололеда на станции наблюдается, подтверждает наличие отложения с помощью графиков. Температура на уровне 850 гПа составляет -3, -4 °С.

За счет синоптической ситуации, можно говорить о возникновении внутримассового гололеда

Случай №6

07.01.2024

Наблюдалось изморозевое отложение, диаметр составляет 3 мм.

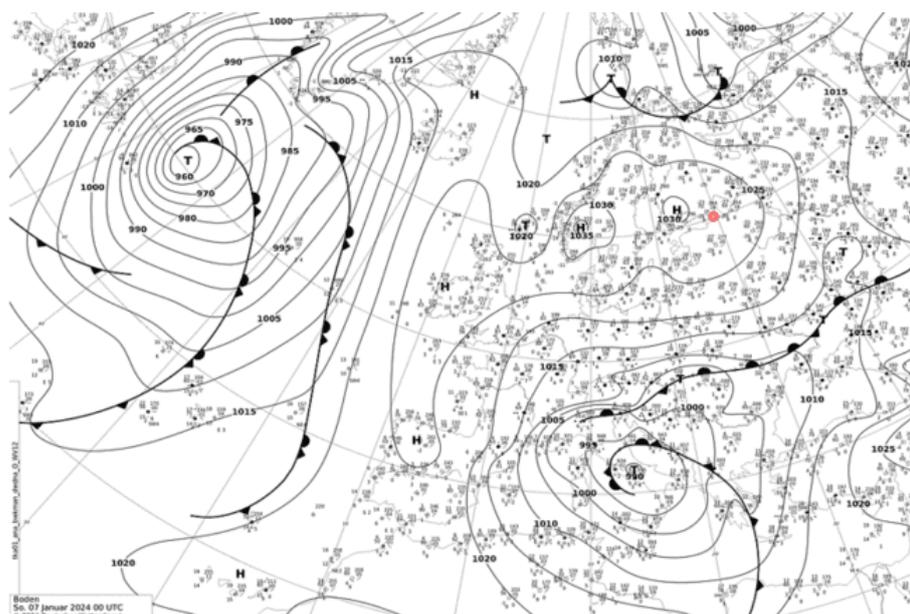


Рисунок 3.20 - Синоптическая карта за 07.01.2024

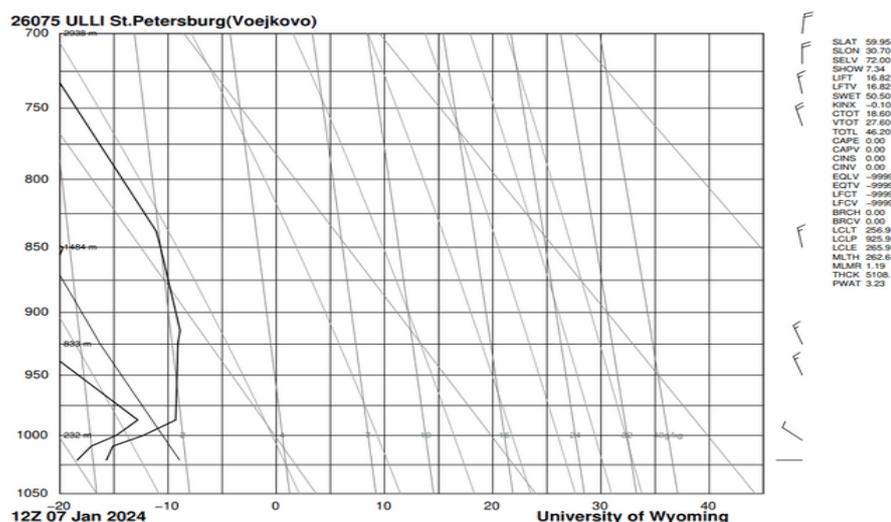


Рисунок 3.21 - Аэрологическая диаграмма за 07.01.2024 12ч

Анализ: Санкт-Петербург находится в зоне действия антициклона (гребня), в его центральной части.

Данные зондирования атмосферы указывают на наличие температурной инверсии.

Наблюдения ввелись в 3,9,15 и 21 час

Температура: менялась с $-20,6^{\circ}\text{C}$ до $-15,9^{\circ}\text{C}$

Дефицит: $1,7 - 1,8^{\circ}\text{C}$ – графическим способом подтверждает наличие изморозевого отложения.

Влажность: 82%

Ветер направление: С 3 до 9 часов – штиль, в 15 и 21 – Западный, юго-западный.

Ветер скорость: 0 - 1 м/с.

Облачность: Облаков нет.

По метеоусловиям можно предположить образование тумана или дымки. Отложение изморози на станции наблюдается, подтверждает наличие отложения с помощью графиков.

3.2 Оценка формирования гололёдно-изморозевых отложений в Выборге.

Случай №1

24.02.2021

Наблюдались: Дождь замерзающий и дымка. Диаметр изморозевого отложения составляет 1 мм.

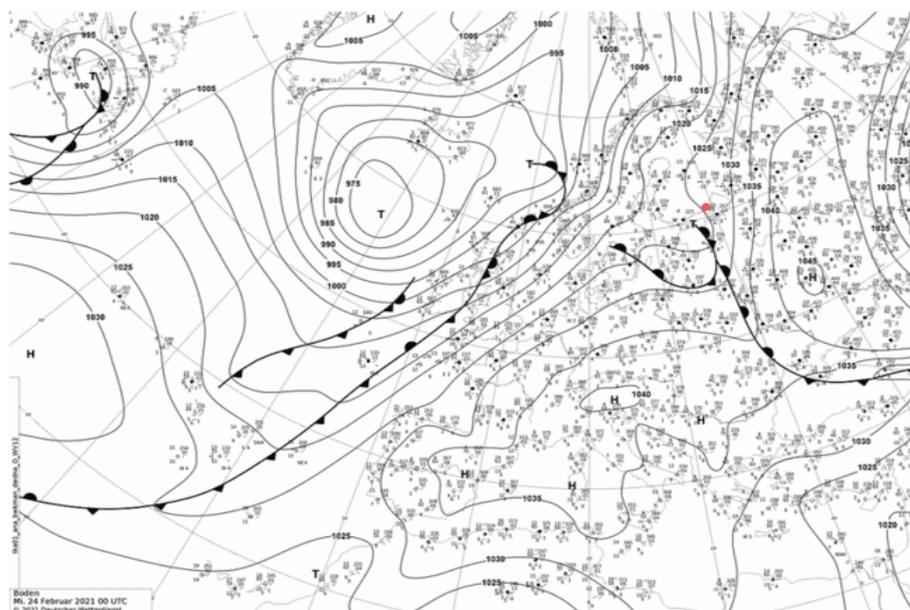


Рисунок 3.22 - Синоптическая карта за 24.02.2021



Рисунок 3.23 - Обзор тумана, модель ICON.

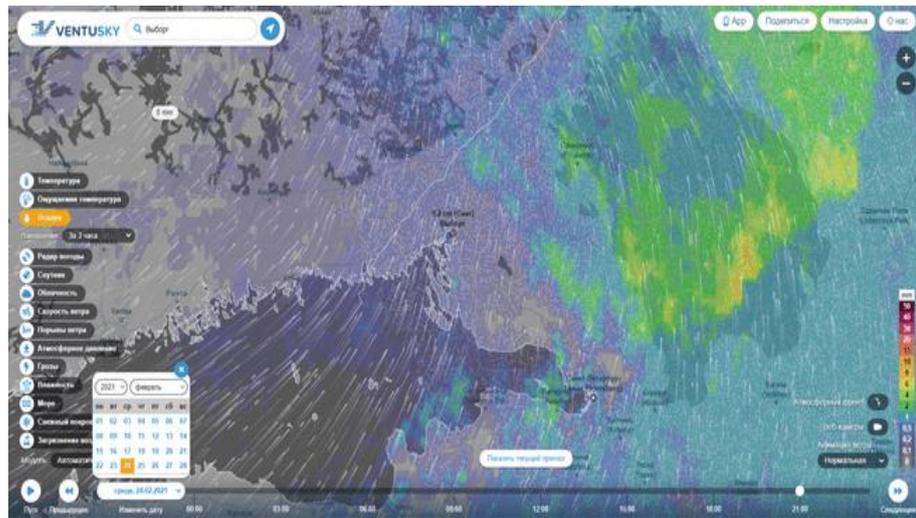


Рисунок 3.24 - Обзор осадков, модель ICON.

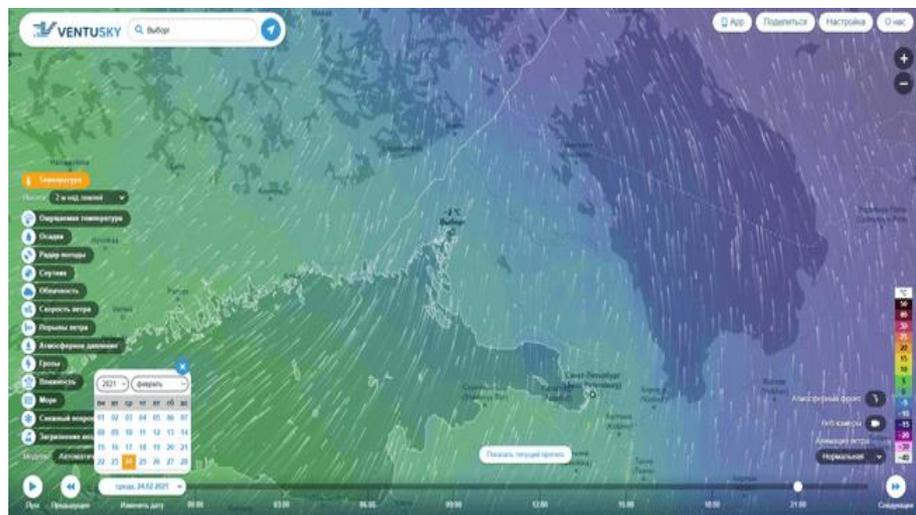


Рисунок 3.25 - Обзор температуры, модель ICON.

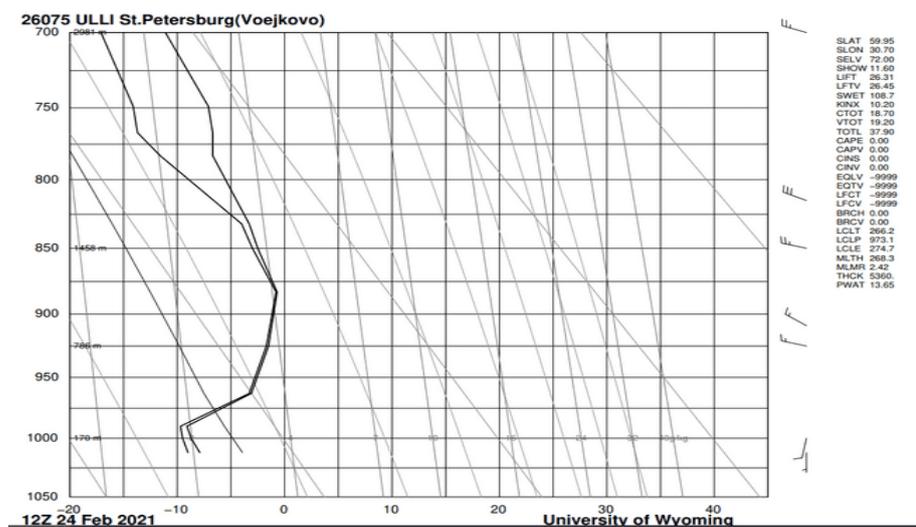


Рисунок 3.26 - Аэрологическая диаграмма за 24.02.2021 12ч.

Синоптический анализ: Выборг находится в зоне действия обширного многоцентрового циклона, вблизи ложбины одно из центров циклона. Возможно влияние фронта окклюзии.

По данным зондирования наблюдается инверсия. На станции наблюдается дымка и замерзающий дождь.

Наблюдения ввелись в 9, 15, 21 часов.

Температура: менялась с -10,0 до -0,3 °С

Дефицит: близкий к 1,5 °С – графическим способом подтверждает наличие изморози.

Влажность: 92%

Ветер направление: преобладание Ю, ЮВ направлений.

Ветер скорость: 1 - 4 м/с.

Облачность: 10 баллов.

За счет замерзающего дождя и дымки вероятность образования изморозевых отложений велика, метеоусловия благоприятны.

Случай №2

15.01.2019

Наблюдался туман или ледяной туман, неба не видно, без заметного изменения интенсивности в течение последнего часа. Диаметр отложения при гололеде составляет 3 мм.

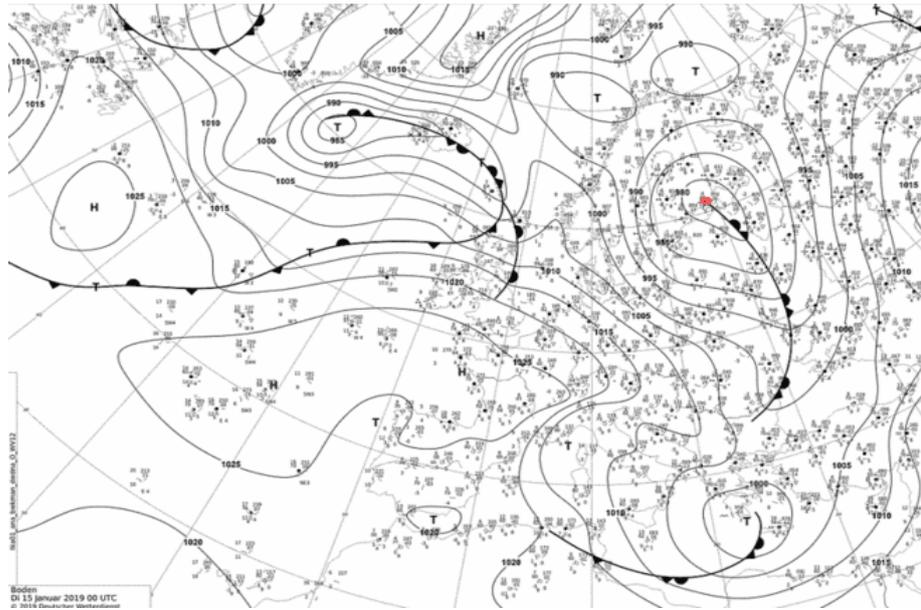


Рисунок 3.27 - Синоптическая карта за 15.01.2019



Рисунок 3.28 - Обзор тумана, модель ICON.

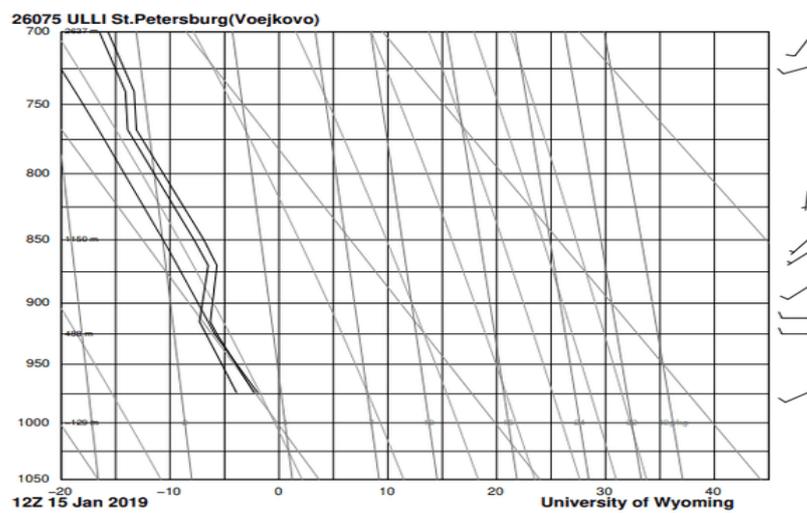


Рисунок 3.29 - Аэрологическая диаграмма за 15.01.2019 12ч.

Выборг находится в центральной части циклона под влиянием фронта окклюзии.

По данным зондирования наблюдается инверсия.

Наблюдения ввелись в 12 и 21 часов. Наблюдался туман и гололед.

Температура: менялась с -2,3 до -2,4 °С

Дефицит: 0,3 - 0,4 °С – графическим способом подтверждает наличие гололеда.

Влажность: 98%

Ветер направление: преобладание Ю, ЮЗ направлений.

Ветер скорость: 1 - 3 м/с.

Облачность: Не видно.

Ледяной туман – главный образующий фактор возникновения гололеда.
Фронтальные гололёды чаще всего связаны с фронтами окклюзии.

3.3 Оценка формирования гололёдно-изморозевых отложений в деревне Ретюнь.

Случай №1

03.01.2024

Диаметр изморозевого отложения составляет 2 мм.

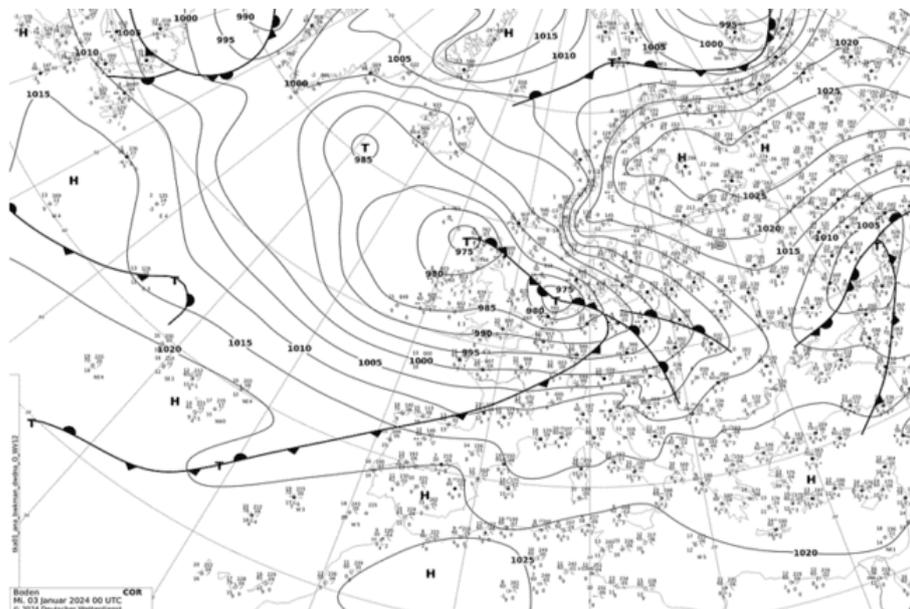


Рисунок 3.30 - Синоптическая ситуация на 03.01.2024.

Деревня Ретюнь находится под действием двухцентрового антициклона. Синоптическая ситуация образует седловину.

Наблюдения на станции ввелись в 3,9,15 и 21 час.

Температура: менялась с $-19,6^{\circ}\text{C}$ до $-24,6^{\circ}\text{C}$

Дефицит: $2,1 - 2,3^{\circ}\text{C}$ – графическим способом подтверждает наличие изморози.

Влажность: 87%

Ветер направление: Ветер, дующий с севера и северо-востока.

Ветер скорость: 1 м/с.

Облачность: Облаков нет.

Синоптическая ситуация благоприятствует образованию изморози. Дефицит – подтверждает наличие изморози. Скорость ветра слабая – способствуют образованию изморози, включая большую влажность, изморозь оседает на поверхности лучше.

Случай №2

20.01.2021

Диаметр смешанного отложения составляет 2 - 4 мм.

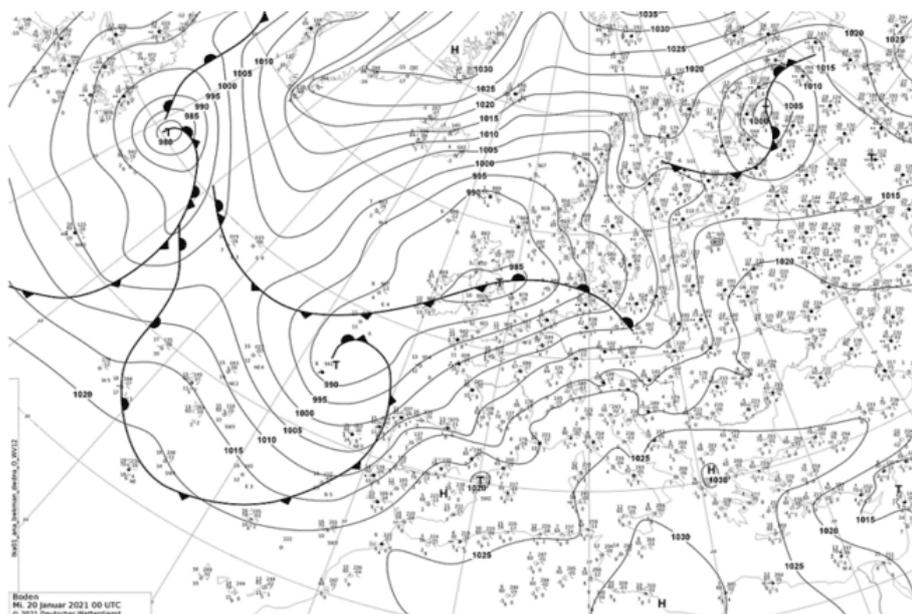


Рисунок 3.31 - Синоптическая карта за 20.01.2023

Ретюнь находится под действием холодного фронта, на периферии циклона в его гребне.

Наблюдения на станции ввелись в 3,9,15 и 21 час.

Температура: менялась с $-6,9^{\circ}\text{C}$ до $-14,8^{\circ}\text{C}$

Дефицит: близкий к 1°C – графическим способом подтверждает наличие изморози.

Влажность: 91%

Ветер направление: В 9:00 наблюдался штиль, преимущественно наблюдался южный и юго-западный

Ветер скорость: 0-2 м/с.

Облачность: В 9 и 21 час облаков практически не было, в другие сроки наблюдения – 10 баллов.

Главными факторами образования смешанного типа отложения являются: нахождение деревни в периферии циклона, слабая скорость ветра при большой влажности, благоприятная температура для образования всех видов гололёдно-изморозевых отложений и дефицит (для определения графическим способом).

3.4 Оценка формирования гололёдно-изморозевых отложений в поселке Лесогорский.

Случай №1

13.01.2024

Наблюдался ливневый снег слабый в срок наблюдения или за последний час. Диаметр изморозевого отложения составляет 9 мм.

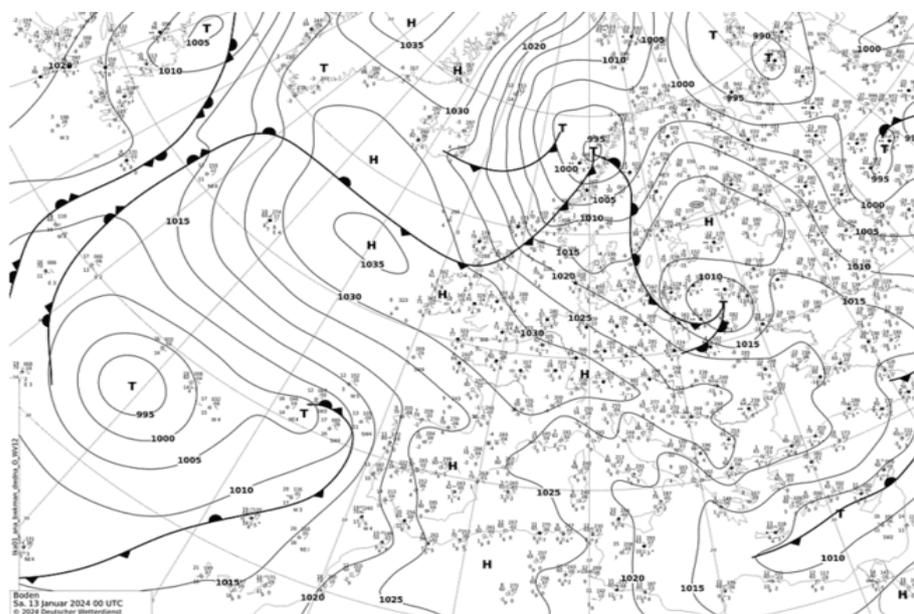


Рисунок 3.32 - Синоптическая карта за 13.01.2024

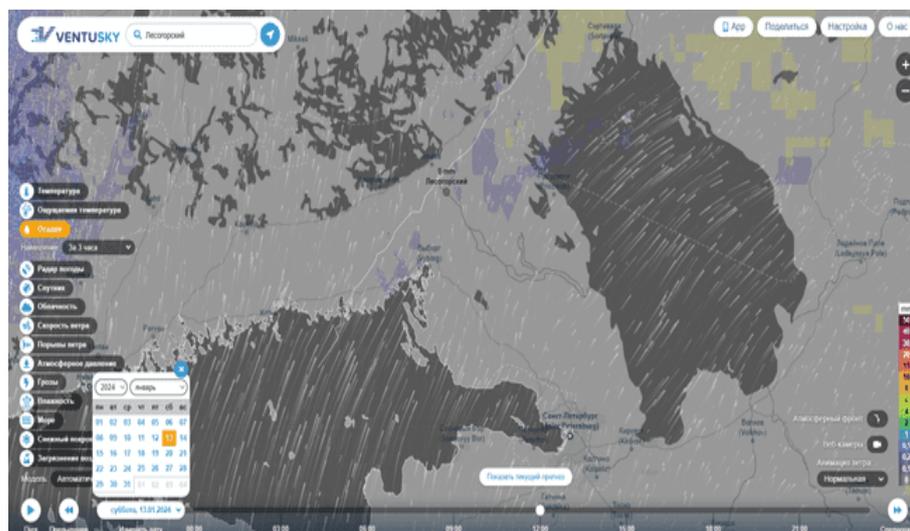


Рисунок 3.33 - Обзор осадков, модель ICON.

Поселок Лесогорский подвержен влиянию центральной части антициклона, в гребне, в зоне холодного сектора, с приближающимся теплым фронтом.

Температура: менялась с $-18,8$ до $-17,7$ °С

Дефицит: $1,7$ °С – графическим способом подтверждает наличие изморози.

Влажность: 87%

Ветер направление: Штиль, безветрие.

Ветер скорость: 0 м/с.

Облачность: 7 - 10 баллов.

На станции в период с 0:00 до 3:00 наблюдался ливневый снег. По синоптической ситуации стоит ожидать гололёдно-изморозевые отложения, метеорологические условия благоприятны для образования изморози.

Случай №2

27.12.2023

Наблюдался туман или ледяной туман, небо видно, начался или усилился в течение последнего часа. Диаметр изморозевого отложения составляет 2 - 3 мм.

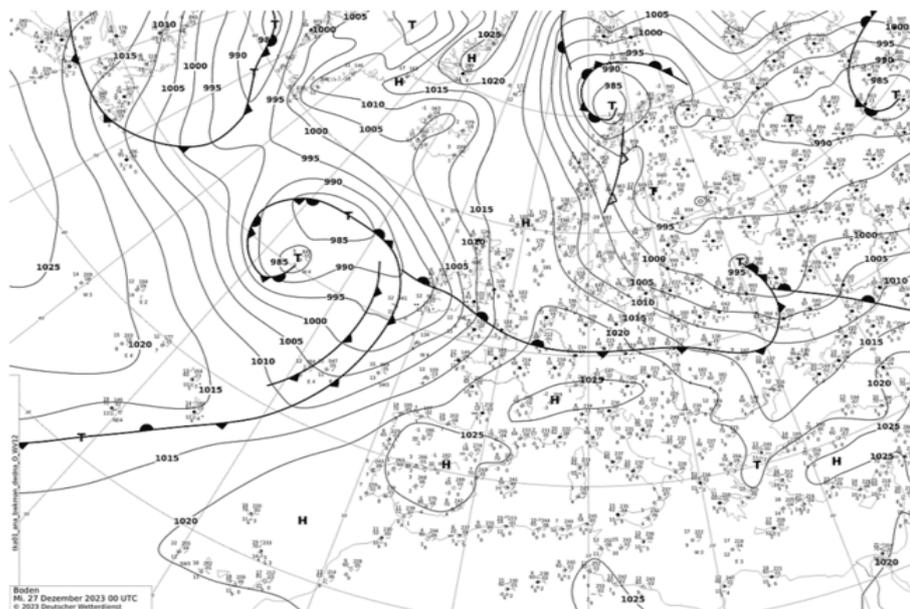


Рисунок 3.34 - Синоптическая карта за 27.12.2023

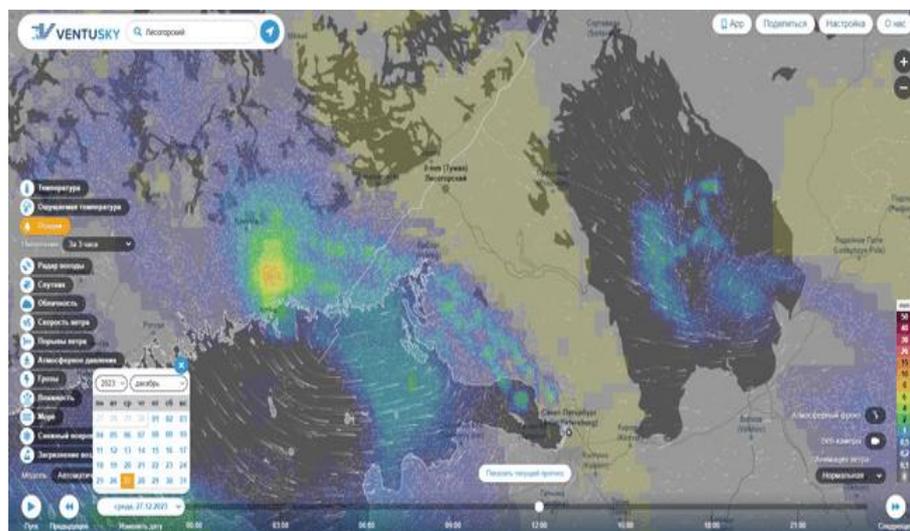


Рисунок 3.35 - Обзор тумана, модель ICON.

Анализ: Поселок расположен в центре многоцентрового циклона.

Наблюдения ввелись с 6 до 21 часа. Наблюдался ледяной туман

Температура: менялась с -9,9 до -13,2 °С

Дефицит: близкий к 1 °С – графическим способом подтверждает наличие изморози.

Влажность: 92%

Ветер направление: В 6 часов – СЗ, в 9 – ССВ, с 12 до 15 – штиль, с 18 до 21 – СЗ.

Ветер скорость: 0 - 1 м/с.

Облачность: 7 - 9 баллов.

Основополагающим фактором образования изморози является ледяной туман. Метеорологические факторы благоприятны для образования отложения.

3.5 Оценка формирования гололёдно-изморозевых отложений в деревне Белогорка.

Случай №1

14.01.2024 за 09:00 ч по местному времени

Диаметр изморозевого отложения составляет 6 мм

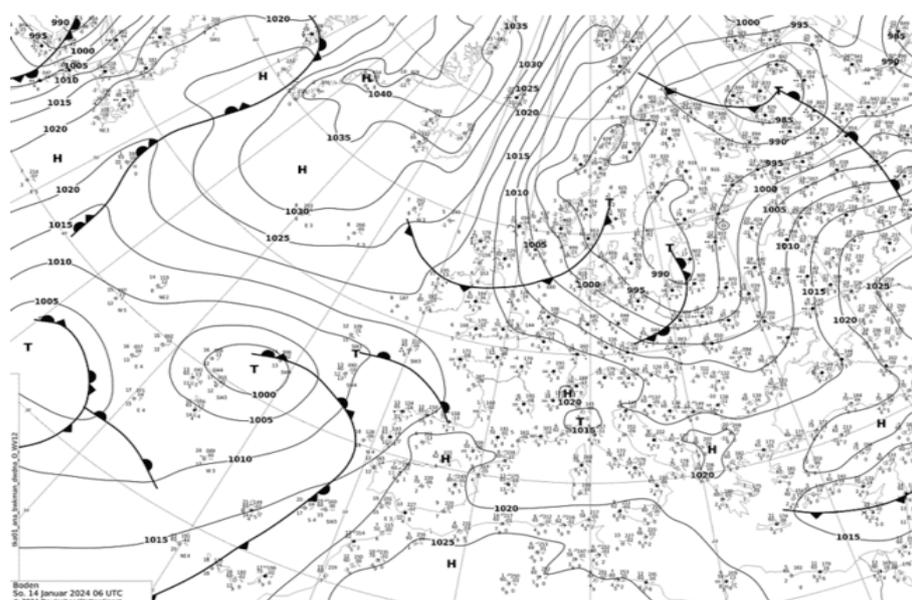


Рисунок 3.36 - Синоптическая карта за 14.01.2024, 06 UTC

Поселок Белогорка находится между гребнем антициклона и ложбиной циклона. Пункт подвержен влиянию приближающегося фронта окклюзий.

Температура: $-16,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Дефицит: $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ – графическим способом подтверждает наличие изморози.

Влажность: 87%

Ветер направление: ЮЮВ

Ветер скорость: 2 м/с.

Облачность: 10 баллов.

На станции в период с 6:00 до 9:00 осадков не наблюдается. По синоптической ситуации стоит ожидать гололёдно-изморозевые отложения, метеорологические условия благоприятны для образования изморози.

Случай № 2

29.12.2020 за 21:00 ч

Наблюдался дождь, замерзающий слабый. Диаметр отложения при гололеде составляет 3 мм.

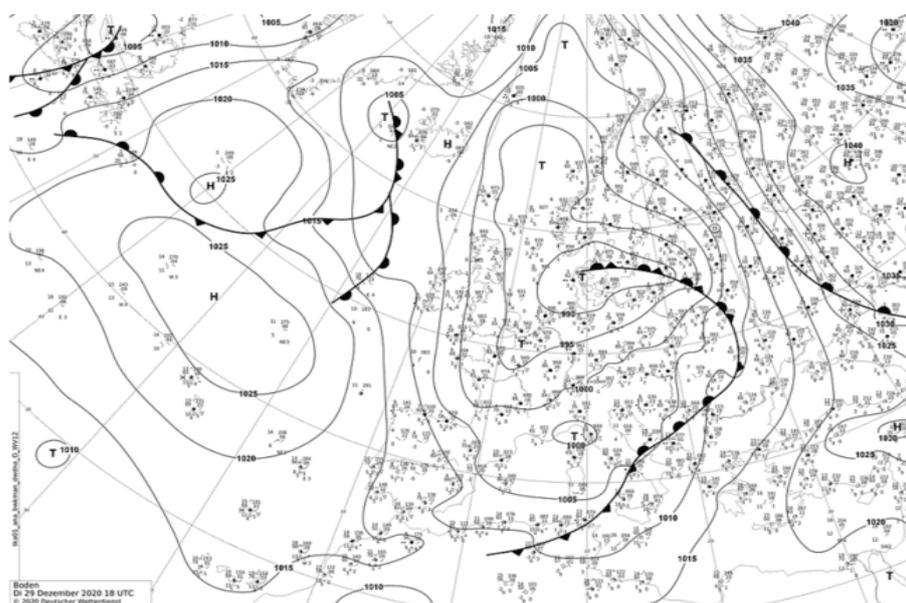


Рисунок 3.37 - Синоптическая карта за 29.12.2020 18 UTC

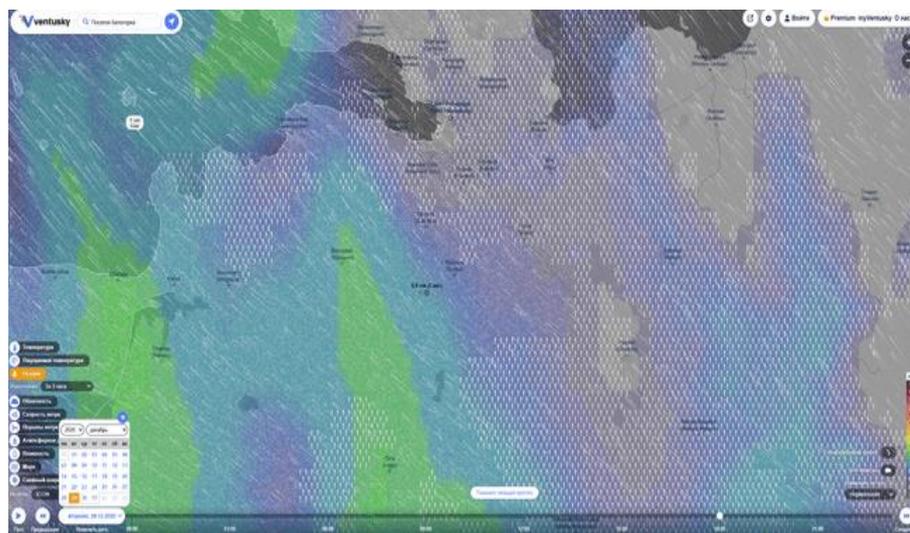


Рисунок 3.38 - Обзор осадков, модель ICON.

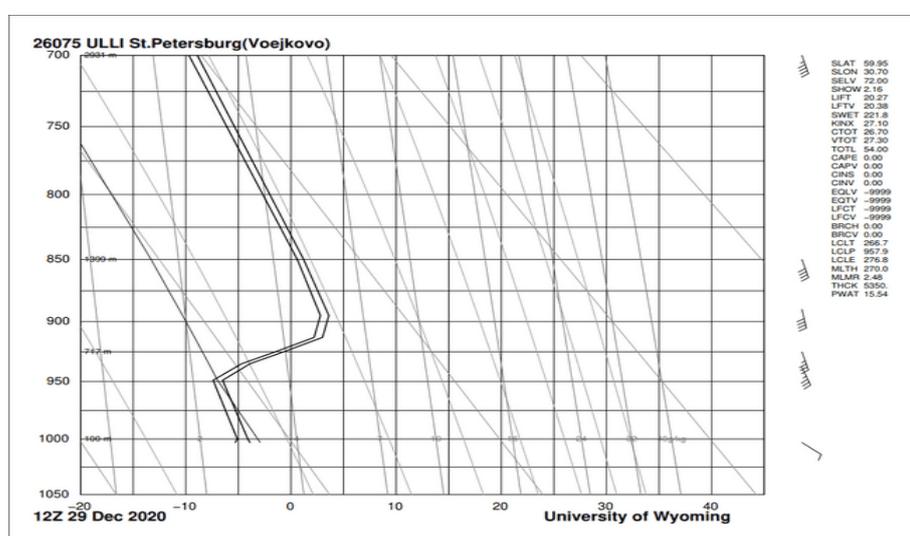


Рисунок 3.39 - Аэрологическая диаграмма за 29.12.2020 12ч.

Поселок Белогорка находится под влиянием многоцентрового циклона в зоне теплого сектора теплого фронта. Пункт подвержен влиянию приближающегося фронта окклюзий.

По данным зондирования наблюдается инверсия – наличия замерзающих осадков.

Температура: $-2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$

Дефицит: $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ – графическим способом подтверждает наличие гололеда.

Влажность: 94%

Ветер направление: ЮВ

Ветер скорость: 3 м/с.

Облачность: 10 баллов.

На станции наблюдаются осадки в виде снега. По синоптической ситуации стоит ожидать гололёдно-изморозевые отложения, метеорологические условия благоприятны для образования гололеда.

3.6 Оценка формирования гололёдно-изморозевых отложений в Ломоносове.

Случай №1

26.12.2021 за 12:00 ч

Снег непрерывный слабый в срок наблюдения. Диаметр изморозевого отложения составляет 10 мм.

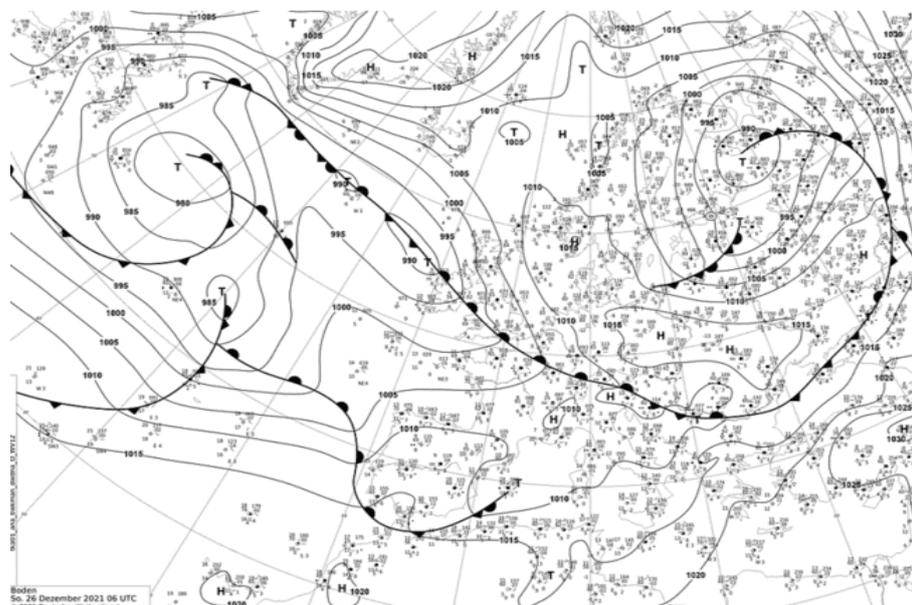


Рисунок 3.40 - Синоптическая карта за 26.12.2021, 6 UTC



Рисунок 3.41 - Обзор осадков, модель ICON.

Ломоносов находится в ложбине двуцентрового циклона. Пункт подвержен влиянию фронта окклюзий.

Температура: $-17,4\text{ }^{\circ}\text{C}$

Дефицит: $2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ – графическим способом подтверждает наличие изморози.

Влажность: 80%

Ветер направление: 3

Ветер скорость: 4 м/с.

Облачность: 10 баллов.

На станции наблюдаются осадки в виде слабого снега. По синоптической ситуации стоит ожидать гололёдно-изморозевые отложения, метеорологические условия благоприятны для образования кристаллической изморози.

Случай №2

03.02.2019 за 21:00 ч

Наблюдается морось незамерзающая непрерывная слабая в срок наблюдения. Диаметр отложения при гололеде составляет 1 мм.

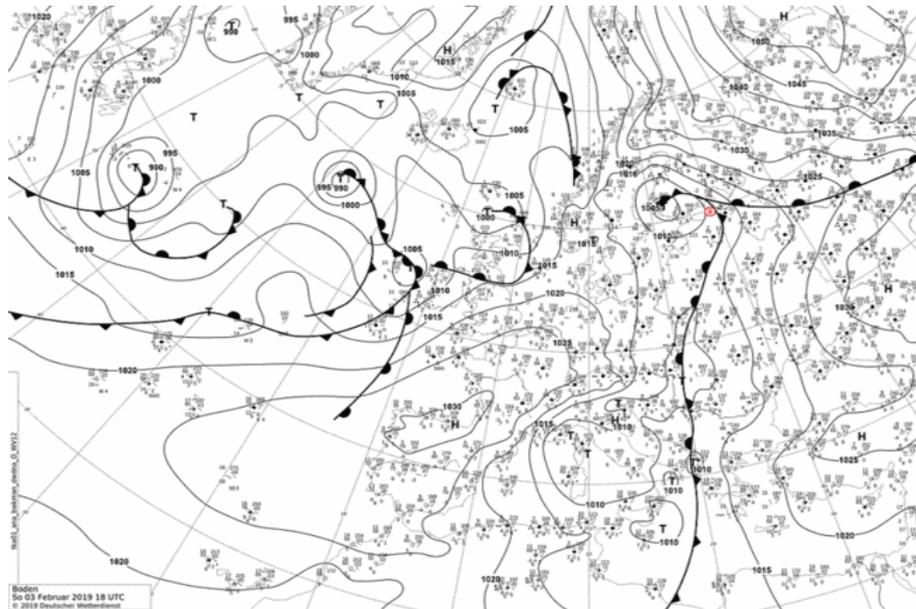


Рисунок 3.42 - Синоптическая карта за 03.02.2019, 18 UTC

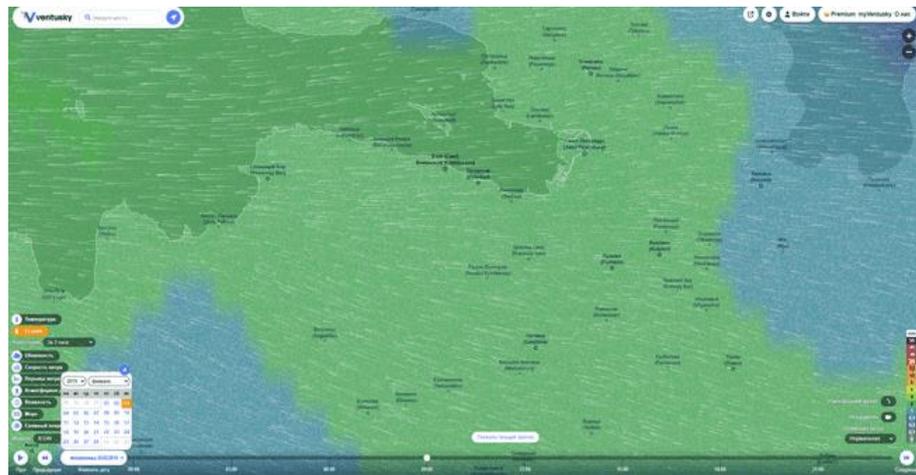


Рисунок 3.43 - Обзор осадков, модель ICON.

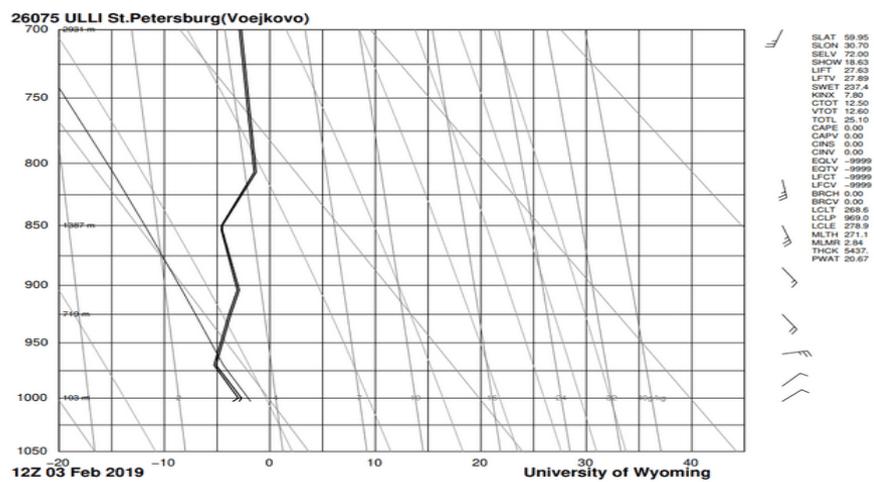


Рисунок 3.44 - Аэрологическая диаграмма за 03.02.2019 12ч.

Ломоносов находится под влиянием многоцентрового циклона в зоне теплого сектора теплого фронта. Пункт подвержен влиянию приближающегося фронта окклюзий.

По данным зондирования наблюдается инверсия – наличия замерзающих осадков.

Температура: 0,1 °С

Дефицит: 0,5 °С – графическим способом подтверждает наличие гололеда.

Влажность: 96%

Ветер направление: ЮВ

Ветер скорость: 3 м/с.

Облачность: 10 баллов.

На станции наблюдаются осадки в виде снега. По синоптической ситуации стоит ожидать гололётно-изморозевые отложения, метеорологические условия благоприятны для образования гололеда.

3.7 Оценка формирования гололётно-изморозевых отложений в поселке Сосново.

Случай №1

07.10.2019 за 09:00 ч

Наблюдался туман или ледяной туман, неба не видно, без заметного изменения интенсивности в течение последнего часа. Диаметр отложения при гололеде составляет 1 мм.

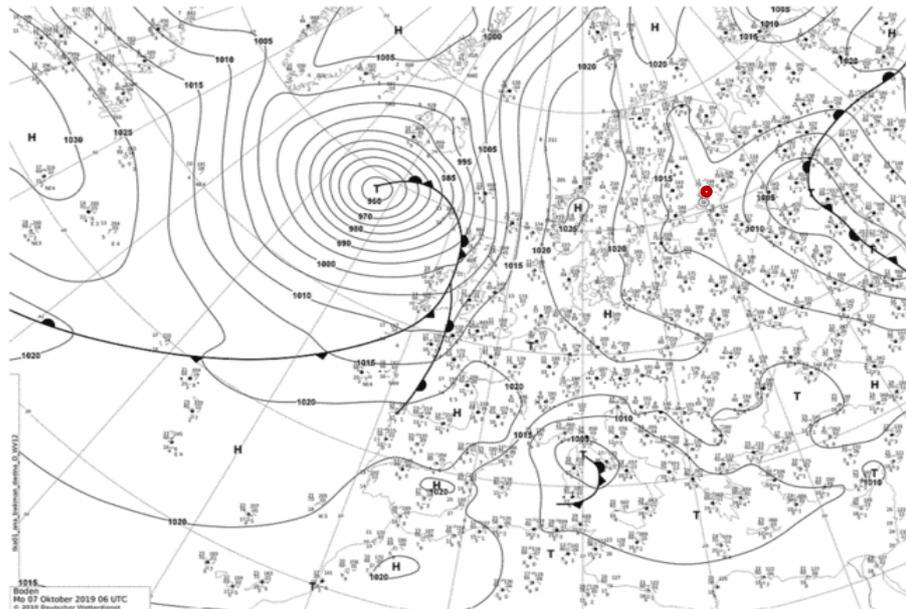


Рисунок 3.45 - Синоптическая карта за 07.10.2019, 06 UTC

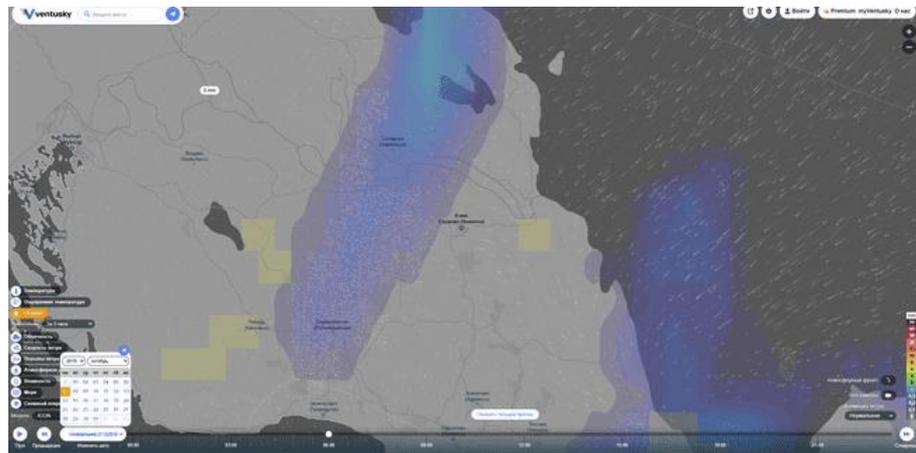


Рисунок 3.46 - Обзор осадков, модель ICON.

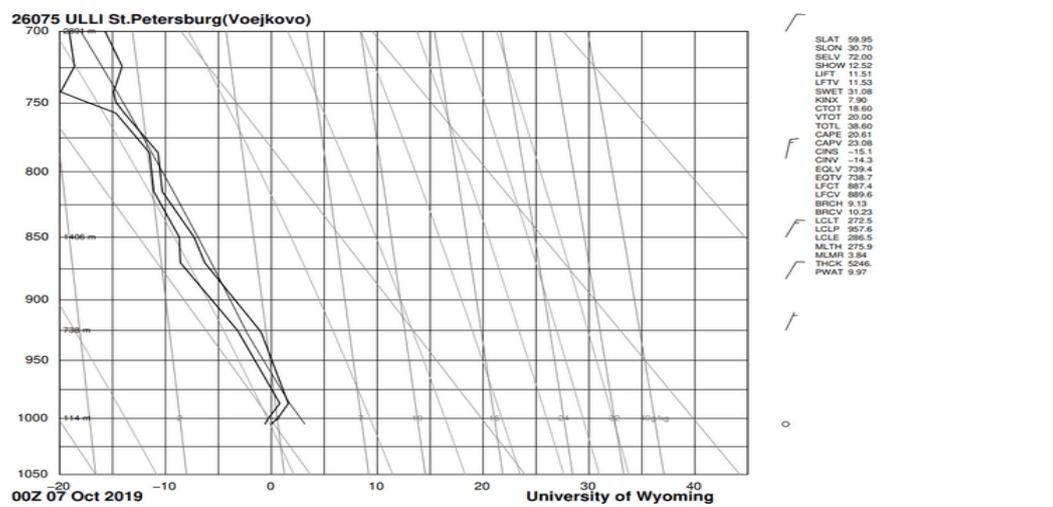


Рисунок 3.47 - Аэрологическая диаграмма за 07.10.2019 00ч.

Поселок Сосново находится на периферии двухцентрового циклона, под его влиянием.

По данным зондирования наблюдается приземная инверсия – подтверждает наличие тумана.

Температура: $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$

Дефицит: $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – графическим способом подтверждает наличие гололеда.

Влажность: 100%

Ветер направление: Штиль, безветрие

Ветер скорость: 0 м/с .

Облачность: Небо не видно из-за тумана.

На станции наблюдается туман. По синоптической ситуации стоит ожидать гололёдно-изморозевые отложения, метеорологические условия благоприятны для образования гололеда.

Случай №2

11.01.2022 за 09:00 ч

Наблюдается дымка. Диаметр изморозевого отложения составляет 9 мм .

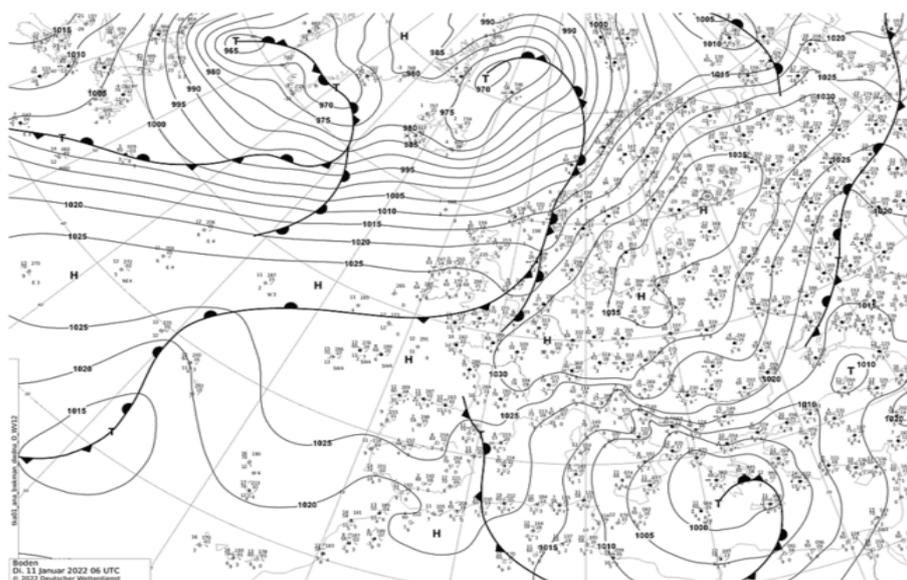


Рисунок 3.48 - Синоптическая карта за 11.01.2022, 06 UTC

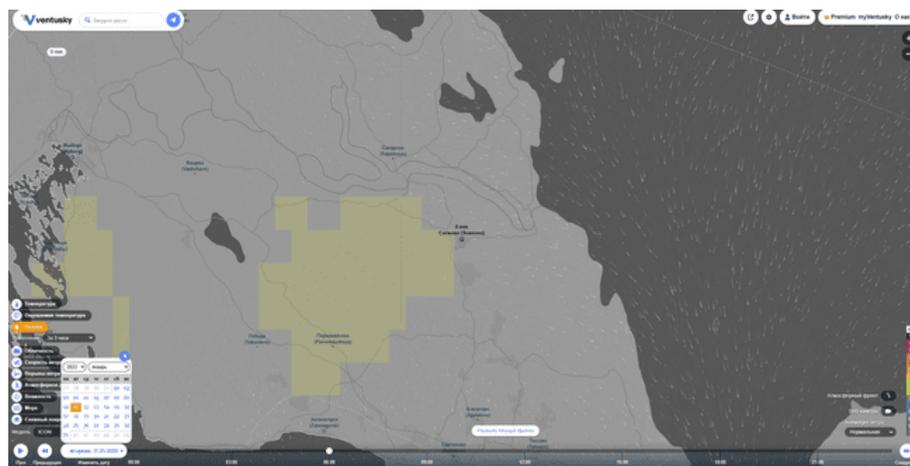


Рисунок 3.49 - Обзор осадков, модель ICON.

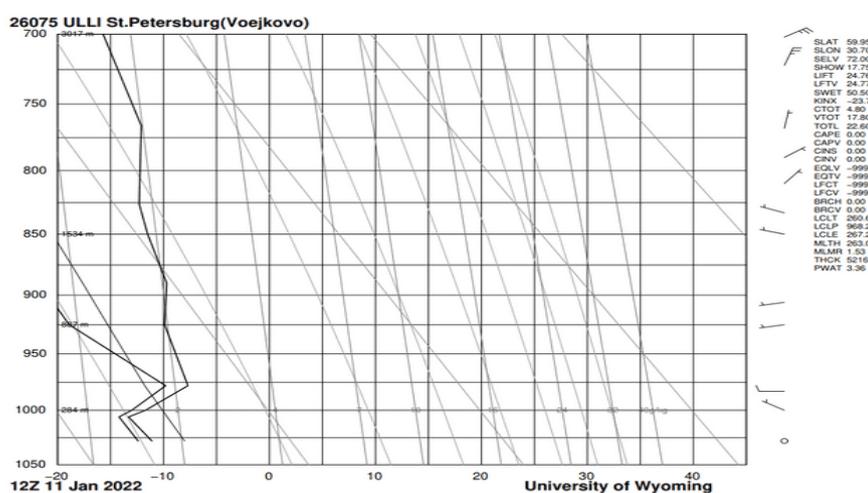


Рисунок 3.50 - Аэрологическая диаграмма за 11.01.2022 12ч.

Поселок Сосново находится в центре двучетрового антициклона.

По данным зондирования наблюдается приземная инверсия – подтверждает наличие дымки/тумана.

Температура: $-15,3\text{ }^{\circ}\text{C}$

Дефицит: $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ – графическим способом подтверждает наличие изморози.

Влажность: 87%

Ветер направление: Штиль, безветрие

Ветер скорость: 0 м/с.

Облачность: 6 баллов.

На станции наблюдается туман. По синоптической ситуации стоит ожидать гололёдно-изморозевые отложения, метеорологические условия благоприятны для образования кристаллической изморози.

3.8 Анализ отложений мокрого снега на территории Ленинградской области

Случай №1

Санкт-Петербург, 23.12.2023 за 15:00ч

Наблюдался снег непрерывный, умеренный в срок наблюдения. Диаметр отложения мокрого снега составляет 4 мм.

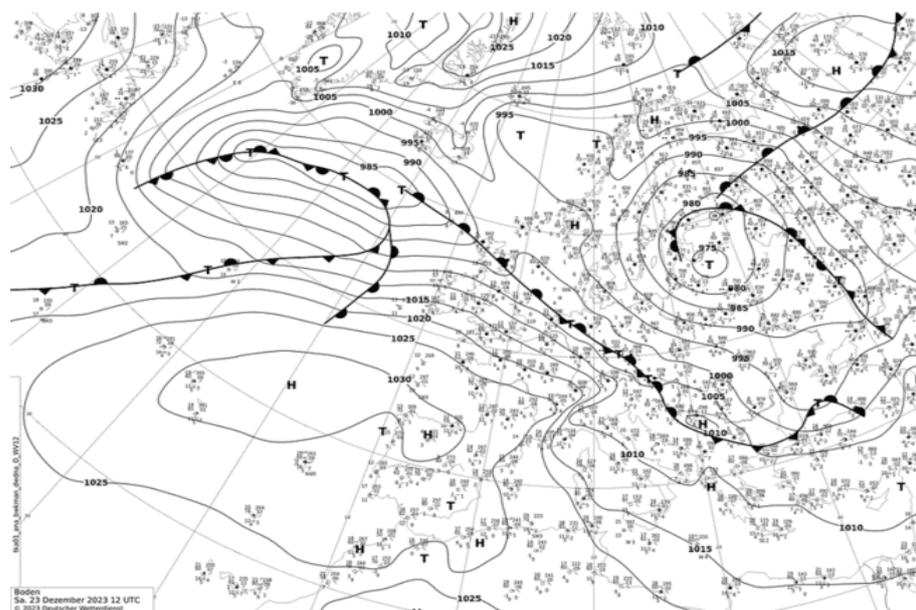


Рисунок 3.51 - Синоптическая карта за 13.12.2023, 12 UTC

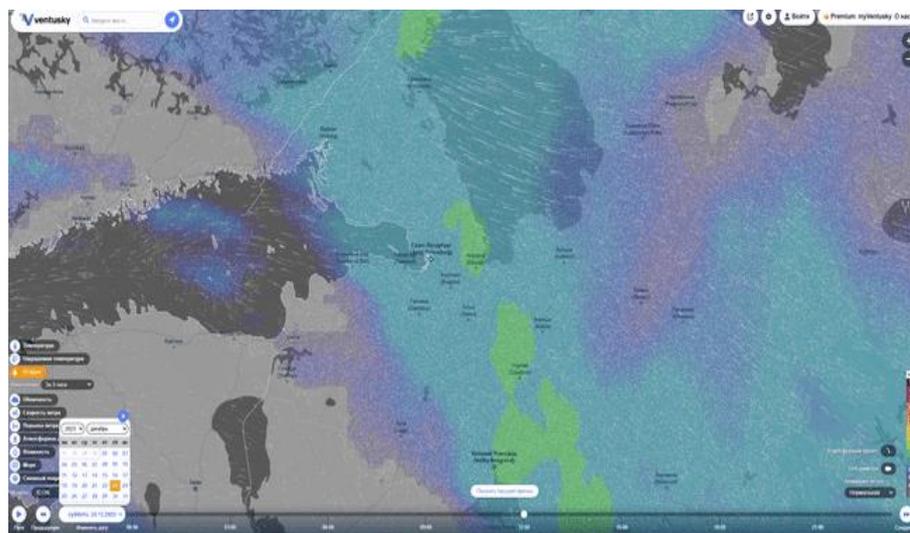


Рисунок 3.52 - Обзор осадков, модель ICON.

Санкт-Петербург находится в центре циклона. Наблюдается прохождение фронта окклюдзий

Температура: 0,4 °С

Влажность: 98%

Ветер направление: В

Ветер скорость: 1 м/с.

На станции наблюдается снег. Синоптической и метеорологические условия благоприятны для образования отложений мокрого снега.

Случай №2

Деревня Ретюнь, 16.12.2019, за 03:00ч

Наблюдалась дымка. Диаметр отложения мокрого снега составляет 2 мм.

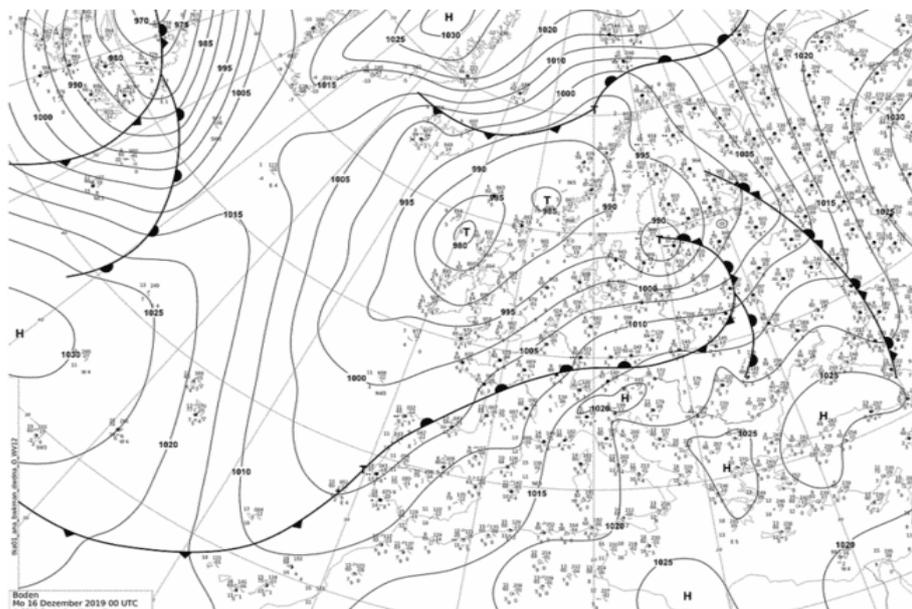


Рисунок 3.53 - Синоптическая карта за 16.12.2019, 00 UTC

Деревня Ретюнь находится на периферии многоцентрового циклона. Метеорологические условия определяются прохождением фронта окклюзий.

Температура: 0,6 °С

Влажность: 98%

Ветер направление: ЮЮЗ

Ветер скорость: 3 м/с.

На станции наблюдается дымка. Синоптической и метеорологические условия благоприятны для образования отложений мокрого снега.

Случай №3

Выборг, 19.01.2023 за 09:00ч

Наблюдался снег непрерывный, умеренный в срок наблюдения. Диаметр отложения мокрого снега составляет 8 мм.

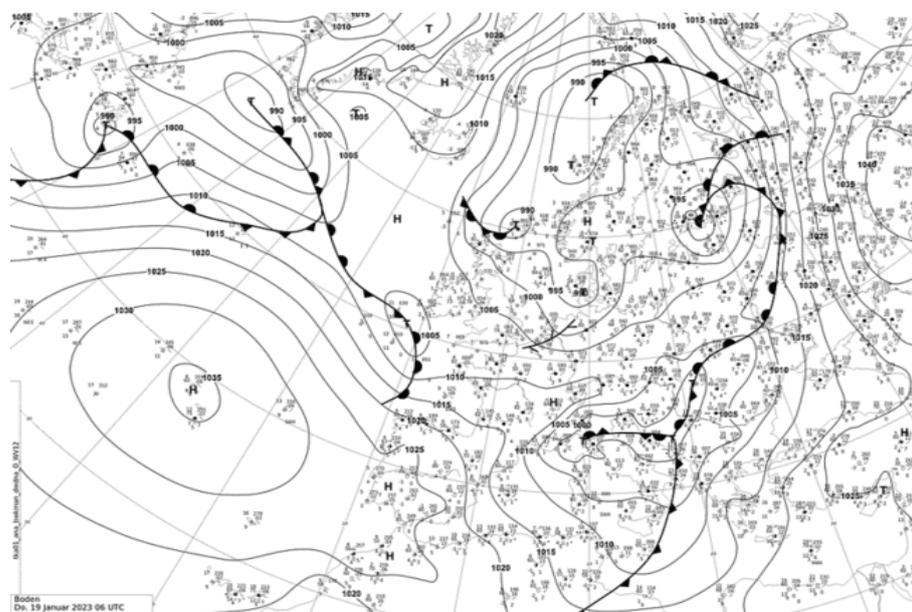


Рисунок 3.54 - Синоптическая карта за 19.01.2023, 06 UTC

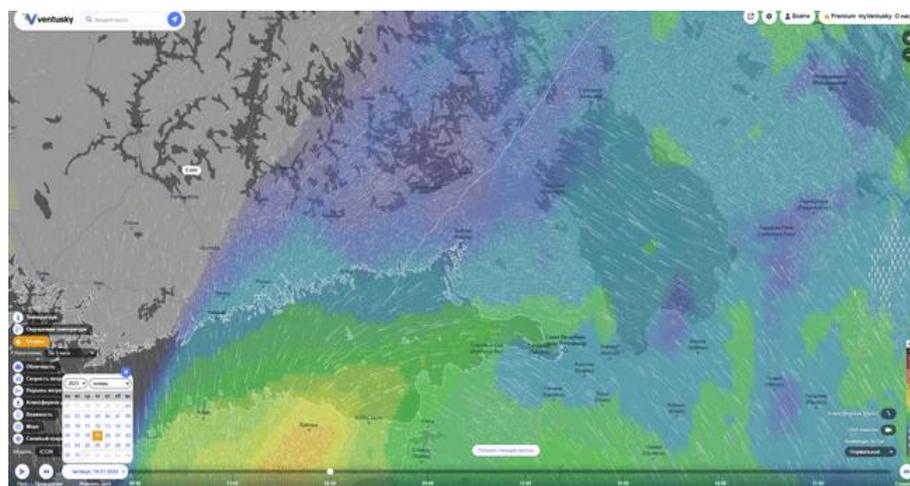


Рисунок 3.55 - Обзор осадков, модель ICON.

Выборг находится в центре действия многоцентрового циклона.
 Метеорологические условия определяются фронтом окклюзий.

Температура: 0,1 °С

Влажность: 100%

Ветер направление: ВСВ

Ветер скорость: 3 м/с.

На станции наблюдаются осадки в виде снега. Синоптические и метеорологические условия благоприятны для образования отложений мокрого снега.

Вывод к главе 3:

Отложения мокрого снега на территории Ленинградской области образуются преимущественно при диапазоне температур воздуха от -1 до 1°C , при температуре выше 1°C они растут медленно или даже тают. Быстроте налипания снега благоприятствуют интенсивность снегопада и затишье; сильный ветер сдувает отложение мокрого снега с поверхности, тем самым препятствуя его нарастанию. При понижении температуры воздуха ниже 0°C отложения мокрого снега постепенно замерзают. Отложения мокрого снега являются фронтальным видом обледенения.

Мокрый снег наблюдается в значительно более узком диапазоне температуры воздуха, чем другие гололёдно-изморозевые отложения. Большая часть случаев отложений мокрого снега наблюдалась при температуре воздуха от -1 до 1°C . Опасные отложения мокрого снега вовсе образуются при температуре воздуха от $-0,5$ до $0,5^{\circ}\text{C}$. Температурный диапазон определяется физическими свойствами снега: если температура слишком низкая, снежинки становятся слишком твердыми и не удерживаются на поверхности, а если слишком высокая, они быстро тают и опадают. Поэтому благоприятные условия для образования отложений мокрого снега ограничены узким температурным диапазоном.

Отложения мокрого снега чаще всего начинают образовываться при скорости ветра от 1 до 4 м/с. Однако данный вид гололёдно-изморозевых отложений имеет важную особенность – в отличие от других видов отложений, опасные отложения мокрого снега наблюдаются при низкой скорости ветра или при штиле. Это связано с физическими свойствами снега – снежинки имеют большой размер и высокую парусность, они легко сдуваются сильным ветром с поверхностей, на которых происходит обледенение. Поэтому для образования

опасных отложений в виде мокрого снега необходимо, чтобы ветер на протяжении всей фазы нарастания был не слишком сильный – в большинстве случаев не более 3 м/с.

Были проанализированы синоптические процессы на исследуемых станциях, сопровождающие образование гололёдно-изморозевых отложений и выделены типовые явления по каждому виду отложений, по данным, имеющимся в открытом доступе [6]. В результате были сформированы объединённые таблицы (приложение 5).

Было выявлено, что внутримассовые гололёды образуются при синоптических ситуациях, способствующих возникновению низкой внутримассовой слоистой облачности или тумана. Фронтальные гололёды чаще всего связаны с тёплыми фронтами и тёплыми фронтами окклюзии и возникают при выпадении переохлаждённого дождя или мороси.

Синоптическая ситуация при образовании изморозевых отложений характеризуется, как правило, малоградиентными полями давления, на перифериях или в центральных частях антициклонов.

Для некоторых случаев гололёдно-изморозевых отложений были проанализированы вертикальные профили основных метеорологических параметров по данным аэрологического зондирования на ст. Воейково, полученные из открытого доступа [7]. В ходе анализа выявлено, что в вертикальном профиле часто наблюдалось инверсионное распределение температуры в приземном слое (до 300 м) и на высотах 1-2 км (приподнятые инверсии).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1 - Квантильный анализ температур для отложений изморози на исследуемых станциях (рисунки 1.1 – 1.7):

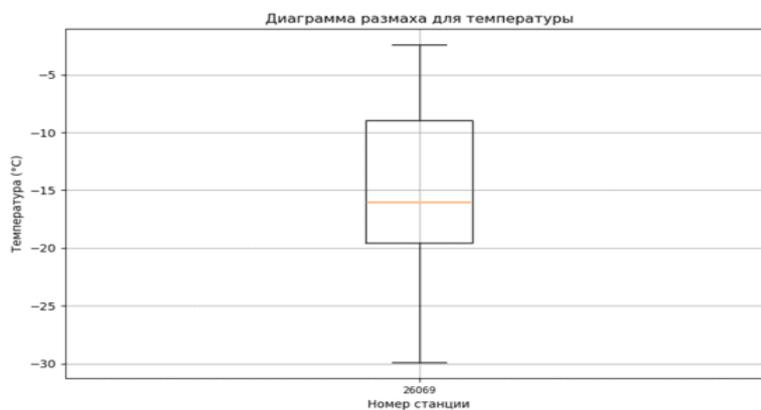


Рисунок 1.1 – Диаграмма размаха температуры воздуха (°C). Станция Белогорка

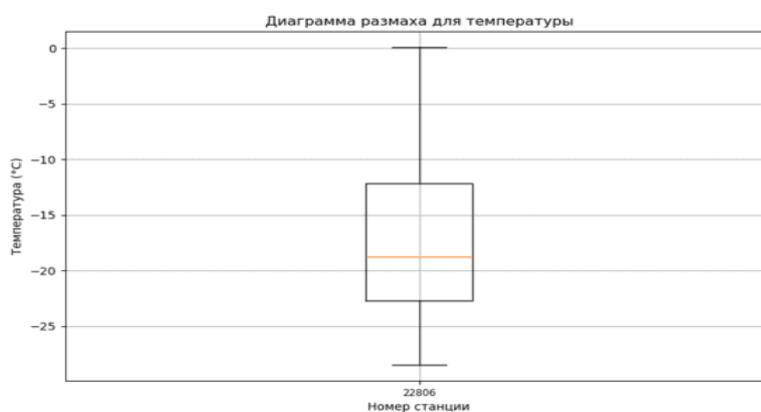


Рисунок 1.2 – Диаграмма размаха температуры воздуха (°C). Станция Лесогорский

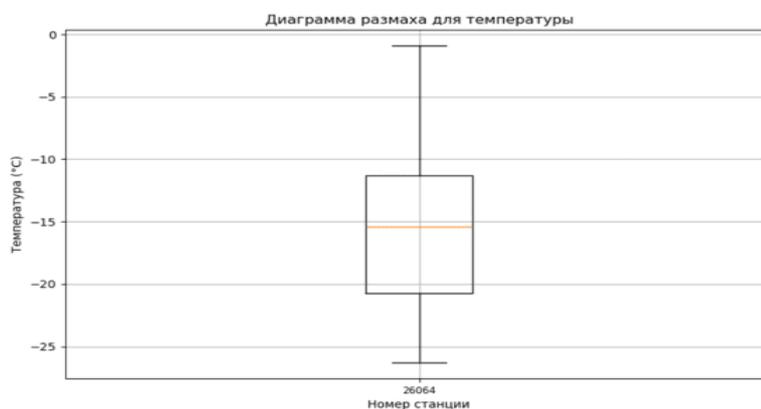


Рисунок 1.3 – Диаграмма размаха температуры воздуха (°C). Станция Ломоносов

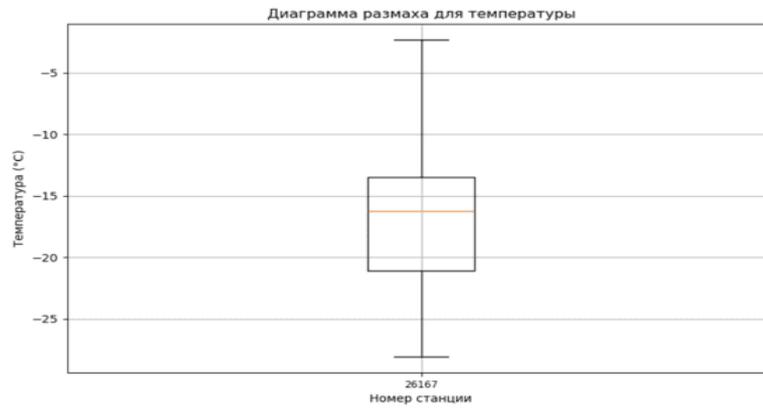


Рисунок 1.4 – Диаграмма размаха температуры воздуха (°C). Станция Ретюнь

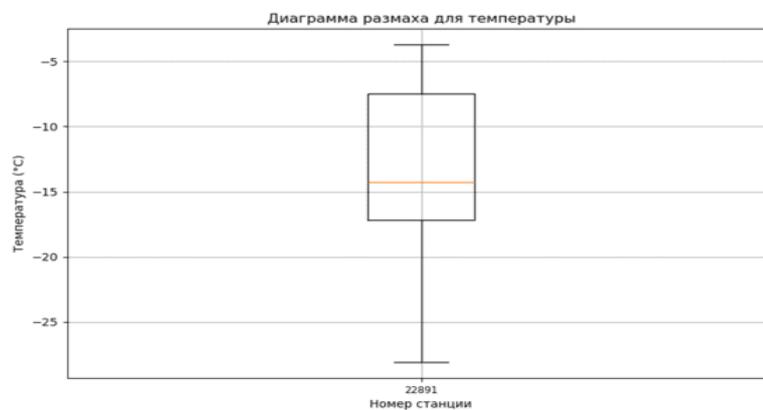


Рисунок 1.5 – Диаграмма размаха температуры воздуха (°C) Станция Сосново

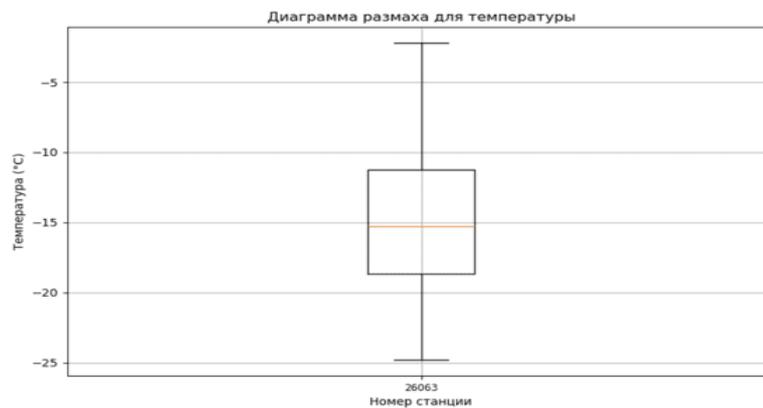


Рисунок 1.6 – Диаграмма размаха температуры воздуха (°C). Станция Санкт-Петербург

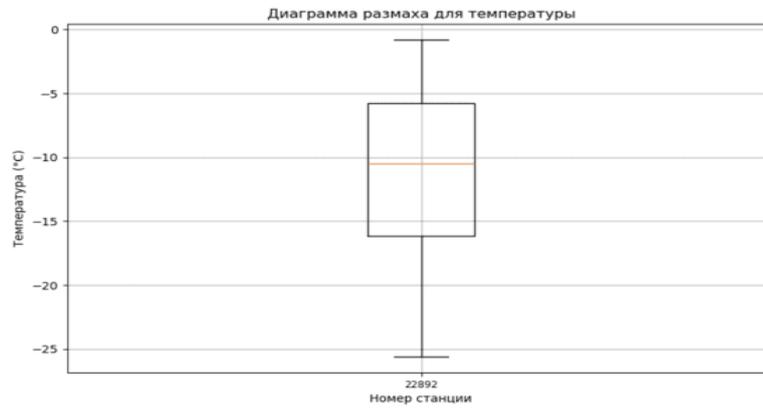


Рисунок 1.7 – Диаграмма размаха температуры воздуха (°C). Станция Выборг

Приложение 2 - Квантильный анализ температур для отложений гололеда на станциях исследуемых (рисунки 2.1 – 2.7):

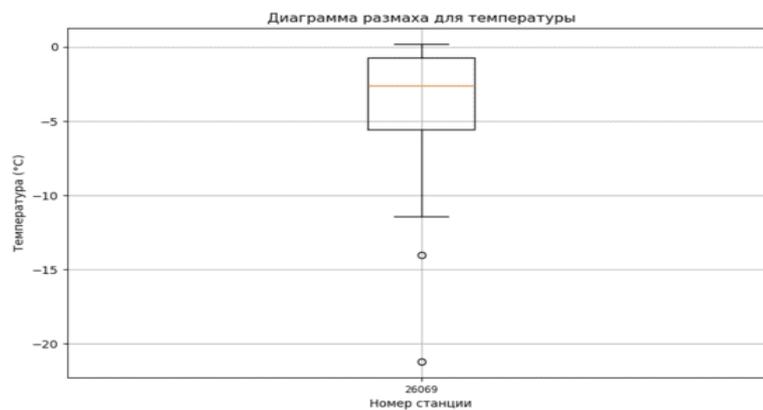


Рисунок 2.1 – Диаграмма размаха температуры воздуха (°C). Станция Белогорка

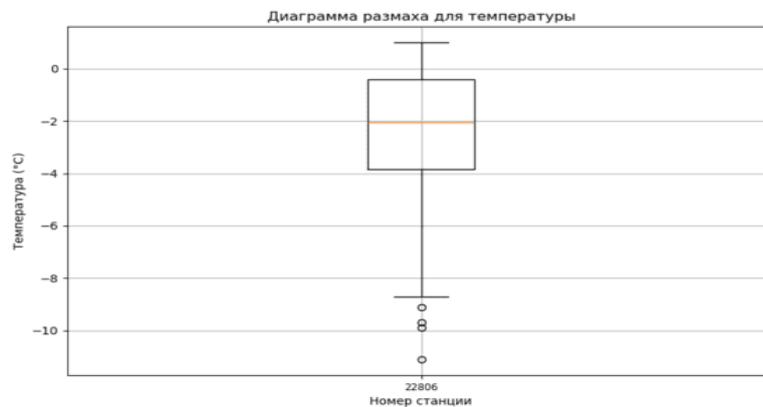


Рисунок 2.2 – Диаграмма размаха температуры воздуха (°C). Станция Лесогорский

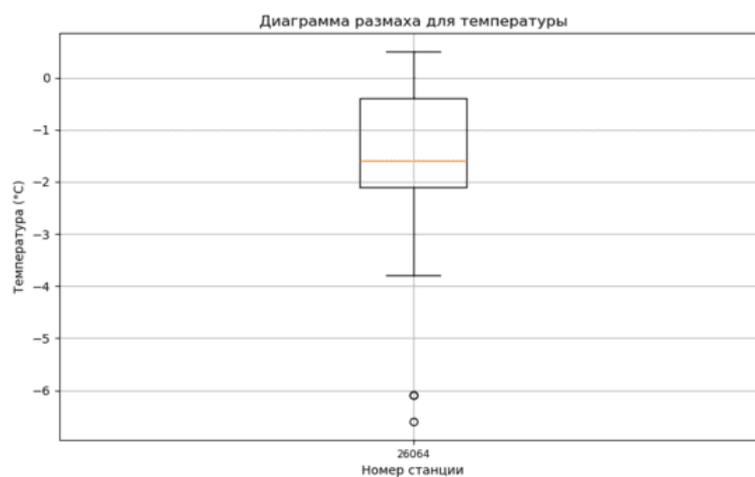


Рисунок 2.3 – Диаграмма размаха температуры воздуха (°C). Станция Ломоносов

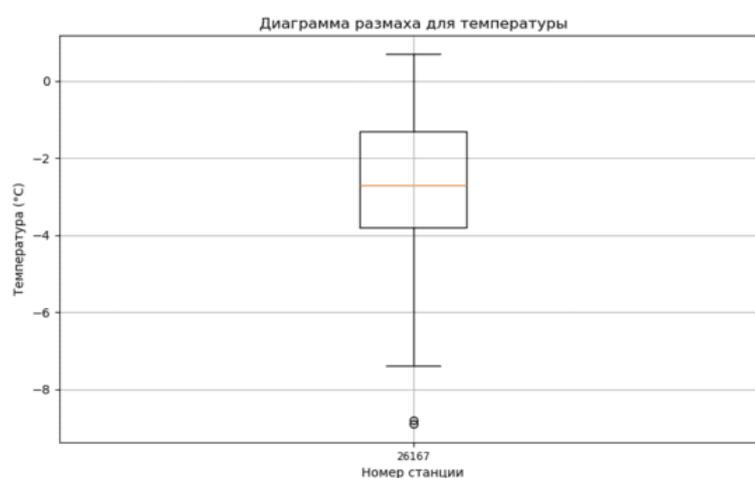


Рисунок 2.4 – Диаграмма размаха температуры воздуха (°C). Станция Ретюнь

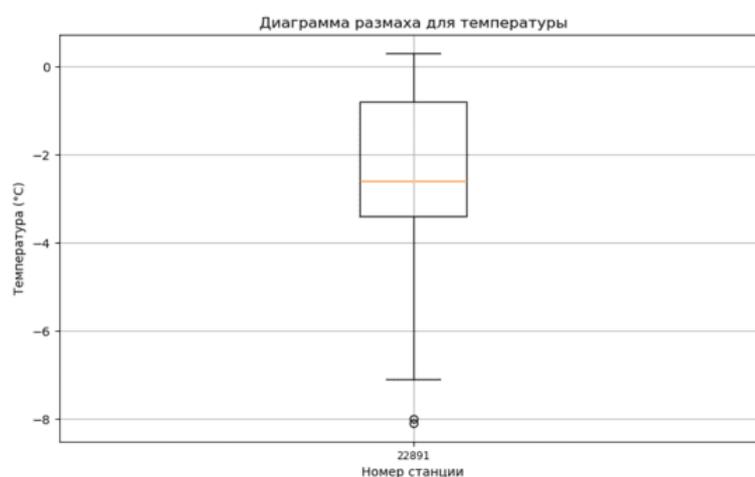


Рисунок 2.5 – Диаграмма размаха температуры воздуха (°C). Станция Сосново

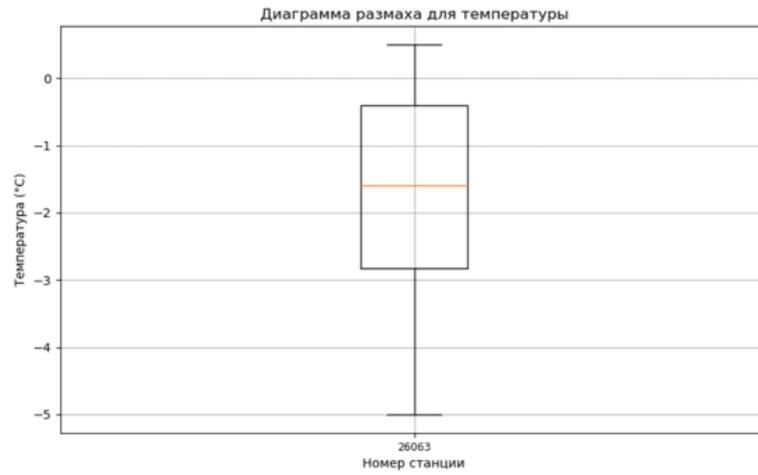


Рисунок 2.6 – Диаграмма размаха температуры воздуха (°C). Станция Санкт-Петербург

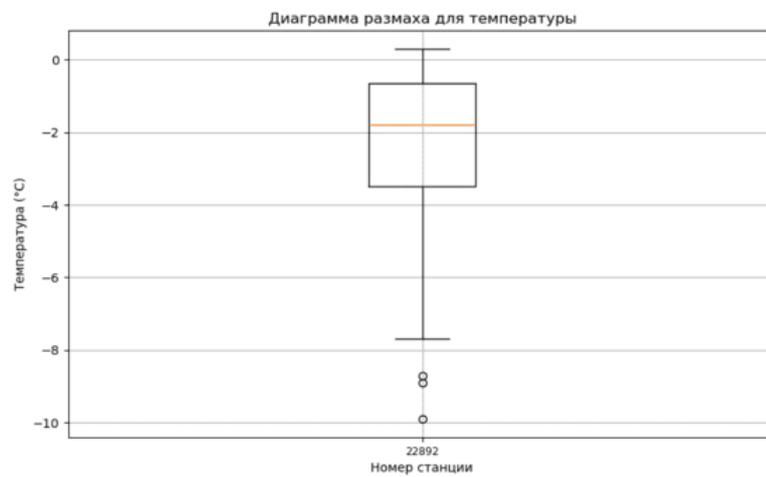


Рисунок 2.7 – Диаграмма размаха температуры воздуха (°C). Станция Выборг

Приложение 3 - Квантильный анализ скорости ветра при отложениях гололёда на исследуемых станциях (рисунки 3.1 – 3.7):

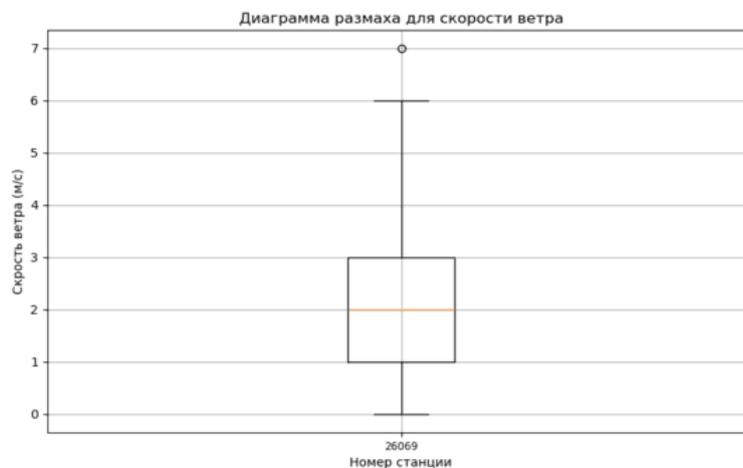


Рисунок 3.1 – Диаграмма размаха скорости вестра (м/с) Станция Белогорка

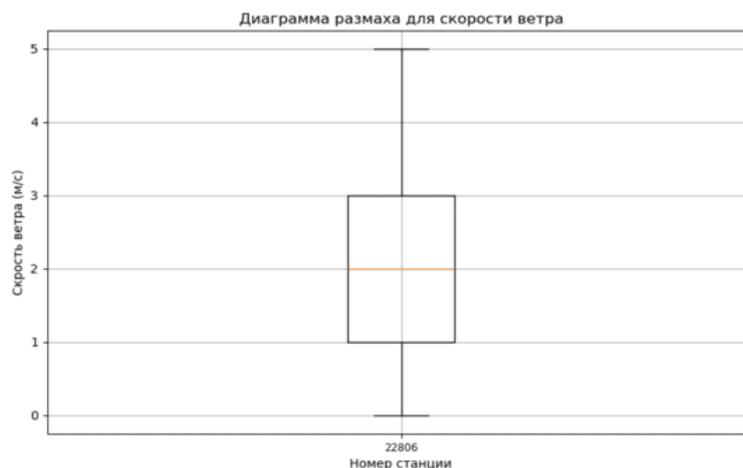


Рисунок 3.2 – Диаграмма размаха скорости вестра (м/с) Станция Лесогорский

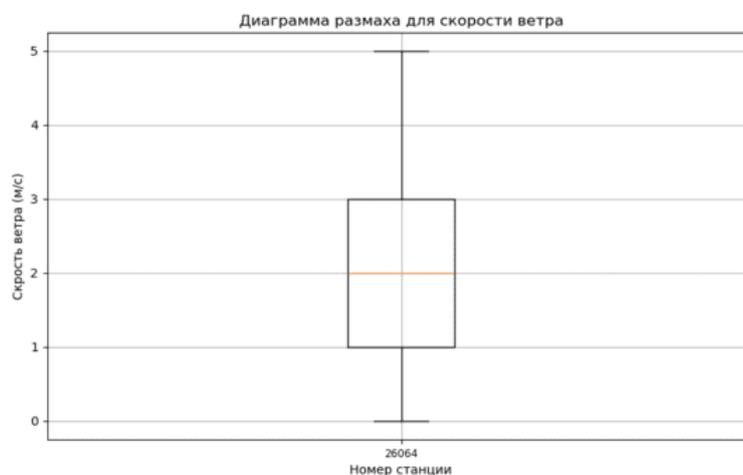


Рисунок 3.3 – Диаграмма размаха скорости вестра (м/с) Станция Ломоносов

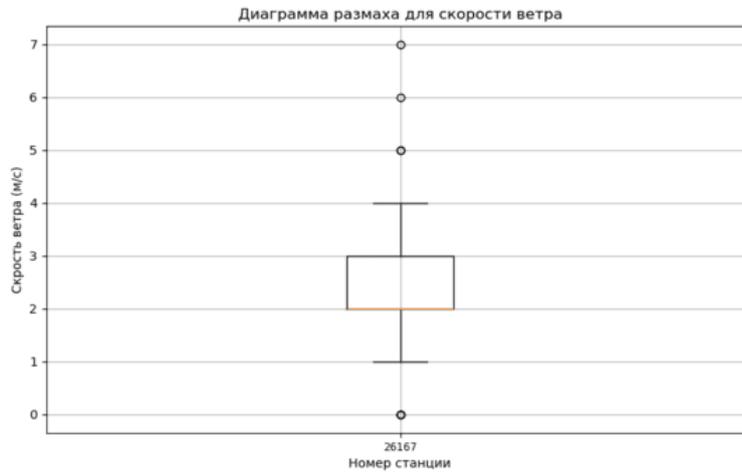


Рисунок 3.4 – Диаграмма размаха скорости вестра (м/с) Станция Ретюнь

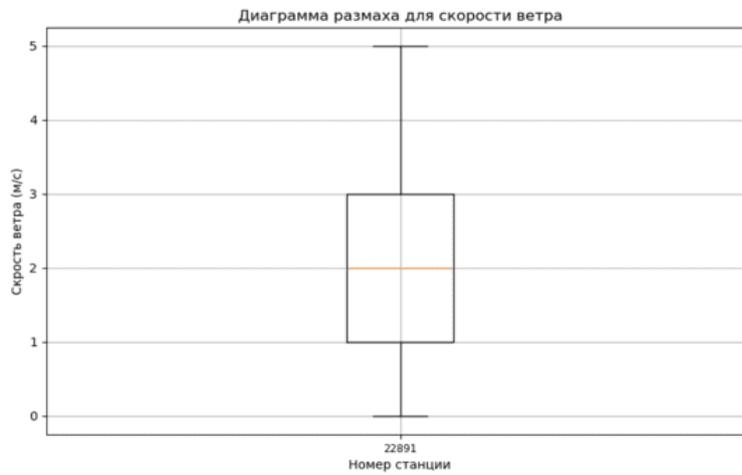


Рисунок 3.5 – Диаграмма размаха скорости вестра (м/с) Станция Сосново

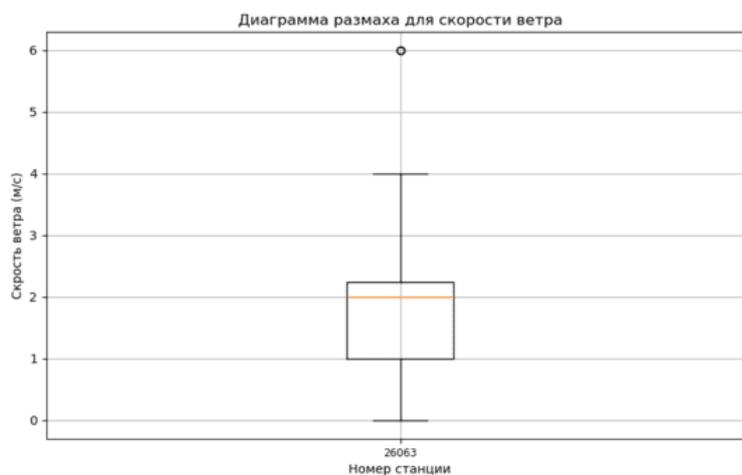


Рисунок 3.6 – Диаграмма размаха скорости вестра (м/с) Станция Санкт-Петербург

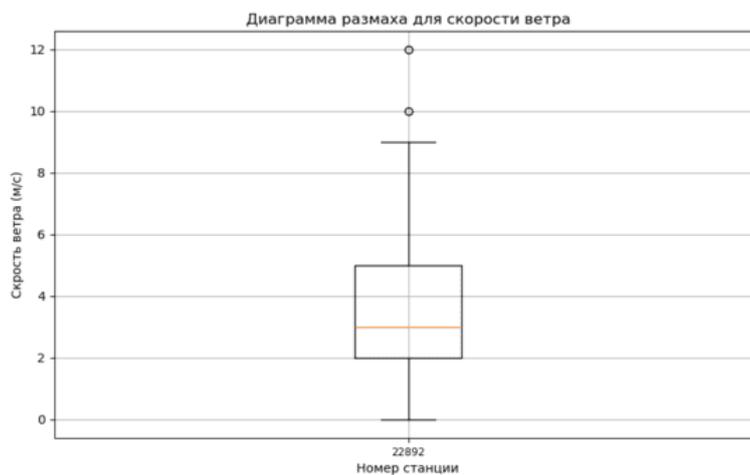


Рисунок 3.7 – Диаграмма размаха скорости вестра (м/с) Станция Выборг

Приложение 4 - Квантильный анализ скорости ветра при отложениях изморози на исследуемых станциях (рисунки 4.1 – 4.7):

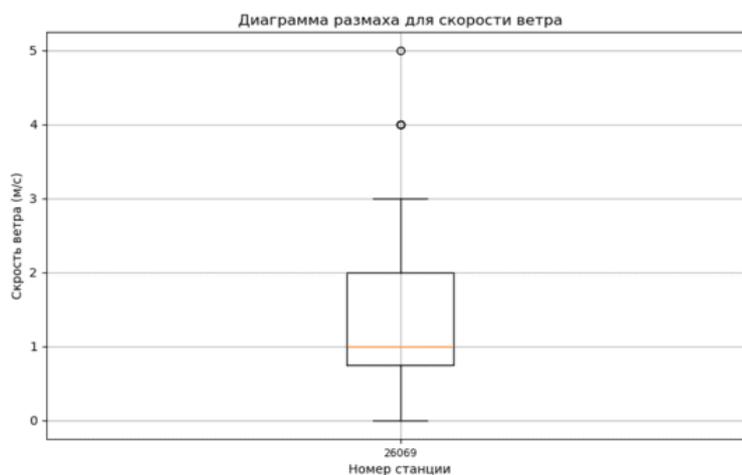


Рисунок 4.1 – Диаграмма размаха скорости вестра (м/с) Станция Белогорка

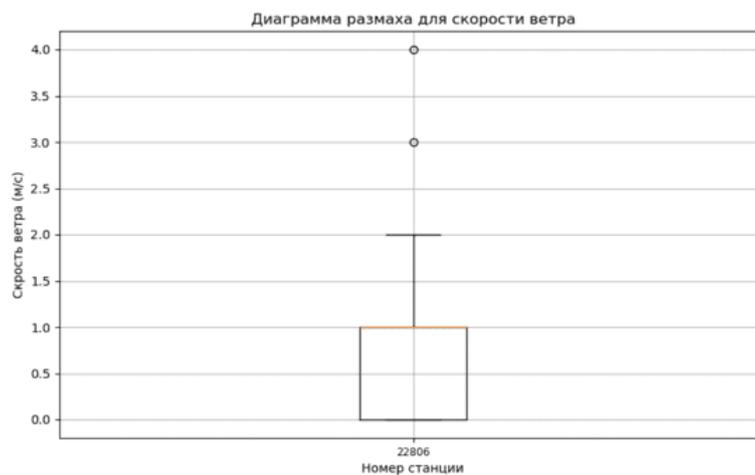


Рисунок 4.2 – Диаграмма размаха скорости вестра (м/с) Станция Лесогорский

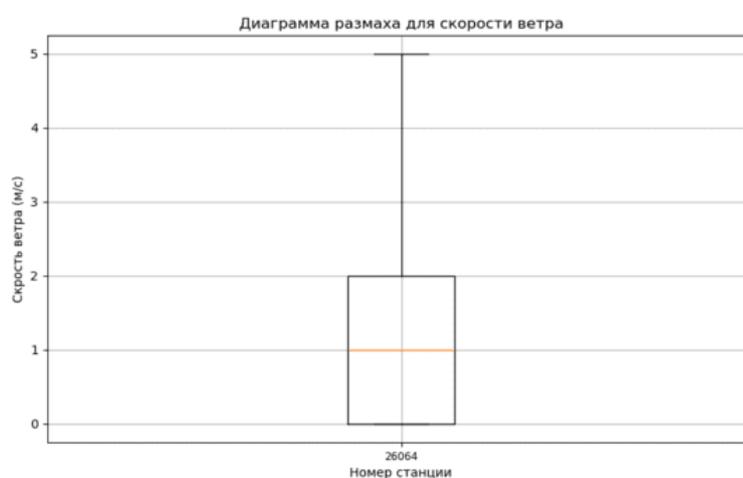


Рисунок 4.3 – Диаграмма размаха скорости вестра (м/с) Станция Ломоносов

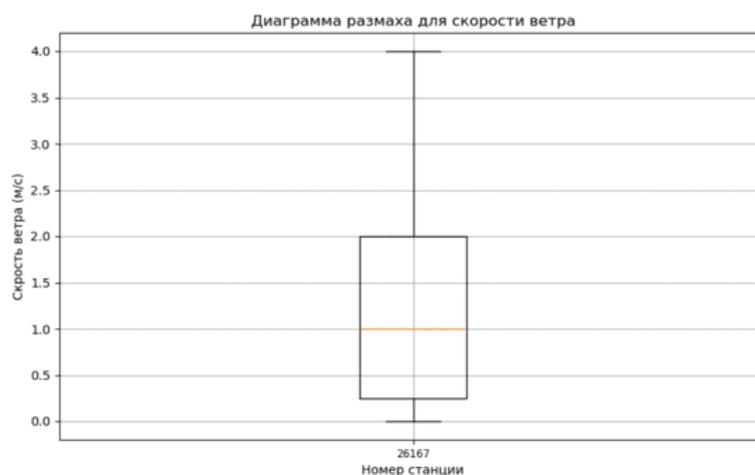


Рисунок 4.4 – Диаграмма размаха скорости вестра (м/с) Станция Ретюнь

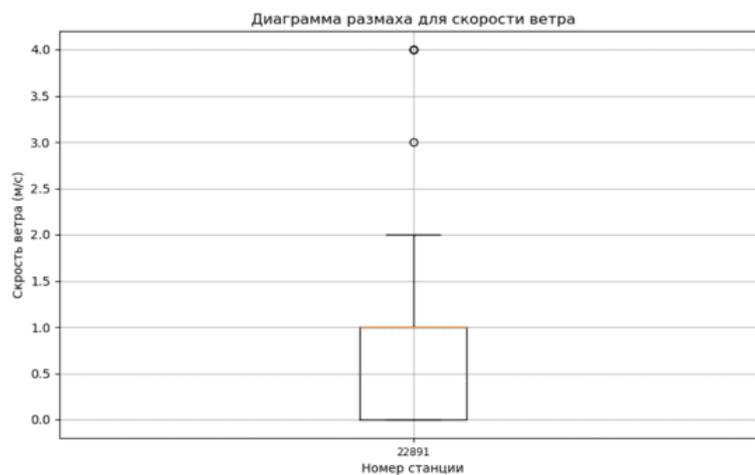


Рисунок 4.5 – Диаграмма размаха скорости вестра (м/с) Станция Сосново

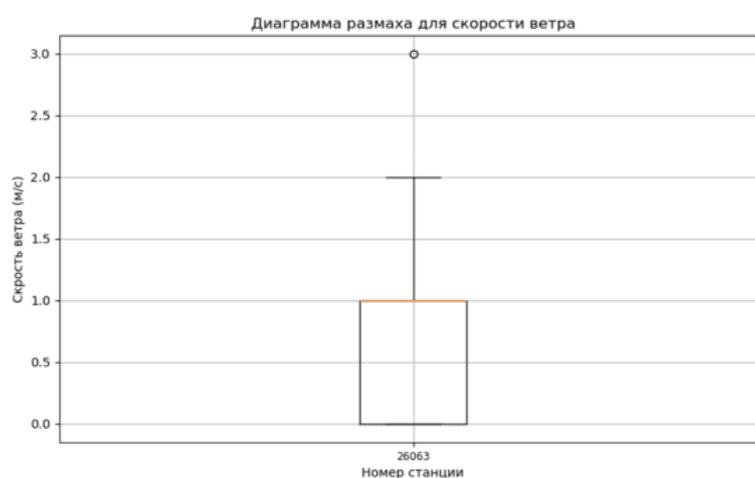


Рисунок 4.6 – Диаграмма размаха скорости вестра (м/с) Станция Санкт-Петербург

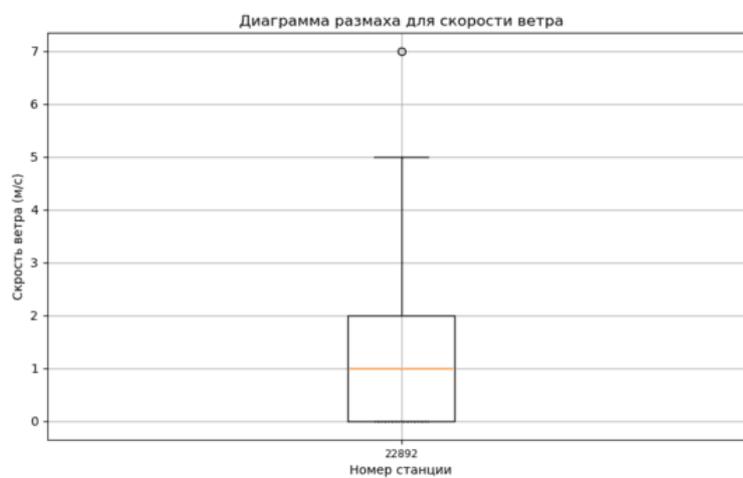


Рисунок 4.7 – Диаграмма размаха скорости вестра (м/с) Станция Выборг

Приложение 5 - Объединённые характеристики гололёдно-изморозевых отложений.

Пункт	День	Явление	Диаметр отложения, мм	Барическая система	Зондирование	Температура, Т °С	Дефицит, t °С	Влажность, F %	Направление ветра	Скорость ветра, [м/с]
Санкт-Петербург	21.01.2024	Изморозевое отложение	7-9	Пункт находится под влиянием антициклона (на гребне), циклона и в зоне приближающегося теплого фронта	инверсия	-19.3 - (-11.0)	1 - 1.7	90	с 3 до 9 часов штиль, 15 часов - ветер, дующий с ЮЮВ.	2
Санкт-Петербург	12.01.2024	Дымка и снег с перерывами слабый, изморозевое отложение	3	Пункт находится в зоне действия циклона и под влиянием теплого фронта	инверсия	-13.1 - (-10.4)	1	90	в 3 часа – ЗСЗ, в 15 часов – ССВ	2
Санкт-Петербург	21.12.2022	Дождь незамерзающий с перерывами слабый, гололед и ледяная крупа	1-4	Пункт находится на периферии циклона, в ложбине. В зоне действия теплого фронта	инверсия	-3.7 - 0.5	1.2 - 1.4	90	ЮЮВ	2
Санкт-Петербург	27.03.2021	Туман или ледяной туман, гололед	1	Пункт находится на гребне антициклона, вблизи центра его действия, в зоне холодного фронта	инверсия	0.1	0.2	99	Штиль, безветрие	0
Санкт-Петербург	07.01.2024	Изморозевое отложение	3	Пункт находится в зоне действия антициклона (гребня), в его центральной части	инверсия	-20.6 - (-15.9)	1.7 - 1.8	82	С 3 до 9 часов – штиль, в 15 и 21 – ЗЮЗ	0 - 1
Выборг	24.02.2021	Дождь замерзающий и дымка. Изморозевое отложение	1	Пункт находится в зоне действия обширного многоцентрового циклона, вблизи ложбины одно из центров циклона. Возможно влияние фронта окклюзии	инверсия	-10.0 - (-0.3)	1.5	92	Преобладание Ю, ЮВ направлений.	1 - 4
Выборг	15.01.2019	Туман или ледяной туман. Гололед	3	Пункт находится в центральной части циклона под влиянием фронта окклюзии	инверсия	-2.3 - (-2.4)	0.3 - 0.4	98	Преобладание Ю, ЮЗ направлений	1 - 3
Ретюнь	03.01.2024	Изморозевое отложение	2	Пункт находится под действием двухцентрового антициклона. Синоптическая ситуация образует седловину	-	-19.6 - (-24.6)	2.1 - 2.3	87	Преобладание С, СВ направлений	1
Ретюнь	20.01.2021	Смешанное отложение	2-4	Пункт находится под действием холодного фронта, на периферии циклона	-	-6.9 - (-14.8)	1	91	Преобладание Ю, ЮЗ направлений	0 - 2
Лесогорский	13.01.2024	Ливневый снег слабый. Изморозевое отложение	9	Пункт подвержен влиянию центральной части антициклона, в гребне, в зоне холодного сектора, с приближающимся теплым фронтом	-	-18.8 - (-17.7)	1.7	87	Штиль, безветрие	0
Лесогорский	27.12.2023	Наблюдался туман или ледяной туман. Изморозевое отложение	2-3	Пункт расположен в центре многоцентрового циклона	-	-9.9 - (-13.2)	1	92	В 6 часов – СЗ, в 9 – ССВ, с 12 до 15 часов – штиль, с 18 до 21 часов – СЗ.	0 - 1

Пункт	День, местное время	Явление	Диаметр отложения, мм	Барическая система	Зондирование	Температура, T °C	Дефицит, t °C	Влажность, F %	Направление ветра	Скорость ветра, [м/с]
Белогорка	14.01.2024 за 09:00 ч	Изморозевое отложение	6	Пункт находится между гребнем антициклона и ложбиной циклона. Пункт подвержен влиянию приближающегося фронта окклюдзий	–	-16.5	1.7	87	ЮЮВ	2
Белогорка	29.12.2020 за 21:00 ч	Дождь, замерзающий слабый. Гололед	3	Пункт находится под влиянием многоцентрового циклона в зоне теплого сектора теплого фронта. Пункт подвержен влиянию приближающегося фронта окклюдзий	инверсия	-2.1	0.9	94	ЮВ	3
Ломоносов	26.12.2021 за 12:00 ч	Снег непрерывный слабый. Изморозевое отложение	10	Пункт находится в ложбине двухцентрового циклона. Пункт подвержен влиянию фронта окклюдзий	–	-17.4	2.6	80	З	4
Ломоносов	03.02.2019 за 21:00 ч	Морось незамерзающая. Гололед	1	Пункт находится под влиянием многоцентрового циклона в зоне теплого сектора теплого фронта. Пункт подвержен влиянию приближающегося фронта окклюдзий	инверсия	0.1	0.5	96	ЮВ	3
Сосново	07.10.2019 за 09:00 ч	Туман или ледяной туман. Гололед	1	Пункт находится на периферии двухцентрового циклона, под его влиянием	инверсия	-0.6	0	100	Штиль, безветрие	0
Сосново	11.01.2022 за 09:00 ч	Дымка. Изморозевое отложение	9	Пункт Сосново находится в центре двухцентрового антициклона	инверсия	-15.3	1.7	87	Штиль, безветрие	0

Пункт	День, местное время	Явление	Диаметр отложения, мм	Барическая система	Температура, T °C	Влажность, F %	Направление ветра	Скорость ветра, [м/с]
Санкт-Петербург	23.12.2023 за 15:00 ч	Снег непрерывный, умеренный. Отложения мокрого снега	4	Санкт-Петербург находится в центре циклона. Наблюдается прохождение фронта окклюдзий	0.4	98	В	1
Деревня Ретюнь	16.12.2019 за 03:00 ч	Дымка. Отложения мокрого снега	2	Деревня Ретюнь находится на периферии многоцентрового циклона. Метеорологические условия определяются прохождением фронта	0.6	98	ЮЮЗ	3
Выборг	19.01.2023 за 09:00 ч	Снег непрерывный, умеренный. Отложения мокрого снега	8	Выборг находится в центре действия многоцентрового циклона. Метеорологические условия определяются фронтом окклюдзий	0,1	100	ВСВ	3

Заключение

Проведенное исследование позволило получить комплексную оценку условий формирования гололёдно-изморозевых отложений (ГИО) в исследуемых станциях на территории Ленинградской области. Установлено доминирование изморозевых (48%) и гололёдных (41%) отложений в общей структуре ГИО. Отложения мокрого снега составили 9%, сложные отложения — менее 2%. Основные месяцы образования – зимние, но возникновение наблюдается весь год, за исключением летних месяцев.

Образование гололёда и изморози чаще всего наблюдается при восточных, юго-восточных и южных ветрах, реже при западных. Разрушение изморози наблюдается при увеличении скорости ветра. Часто наблюдаются туманы и дымки, замерзающие дожди, сопровождающие и способствующие образованию отложений.

Формирование ГИО обусловлено переходным атлантико-континентальным климатом региона с частой адвекцией морских воздушных масс, высокой циклонической активностью и выраженной пространственной неоднородностью погодных условий. Метеорологические факторы являются условием образования отложений, больше всего влияют влажность, скорость и направление ветра и температура, с помощью дефицита можно прогнозировать изморозь и гололед графическим способом и подтвердить ее наличие. Синоптическая ситуация также влияет на образование гололеда и изморози. При определенных сложившихся обстоятельствах можно выявить характер и условия возникновения. Ключевые факторы формирования:

Гололёд: связан с теплыми фронтами и фронтами окклюзии (фронтальный тип) или с внутримассовыми туманами и слоистой облачностью в периферийных зонах антициклонов/циклонов (внутримассовый тип).

Изморозь: преимущественно формируется в малоградиентных барических полях (центры антициклонов, гребни, заполняющиеся циклоны).

Зернистая изморозь связана с адвекцией тепла, кристаллическая — с радиационным выхолаживанием.

Мокрый снег: возникает при фронтальных процессах (окклюзии, теплые фронты) в узком температурном диапазоне (-1°C до $+1^{\circ}\text{C}$). Выявлены статистически значимые диапазоны параметров для разных типов отложений: Температура воздуха: Гололёд: -4°C до -1°C ; Изморозь: -20°C до -10°C ; Мокрый снег: -1°C до $+1^{\circ}\text{C}$. Скорость ветра: Гололёд: 1-4 м/с; Изморозь: 0-2 м/с; Мокрый снег: 0-3 м/с.

Аэрологическое зондирование атмосферы довольно точно описывает происхождение тумана и переохлажденных осадков за счет инверсии температуры в приземном слое до 300 м, так и в верхних слоях атмосферы на высотах 1-2 км, где происходит образование ледяного дождя (замерзающего дождя).

Рельеф (Ижорская возвышенность, Балтийско-Ладожский глинт, Карельский перешеек) и близость крупных водоемов (Финский залив, Ладожское озеро) существенно модулируют процессы ГИО: Усиление отложений на наветренных склонах возвышенностей. Влияние инверсий температуры (особенно приземных) на развитие туманов — ключевого фактора для изморози и внутримассового гололёда. Снижение количества осадков (и потенциального гололёда) на прибрежных низменностях.

Проведенная работа вносит значимый вклад в понимание физики процессов гололёдно-изморозевых отложений в специфических условиях Ленинградской области и создает основу для совершенствования системы прогноза и минимизации рисков, связанных с этими опасными метеорологическими явлениями.

Список использованной литературы

1. Бучинский В.Е. Атлас обледенения проводов. Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 114 с.
2. Диссертация Леонов Игорь Иванович «Структура атмосферы при формировании высокоинтенсивных гололёдно-изморозевых отложений», 2023 – 176 с.
3. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: Триада лтд, 2016. 312 с.
4. Богаткин О.Г, Топтунова О. Н., Волобуева О. В., Иванова И. А. Практикум по авиационной метеорологии – СПб.: Издательско- полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2022. – 113 с.
5. Сайт: <https://rp5.ru/> (архив)
6. Сайт: https://www.wetter3.de/fax_dt.html (архив)
7. Сайт: <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> \ зондирование атмосферы (архив)
8. «Мониторинг гололёдно-изморозевых отложений на территории России» - Н.М. Аржанова, Н.Н. Коршунова.
9. «КЛИМАТ Ленинграда» Под редакцией канд. геогр. наук Ц. А. ШВЕР, канд. геогр. наук Е. В. АЛТЫКИСА и Л. С. ЕВТЕЕВОЙ, 1982 – 254 с.
10. Сайт: <https://www.meteonova.ru/klimat/47/Leningradskaya%20Oblast/>
11. Сайт: <http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=2> «Климат Санкт Петербурга и Ленинградской области»