

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Леонов Игорь Иванович

**Структура атмосферы при формировании высокоинтенсивных
гололедно-изморозевых отложений**

1.16.18 – Науки об атмосфере и климате

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
кандидат географических наук
Соколихина Наталья Николаевна

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----------|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| ГЛАВА 1. ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ: ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ, ТЕОРИИ И СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ .. | 10 |
| 1.1. Виды гололедно-изморозевых отложений и атмосферные явления приводящие к их образованию | 10 |
| 1.2. Классификации гололедно-изморозевых отложений | 13 |
| 1.3. Наблюдения за гололедно-изморозевыми отложениями | 14 |
| 1.4. Синоптические условия формирования гололедно-изморозевых отложений | 16 |
| 1.5. Климатология гололедно-изморозевых отложений | 25 |
| 1.6. Влияние региональных процессов на формирование гололедно-изморозевых отложений | 30 |
| 1.7. Применение численного моделирования для исследования гололедно-изморозевых отложений | 32 |
| Выводы к главе 1 | 41 |
| ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ..... | 43 |
| 2.1. Используемые данные метеорологических наблюдений | 43 |
| 2.1.1. Данные срочных наблюдений | 43 |
| 2.1.2. Данные аэрологических наблюдений | 44 |
| 2.1.3. Данные инструментальных наблюдений | 45 |
| 2.2. Использование данных численных моделей атмосферы | 47 |
| 2.2.1. Данные атмосферных реанализов | 47 |
| 2.2.2. Модель WRF-ARW | 49 |
| 2.2.3. Конфигурация численных экспериментов | 50 |
| 2.3. Анализ условий формирования гололедно-изморозевых отложений | 53 |
| 2.3.1. Анализ метеорологических условий формирования гололедно-изморозевых отложений | 53 |
| 2.3.2. Синоптический анализ условий формирования гололедно-изморозевых отложений | 54 |
| 2.3.3. Численное моделирование высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений | 57 |
| Выводы к главе 2 | 59 |

| | |
|---|------------|
| ГЛАВА 3. ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ | 60 |
| 3.1. Пространственное распределение гололедно-изморозевых отложений | 60 |
| 3.2. Метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложений | 65 |
| 3.3. Диаметр и плотность гололедно-изморозевых отложений | 75 |
| Выводы к главе 3 | 82 |
| ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ СИНОПТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА..... | 84 |
| 4.1. Синоптические условия формирования гололеда | 84 |
| 4.2. Синоптические условия формирования зернистой изморози | 112 |
| 4.3. Синоптические условия формирования отложений мокрого снега | 118 |
| Выводы к главе 4 | 135 |
| ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 137 |
| 5.1. Результаты моделирования гололеда | 137 |
| 5.2. Результаты моделирования зернистой изморози..... | 149 |
| 5.3. Результаты моделирования отложений мокрого снега | 156 |
| Выводы к главе 5 | 165 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 167 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 169 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования обусловлена нарастающим во всем мире ущербом от опасных погодных и климатических явлений [IPCC, 2022]. Данная ситуация наблюдается и на территории России, где существует устойчивый тренд к увеличению количества опасных явлений погоды [Третий оценочный доклад, 2022]. В типовой перечень опасных метеорологических явлений, помимо других, входят сильные гололедно-изморозевые отложения, вызывающие обледенение поверхности земли, деревьев, линий электропередачи, технических средств и различных объектов хозяйственной деятельности человека [Руководящий Документ, 2002].

Например, в декабре 2010 года на территории центра Европейской равнины прошел рекордно сильный замерзающий дождь. Это явление привело к тому, что без света осталось более 400 тысяч человек. В московских аэропортах были задержаны десятки авиарейсов, а обледенение железнодорожного полотна и автомобильных дорог повлекло за собой транспортную катастрофу. В ноябре 1988 года на территории Сахалинской области прошел ледяной шторм, в результате которого на ЛЭП образовались рекордные отложения мокрого снега, что в итоге парализовало хозяйственную деятельность области на несколько недель. В настоящее время опасные гололедно-изморозевые отложения наблюдаются на территории России ежегодно. В некоторых случаях, серьезные последствия прохождения ледяных штормов обусловлены, в том числе тем, что приводящие к ним опасные явления погоды не были спрогнозированы с достаточной заблаговременностью из-за сложности атмосферных процессов, приводящих к таким явлениям погоды. Несмотря на множество исследований, посвященных данной теме, **степень разработанности** отдельных вопросов остается недостаточной, в первую очередь, это относится к характеру распространения высокоинтенсивных отложений на территории России, а также условиям формирования внутриоблачного обледенения.

В связи с возрастающим интересом к гололедно-изморозевым отложениям, а также необходимостью предупреждения и уменьшения негативных воздействий на различные секторы экономики, возникает необходимость изучения структуры атмосферы – взаимосвязи синоптических, мезометеорологических и микрофизических процессов, приводящей к образованию опасных явлений данного типа.

В настоящей диссертации условия формирования высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений были рассмотрены как по данным многолетних инструментальных наблюдений на территории России, так и на примере отдельных случаев образования опасных отложений гололеда, зернистой изморози и мокрого снега с использованием результатов синоптического анализа и данных численного моделирования. Детально были рассмотрены случаи выпадения замерзающих дождей в январе 2010 и ноябре 2016 года в Центральной России, и замерзающего дождя, прошедшего в ноябре 2020 года в Приморском крае. Условия формирования опасных отложений зернистой изморози были рассмотрены на примере случаев образования обледенения на территории горного массива Рай-Из, расположенного в Ямало-Ненецком автономном округе. Условия образования высокоинтенсивных отложений в виде мокрого снега были исследованы на примере трех случаев, произошедших на Дальнем Востоке и на территории Большого Кавказа.

Целью данной работы является исследование условий и механизмов формирования гололедно-изморозевых отложений высокой интенсивности.

Для реализации поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

- обработка данных станций наземных и аэрологических наблюдений, а также метеостанций, оборудованных гололедными станками;
- изучение метеорологических условий формирования и пространственного распределения гололедно-изморозевых отложений на территории России по данным наблюдений за период с 1985 по 2020 год;

- проведение синоптического анализа отдельных случаев гололедно-изморозевых отложений на основе данных наблюдений и данных атмосферных реанализов;
- проведение численных экспериментов по воспроизведению отдельных случаев гололедно-изморозевых отложений с использованием атмосферной модели WRF-ARW.

Объект исследования – высокоинтенсивные гололедно-изморозевые отложения. **Предметом исследования** являются особенности структуры атмосферы при формировании высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений.

Научная новизна работы:

1. Впервые исследовано пространственное распределение высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений на территории России по данным наблюдений с гололедных станков за период с 1985 по 2020 год.
2. Получены количественные оценки метеорологических условий формирования гололедно-изморозевых отложений для каждого вида по данным инструментальных наблюдений. Впервые отдельные оценки получены для высокоинтенсивных отложений.
3. Впервые проведен анализ трехмерной структуры атмосферы в период формирования гололедно-изморозевых отложений высокой интенсивности с использованием синоптического анализа и данных мезомасштабного моделирования с высоким пространственным разрешением.
4. Впервые показана роль мезомасштабных процессов в формировании отложений гололеда, зернистой изморози и мокрого снега на примере отдельных катастрофических случаев образования данных отложений.

Теоретическая значимость данной научно-квалификационной работы заключается в исследовании условий формирования высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений с использованием новых метеорологических данных и новых разработанных методик, в том числе с привлечением данных численного моделирования.

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

Полученные результаты и выводы диссертационной работы по процессам формирования высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений могут быть востребованы в организациях Росгидромета и отраслевых институтах, занимающихся исследованиями опасных явлений погоды.

Методология и методы исследования. Результаты работы получены путем обработки многолетних наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями на территории России с использованием методов математической статистики. Анализ отдельных случаев формирования гололедно-изморозевых отложений проводился на основе синоптического анализа и численного моделирования с использованием мезомасштабной модели WRF-ARW.

В диссертации защищаются следующие **положения**:

1. Наибольшее количество гололедно-изморозевых отложений на территории России наблюдается в виде кристаллической изморози, преобладающей на 86% метеорологических станций. Высокоинтенсивные гололедно-изморозевые отложения имеют пространственное распределение с преобладанием гололеда и мокрого снега на 35 и 45% метеорологических станциях соответственно.

2. Ведущую роль в формировании высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений в виде гололеда и мокрого снега играют процессы синоптического масштаба, в то время как формирование отложений зернистой изморози наиболее часто связано с местными мезомасштабными циркуляциями.

3. Для оценки моделью WRF-ARW интенсивности обледенения в виде гололеда и мокрого снега целесообразно использовать анализ количества осадков определенного фазового состава (1–20 и 80–100% гидрометеоров жидкой фазы для мокрого снега и гололеда соответственно), а для зернистой изморози – анализ

плотности потока переохлажденных капель облаков и тумана, с шагом сетки модели по пространству 2 км и менее.

Личный вклад автора. Все результаты работы получены автором лично или в соавторстве с к.г.н. Соколихиной Н.Н., д.г.н. Семеновым Е.К. и Аржановой Н.М. Личный вклад автора состоит в анализе метеорологических данных, проведении всех необходимых расчетов и численных экспериментов, а также в интерпретации полученных результатов. Необходимые компьютерные программы, используемые на всех этапах исследования, написаны автором диссертации. Автор принимал непосредственное участие в написании научных статей по теме диссертации и в представлении научных докладов на международных конференциях.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты работы докладывались автором на российских и международных конференциях, в том числе на: Международной конференции «Practical Geography and XXI Century Challenges. International Geographical Union Thematic Conference dedicated to the Centennial of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences», Москва, Россия, 2018; Международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2019» и «Ломоносов 2021», Москва, Россия; III Всероссийской конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России», Иркутск, Россия, 2020; Международных конференциях CITES-2021, Москва, Россия; ENVIROMIS–2022, Томск, Россия. Также результаты диссертации были представлены на семинаре кафедры метеорологии и климатологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова 9 марта 2022 года.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, включая 4 статьи в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях, определенных п. 2.3 Положения о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 178 страниц, включая 100 рисунков и 19 таблиц. Список используемых источников содержит 111 наименований, в том числе 54 – на иностранном языке.

Благодарности. Автор диссертации выражает благодарность научному руководителю – к.г.н. Соколихиной Наталье Николаевне за многолетнюю совместную работу и помощь в подготовке диссертации; д.г.н. Кислову Александру Викторовичу, д.г.н. Сурковой Галине Вячеславовне, д.б.н. Ольчеву Александру Валентиновичу, д.г.н. Гушиной Дарье Юрьевне, к.ф.-м.н. Чернокульскому Александру Владимировичу, к.г.н. Платонову Владимиру Сергеевичу, к.г.н. Полюхову Алексею Андреевичу, Черешнюку Сергею Викторовичу и всем сотрудникам кафедры метеорологии и климатологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова за обсуждение результатов работы, ценные советы и замечания.

ГЛАВА 1. ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ: ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ, ТЕОРИИ И СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первая глава диссертации содержит обзор современных исследований, посвященных гололедно-изморозевым отложениям. В главе приводятся основные термины и определения, описание вызывающих обледенение атмосферных явлений и существующих классификаций гололедно-изморозевых отложений. Рассматриваются современные исследования, посвященные условиям формирования и климатологии гололедно-изморозевых отложений, а также работы, посвященные применению численного моделирования для изучения и прогнозирования обледенения в атмосфере.

1.1. Виды гололедно-изморозевых отложений и атмосферные явления приводящие к их образованию

Обледенение в атмосфере в классическом понимании – это отложение льда любого вида на поверхности сооружений, ветвях деревьев, проводах, на покрытиях дорог, аэродромов и пр. [Хромов, Мамонтова, 1974]. Стоит разделять гололедно-изморозевые отложения и атмосферные явления, которые приводят к ним.

Гололедно-изморозевые отложения включатся в себя отложения гололеда, зернистой и кристаллической изморози, мокрого снега и сочетания нескольких вышеназванных видов, которые называются сложными отложениями. Рассмотрим классические определения для каждого из видов отложений, приведенные в метеорологическом словаре С.П. Хромова и Л.И. Мамонтовой.

Гололед – это слой плотного льда, нарастающего на поверхности земли и на предметах преимущественно с наветренной стороны, от намерзания капель переохлажденного дождя или мороси. В англоязычных терминах «гололед» – «glaze» или «glaze ice».

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

Кристаллическая изморозь состоит из кристаллов льда нежной тонкой структуры, легко осыпающейся при встряхивании. Образуется в результате сублимации водяного пара в тихую погоду, особенно ночью, чаще всего при температурах от -5 до -20°C.

В англоязычной литературе «кристаллическая изморозь» и «зернистая изморозь» – «soft rime» и «hard rime» соответственно [<https://glossary.ametsoc.org>].

Кроме этого, на холодных поверхностях могут образовываться другие виды отложений, такие как иней и твердый налет. Эти явления не представляют серьезной опасности для хозяйственной деятельности человека и не будут рассмотрены в данной работе.

Отложение мокрого снега - слой мокрого снега, налипшего на проводах (гололедного станка) и сползающий вниз при положительной или близкой к нулю температуре воздуха. При последующем замерзании явление называется замерзшим отложением мокрого снега. Англоязычный термин – «wet snow».

В «Типовой перечень и критерии опасных метеорологических явлений» [Руководящий документ, 2002] среди прочих входят сильные гололедно-изморозевые отложения, диаметр отложения на проводах гололедного станка которых составляет не менее 20 мм для гололеда, 35 мм для мокрого (замерзающего) снега и сложных отложений, и 50 мм для зернистой и кристаллической изморози. Наибольший интерес в этой области представляет гололед, зернистая изморозь и отложения мокрого снега, так как именно эти виды отложений льда являются наиболее опасными. В настоящей работе *высокоинтенсивными* называются гололедно-изморозевыми отложения, достигающие критериев опасного явления.

Далее необходимо рассмотреть атмосферные явления, с которыми связано образования гололедно-изморозевых отложений.

Гололед чаще всего образуется во время выпадения переохлажденных (замерзающих) осадков – замерзающего дождя и мороси, а также во время ледяного дождя. Классические определения для каждого явления, вызывающего отложения

в виде гололеда (замерзающих осадков), представлены в метеорологическом словаре С.П. Хромова и Л.И. Мамонтовой.

Переохлажденный (замерзающий) дождь – дождь из переохлажденных капель, выпадающий при отрицательных температурах. Ударяясь о поверхность земли, капли замерзают и образуют гололед, всегда сопровождающий выпадение переохлажденного дождя. Переохлажденная (замерзающая) морось – морось, состоящая из переохлажденных капель; выпадает при не слишком низких отрицательных температурах из слоистых облаков или тумана.

Ледяной дождь – твердые осадки, выпадающие при отрицательной температуре воздуха (чаще всего от 0 до -10° , иногда до -15°) в виде твердых прозрачных шариков льда диаметром 1-3 мм. Внутри шариков находится незамёрзшая вода - падая на предметы, шарики разбиваются на скорлупки, вода вытекает и образуется гололёд. Ледяной дождь как атмосферное явления сам по себе не часто вызывает обледенение, так как твердые шарики отскакивают от предметов. На невысокую вероятность образования гололеда указывает и факт расположения явления в группе твердых осадков в коде КН-01 [Код..., 2012]. Очень часто термин «ледяной дождь» употребляется для описания всей синоптической ситуации, во время которой образуется гололед [Вильфанд, Голубев, 2011; Семенов и др. 2018].

Для описания отдельных случаев выпадения замерзающих осадков лучше подходит термин «ледяной шторм» – аналог англоязычного термина «ice storm», обозначающего опасные случаи образования гололеда с толщиной отложений льда более $\frac{1}{4}$ дюйма (6,4 мм) [American Meteorological...]. Для российских условий термин «ледяной шторм» уместно употреблять для описания синоптических условий, во время которых диаметр образовавшихся гололедно-изморозевых отложений достиг опасных значений, установленных для территории России [Руководящий документ, 2002]. Данный термин будет употребляться в настоящей работе.

Также стоит отметить, что в русскоязычной литературе термины «переохлаждённый дождь» и «замерзающий дождь» являются синонимами

англоязычного термина «freezing rain» и обозначают одно и то же явление. Термин «переохлажденный» чаще используется в авиации, а «замерзающий» на станциях наземных наблюдений, например, в коде КН-01 [Код..., 2012]. Аналогично этому используются термины «переохлажденная морось» и «замерзающая морось» синонимичные термину «freezing drizzle». Ледяной дождь обычно обозначается термином «ice pellets», а ледяная крупа термином «graupel» [FCM-H2-1988, 2005].

К отложениям в виде изморози обычно приводят переохлажденные туманы. Переохлажденный туман – это туман, состоящий из переохлажденных капелек; он осаждается в виде переохлажденной мороси. В коде КН-01 различается туман с отложением изморози, при котором видно небо (код 48), и туман с отложением изморози при котором небо не видно (код 49). Англоязычный термин – «supercooled fog».

Мокрый снег – снег, выпадающий при положительной температуре, близкой к 0°C, когда снежинки частично подтаивают или когда вместе со снегом выпадает дождь. Снежинки мокрого снега обычно слипаются в хлопья. Можно различать обложной мокрый снег и ливневой мокрый снег. В коде КН-01 не предусмотрено отдельного кода для явления выпадения мокрого снега, поэтому он может наблюдаться при любом виде осадков твердой или смешанной фазы.

1.2. Классификации гололедно-изморозевых отложений

К классификации процессов обледенения можно подойти с разных сторон. Первая рассматриваемая классификация относится к метеорологическим терминам, используемым в авиационной метеорологии. Согласно данной классификации, обледенение можно разделить на то, которое происходит у земли, и на то, которое происходит на некоторой высоте – обледенение в полете [Шакина, Иванова, 2016]. Данная работа посвящена явлению обледенения у поверхности земли и в нижнем приземном слое атмосферы.

В монографии В.Е. Бучинского представлена генетико-морфологическая классификация. В рамках данной классификации обледенение можно отнести к четырем группам. Первая группа – обледенение, возникающее в результате

сублимации водяного пара. В эту группу входит кристаллическая изморозь и иней. Вторая группа – обледенение, возникающее в результате отложения и замерзания переохлажденных капель воды. К этой группе относится гололед и зернистая изморозь. Третья группа – обледенение, возникающее в результате налипания и замерзания мокрого снега. Последняя группа – это сложные отложения, формирующиеся при последовательном отложении нескольких слоев льда разного вида [Бучинский, 1966].

Следующая классификация разделяет обледенение по типу образования. Согласно классификации, обледенение у поверхности земли можно отнести к двум типам. Первый тип – это обледенение, происходящее вследствие выпадения атмосферных осадков (precipitation icing). Второй тип – это внутриоблачное обледенение (in-cloud icing) [Fikke et al., 2006]. Иногда мокрый снег относят к отдельному, третьему типу наземного атмосферного обледенения [Шакина, Иванова, 2016]. Для первого типа характерны отложения льда в виде гололеда или мокрого снега. Второй тип обледенения характеризуется отложениями в виде изморози – отложений льда на предметах при тумане в результате сублимации водяного пара (кристаллическая изморозь) или намерзания капель переохлажденного тумана (зернистая изморозь).

1.3. Наблюдения за гололедно-изморозевыми отложениями

Из-за большого разнообразия видов ледяных отложений и атмосферных явлений наблюдения за гололедно-изморозевыми отложениями является трудной задачей.

В первую очередь, на метеорологических станциях производятся визуальные наблюдения за атмосферными явлениями. Во время наблюдений на метеорологических станциях и в пределах видимой окрестности определяются вид атмосферного явления, время начала и окончания, продолжительность явления, его интенсивность и состояние погоды в срок и между наблюдениями.

Вид атмосферного явления определяется визуально по внешним признакам явления в соответствии с перечнем и описанием явлений [Наставление, 1985],

составленных на основании классификации, принятой Всемирной метеорологической организацией [Всемирная метеорологическая...]. Гололедно-изморозевые отложения в виде гололеда и обоих видов изморози относятся к группе твердых гидrometeorов, мокрый снег относится к группе смешанных осадков. Для визуальных наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями также применяется ледоскоп, который рекомендуется осматривать при каждом выходе наблюдателя на метеорологическую площадку.

К преимуществам визуальных наблюдений можно отнести то, что они проводятся параллельно с остальными срочными наблюдениями на всех метеорологических станциях и их результаты также записываются в книжку КМ-1. Главным недостатком визуальных наблюдений является субъективная качественная оценка интенсивности явления наблюдателем. Различают три степени интенсивности – слабую, умеренную и сильную. Сильная интенсивность явления отмечается тогда, когда по мнению наблюдателя, характер явления существенно отличается от умеренной интенсивности.

В первой половине XX века на территории Советского Союза была создана сеть метеорологических станций, ведущих инструментальные наблюдения над обледенением проводов [Заморский, 1951]. Главным преимуществом инструментальных наблюдений является количественная оценка интенсивности гололедно-изморозевых отложений, которая выражается в размере отложения, измеренного наблюдателем.

Инструментальные наблюдения проводятся на метеорологических станциях, оборудованных гололедными станками с четырьмя проводами и комплектом приспособлений для снятия отложения. Вид и продолжительность гололедно-изморозевого отложения определяются наблюдателем путем визуального осмотра проводов гололедного станка и оценки фактических погодных условий с целью правильного отнесения наблюдаемого отложения к соответствующему виду. Размеры отложения определяются на основании измерений наибольшей по величине оси поперечного сечения отложения и расстояния между двумя наиболее

удаленными точками в направлении, перпендикулярном линии диаметра. Диаметр и толщина отложения выражаются в миллиметрах; диаметр провода из результатов измерений вычитается. Масса отложения определяется по объему растаявшей пробы отложения, взятой с участка провода длиной 25 см, с последующим пересчетом в массу отложения на одном метре провода; выражается в граммах на метр длины [Наставление, 1985].

Помимо наблюдений на метеорологических станциях, для мониторинга гололедно-изморозевых отложений используются различные системы, включающие в себя датчики гололедной нагрузки и датчики продольного тяжения проводов. Наблюдения основаны на измерении веса провода и переводе его в толщину стенки гололеда с использованием специальных методик. Такие системы устанавливаются на опоры воздушных линий электропередачи с целью выявления гололедообразования и предотвращения аварийных ситуаций [Мишулин, 2013; Засыпкин, 2018]. К сожалению, эти системы не интегрированы в сеть наблюдений Росгидромета и не могут использоваться для систем усвоения данных, используемых для прогноза погоды.

1.4. Синоптические условия формирования гололедно-изморозевых отложений

В настоящее время опубликовано большое количество работ посвященных гололедно-изморозевым явлениям. Это связано с тем, что образование опасных ледяных отложений чрезвычайно сильно отражается на хозяйственной деятельности человека. Однако работ, посвященных условиям формирования высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений немного, а существующие работы чаще всего рассматривают последствия прохождения ледяных штормов, а не механизмы их формирования. Связано это, в первую очередь, с тем, что такие явления считаются довольно редкими на территории России [Шакина и др., 2012]. В данной работе особый интерес уделялся потенциально опасным отложениям – это, в первую очередь, гололед, зернистая изморозь и мокрый снег.

Кристаллическая изморозь и другие явления реже приводят к серьезным негативным последствиям, так как имеют меньшую плотность и интенсивность образования.

В начале были рассмотрены работы, посвященные синоптическим условиям образования обледенения первого типа – образующегося в результате выпадения атмосферных осадков. В синоптической практике замерзающие осадки в подавляющем большинстве случаев формируются перед теплыми фронтами [Руководство, 1987].

Наиболее подробно условия выпадения замерзающих осадков описаны в серии работ, основанных на анализе данных наблюдений в аэропортах России и СНГ и данных радиозондирования [Шакина и др., 2003; Шакина и др., 2005; Шакина и др., 2005; Шакина и др., 2007].

Авторами было выявлено, что распределение синоптических ситуаций характеризуется преобладанием циклонических полей. Такая картина наблюдается в аэропортах московского региона, Минеральных Водах, Одессе и Нижнем Новгороде (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Число случаев синоптических ситуаций, связанных с замерзающими осадками в аэропортах по данным публикаций Н.П. Шакиной и соавторов

| | Ложбина/ гребень | Сектор циклона (Ц)/антициклона (А) | | | | | | | | | Всего Ц/А ситуаций |
|--------------------|---------------------|------------------------------------|------|-----|------|-----|------|-----|-----|--------|--------------------------|
| | | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ | Центр. | |
| Московская область | 3/2 | 0/1 | 0/4 | 7/1 | 14/7 | 9/1 | 9/0 | 0/0 | 0/1 | 1/1 | 43/18 |
| Минеральные Воды | 2/4 | 11/0 | 23/1 | 6/0 | 0/0 | 0/8 | 0/19 | 0/3 | 3/2 | 0/0 | 45/37 |
| Одесса | 3/3 | 2/0 | 14/0 | 2/1 | 0/0 | 0/6 | 1/5 | 1/3 | 8/4 | 2/1 | 33/23 |
| Нижний Новгород | 1/1 | 2/5 | 2/0 | 4/0 | 8/0 | 3/0 | 4/1 | 3/2 | 1/3 | 0/0 | 28/12 |

Преобладание циклонического расположения области выпадения замерзающих осадков наиболее характерно для выпадения замерзающих дождей чем для замерзающей мороси. В аэропортах московского региона замерзающие

осадки чаще всего выпадают в восточном, юго-восточном и южном секторах циклонов, что объясняется наибольшей повторяемостью адвекций тепла и инверсий температуры воздуха. В аэропорту Нижнего Новгорода также, как и в московском аэроузле, замерзающие осадки преимущественно выпадают в восточной, юго-восточной, южной и юго-западной части циклонов. В Минеральных водах замерзающие осадки чаще образуются в северных и северо-восточных частях циклонов, что связано с сильным влиянием местных циркуляций атмосферы. Схожая картина наблюдается в аэропорту Одессы. В целом, циклонические условия образования более характерны для выпадения замерзающего дождя, чем для замерзающей мороси. Большинство случаев выпадения замерзающих осадков наблюдаются при значительных температурных контрастах у земли и высокой бароклинности в слоях 850-500 и 925-700 гПа. В зонах атмосферных фронтов чаще выпадают замерзающие осадки в виде замерзающего дождя, а замерзающая морось, напротив, часто имеет происхождение внутримассового характера. Наиболее хорошо это проявляется для аэропортов московского аэроузла и Нижнего Новгорода.

Большое влияние на фазовый состав осадков оказывает вертикальная стратификация атмосферы. Классический механизм образования замерзающих осадков подразумевает наличие слоя с положительной температурой внутри облака [Bennetts, 1913]. Осадки, выпадающие в виде снега, проходя через слой с положительной температурой превращаются в дождь или морось, далее, в холодном нижележащем слое становятся переохлажденными и замерзают при попадании на поверхность Земли, имеющую отрицательную температуру. Такая стратификация температуры называется «теплый нос». Иногда в литературных источниках слой с положительной температурой в данной стратификации называют «линзой тепла» [Кислов, 2016].

Классическая термическая структура атмосферы, характерная для выпадения замерзающего дождя, описана в литературе [Zerr, 1997]. При наличии температурной инверсии, падающая вниз частица снега может растаять в «слое таяния» (рисунок 1.1а), а далее охладиться до отрицательной температуры в «слое

замерзания», и, не эволюционируя до твердой фазы, упасть за поверхность земли и образовать гололедные отложения. Чтобы это произошло, вертикальный температурный профиль должен напоминать профиль вида «теплый нос», изображенный на рисунке 1.1а. В зависимости от толщины слоя таяния и замерзания могут выпадать осадки разной фазы.

На рисунке 1.1б представлена авторская схема типов осадков по фазе, частично основанная на работе [Семенов и др., 2018]. Согласно этой упрощенной схеме, снег выпадает в полностью холодном ($T < 0^{\circ}\text{C}$) слое воздуха (I). Дождь выпадает в полностью теплом слое воздуха (II) или тонком слое с отрицательной температурой, в котором капли не успевают стать переохлажденными (III). В области (IV) выпадает замерзающий дождь, так как слой замерзания достаточно толстый. В области (V) переохлажденная вода успевает покрыться корочкой и выпасть в виде ледяного дождя, а в области (VI) – полностью замерзнуть и выпасть в виде крупы.

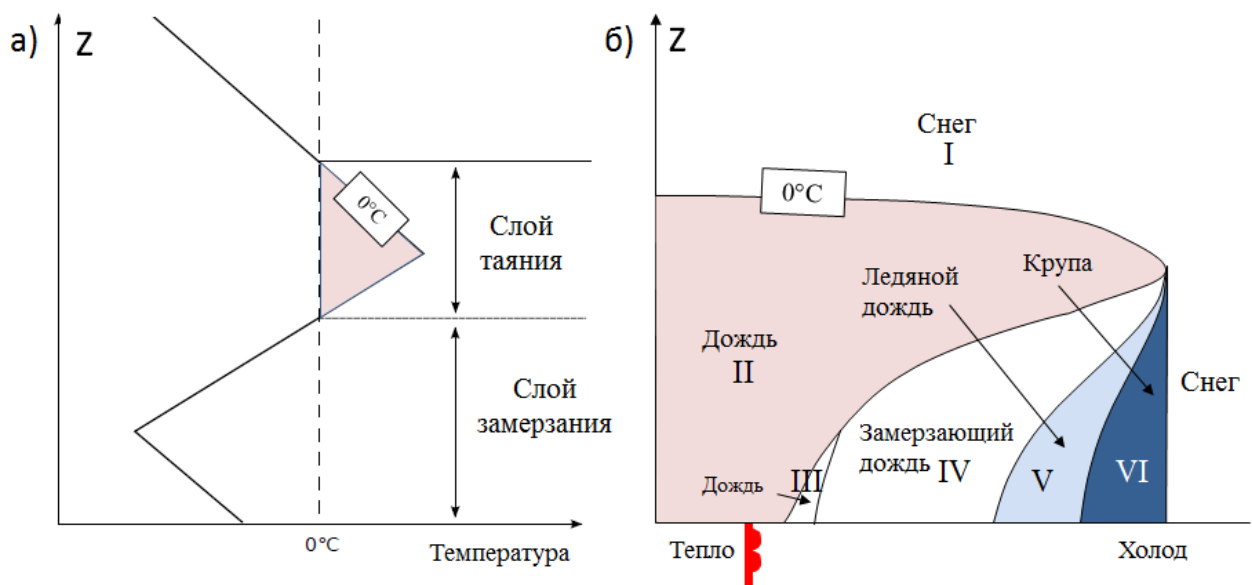


Рисунок 1.1 – а) Схема атмосферной стратификации «теплый нос» [Zerr, 1997]
 б) Возможные типы осадков на теплом атмосферном фронте

Данный рисунок изображает эволюцию фазы осадков при прохождении теплого фронта схематично: не обязательно, что при прохождении каждого теплого атмосферного фронта будут наблюдаться все представленные типы осадков. На

схеме не отмечены осадки в виде мокрого снега – как правило, они образуются при одном или нескольких тонких слоях таяния, где снег не успевает полностью растаять.

Исследование условий выпадения замерзающих осадков в аэропортах России и СНГ показали, что классический механизм образования замерзающих осадков присутствует не во всех случаях их выпадения (таблица 1.2). Были рассмотрены и другие виды атмосферной стратификации:

- первый тип стратификации – рассмотренный выше «теплый нос». Разновидность данного типа также предполагает возможность нахождения тонкого теплого слоя у поверхности земли;
- «теплая вершина облака» означает, что теплый слой охватывает верхнюю часть облака, его верхнюю границу и слой выше облака, все холодное ниже;
- «тепло выше облака» - стратификация, при которой слой с положительной температурой воздуха располагается выше верхней граница облака;
- «теплый приземный слой, все холодное выше» - означает наличие теплого слоя у поверхности земли и отрицательной температуры воздуха во всех слоях выше;
- «все холодное» - отрицательная температура во всей толще атмосферы.

Таблица 1.2 – Классификация случаев замерзающих осадков
[Шакина и др., 2003, 2005, 2005, 2007]

| Обозначение | Всего случаев выпадения замерзающих осадков | | | |
|--|---|------------------|--------|-----------------|
| | Московская область | Минеральные Воды | Одесса | Нижний Новгород |
| «Теплый нос» | 23 | 5 | 6 | 10 |
| Теплая вершина облака | 7 | 3 | 2 | 4 |
| Тепло выше облака | 1 | 28 | 3 | 1 |
| Теплый приземный слой, все холодное выше | 6 | 6 | 5 | 1 |
| Все холодное | 52 | 86 | 6 | 38 |

В большинстве случаев выпадение замерзающих осадков происходило в полностью холодной атмосфере, при температуре воздуха ниже 0°C. Такой процесс

называется «процесс переохлажденного теплого дождя» [Bochieri, 1980]. Подавляющее большинство случаев образования замерзающей мороси происходит в подобных условиях. Классически механизм формирования замерзающих осадков со стратификаций по типу «теплый нос» наиболее свойственен для осадков, выпадающих в виде замерзающего дождя.

Большое значение имеют работы, в которых детально рассматриваются условия формирования отдельных катастрофических случаев выпадения замерзающих осадков с образованием опасных отложений в виде гололеда.

Так, в ряде работ были описаны условия формирования ледяного шторма, прошедшего в Московском регионе 25-26 декабря 2010 года [Сатина, 2011; Вильфанд, Голубев 2011; Шакина и др. 2012; Голубев и др., 2013].

В обзоре погоды на территории России за декабрь 2010 года было отмечено, что 26 декабря в ряде областей Центрального округа, в том числе и в Московской области, отмечался гололед. Центр России пересекал теплый атмосферный фронт циклона, которой приближался с территории Западной Европы. Начались осадки в виде дождя, местами сильного, переходящего к вечеру в небольшой и умеренный снег. Далее температура стала понижаться. Толстая корка льда при обильных осадках быстро увеличивалась. Диаметр образовавшихся гололедных отложений в Московской области достигал 22 мм, в других областях Нечерноземья от 10 до 20 мм. По массовости распространения гололеда и его интенсивности, 26 декабря стал выдающимся днем в истории метеонаблюдений [Сатина, 2011].

Анализ синоптической ситуации и условий возникновения ледяного дождя был проведен также в Гидрометцентре России [Вильфанд, Голубев 2011; Голубев и др., 2013]. Авторы статьи отмечают, что выпадение ледяного дождя было связано с отрицательными температурами у поверхности земли, от $-2,9$ до $-9,0^{\circ}\text{C}$ и положительными на высоте изобарической поверхности АТ850 гПа от 2 до 4°C .

На рисунке 1.2 представлены распределение осадков, явлений погоды и приземной температуры ночью 26 декабря 2010 г., когда ледяной дождь был зарегистрирован в Москве, на севере Московской области, на юге Тверской и

Ярославской областей, во Владимирской области и в южной половине Нижегородской области.

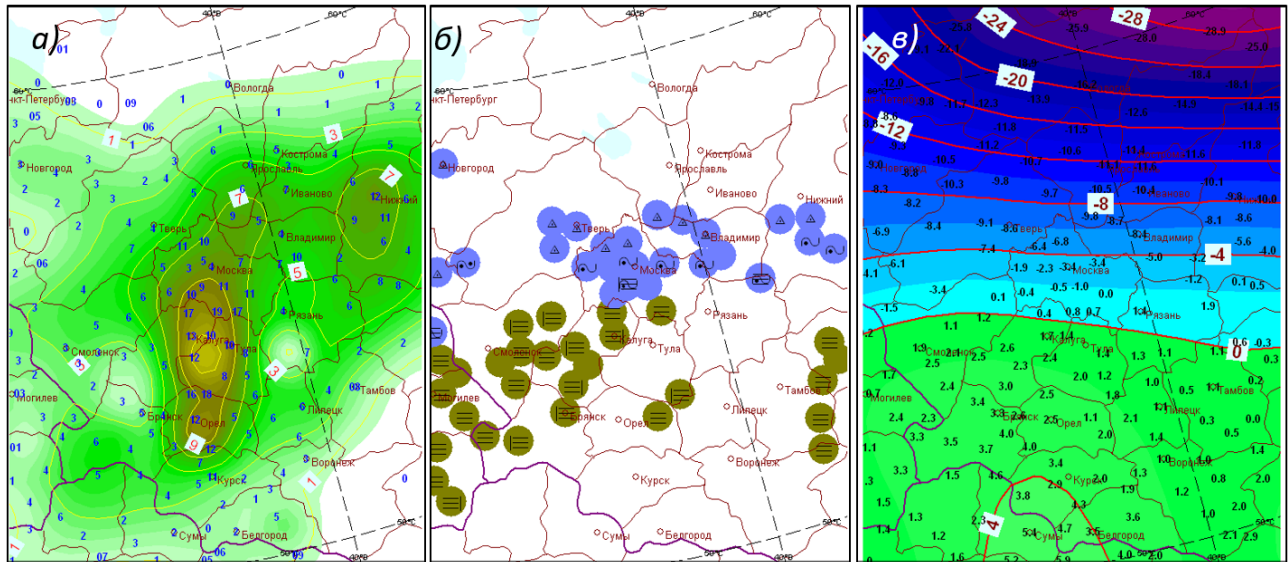


Рисунок – 1.2. а) Поле количества осадков (мм), выпавших в ЦФО за ночь 26.12.2010 г. б) Явления погоды (туман, гололед, ледяной дождь), наблюдавшиеся на территории ЦФО ночью 26.12.2010 г. в) Поле минимальной температуры воздуха в ЦФО ночью 26.12.2010 г. [Голубев и др., 2013]

Особенное внимание авторы обзора уделяют интенсивности и продолжительности гололедных явлений в центральных областях европейской территории России.

Так, на некоторых метеорологических станциях Московской области гололедные отложения сохранялись в течение 24 дней, превышая 27 и 28 декабря опасные значения (24 мм). В Москве гололед сохранялся до 17 суток, а максимальная его толщина составила 10-11 мм. Таким образом, в столице максимальная толщина гололеда была в два раза меньше, чем в Московской области. Одной из причин этого был проявившийся остров тепла города Москвы.

На рисунке 1.3 представлены максимальные значения гололедных отложений толщиной 5 мм и более за период с 24 по 28 декабря 2010 г. Видно, что зона гололеда протянулась полосой шириной 150-250 км от Смоленской до Самарской области.



Рисунок – 1.3. Максимальные значения толщины гололедных отложений (мм) за период 24-28.12.2010 г. [Голубев и др., 2013]

На сайте Гидрометцентра России были описаны последствия выпадения ледяного дождя в ноябре 2016 года [Гидрометцентр России...]. Тогда в Московской области наблюдался сильный дождь со снегом (до 18 мм), сильный гололед (диаметр отложений до 20 мм). Кроме этого, стихийный удар приняли на себя и соседние области. Причины и условия формирования данной ситуации были схожи со случаем 2010 года, однако в ноябре 2016 года гололед продержался в столичном регионе не более суток.

Классические условия выпадения замерзающих осадков были рассмотрены и на примере случая ледяного дождя, прошедшего на Урале 14 декабря 2010 года. Тогда температура у поверхности земли опускалась ниже -10°C , а на высотах изобарических поверхностей 925 и 850 гПа принимала положительные значения [Калинин, Смородин, 2012]. Авторами статьи также было показано, что объемная доля ледяной оболочки переохлажденных капель не превышает 3% даже при благоприятных условиях охлаждения. Это значит, что обледенение происходит преимущественно из-за выпадения жидких осадков.

В ноябре 2020 года в Приморском крае России прошел беспрецедентный ледяной шторм, который также, как и случаи на Европейской территории России, привел к серьезными экономическим последствиям. Анализ данного случая представлен в научной литературе [Гурвич и др., 2021]. Особенностью данной работы было использование спутниковых данных. По измерениям многоканального микроволнового радиометра GPM Microwave Imager (GMI) и

двухчастотного дождевого радиолокатора Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) на спутнике GPM получено пространственное распределение зон осадков, оценки их количества и интенсивности. Было показано, что территория с благоприятными условиями гололедообразования достигала 89 000 км². Таким образом, применение спутниковой информации является перспективным направлением в прогнозировании областей выпадения замерзающих осадков.

Детальный анализ условий формирования ледяных штормов встречается и в англоязычных источниках, наибольшее количество подобных работ посвящено ледяному шторму, прошедшему 5-9 января 1998 года на территории Канады. Прошедший на территории провинции Онтарио замерзающий шторм, как и рассмотренные выше случаи, произошедшие на территории России, наблюдался в зоне теплого фронта при наличии мощной адвекции тепла на уровне АТ850 гПа. Этот случай относился к классическому механизму формирования, со стратификацией температуры по типу «теплого носа» [Dupigny-Giroux 2000, Shabbar, Higuchi 2021].

Далее были рассмотрены работы, посвященные обледенению второго типа – внутриоблачному обледенению. В настоящее время наиболее хорошо изучены механизмы обледенения летательных аппаратов, так как эти знания необходимы для функционирования любого типа авиации [ВМО/ТД-№ 1390]. Работ, посвященных процессам обледенения у поверхности земли, значительно меньше, как в русскоязычных источниках литературы, так и в зарубежных.

Кристаллическая изморозь появляется при радиационных и адвективно-радиационных туманах чаще всего в условиях малоградиентного барического поля, т.е. в центральных частях антициклонов, перемычках высокого давления, в циклонах и ложбинах, находящихся в конечной стадии заполнения.

Условием образования зернистой изморози является возникновение тумана при отрицательной температуре воздуха. При этом происходит осаждение капелек тумана, замерзающих при соприкосновении с ледяными частицами, находящимися на предметах. Синоптические условия зернистой изморози схожи с условиями формирования внутримассового гололеда. Также для зернистой изморози

благоприятны условия адвекции тепла – теплые сектора подвижных циклонов и западные и северные периферии стационарных антициклонов [Заморский, 1955; Зверев, 1977; Воробьев, 1991].

Отложения мокрого снега образуются преимущественно при положительной температуре воздуха от 0 до 1°C, при температуре выше 1°C они растут медленно или даже опадают. Быстроте налипания снега благоприятствуют интенсивность снегопада и затишье; сильный ветер сдувает отложение мокрого снега с проводов. При понижении температуры воздуха ниже 0°C отложения мокрого снега постепенно замерзают. Отложения мокрого снега являются фронтальным видом обледенения. Его образование может происходить как в зоне теплого, так и в зоне холодного фронта 2-го рода [Бучинский, 1966].

С целью изучения фазового состава осадков в холодный период года, в ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС» был проанализирован 8-ми летний период с 2005 до 2012 год [Методическое пособие..., 2012]. Анализ показал, что наиболее часто повторяющимися опасными гололедно-изморозевыми отложениями являются отложения в виде мокрого снега. За рассмотренный период в грациях ОЯ было отмечено 12 случаев налипания мокрого снега. Показано, что в 99% случаев мокрый снег выпадает в зоне прохождения атмосферных фронтов. В 85-90% случаев в зоне фронтов, где приземная температура находится в диапазоне от 0 до 2°C. Также отмечается наличие теплого слоя в нижних 500 м и одновременно отсутствие такового на вышележащих уровнях. Формирование отложений в виде мокрого снега наиболее часто происходит при температуре воздуха от 0,4 до 0,7°C, и при интенсивности выпадения осадков более 5 мм/12 часов.

1.5. Климатология гололедно-изморозевых отложений

Замерзающие осадки и другие атмосферные явления, вызывающие образование гололедно-изморозевых отложений, наблюдаются в умеренных и высоких широтах обоих полушарий. Также гололедно-изморозевые отложения могут наблюдаться в низких широтах, при наличии отрицательной температуры воздуха, что свойственно областям высотной поясности. Наиболее хорошо

изучены условия выпадения замерзающих осадков на территории Северной Америки. На территории США наибольшая повторяемость замерзающих осадков наблюдается в северо-восточных штатах, на Среднем Западе, на востоке Аппалачских гор и на севере Тихоокеанского побережья. В Западной и Центральной Европе, наиболее часто замерзающие осадки наблюдаются в холодное время года, преимущественно в более континентальном климате [Шакина и др., 2012].

На рисунке 1.4 показана многолетняя среднегодовая частота замерзающих осадков над Северной Америкой. На востоке США, в районе Великих озер, и в приморских провинциях Канады замерзающие осадки случаются довольно часто, от 4 до 15 дней в году [Groisman et al., 2016].

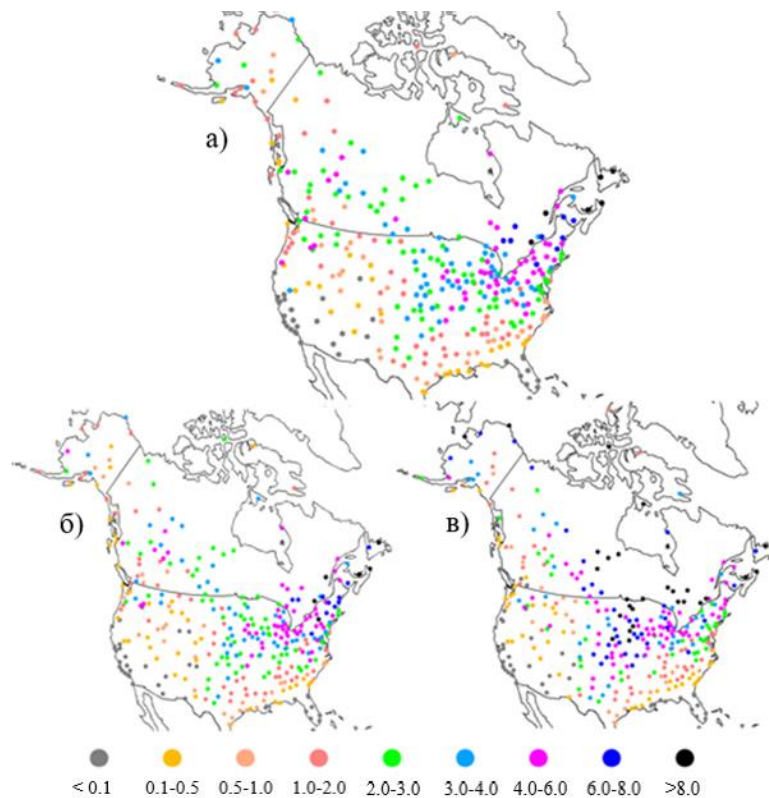


Рисунок 1.4 – Среднее число дней в году с а) замерзающими дождями с 1975 по 2014 год; б) замерзающими дождями 1975–1994 гг. в) замерзающей моросью 1975–1994 гг. На рисунках 1.4б и 1.4в представлен более короткий период для того, чтобы обеспечить взаимное сравнение обеих климатологий за одинаковый период [Groisman et al., 2016]

Здесь наблюдается самое большое число дней с замерзающими дождями на территории Северной Америки. Напротив, замерзающие дождя являются очень

редким явлением на западной части территории США и вдоль побережья Мексиканского залива. Сравнение рисунков 1.4б и 1.4в показывает, что на большей части территории Северной Америки частота дней с замерзающей моросью намного выше, чем частота дней с замерзающим дождем. Севернее 60° с. ш. морось встречается в три раза чаще.

На рисунке 1.5 показано среднее число дней с замерзающими осадками над Россией и Норвегией за последние четыре десятилетия. Замерзающие дожди наиболее часты в европейской части России, которая достаточно сильно подвержена адвекции влаги из северной части Атлантического океана и имеет относительно длинные переходные сезоны с температурой воздуха около 0°C . При движении на восток замерзающие осадки выпадают реже из-за меньшей влажности приповерхностного воздуха и более континентального климата (с короткими переходными сезонами).

Вдоль тихоокеанского побережья России наблюдается небольшой вторичный максимум повторяемости замерзающих дождей. Характер распространения замерзающей мороси над Северной Евразией аналогичен замерзающему дождю, но ее повторяемость существенно выше. На территории России в среднем 0,8 дней в году приходится на замерзающие дожди по сравнению с 2,5 днями в год с замерзающей моросью.

В отличие от Северной Америки, отношение дней с замерзающей моросью к количеству дней с замерзающим дождем над Россией и Норвегией незначительно меняется в зависимости от широты. Авторы статьи делают предположение, что увеличение этого отношения в высоких широтах Северной Америки может быть связано с гораздо более высокой частотой сообщений о следах осадков в аналогичных климатических условиях по сравнению с Северной Евразией.

Данное предположение подчеркивает важность проблемы методологии наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями, в том числе проводимыми на автоматических метеорологических станциях.

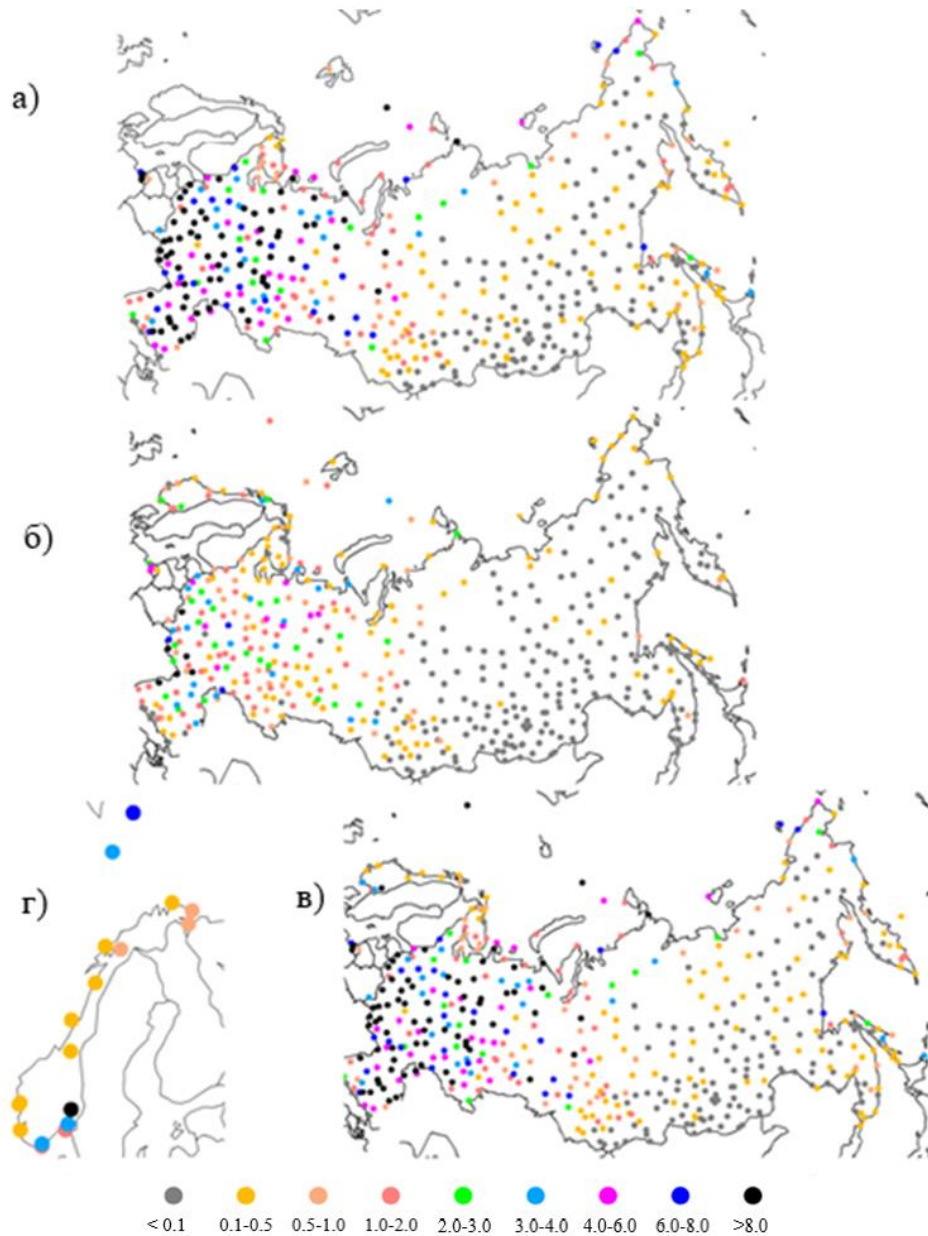


Рисунок 1.5 – Среднее число дней с замерзающими осадками над Россией и Норвегией за период с 1975 по 2014 год, учитываются (а) все замерзающие осадки (б) только замерзающие дожди (в) только замерзающая морось. Для климатологии замерзающей мороси над Норвегией, включая норвежские арктические острова, использовался период 1975–1994 гг. (г). [Groisman et al., 2016]

Авторами статьи также была проведена оценка изменения повторяемости замерзания осадков, путем сравнения десятилетие с 2005 по 2014 год с предшествующим 30-летним периодом. Увеличение повторяемости замерзающих дождей отчетливо проявляется над Норвегией и на значительной части северо-запада России. Существенные изменения повторяемости замерзающих дождей наблюдались также над североамериканской Арктикой (увеличение) и над самыми

южными частями Северной Америки и России (уменьшение). Изменения в частоте возникновения замерзающей мороси оценивались только для России. Была выявлена тенденция к уменьшению повторяемости замерзающей мороси на всей территории России.

По мере повышения температуры в Северном полушарии наблюдается сдвиг наблюдаемых ледяных штормов к полюсу и сдвиг в сторону холодного сезона. В более южных штатах наблюдается уменьшение ледяных штормов в любое время года, в то время как в северных штатах уменьшение весной и осенью и увеличение зимой. Ожидается увеличение частоты ледяных штормов в течение большей части зимы на востоке Канады и в США к западу от Аппалачей на юге вплоть до штата Теннесси. Авторы отмечают, что от того, как именно будет изменяться климат зависит усиление или ослабление ожидаемых тенденций [Klima, Morgan, 2015].

Ожидаемое увеличение количества выпадающих осадков, связанное с увеличением влагосодержания из-за потепления климата, может привести к увеличению интенсивности атмосферного обледенения в Норвегии [Ingvaldsen, 2017].

В условиях изменения климата также наблюдается увеличение риска экстремальных снегопадов с отложением мокрого снега над северной частью Японских Альп (горных районов в центральной Японии) и на острове Хоккайдо (северной части Японии) [Ohba, Sugimoto, 2020].

Помимо изменений климата, на формирования гололедно-изморозевых отложений влияет изменчивость климата. Так, некоторые исследования указывают на связь формирования интенсивных ледяных штормов на территории США с положительной фазой североатлантического колебания [Higuchi et al, 2020].

В других работах была проведена оценка пространственного распространения гололедно-изморозевых отложений на территории России с использованием данных инструментальных наблюдений. Гололедно-изморозевые отложения отмечаются практически на всей территории России. Они отмечаются на отдельных метеостанциях арктического побережья даже летом. Из всех видов гололедно-изморозевых образований наибольшее распространение по площади у

кристаллической изморози [Аржанова, Коршунова, 2019]. Увеличение числа случаев, продолжительности и веса гололёда происходит на юго-востоке Европейской территории России и Ямало-Ненецкого автономного округа. На юге Европейской части России отмечается уменьшение числа случаев, продолжительности и веса зернистой изморози. Рост числа случаев и продолжительности зернистой изморози отмечается на востоке Европейской части России, в Западной Сибири, Амурской области и отдельных районах Чукотки. В среднем по территории России наблюдается статистически значимый положительный тренд числа случаев, продолжительности и веса отложений мокрого снега [Bulygina et al., 2015; Аржанова, Коршунова, 2021].

1.6. Влияние региональных процессов на формирование гололедно-изморозевых отложений

Помимо процессов синоптического масштаба, на условия формирования гололедно-изморозевых отложений всех видов большое влияние оказывают региональные особенности местности.

На образование отложений гололеда существенное влияние оказывают орографические особенности местности. Например, в ряде исследований показано, что в большинстве случаев, с увеличением высоты увеличивается интенсивность гололедообразования [Волеваха, 1958; Гончар и др., 1974; Голикова, 1978]. На увеличение интенсивности гололедообразования влияет не само по себе увеличение абсолютных отметок высот, а характер формы рельефа. Замерзающие осадки, как и осадки в целом, в большем количестве выпадают на наветренных по отношению к направлению гололедонесущего потока склонах. Зависимость от высоты местности прослеживается не всегда. Например, на территории Украины, большая часть которой занята равнинами с высотами от 400 до 700 м, зависимость между толщиной отложения гололеда и высотой местности прослеживается слабо, и в данном случае большее значение в образовании гололеда имеют синоптические процессы [Раевский, 1961].

Увеличение повторяемости и интенсивности выпадения замерзающих осадков наиболее хорошо прослеживается в районах, граничащих с относительно высокими и имеющими большую протяженность горами. Так, например, отмечается максимум осадков на наветренных склонах Аппалачей в районе штата Пенсильвания [Bernstein, 2000]. Особенности условия выпадения замерзающей мороси, связанные с орографией, отмечалось в Минеральных Водах [Шакина и др., 2005]. Орографическое усиление осадкообразования также приводит к увеличению отложений в виде мокрого снега [Eliasson, 2017; Pulkkinen, 2017].

Внутриоблачное обледенение происходит только внутри туманов и облаков, состоящих из переохлажденных капель, которые остаются жидкими при температуре ниже 0°C . При совокупности благоприятных условий, зернистая изморозь может формироваться над нижней границей облаков, а также выше изотермы 0°C . Поэтому образование зернистой изморози часто происходит вблизи наветренных вершин гор. Интенсивность и продолжительность внутриоблачного обледенения зависят от потока жидкой воды в облаке, который опять же зависит от многих параметров, таких как скорость ветра, которая увеличивается при обтекании воздушным потоком вершин гор интенсивность обледенения [Fikke et al., 2008].

В классических работах было проведено исследование условий образования гололедно-изморозевых отложений в нижней атмосфере на высотах до 300 и до 500 м [Клинов, 1970; Клинов, 1990]. Автором показано, что в регионе Московской и Калужской области гололедный сезон длится в среднем полгода – с ноября по март, начало апреля. Наиболее часто встречаются отложения в виде гололеда, зернистой изморози, а также их сочетаний. В отдельные годы сложные отложения в виде смеси гололеда и изморози наблюдались в 75% случаев. Около верхней границы Обнинской метеорологической мачты наблюдались отложения толщиной до 200 мм и массой до 3000 г/м на стандартном 15-мм стержне. Отложения на ограждениях балконов и подвесных тросах достигали массы 4 и 17 кг/м соответственно. Для гололеда и изморози характерно увеличивающиеся с высотой размеры отложений и продолжительность обледенения. Наиболее интенсивные

гололедно-изморозевые отложения наблюдались во время низкой холодной облачности. Наблюдения на Останкинской башне в Москве показали схожие результаты. Гололед и зернистая изморозь в нижнем слое атмосферы чаще наблюдались при низкой облачности и тумане, а кристаллическая изморозь в их отсутствии.

Отдельно стоит рассмотреть влияние городов на образования гололедно-изморозевых отложений. Для оценки городского влияния на образования гололеда, были проведены исследования для нескольких крупных городов США. В двух крупнейших оцененных городах, Нью-Йорке и Чикаго, в каждом из которых есть по две городские метеорологические станции, наблюдалось заметное сокращение количества дней с замерзающим дождем, как в среднем за год, так и в максимальном годовом выражении. Среднее значение количества дней с замерзающим дождем в городах оказалось на 0,5-2 дня меньше, а максимальные годовые значения на 3–5 дней меньше, чем на станциях, расположенных в пригородах. Среднегодовые значения в Сент-Луисе и Вашингтоне (округ Колумбия), показали снижение среднего количества дней с замерзающим дождем менее чем на 1 день в году. Максимальное годовое значение в Сент-Луисе также было на 3-4 дня меньше, чем на близлежащих станциях, однако в Вашингтоне данный эффект не наблюдался.

Меньшие различия в изменениях средних значений в Сент-Луисе и Вашингтоне по сравнению с таковыми в Чикаго и Нью-Йорке, могут быть результатом различий в размерах их городских районов и, следовательно, величинами их островов тепла [Changnon, 2003], т.к. размер города и величина теплового острова взаимосвязаны [Oke, 1973].

1.7. Применение численного моделирования для исследования гололедно-изморозевых отложений

В настоящее время разработано большое количество алгоритмов определения типа осадков [Шакина и др., 2012], которые можно использовать с применением численных моделей атмосферы. Сначала рассмотрим алгоритмы,

используемые для определения фазы осадков при прогнозировании обледенения первого типа (precipitation icing). В работе Н.П. Шакиной и соавторов подробно описаны методы «толщины слоя», алгоритмы ВТС и Бургуэна, а также метод Реймера.

К самым простым можно отнести алгоритм «толщины слоя», который использует данные о высоте изобарических поверхностей 700, 850 и 1000 гПа и данных о температуре воздуха по смоченному термометру у поверхности земли. В зависимости от толщины слоев 850-700 и 1000-850 гПа и их сочетания с температурой у земли выделяются различные фазы выпадающих осадков. Так, например, замерзающий дождь выпадает при $T_w \leq 0^\circ\text{C}$ и толщине слоя 1000-850 гПа более 1310 м или при толщине слоя 850-700 гПа более 1560 м [Keeter, Cline, 1991]. Ограничением использования данного алгоритма является невозможность его использования при давлении на уровне земли ниже 1000 гПа.

Алгоритм ВТС [Baldwin et al., 1994] используется для определения фазы выпадающих осадков по данным о вертикальном распределении температуры и влажности воздуха. Алгоритмом определяется площадь теплых (слоев таяния) и холодных (слоев замерзания) слоев. Теплые и холодные слои определяются как площадь между нулевой изотермой и кривой $T_w(z)$, где z – высота. Алгоритм Бургуэна [Bourgouin, 2000] работает по аналогичному с алгоритмом ВТС принципу и определяет условия таяния или замерзания гидрометеоров. Используя сведения о термической стратификации атмосферы, определяется площадь между изотермой 0°C и наблюдаемой положительной температурой – «энергия таяния» и площадь между изотермой 0°C и наблюдаемой отрицательной температурой – «энергия замерзания». Тип выпадающих осадков определяется по соотношению «энергии таяния» и «энергии замерзания» [Шакина и др., 2012].

Наибольшую популярность получил алгоритм Реймера [Ramer, 1993], который использует данные о давлении, температуре, относительной влажности и температуре смоченного термометра для разделения условий выпадения снега, дождя, замерзающего дождя, ледяных зерен и смешанных осадков:

– если на нижнем уровне (у земли) $T_w \geq 2^\circ\text{C}$, ожидается дождь;

– если у земли $T_w \leq 2^\circ\text{C}$ и на остальных уровнях $T_w < -6,6^\circ\text{C}$, ожидается снег.

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

Когда гидрометеоры падают с уровня генерации, они могут таять при соответствующей стратификации T_w . Ледяная фракция (I) гидрометеоров определяется из формулы 1.1.

$$\frac{dI}{d\ln p} = \frac{0^\circ\text{C} - T_w}{E} \quad (1.1)$$

где $E = E' \cdot RH$, эмпирически определено, что $E' = 0,045^\circ\text{C}$.

Величина I меняется от 0 (жидкие капли) до 1 (кристаллы). Окончательное решение о типе осадков принимается на основании следующих правил по значениям I и T_w на самом нижнем уровне: – если $I > 0,85$, ожидаются ледяные зерна; – если $I = 1$, ожидается снег; – если $I < 0,04$ и $T_w < 0^\circ\text{C}$ у земли, ожидается замерзающий дождь; – если $I < 0,04$ и $T_w \geq 0^\circ\text{C}$ – ожидается дождь; – если $0,04 \leq I \leq 0,85$ и $T_w < 0^\circ\text{C}$ у земли, то ожидаются смешанные осадки, часть из которых – замерзающий дождь; если же $T_w \geq 0^\circ\text{C}$, замерзающих осадков не ожидается [Шакина и др., 2012].

В последние годы активно применяются алгоритмы, разработанные с учетом возможности использования схем микрофизики, интегрированных в численные модели атмосферы. Так, например, в Национальном управлении океанических и атмосферных исследований США (NOAA) используют метод явного прогнозирования типа осадков [Gascón et al., 2016], использующийся совместно со схемой микрофизики объемного облака смешанной фазы [Thompson et al., 2008, Thompson et al. 2014], применяемой в оперативных прогностических моделях. Для определения типа выпадающих осадков метод использует данные об их количестве и интенсивности, температуре воздуха на различных уровнях, а также процентном соотношении твердой и жидкой фракции осадков, полученных из модели (рисунок 1.6).

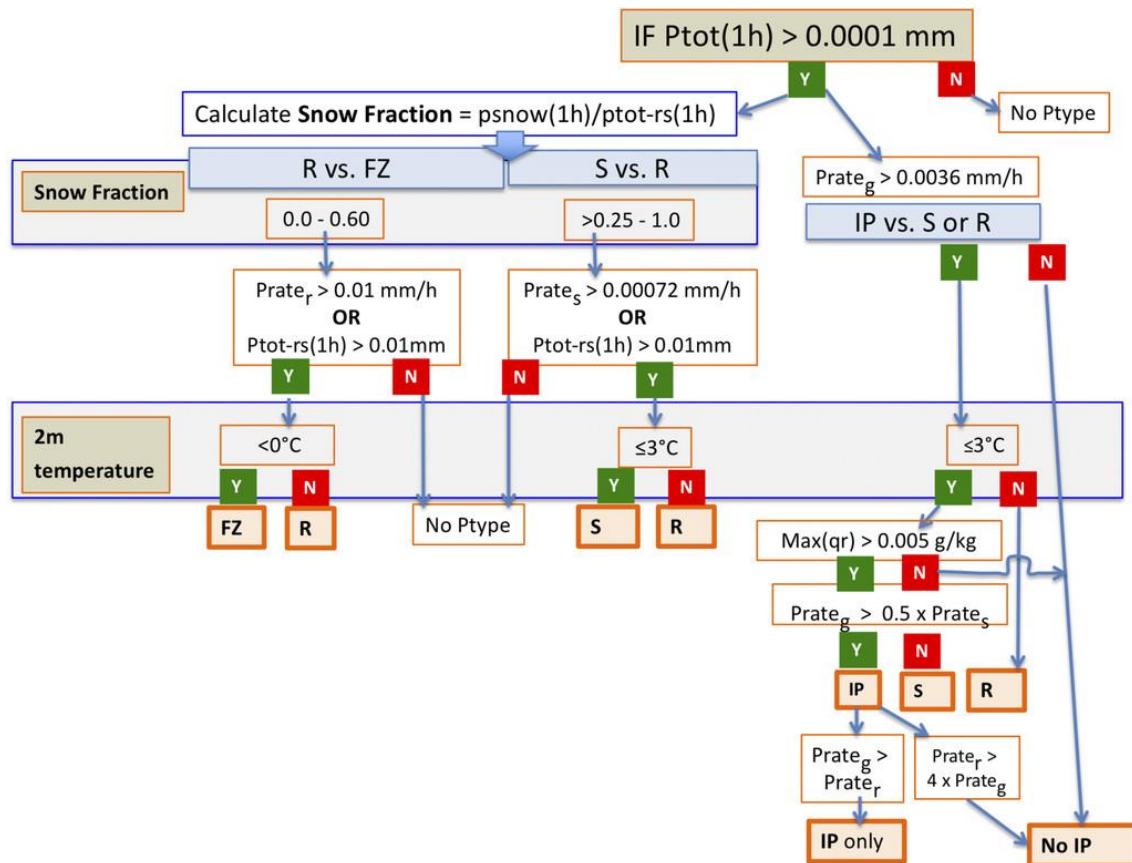


Рисунок 1.6 – Блок-схема, описывающая диагностическую логику для определения типа осадков [Gascón et al., 2016]

Данный метод показал хорошие результаты в ходе проверки двух зимних сезонов с 2013 по 2015 гг. осуществляется по приземным наблюдениям METAR.

В последние годы были проведены исследования по использованию методов прогноза гололеда с помощью анализа типов осадков с использованием данных модели WRF-ARW. В данном методе использовались следующие критерии для присутствия гололеда: сумма осадков более 0,1 мм за 12 часов, температура воздуха или поверхности не выше 0°C, процентное соотношение жидких гидрометеоров более 0,9 и присутствие жидких гидрометеоров на нижнем сигма-уровне модели [Игнатов и др., 2020]. Параллельно с использованием метода, основанного на анализе типов осадков, использовалась канадская модель METRo, которая в виде входящих данных также использует данные модели WRF-ARW. Состояние подстилающей поверхности с помощью теплобалансной модели, использующей данные о температуре и точки росы на высоте 2 м, сумм жидких и твердых осадков, скорость ветра на высоте 10 м, атмосферное давление на

поверхности, потоки коротковолновой и длинноволновой радиации и температуру почвы на глубине 40 см [Crevier, 2001]. Для оценки результатов прогноза гололедных явлений использовались данные наблюдений на 350 метеорологических станциях, преимущественно расположенных на территории ЦФО России. С 2003 по 2018 год были выбраны даты, когда наличие гололеда отмечалось на 10 и более станциях Московской области. Таким образом, для оценки было отобрано 46 случаев образования гололеда. Прогноз с помощью теплобалансной модели в большинстве случаев дает лучший результат, чем с помощью анализа типа осадков, однако эта разница невелика. Теплобалансную модель целесообразнее использовать для прогноза гололедных явлений на равнинах, чем анализ гидрометеоров [Игнатов и др., 2020].

Теми же авторами были описаны методы численного прогноза максимальной толщины гололедных отложений и его результаты для 10 случаев гололеда на Восточно-Европейской равнине и одного – в Приморском крае [Игнатов и др., 2022]. Толщина отложений гололеда $G(t)$ в данной работе рассчитывалась в каждый момент времени в каждом узле сетки по формуле $G(t) = G(t-1) + R(t)$ при выполнении одного из условий: $T_s(t-1) \leq 0^\circ\text{C}$ и узел находится на суше или $T_2(t-1) \leq 0^\circ\text{C}$ и узел на воде. (T_s – температура поверхности суши, T_2 – температура воздуха на высоте 2 м). Принималось, что если $T_s(t-1) \geq 0,1$ на суше или $T_2(t-1) \geq 0,1$ на воде, то $G(t) = 0$, то лед разрушается (тает). Здесь t – текущий момент времени; $t-1$ – предыдущий момент времени; $R(t)$ – прирост льда за интервал времени от $t-1$ до t .

Прирост льда в каждый момент времени рассчитывался по формуле 1.2:

$$R(t) = \frac{1}{\rho_i \pi} \sqrt{(\rho_0 P(t))^2 + (3.6V(t)W(t))^2} \quad (1.2)$$

где $W(t) = 0,067P(t)^{0,846}$ – содержание воды в воздухе; $V(t)$ – скорость ветра на высоте 10 м, P – сумма жидких осадков (мм) за период времени между $t-1$ и t ; ρ_0 – плотность воды (~ 1000 кг/м³); ρ_i – плотность льда (~ 900 кг/м³).

Прогноз гололеда в большой степени зависит от качества прогноза температуры воздуха и осадков численной моделью атмосферы. Практически все

рассмотренные случаи сильных (более 10 мм) отложений гололеда оказались успешно спрогнозированы.

Далее были рассмотрены работы, посвященные моделированию внутриоблачного обледенения. Для начала были рассмотрены существующие методы прогноза высотного атмосферного обледенения, т.к. именно в области авиационной метеорологии разработано большое количество алгоритмов определения обледенения этого типа [Шакина, Иванова, 2016]. Прогноз обледенения во многих гидрометеорологических службах мира в настоящее время основан на прогнозе температуры и влажности воздуха, а также, по возможности, простейших двух характеристик облачности (слоистая, конвективная).

В Гидрометцентре России была проведена оценка успешности нескольких алгоритмов, разработанных для выявления областей возможного обледенения воздушных судов [Шакина и др., 2010]. Среди них: алгоритм прогноза обледенения, основанный на анализе данных самолетного зондирования (таблица 1.3); алгоритм прогноза обледенения, разработанный в Национальном центре США прогнозирования состояния окружающей среды (NCEP) (таблица 1.4); алгоритм прогноза обледенения, разработанный в Центре авиационных прогнозов Национальной службы погоды США (таблица 1.5) [Шакина, Иванова, 2016].

Кроме указанных выше алгоритмов, рассматривался критерий К. Годске, согласно которому обледенение вероятно если:

$$T < -8(T - T_d) \quad (1.3)$$

где T – температура воздуха, T_d – температура точки росы.

По своей сути, данный алгоритм также использует величину относительной влажности воздуха, выраженную через разность температуры воздуха и температуры точки росы.

Представленные алгоритмы прогнозирования внутриоблачного обледенения разработаны для авиационных прогнозов погоды, однако благодаря схожей физике процесса, алгоритмы, использующие аналогичные предикторы могут быть использованы и для прогноза наземного обледенения.

Таблица 1.3 – Алгоритм прогноза обледенения, основанный на анализе данных самолетного зондирования [Шакина, Иванова, 2016]

| Форма облачности | Температура, °С |
|--|-------------------|
| Обледенение произвольной интенсивности | |
| Cu. Cb | $-24 < T \leq -2$ |
| St. Sc | $-20 < T \leq -2$ |
| As | $-10 < T \leq -2$ |
| Ac | $-28 < T \leq -2$ |
| Интенсивное обледенение | |
| Cu. Cb. St. Sc | $-16 < T \leq -2$ |

Таблица 1.4 – Алгоритм прогноза обледенения, разработанный в Национальных центрах США прогнозирования состояния окружающей среды (NCER) [Шакина, Иванова, 2016]

| Среда обледенения | Температура, °С | Относительная влажность, % |
|---------------------|---------------------|----------------------------|
| Общий случай | $-16 \leq T \leq 0$ | ≥ 63 |
| Конвективные облака | $-20 \leq T \leq 0$ | ≥ 56 |
| Слоистые облака | $-12 \leq T \leq 0$ | ≥ 85 |

Таблица 1.5 – Алгоритм прогноза обледенения, разработанный в Центре авиационных прогнозов Национальной службы погоды США [Шакина, Иванова, 2016]

| Среда обледенения | Температура, °С | Относительная влажность, % |
|--|---------------------|----------------------------|
| Выше 900 м над подстилающей поверхностью | $-14 \leq T \leq 0$ | ≥ 75 |
| Ниже 900 м | $-20 \leq T \leq 0$ | ≥ 86 |

В случае, когда в качестве предикторов использовались значения температуры и влажности, непосредственно измеренные в полете, все вышеприведенные алгоритмы, включая критерий Годске, показали практически значимые результаты. Если предикторы брали из численного прогноза, успешность прогноза резко понижалась, в особенности на уровнях вблизи изобарических поверхностей 500 и 700 гПа. Однако на меньших высотах (850 и 825 гПа) успешность оказалась значимой у всех алгоритмов кроме критерия К. Годске.

Прогноз наземного обледенения является задачей более трудной, так как значительное влияние на толщину и интенсивность гололедно-изморозевых отложений оказывает подстилающая поверхность и характеристики рельефа местности. Также на характеристики обледенения влияет: расстояние от водоемов, высота над уровнем моря и экспозиция склонов.

Часть современных численных методов прогноза обледенения основаны на прогнозе отдельных характеристик воздуха, которые в совокупности определяют благоприятные условия для образования гололедно-изморозевых отложений. В качестве основных предикторов обледенения второго типа выделяют следующие характеристики: удельную и относительную влажность воздуха, температуру воздуха, скорость и направление ветра, а также размер облачных капель [Farzahan, 2008].

Главными критериями, как и в авиационных прогнозах, является температура воздуха и относительная влажность. Чаще всего в качестве предиктора указывается значение относительной влажности более 90%.

В настоящее время существуют методы описания этих процессов, использующиеся в численном моделировании. Большинство из них основано на уравнениях, описывающих обтекание воздушным потоком цилиндрического тела [Makkonen, 2000].

Согласно данному методу, интенсивность обледенения рассчитывается по формуле 1.4. Данная формула позволяет рассчитать массу отложения льда, образовавшегося на подверженном обледенению предмете за единицу времени, которая зависит от параметров атмосферы и размеров предмета.

$$\frac{dM}{dt} = E \cdot LWC \cdot V \cdot A, \quad (1.4)$$

где M – масса гололедно-изморозевого отложения, t – время обледенения, E – ослабляющий коэффициент, LWC – содержание жидкой воды в объеме воздуха (*Liquid Water Content*), V – скорость ветра на высоте 10 м, A – площадь поперечного сечения объекта, на котором происходит обледенение.

Коэффициент ослабления (E) показывает долю переохлажденных капель тумана, которые преобразовались в отложения изморози, и рассчитывается по формуле (1.5):

$$E = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \quad (1.5)$$

где α_1 – коэффициент столкновения, α_2 – коэффициент налипания и α_3 – коэффициент намерзания.

Коэффициенты столкновения, прилипания и намерзания могут значительно занижать интенсивность отложений. Коэффициент столкновения (α_1) представляет собой отношение количества капель, столкнувшихся с объектом, к общему потоку капель, переносимому воздухом. Коэффициент налипания (α_2) представляет собой отношение удержавшихся на объекте капель, переносимых потоком, к их общему количеству. Коэффициент намерзания (α_3) – это отношение переохлажденных капель воды, успевших замерзнуть на поверхности столкновения, к общему количеству удержавшихся на объекте капель.

В случае зернистой изморози коэффициенты прилипания и намерзания близки к единице, так как жидкие капли легко прилипают к поверхности, и из-за малого размера имеют небольшую теплоемкость и успевают быстро замерзнуть на препятствии.

Коэффициент столкновения в данном случае необходимо рассчитывать, так как часть небольших и легких капель переохлажденного тумана в потоке воздуха погибает препятствие из-за сил инерции. В основе подавляющего большинства методов расчета коэффициента столкновения заложено уравнение, описанное Лэнгмюром и Блоджет еще в 1946 году [Langmuir, 1946].

В данном методе оценивается влияние сил инерции и вязкости на переохлажденные капли тумана, и с помощью безразмерных величин определяется доля капель, которые должны столкнуться с твердым телом. Уравнение описано ниже (формула 1.6):

$$f(x) = \begin{cases} 0,466(\log_{10} 8K_0)^2, & 0,125 < K_0 < 1,1 \\ \frac{K_0}{K_0 + \frac{\pi}{2}}, & K_0 > 1,1 \\ \frac{K}{K + \frac{\pi}{2} 0,112Re^{0,63} + 0,75 \cdot 10^{-4} Re^{1,38}}, & E > 0,5 \end{cases} \quad (1.6)$$

где K_0 – безразмерный параметр, рассчитываемый по формуле (1.7).

$$K_0 = 0,125 + \frac{K - 0,125}{1 + 0,0967Re^{0,6367}}, \quad (1.7)$$

где K – число Стокса (1.8), Re – число Рейнольдса (1.9)

$$K = \frac{\rho_w D_d^2 V}{9\mu D_c}, \quad (1.8)$$

где ρ_w – плотность воды, D_c – диаметр объекта подверженного обледенению, D_d – диаметр капли переохлажденного тумана, μ – динамическая вязкость воздуха.

$$Re = \frac{VD_c \rho_a}{\mu}, \quad (1.9)$$

где ρ_a – плотность воздуха.

В настоящее время опубликовано несколько работ, предлагающих уточнение метода Лэнгмюра-Блоджет для расчета коэффициента столкновения [Lozowski et al., 1988]. Некоторые методы оценки коэффициента столкновения основаны на использовании данных только о скорости ветра и размере капли [Stallabrass, 1980].

Выводы к главе 1

Гололедно-изморозевые отложения отличаются большим разнообразием видов и разнообразием атмосферных явлений, которые становятся причинами их образования. Некоторые виды отложений могут достигать опасных размеров и приводить к серьезным экономическим последствиям, в первую очередь это отложения в виде гололеда, зернистой изморози и мокрого снега.

В настоящее время существует множество видов наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями. У каждого из видов наблюдений есть свои

преимущества и недостатки. Развиваются новые цифровые системы мониторинга за атмосферным обледенением.

Процессы формирования гололедно-изморозевых отложений разнообразны. В связи с этим, необходимо более детальное изучение этих процессов с использованием современных методов, включая численное моделирование. Существует большое количество алгоритмов и методов для выявления опасных гололедно-изморозевых отложений. Однако их прогнозирование остается трудной задачей, особенно это касается внутриоблачного обледенения в виде зернистой изморози.

Современные исследования показывают, что наблюдается увеличение повторяемости опасных ледяных отложений в средних и высоких широтах. Однако влияние изменения и изменчивости климата на будущее пространственное распределение повторяемости и интенсивности гололедно-изморозевых отложений на Земле требует дальнейших исследований.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Вторая глава посвящена используемым в ходе работы материалам и методике исследования. Для анализа метеорологических условий формирования и изучения пространственного распространения высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений на территории России использовались данные инструментальных наблюдений и методы математической статистики. Главным подходом в исследовании условий образования отдельных наиболее опасных случаев гололедно-изморозевых отложений было проведение подробного синоптического анализа, в ходе выполнения которого использовались данные с наземных метеорологических и аэрологических станций, а также данные реанализа ERA5. Важным подходом в анализе механизмов формирования высокоинтенсивных отложений было использование результатов численных экспериментов, проведенных с использованием мезомасштабной модели WRF-ARW.

2.1. Используемые данные метеорологических наблюдений

Основными данными наблюдений, используемыми для выполнения задач диссертации, были данные с наземных метеорологических станций, в том числе оборудованных гололедными станками и данные аэрологических наблюдений.

2.1.1. Данные срочных наблюдений

Данные метеорологических станций были собраны из нескольких архивов. Основные метеорологические параметры были получены из массива данных ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» — Федерального государственного бюджетного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных» [Булыгина и др. 2014]. В данном архиве содержатся данные срочных наблюдений на 521 станции, период наблюдения с 1966 по 2021 год.

Часть данных была получена из архива погодного сайта ООО «Расписание погоды» [Расписание погоды...]. Архив содержит данные срочных 3-часовых метеорологических наблюдений, а также данные наблюдений на авиационных

метеорологических станциях в коде METAR с 30-минутным шагом. Кроме этого, на сайте gr5.ru доступны срочные данные инструментальных измерений за гололедно-изморозевыми отложениями. Данные доступны для периода с февраля 2005 года.

Все полученные данные были собраны в один архив и использовались для проведения синоптического анализа и верификации результатов численных экспериментов.

2.1.2. Данные аэрологических наблюдений

В данной работе использовались данные радиозондирования, полученные из архива кафедры атмосферных наук университета Вайоминга [Upper Air...], а также данные электронного архива ГИС «Метео» научно-производственного центра «Мэп Мейкер» [Электронный архив...].

Данные радиозондирования использовались для изучения вертикальной структуры атмосферы в период формирования гололедно-изморозевых отложений и для верификации результатов численного моделирования.

По данным радиозондирования были построены пространственные разрезы тропосферы высотой до 5 км, по которым изучалась термическая структура теплого атмосферного фронта и вертикальное распределения температуры воздуха в данном разрезе. Профили строились перпендикулярно линии фронта.

Для случая гололеда 2010 года использовались данные радиозондирования в городах Курске, Смоленске, Долгопрудном, Нижнем Новгороде, для случая 2016 года – в городах Рязани, Долгопрудном, Бологом и Санкт-Петербурге. Разрезы для случая ледяного шторма 2020 года были построены по данным радиозондирования в южнокорейском городе Каннин, Владивостоке [Сад-Город] и Дальнереченске.

Также по данным радиозондирования были построены временные разрезы, высотой до 5 км, наглядно показывающие изменение стратификации атмосферы во время формирования высокоинтенсивных замерзающих дождей. Временные разрезы были построены по данным радиозондирования в г. Долгопрудном и в

г. Владивосток (Сад-город). Для построения временных разрезов термической структуры атмосферы в период выпадения интенсивных осадков в виде мокрого снега использовались данные радиозондирования со станций: пос. Ключи и г. Таганрог.

2.1.3. Данные инструментальных наблюдений

Данные инструментальных измерений гололедно-изморозевых отложений по 183 станциям на территории России были предоставлены ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» [ФГБУ...]. Используемые в работе данные инструментальных наблюдений включали в себя информацию о:

- дате начала обледенения и времени начала обледенения;
- виде гололедно-изморозевого отложения;
- продолжительности стадии нарастания и стадии обледенения;
- диаметре, толщине и массе отложения;
- температуре воздуха в момент начала обледенения и в момент максимального развития обледенения;
- скорости ветра в момент начала обледенения и в момент максимального развития обледенения;
- направлении ветра в момент начала обледенения и в момент максимального развития обледенения.

Данные были представлены в закодированном текстовом формате. Для каждой метеорологической станции были отобраны выборки указанных выше параметров для общего количества гололедно-изморозевых отложений и для отложений, достигших критериев опасного явления.

В первую очередь, для анализа условий формирования гололедно-изморозевых отложений использовались параметры, наблюдаемые в момент начала обледенения, так как именно они определяли благоприятные условия формирования гололедно-изморозевых отложений различных видов и интенсивности.

В последующем, данные с гололедных станков использовались для верификации результатов численных экспериментов.

Одной из наиболее важных характеристик гололедно-изморозевых отложений, наравне с диаметром и толщиной, является плотность. На метеорологических станциях данная величина не измеряется. Для отложений, гололеда, зернистой изморози и отложений мокрого снега, достигших определенного диаметра (таблица 2.1), проводятся измерения массы отложения.

Таблица 2.1 – Значение диаметра отложения (за вычетом диаметра провода), при достижении которого нужно измерять размеры отложения на верхних (сменных) проводах и производить измерение массы отложения [Наставление, 1985]

| Вид отложения | Диаметр отложения |
|--|-------------------|
| Гололед и стекловидное отложение мокрого снега | 5 |
| Зернистая изморозь и снеговидное отложение мокрого снега | 10 |
| Кристаллическая изморозь | 15 |

Зная диаметр и толщину отложения, а также его массу можно рассчитать плотность. Предполагается, что поперечное сечение гололедно-изморозевого отложения можно принять за эллипс, в котором большая полуось определяется как половина суммы диаметра отложения и диаметра провода гололедного станка, а малая полуось как половина суммы толщины отложения и диаметра провода (рисунок 2.1).

Такой расчет является приближенным, так как в реальности поперечное сечение гололедно-изморозевых отложений может быть крайне разнообразным. Иногда поперечное сечение отложения имеет треугольную форму. Так, например, в атласе обледенения проводов В.Е. Бучинского приводятся фотографии отложений зернистой изморози, диаметр которых многократно превышает толщину отложения, а само отложение располагается не вокруг провода, а с одной наветренной стороны. Такая форма характерна для сложных отложений – сочетания нескольких видов обледенения, например гололеда и зернистой изморози [Бучинский, 1966].

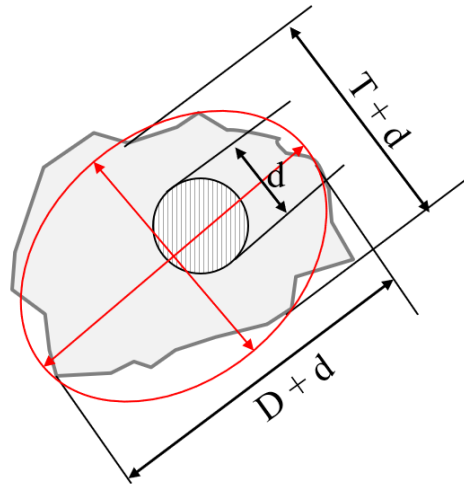


Рисунок 2.1 – Схема гололедно-изморозевого отложения на проводе гололедного станка [Наставление, 1985]

Плотность гололедно-изморозевых отложений (ρ_i) рассчитывалась по формуле 2.1.

$$\rho_i = \frac{m}{\frac{\pi}{4}((T + d)(D + d) - d^2)} \quad (2.1)$$

где ρ_i – плотность гололедно-изморозевого отложения, m – масса отложения, T – толщина отложения, D – диаметр отложения, d – диаметр провода гололедного станка.

2.2. Использование данных численных моделей атмосферы

Данных с наземных метеорологических станций, особенно со станций аэрологического радиозондирования, не всегда достаточно для детального описания какого-либо метеорологического явления. С целью получения значений метеорологических полей с более высоким пространственным и временным разрешением использовались данные реанализа ERA5 и численных экспериментов, проведенные с использованием атмосферной мезомасштабной модели WRF-ARW.

2.2.1. Данные атмосферных реанализов

Современные реанализы позволяют получать многочисленные поля метеорологических величин с относительно высоким (до $0,1^\circ$) шагом по пространству и с дискретностью до 1 часа. В настоящей диссертации использовались данные реанализа ERA5.

Данные метеорологического реанализа производятся путем объединения данных измерений, наблюдений, моделирования и применения методов ассимиляции для достижения наиболее реалистичного описания погодных условий. Долгое время наиболее качественным считался реанализ ERA-Interim [Dee et al., 2011]. Однако ему на замену пришла новая версия реанализа от Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды. Реанализ ERA5 [Hersbach et al., 2020] является пятым поколением реанализов ECMWF. ERA5 производится с использованием усвоения данных 4D-Var в версии CY41R2 ECMWF's Integrated Forecast System (IFS), с 137 гибридными уровнями по вертикали, с верхним уровнем 0,01 гПа (около 80 км). В ближайшее время ERA5 в полностью заменит ERA-Interim, обслуживание которого становится все труднее.

Сильные стороны ERA5 по сравнению с ERA-Interim:

- намного более высокое пространственное и временное разрешение,
- улучшенное описание тропосферы,
- улучшенное представление тропических циклонов,
- лучший глобальный баланс осадков и испарения,
- более точное количество осадков над сушей тропиков,
- лучшее описание влажности почвы,
- более стабильная температура морской поверхности и морского льда.

Атмосферные данные интерполируются на 37 уровней давления, 16 уровней потенциальной температуры и 1 уровень для потенциального вихря. Также доступны данные «приземного» уровня, содержащие двухмерные параметры, такие как осадки, температура воздуха на высоте 2 м и многие другие. IFS связана с моделью почвы, параметры которой также обозначаются как параметры поверхности, и моделью морских волн.

ERA5 в конечном итоге будет охватывать период с января 1950 года по текущий момент времени. Данные ERA5, опубликованные на данный момент, охватывают период с 1979 года и продолжают расширяться в режиме, близком к реальному времени (с задержкой около 5 дней). Набор данных ERA5 содержит

одну реализацию с высоким разрешением (реанализ, «HRES») и ансамбль из десяти элементов с уменьшенным разрешением (ансамбль, «EDA»).

Данные сохраняются в архиве данных ECMWF (MARS), и соответствующий поднабор данных, интерполированный в регулярную сетку широты/долготы, доступен в хранилище климатических данных (CDS) C3S [Climate Data...].

2.2.2. Модель WRF-ARW

Модель Weather Research and Forecasting (WRF) – это современная мезомасштабная система численного прогноза погоды, предназначенная как для атмосферных исследований, так и для оперативного прогнозирования.

Она представлена двумя динамическими ядрами (Non-hydrostatic Mesoscale Model – NNM и Advanced Research WRF – ARW), системой усвоения данных и программной архитектурой, поддерживающей параллельные вычисления и расширяемость системы. Модель предназначена для широкого спектра метеорологических применений в масштабах от десятков метров до тысяч километров. Разработка модели WRF началась во второй половине 1990-х годов.

Модель WRF может создавать симуляции, основанные на реальных атмосферных условиях (т.е. на основе наблюдений и анализа) или идеализированных условиях. WRF предлагает гибкую и эффективную в вычислительном отношении платформу для оперативного прогнозирования, отражающую последние достижения в области физики, математики и усвоения данных, внесенные разработчиками из обширного исследовательского сообщества (по состоянию на 2021 год общее число пользователей модели составляет более 57 800 человек в более чем 160 странах). WRF в настоящее время эксплуатируется в NCEP и других национальных метеорологических центрах, а также в качестве инструмента прогнозирования в режиме реального времени в лабораториях, университетах и частных компаниях [Weather Research...].

В настоящей диссертации, для проведения численных экспериментов использовалась мезомасштабная модель атмосферы WRF-ARW версии 4.1.2. Четвертое поколение модели вышло 8 июня 2018 года.

Набор уравнений в модели WRF-ARW является полностью сжимаемым, эйлеровым и негидростатическим, с возможностью применения гидростатики во время расчета. Система используемых уравнений консервативна для скалярных переменных. В модели используется гибридная вертикальная координата сигма-давления, повторяющая рельеф местности, при этом верхняя часть модели представляет собой поверхность с постоянным давлением. Горизонтальная сетка представляет собой сетку Аракавы-С. Схема интегрирования по времени в модели использует схему Рунге-Кутты третьего порядка, а пространственная дискретизация использует схемы со 2-го по 6-й порядок.

Модель поддерживает приложения как с идеализированными, так и с реальными метеорологическими данными с различными вариантами боковых граничных условий [WRF Model...].

Расчеты могут производиться на нескольких областях интегрирования (доменов) – с использованием вложенных сеток. Вложенные сетки могут использоваться только в горизонтальной плоскости, поэтому по вертикали область расчетов должна иметь одинаковые размеры на всех сетках. Каждая последующая вложенная сетка должна иметь шаг в нечетное количество раз меньше, чем материнская сетка [Вельтищев, Жупанов, 2010].

Выбор именно этой модели был обусловлен тем, что исходный код модели находится в свободном доступе, и может быть установлен на персональный компьютер, в связи с этим эксперименты могут проводиться самостоятельно и независимо. Также данная модель имеет широкий диапазон выбора начальных данных, настроек запуска и инструментов для обработки полученных расчетов.

2.2.3. Конфигурация численных экспериментов

В качестве начальных и граничных условий для запуска численных экспериментов использовались данные реанализа ERA5 с шагом по пространству $0,25^\circ$. Область интегрирования для воспроизведения зернистой изморози имела четыре расчетных домена с шагами по пространству 18, 6, 2 и $0,667$ км с количеством узлов 142×121 для каждой вложенной сетки (рисунок 2.2). В данном

случае, использование четырех вложенных сеток было обусловлено небольшим пространственным масштабом исследуемых процессов. На рисунке 2.3 для наглядности представлено описание топографической подложки для профиля, проходящего через горный массив Рай-Из (от 66.737° с.ш., 65.290° в.д. до 67.050° с.ш., 66.018° в.д.). В случае численных экспериментов с использованием шага по пространству равному 18 км, орографические особенности территории не разрешаются моделью, при использовании шага в 6 км, разрешаются недостаточно полно. Уменьшение шага до 2 км и менее позволяет намного более точно описывать рельеф в области интегрирования и ожидать от модели успешного воспроизведения мезомасштабных процессов, связанных с влиянием орографии. С целью более точного изучения вертикальной структуры атмосферы использовалось увеличенное до 78 количество вертикальных уровней модели.

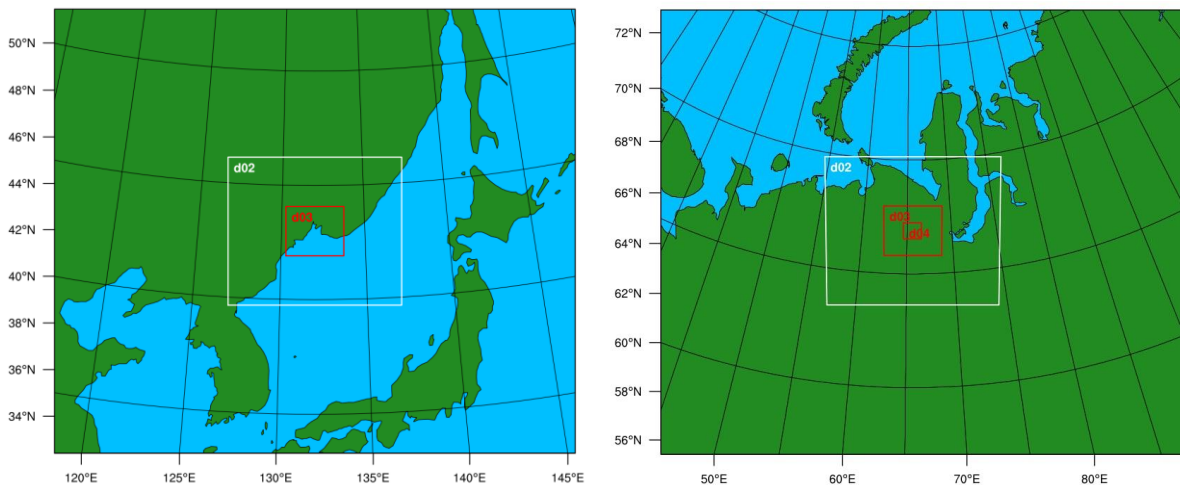


Рисунок 2.2 – Пример областей интегрирования (доменов) для различных регионов

При проведении численных экспериментов использовалась параметризация пограничного слоя Bougeault–Lacarrere Scheme [Bougeault, Lacarrere, 1989], новая упрощенная схема Аракавы-Шуберта [Kwon, Hong, 2017] для описания конвекции и алгоритмы RRTMG для расчета коротковолновой и длинноволновой радиации [Iacono et al., 2008]. Схема Noah-MP и схема MM5 использовалась в качестве модели, описывающей процессы, происходящие на подстилающей поверхности и в почве [Niu et al., 2011; Yang et al., 2011; Jimenez 2012].

Во время проведения численных экспериментов в модели WRF-ARW подключалась современная параметризация городского слоя Building Energy Model [Salamanca, Martilli, 2010].

Выбор данных параметризаций обусловлен опытом работы с моделью и анализом опыта других пользователей, показывающим наиболее подходящее сочетание параметризаций. Однако, выбор параметризаций остается дискуссионным вопросом, так как применение определенной параметризации может значительно улучшать описание одних процессов, но при этом уменьшать точность воспроизведения других.

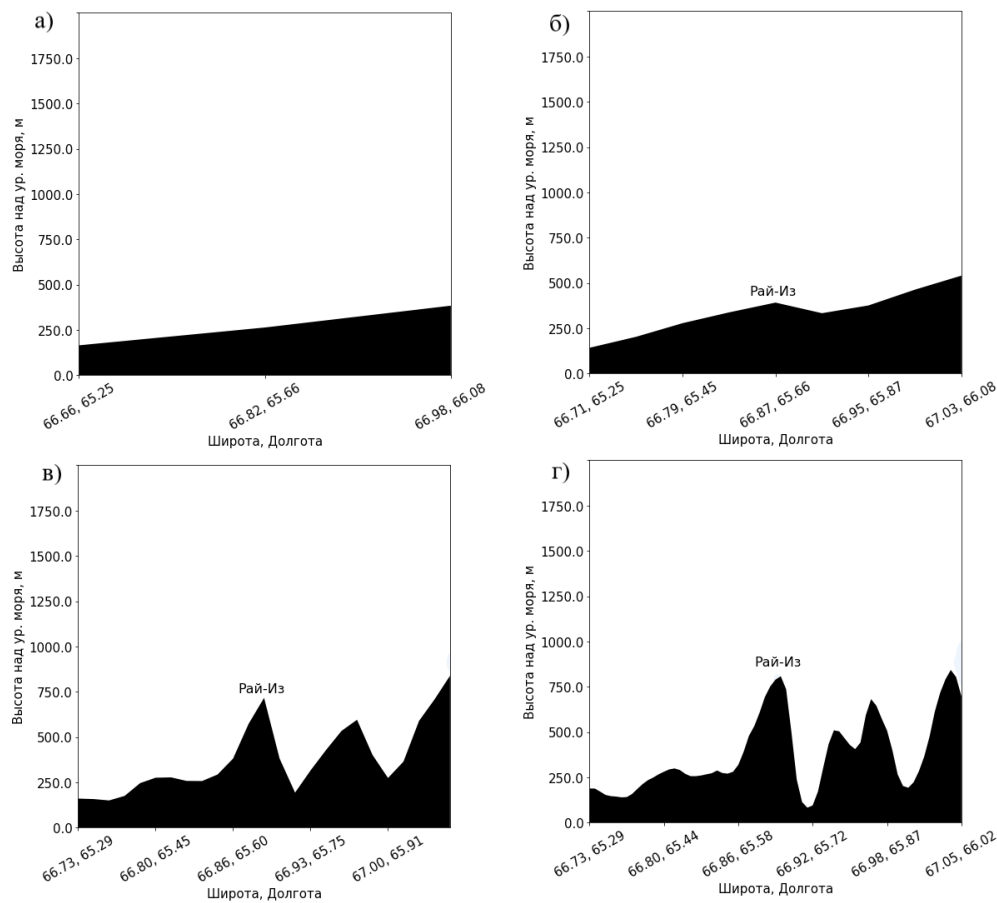


Рисунок 2.3 – Описание рельефа в модели WRF-ARW различных шагов по пространству: а) 18 км; б) 6 км; в) 2 км; г) 667 м

В экспериментах по воспроизведению гололедно-изморозевых отложений наибольшее значение имел выбор параметризации микрофизики. В ходе проведения численных экспериментов использовалась двухмоментная схема NSSL, включающая в себя расчет семи типов гидрометеоров: в виде водяного пара,

облачных капель, дождя, снега, льда, крупы и града [Mansell et al., 2010]. Кроме этого, параметризация позволяла получить поля концентраций ядер кристаллизации и концентрации облачных капель.

Модель запускалась на 72-120 часов для каждого из рассматриваемых периодов обледенения, результаты вычислений записывались с дискретностью в один час.

2.3. Анализ условий формирования гололедно-изморозевых отложений

В данной работе условия формирования гололедно-изморозевых отложений рассматривались по данным обработки многолетних инструментальных наблюдений. Кроме этого, рассматривались отдельные случаи образования особенно опасных гололедно-изморозевых отложений.

2.3.1. Анализ метеорологических условий формирования гололедно-изморозевых отложений

Для каждой из 183 метеорологических станций было получено количество гололедно-изморозевых отложений в виде гололеда, зернистой изморози, кристаллической изморози и мокрого снега. Далее рассчитывалось процентное соотношение этих явлений и выделялся преобладающий вид отложений. По полученным данным были построены карты количества гололедно-изморозевых отложений на территории России. Отдельно рассматривались высокоинтенсивные гололедно-изморозевые отложения, достигающие критериев опасного явления. Для таких явлений строились аналогичные карты.

По данным инструментальных наблюдений исследовались метеорологические условия формирования гололедно-изморозевых отложений на территории России. Для каждого вида отложения были получены диапазоны температуры воздуха и скорости ветра. Отдельные расчеты были произведены для опасных явлений. По данным о толщине, диаметре и массе были получены данные о плотности гололедно-изморозевых отложений.

2.3.2. Синоптический анализ условий формирования гололедно-изморозевых отложений

В начале исследования были отобраны наиболее яркие случаи образования гололедно-изморозевых отложений большого диаметра, произошедшие на территории России. Это случаи отложений гололеда, зернистой изморози и мокрого снега, для анализа условий формирования которых имелось достаточное количество пригодных метеорологических данных.

Были отобраны три случая образования гололеда высокой интенсивности, которые привели к катастрофическим экономическим последствиям. Это случаи гололеда, произошедшие в декабре 2010 и в ноябре 2016 года на Европейской территории России и случай, произошедший в ноябре 2020 года в Приморском крае. Во время этих событий наблюдались отложения гололеда, достигшие критериев опасного явления. Рассматриваемые опасные явления включены в базу данных «Сведения об опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлениях, которые нанесли материальный и социальный ущерб на территории России» [Шамин и др., 2019].

Далее были отобраны случаи формирования высокоинтенсивных отложений зернистой изморози на территории Полярного Урала, в районе горного массива Рай-из (Райиз). Рассматривались три синоптических периода, во время которых над Полярным Уралом сформировалась атмосферная циркуляция, которая привела к образованию опасных отложений зернистой изморози. Выбор данного региона был обусловлен наличием инструментальных наблюдений на метеорологической станции Рай-Из, которая отличается уникальным географическим положением на вершине горного массива Рай-Из (рисунок 2.4), что приводит к высокой повторяемости образования высокоинтенсивных отложений зернистой изморози. Также выбранный район хорошо подходит для проведения численных экспериментов – высота горного массива небольшая, и окружающая территория представляет собой равнину.

Отложения мокрого снега на территории России чаще всего наблюдаются на Дальнем Востоке и в горных районах юга страны. В связи с этим, было отобрано

три случая, которые наиболее полно характеризуют условия формирования опасных отложений в виде мокрого снега. Первым случаем был ледяной шторм, прошедший на юге Сахалина в ноябре 1988 года. Вторым был выбран случай образования отложений в виде мокрого снега на территории полуострова Камчатка в декабре 2008 года. Отдельно стоит отметить, что регионы Дальнего Востока имеют стратегическое значение для развития всей страны, поэтому изучение образований и воздействий опасных явлений на экономику данных регионов стоит отдельной задачей современной метеорологии и климатологии.

Третьим рассматриваемым случаем было образование отложений мокрого снега на перевале Аибга Большого Кавказа. Несмотря на сложность моделирования метеорологических условий в горах, было решено проанализировать данный случай, так как регион Большого Кавказа часто подвержен сильным снегопадам, во время которых образуются отложения мокрого снега.

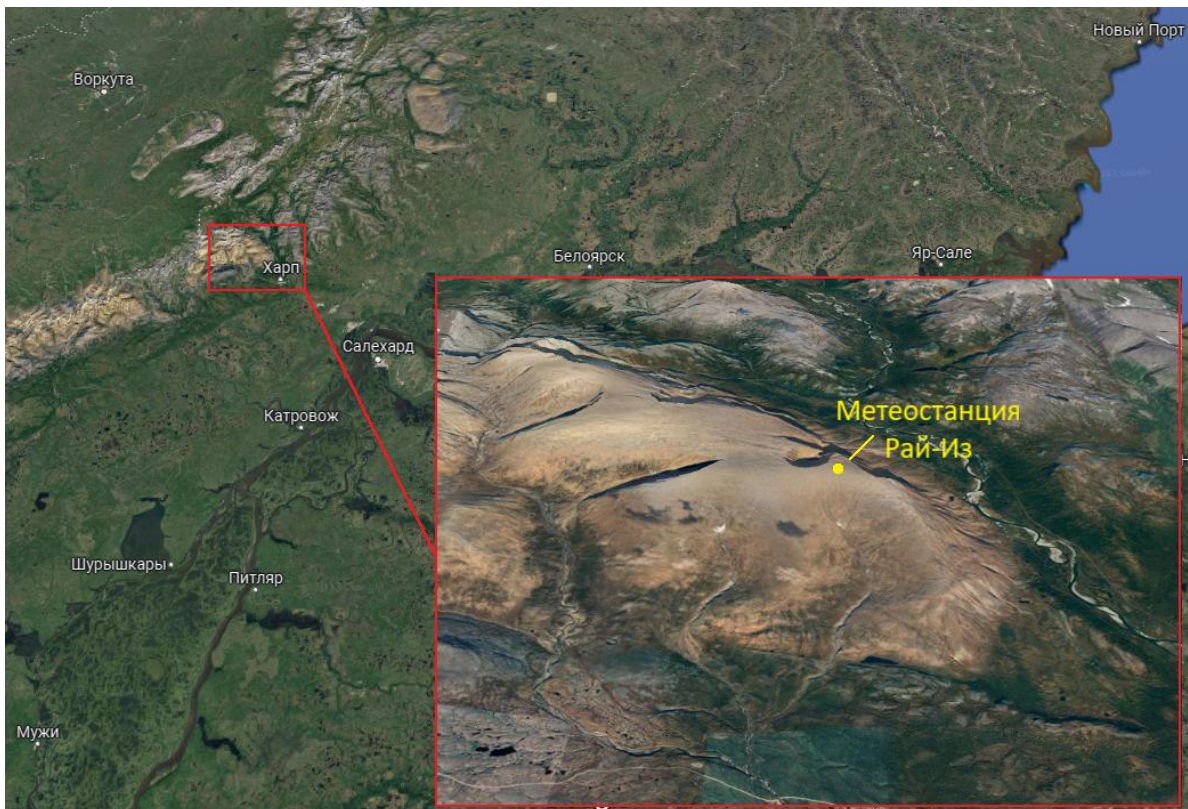


Рисунок 2.4 – Географическое положение метеорологической станции Рай-Из [Google Map, Google Earth]

Информация о характеристиках гололедно-изморозевых отложений для каждого из выбранных случаев приведена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Основные характеристики гололедно-изморозевых отложений для отобранных периодов

| № случая | Дата начала обледенения | Наибольший диаметр отложения, мм | Регионы, подверженные обледенению |
|---------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|---|
| Случаи образования гололеда | | | |
| 1 | 26.12.2010 | 24 | г. Москва, Московская область, Калужская область, Нижегородская область |
| 2 | 10.11.2016 | 24 | г. Москва, Московская область, Тверская область |
| 3 | 19.11.2020 | 29 | Приморский край (г. Владивосток) |
| Случаи образования зернистой изморози | | | |
| 1 | 28.09.1994 | 172 | Ямало-Ненецкий АО |
| 2 | 01.11.1996 | 379 | Ямало-Ненецкий АО |
| 3 | 19.10.1997 | 280 | Ямало-Ненецкий АО |
| Случаи образования мокрого снега | | | |
| 1 | 24.11.1988 | 320 | Сахалинская область (южная часть) |
| 2 | 28.12.2008 | 111 | Камчатский край (пос. Ключи) |
| 3 | 25.12.2018 | 127 | Краснодарский край (перевал Аибга) |

Исследования синоптических условий формирования, описанных выше гололедно-изморозевых отложений, проводилось по данным электронного архива ГИС «Метео» научно-производственного центра «Мэп Мейкер» [Электронный архив...], и данным с метеорологических станций [Булыгина и др. 2014] и станций радиозондирования. Также использовались данные инструментальных измерений гололедно-изморозевых отложений на территории России, предоставленные ВНИИГМИ-МЦД [meteo.ru].

Для каждого из выбранных случаев гололеда были подробно рассмотрены синоптические периоды длиной в десять суток, во время которых формировалась атмосферная циркуляция, ставшая причиной выпадения сильных замерзающих осадков. Аналогичный синоптический анализ выполнялся для случаев образования зернистой изморози и отложений мокрого снега.

В ходе синоптического анализа по срочным данным были восстановлены поля давления и температуры воздуха, области выпадения осадков для каждого срока наблюдения. Были выявлены расположение и перемещение центров действия атмосферы. По данным приземной наноски были восстановлены метеорологические явления, которые наблюдались на метеостанциях,

располагающихся в выбранных областях исследования. Были построены приземные синоптические карты и синоптические карты на изобарической поверхности 850 гПа для всех сроков, по которым были отслежены перемещения атмосферных вихрей и прохождение атмосферных фронтов в районе образования гололедно-изморозевых отложений.

При изучении синоптических условий формирования внутриоблачного обледенения на территории Ямало-Ненецкого округа данные радиозондирования не использовались в связи с большой удаленностью аэрологических станций от места формирования отложений изморози.

2.3.3. Численное моделирование высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений

Основные методы прогнозирования замерзающих осадков описаны в обзорной статье Шакиной Н.П. и соавторов [Шакина и др., 2012], приведенные в главе 1.7. В публикациях последнего времени рассмотрены методы, использующие возможности современных параметризаций микрофизики выделять гидрометеоры различных фазовых состояний [Игнатов и др. 2020]. В настоящей работе использовался схожий подход. Замерзающими считались осадки, во время образования которых, на нижнем сигма-уровне модели отношение гидрометеоров жидкой фазы к общему числу гидрометеоров превышало 80%, и температура воздуха на высоте 2 метров принимала отрицательные значения. Схожие критерии замерзающих осадков используют в модели IFS (Integrated Forecasting System), используемой в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Максимальная толщина отложений была рассчитана по формуле 1.2 (см. главу 1.7).

Для моделирования внутриоблачного обледенения использовался метод, описывающий обтекание воздушным потоком цилиндрического тела [Makkonen, 2000]. Согласно данному методу, интенсивность обледенения рассчитывается по формуле (2.2). Более подробно метод описан в главе 1.7.

$$\frac{dM}{dt} = E \cdot LWC \cdot V \cdot A, \quad (2.2)$$

Коэффициент ослабления E показывает долю переохлажденных капель тумана, которые преобразовались в отложения изморози и рассчитывается по формуле (2.3):

$$E = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \quad (2.3)$$

где α_1 – коэффициент столкновения, α_2 – коэффициент налипания и α_3 – коэффициент намерзания.

В случае моделирования зернистой изморози коэффициенты прилипания и намерзания близки к единице. Коэффициент столкновения в данном случае необходимо рассчитывать, так как часть небольших и легких капель переохлажденного тумана в потоке воздуха огибает препятствие из-за сил инерции. В настоящей работе для оценки массы отложения зернистой изморози использовался аналогичный предложенному Лэнгмюром и Блоджет, но более современный метод [Finstad et al., 1983]. Согласно этому методу, коэффициент столкновения α_1 рассчитывается по формуле (2.4).

$$\alpha_1(K_0) = \begin{cases} 0,489(\log_{10} 8K_0)^{1,978}, & 0,125 < K_0 < 0,9 \\ \frac{K_0}{K_0 + \frac{\pi}{2}}, & K_0 \geq 0,9 \end{cases}, \quad (2.4)$$

где K_0 – безразмерный параметр, рассчитываемый по формуле (2.5).

$$K_0 = 0,125 + \frac{K - 0,125}{1 + 0,0967Re^{0,6367}}, \quad (2.5)$$

где K – число Стокса, Re – число Рейнольдса.

Учитывая типичные условия атмосферы во время обледенения и характеристики объекта, на котором происходит это обледенение (провода гололедного станка), для расчета интенсивности формирования зернистой изморози принимались следующие значения параметров: ρ_w – плотность воды = 1000 кг/м³, D_d – диаметр капли воды = 15 мкм, μ – динамическая вязкость воздуха = 1,7·10⁻⁵ Па·с, D – диаметр цилиндрического тела = 5 мм.

Осадками в виде мокрого снега считались те, во время образования которых на нижнем сигма-уровне модели отношение гидрометеоров жидкой фазы к общему числу гидрометеоров превышало 1% и было ниже 20%, и температура воздуха на

высоте 2 метров принимала положительные значения. Также, как в случае с замерзающими осадками, были выбраны критерии, используемые в модели IFS [Forecast...].

Принятые в данной работе критерии выпадения осадков определенного типа (1–20 и 80–100% гидрометеоров жидкой фазы для мокрого снега и гололеда соответственно) не являются строгими. Важно, чтобы при выделении осадков в виде замерзающего дождя, жидкая фаза гидрометеоров в несколько раз преобладала над твердой. Это нужно для воспроизведения моделью заморозания переохлажденной жидкости на предметах. При формировании отложений в виде мокрого снега, необходимо, чтобы небольшая, но не нулевая, часть гидрометеоров была жидкой фазы.

Представленные в данной работе критерии могут немного варьироваться. Например, в оперативной практике стоит делать критерий более строгим при большом наблюдаемом уровне ложных тревог, и наоборот, ослаблять при большом проценте «пропусков цели».

Выводы к главе 2

Изучение каждого вида гололедно-изморозевых отложений требует индивидуального подхода. Для изучения условий формирования и механизмов образования гололедно-изморозевых отложений необходимо использовать все доступные данные и методы исследований. Эти методы включают в себя обработку многолетних данных наблюдений с использованием математической статистики, проведение классического синоптического анализа с использованием данных визуальных, инструментальных и аэрологических наблюдений, а также проведение численных экспериментов с использованием мезомасштабных моделей атмосферы.

ГЛАВА 3. ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

В главе представлены результаты исследования пространственного распределения гололедно-изморозевых отложений на территории России и метеорологических условий их образования, полученные по данным инструментальных наблюдений. Также рассмотрены физические свойства отложений различных видов и интенсивности.

3.1. Пространственное распределение гололедно-изморозевых отложений

Данные инструментальных наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями позволили получить пространственную картину их распространения на территории России.

На рисунке 3.1 представлена карта количества наблюденных гололедно-изморозевых явлений каждого вида на территории России за весь рассматриваемый период, с 1985 по 2020 год. По данной карте можно выявить пространственные закономерности. В первую очередь эти закономерности связаны с типом климата территории, который определяется общей циркуляцией атмосферы.

Отложения в виде гололеда в первую очередь характерны для Европейской территории России. По классификации Б.П. Алисова — это атлантическая область субарктического климата, атлантико-арктическая, атлантико-континентальная европейская, континентальная восточноевропейская и горная область большого Кавказа умеренного климатического пояса. Для данных регионов во время холодного периода года нередко наблюдаются синоптические условия, во время которых средиземноморские циклоны приносят теплые и влажные воздушные массы, которые при взаимодействии с выхоленной поверхностью континента создают благоприятные условия для выпадения замерзающих осадков. Во-вторых, гололед часто наблюдается на метеорологических станциях, расположенных на побережьях северных морей России — Баренцева, Карского, моря Лаптевых,

Восточно-Сибирского и Чукотского моря. В данном случае гололед образуется преимущественно в переходные сезоны, когда поверхность земли стремительно выхолаживается, но с океана на континент все еще поступает относительно теплый и влажный воздух.

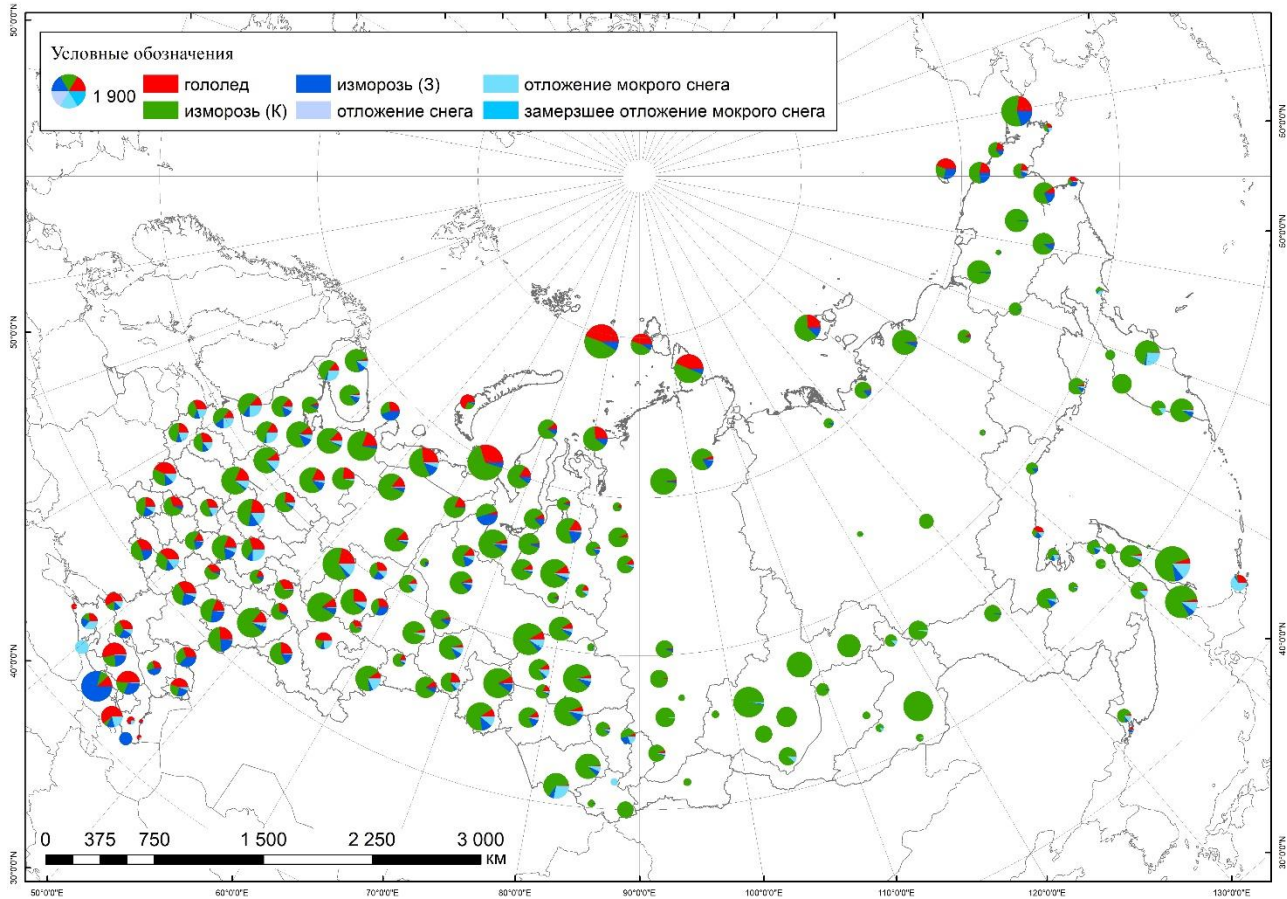


Рисунок 3.1 – Количество гололедно-изморозевых отложений на территории России в период с 1985-2020 год

На территории Западной Сибири процентное соотношение гололеда уменьшается, а на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока гололед является крайне редким явлением (за исключением прибрежных станций).

Кристаллическая изморозь часто наблюдается на всей территории России. Это связано с высокой повторяемостью благоприятных условий для ее образования – сильному радиационному выхолаживанию поверхности, в результате которого происходит сублимация водяного пара. Такие условия наблюдаются повсеместно, даже на юге Европейской части России. Зернистая изморозь – более редкое

явление. Как было показано в главе 1, для формирования зернистой изморози необходимо существование переохлажденного тумана, капли которого сталкиваясь с препятствием будут превращаться в лед. Наибольшая повторяемость зернистой изморози, как и гололеда наблюдается на Европейской территории России, где зимой воздух часто имеет достаточное влагосодержание, для образования переохлажденных туманов с отложением изморози. Отдельно стоит отметить высокую повторяемость зернистой изморози на горных метеорологических станциях, таких как Рай-Из (Ямало-Ненецкий АО) и метеорологической станции на плато Шаджатмаз (Карачаево-Черкессия). На таких метеостанциях зернистая изморозь часто наблюдается в периоды, когда нижняя граница облачности располагается на высоте горных массивов.

Отложения мокрого снега также часто наблюдаются на Европейской территории России, так как в зимнее время осадки в виде снега часто выпадают при температуре воздуха от -2 до 2°C . Особенность распространения мокрого снега состоит в высокой его повторяемости на Дальнем Востоке – Камчатке, Сахалине. Здесь отложения мокрого снега образуются во время выхода мощных зимних циклонов на побережья Берингова, Охотского и Японского морей.

Помимо отложений мокрого снега наблюдаются отложения снега и замерзшие отложение мокрого снега. Но так как количество данных явлений несущественно, их распространение в данной работе не рассматривается.

На рисунке 3.2 показана карта преобладающего вида гололедно-изморозевых отложений на территории России. Практически на всей территории России чаще всего встречается кристаллическая изморозь. Гололед преобладает, в целом, только на юге России и на некоторых прибрежных станциях на Севере России. Зернистая изморозь на метеорологических станциях, имеющих особенное расположение по отношению к рельефу местности, а отложения мокрого снега на некоторых горных станциях и станции на о. Кунашир.

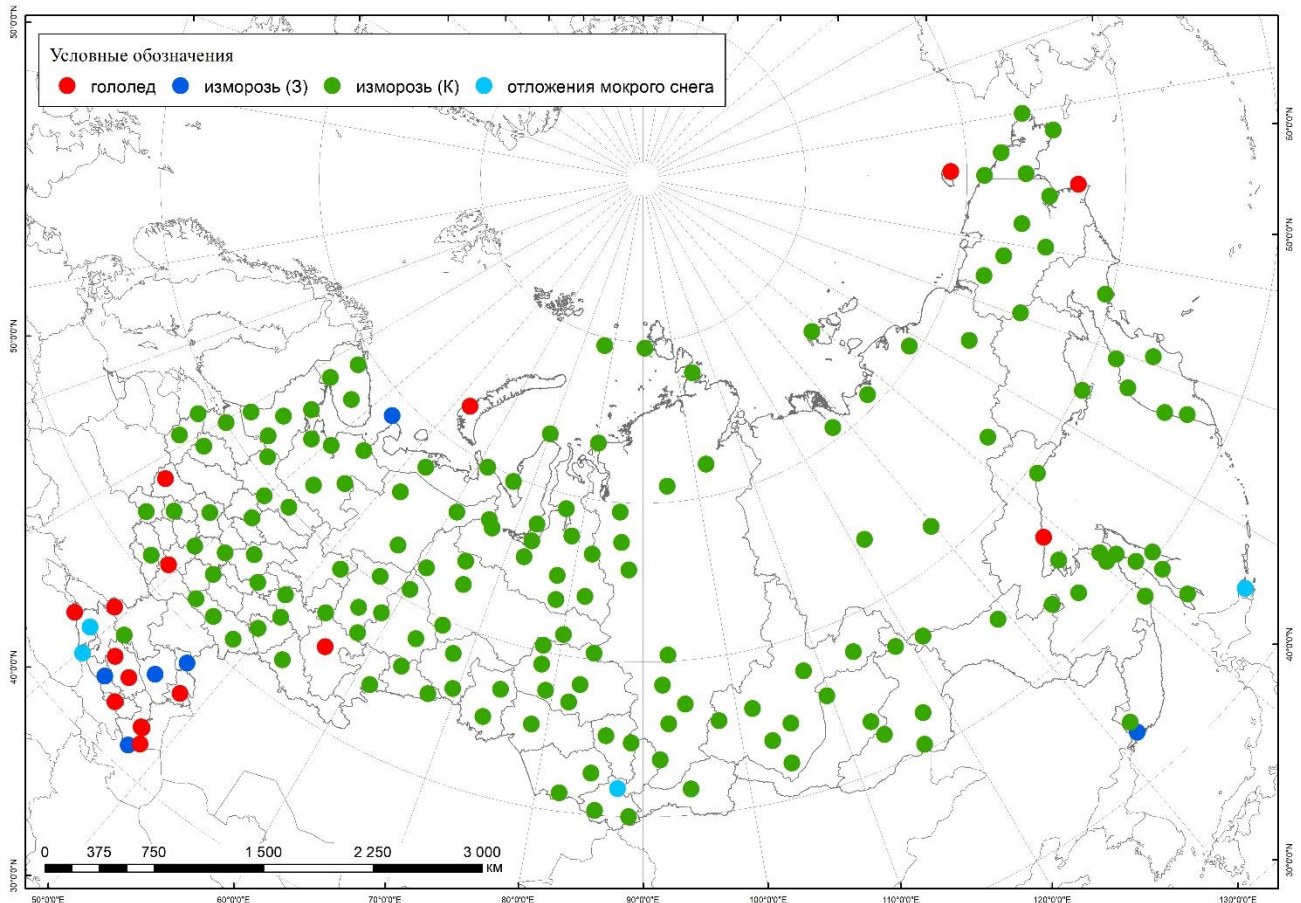


Рисунок 3.2 – Преобладающий вид гололедно-изморозевых отложений на территории России в период с 1985-2020 год

Далее было рассмотрено пространственное распределение гололедно-изморозевых отложений, диаметр которых по данным наблюдений достиг значения критерия опасных явлений.

На рисунке 3.3 показана карта количества опасных гололедных отложений каждого вида. На этой карте особенно сильно выделяются несколько метеорологических станций – Аибга, Рай-Из, Шаджатмаз, также несколько станций северного побережья. Столь высокая повторяемость опасных явлений погоды обусловлена, в том числе, мезометеорологическими условиями, а именно – интенсификацией процесса обледенения в условиях сложного рельефа местности.

Наиболее часто опасные гололедно-изморозевые отложения наблюдаются на Европейской территории России и на Дальнем Востоке, несколько реже в Западной Сибири и крайне редко в Восточной.

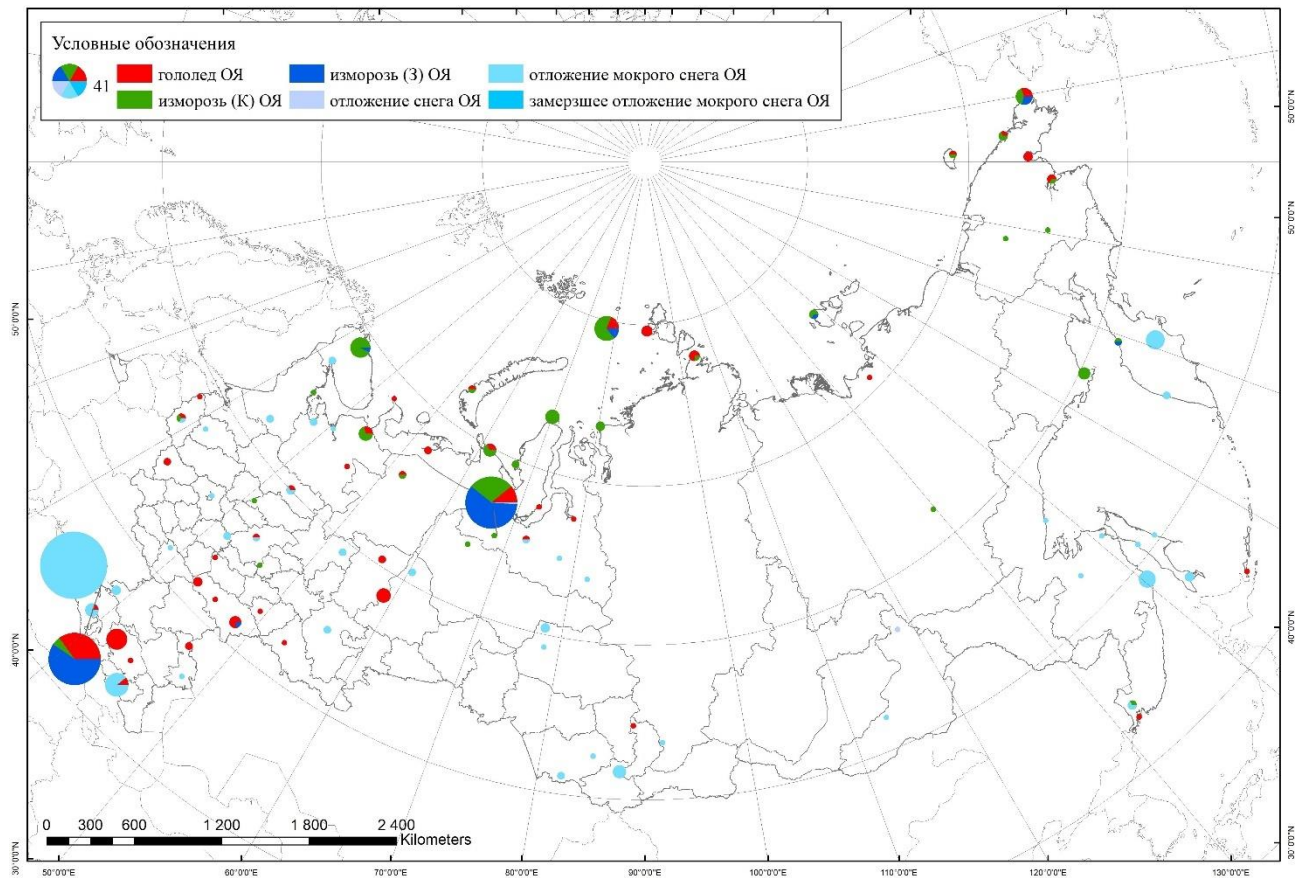


Рисунок 3.3 – Количество опасных гололедно-изморозевых отложений на территории России в период с 1985-2020 год

На рисунке 3.4 показана карта преобладающего вида опасных гололедно-изморозевых отложений. По сравнению с рисунком 3.2 наблюдается значительно большее количество метеостанций, на которых преобладающим видом отложений являются гололед, зернистая изморозь и мокрый снег. На половине рассматриваемых метеорологических станций опасные отложения не наблюдаются. На 35% метеорологических станций преобладает гололед, на 40% – мокрый снег, на 22% – кристаллическая изморозь и на 2% – зернистая.

Это связано с микрофизическими свойствами каждого вида отложений. Как было отмечено в главе 1, кристаллическая изморозь имеет очень маленькую плотность и прочность, поэтому большая часть отложений в виде кристаллической изморози не достигает размеров 50 мм, а даже если и достигает, то не приводит к серьезным последствиям. Остальные виды отложений более плотные и прочные. При достижении большого диаметра они имеют большую массу, что и приводит к обрывам проводов линий электропередачи, падению деревьев и т.д.

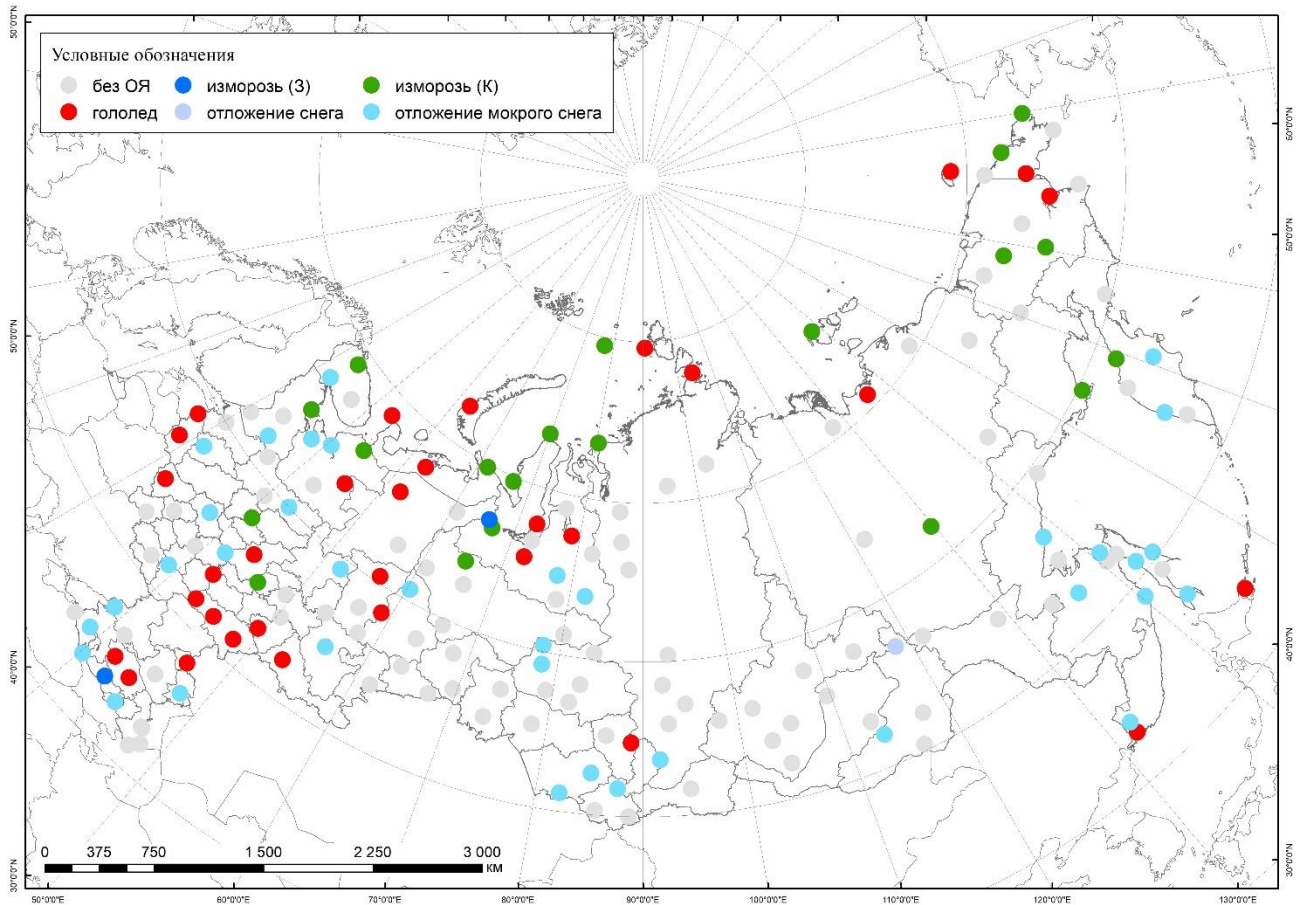


Рисунок 3.4 – Преобладающий вид опасных гололедно-изморозевых отложений на территории России в период с 1985-2020 год

3.2. Метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложений¹

В данной главе рассматриваются метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложений различных видов и интенсивности.

Одним из наиболее важных метеорологических параметров, влияющих на условия образования гололедно-изморозевых отложений, является температура воздуха. Для анализа условий формирования использовалась температура воздуха, измеренная на метеорологических станциях в момент начала обледенения. В результате анализа были получены параметры для выборок температуры в момент начала обледенения каждого из видов гололедно-изморозевых отложений (таблица 3.1). В таблице представлена величина выборки, среднее значение, медиана, стандартное отклонение выборки, а также значения 5, 25, 75 и 95-го

¹ Раздел написан на основе статьи [Леонов, Аржанова, 2023]

процентиля. В таблице приведена информация для общего количества гололедно-изморозевых отложений каждого вида, и для случаев, достигших опасных значений, установленных Росгидрометом.

Таблица 3.1 – Параметры выборок температуры воздуха в момент начала формирования гололедно-изморозевых отложений

| | Гололед | | Изморозь (К) | | Изморозь (З) | | Отложения мокрого снега | |
|-------------------|------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|-------------------------|-----------|
| | все случаи | случаи ОЯ | все случаи | случаи ОЯ | все случаи | случаи ОЯ | все случаи | случаи ОЯ |
| кол-во случаев | 18421 | 128 | 81052 | 108 | 12154 | 121 | 7590 | 256 |
| среднее | -2.1 | -2.4 | -19.1 | -14.2 | -6.7 | -5.4 | 0.0 | 0.3 |
| медиана | -1.3 | -1.5 | -18.0 | -13.8 | -6.0 | -4.9 | 0.1 | 0.2 |
| σ | 2.3 | 2.9 | 8.2 | 6.6 | 4.5 | 3.3 | 1.1 | 0.4 |
| Q _{0.05} | -6.9 | -7.1 | -34.9 | -28.5 | -14.3 | -10.3 | -1.2 | 0.0 |
| Q _{0.25} | -3.0 | -3.1 | -24.1 | -17.2 | -8.5 | -7.2 | -0.1 | 0.1 |
| Q _{0.75} | -0.5 | -0.6 | -13.3 | -10.5 | -3.8 | -2.9 | 0.3 | 0.3 |
| Q _{0.95} | 0.0 | -0.2 | -7.0 | -4.2 | -1.4 | -0.7 | 1.0 | 0.6 |

Расчитанные процентиля использовались для оценки диапазонов температуры воздуха: 25-й и 75-й процентиля использовались для оценки наиболее характерных условий формирования гололедно-изморозевых отложений, 5-й и 95-й процентиля для оценки наиболее вероятных границ рассматриваемых значений.

Данные таблицы 3.1 для наглядности представлены в виде диаграммы размаха (диаграммы «ящик с усами»). Ящики, выделенные цветной заливкой, обозначают 25-й и 75-й процентиля, сплошная линия внутри ящика – медиану, пунктирная – среднее значение выборки. Усами обозначен размах, соответствующий 5-му и 95-му процентилю, точками отмечены выбросы – наблюдения, выходящие за пределы усов. Аналогичные параметры для явлений достигших критериев опасных представлены в виде ящиков серого цвета для каждого из видов отложений (рисунок 3.5).

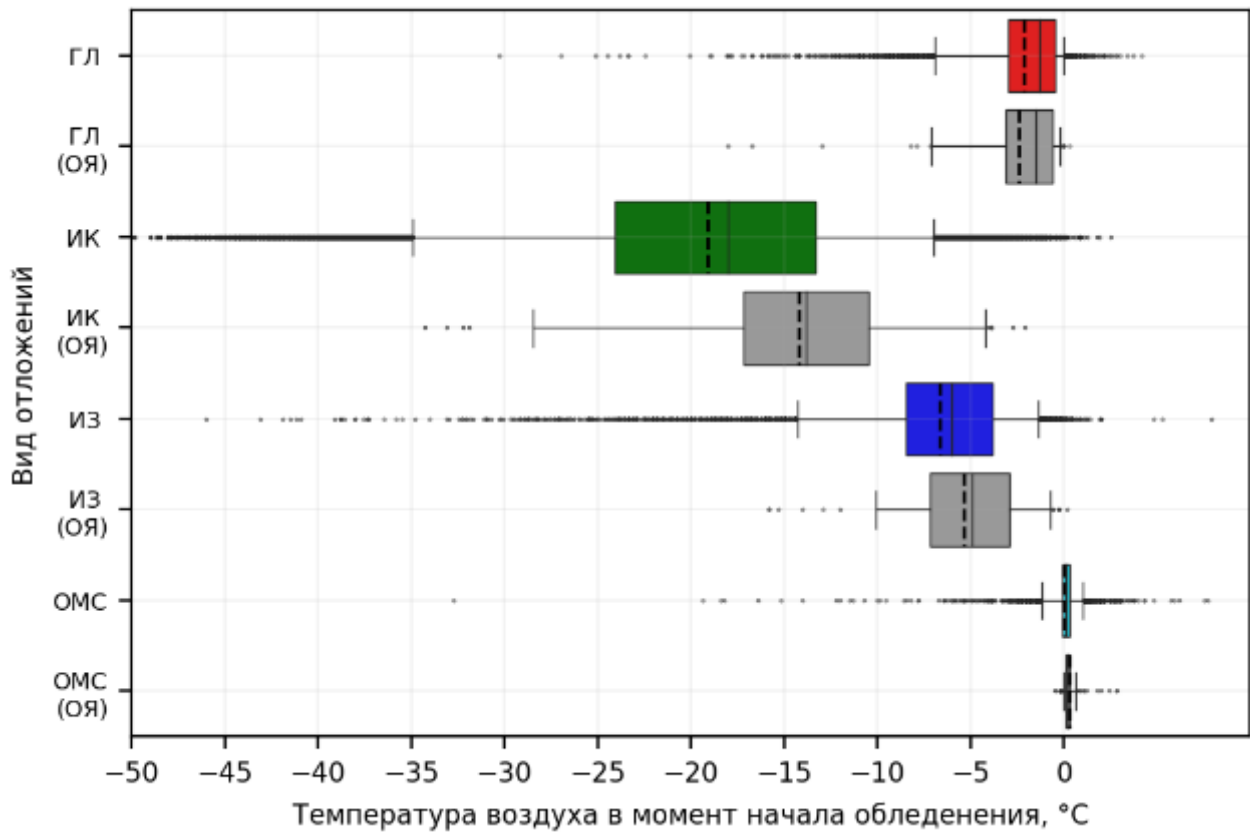


Рисунок 3.5 – Различие наблюдаемой температуры воздуха в момент начала обледенения для каждого из видов гололедно-изморозевых отложений

Гололед образуется преимущественно при температуре воздуха от -3 до $0,5^{\circ}\text{C}$. Для опасных отложений гололеда в среднем характерна немного более низкая температура воздуха. На рисунке 3.5 видно, что опасные отложения гололеда практически никогда не формируются при температуре воздуха выше 0°C , т.к. в случае около нулевой и слабopоложительной температуры воздуха обледенение происходит не так интенсивно из-за таяния льда.

Согласно литературным источникам, отложения в виде кристаллической изморози не приводят к опасным последствиям, однако условия их формирования в данной главе рассматриваются для сравнения с условиями формирования зернистой изморози. Температура воздуха в момент начала образования кристаллической изморози располагается в очень широком диапазоне значений от -35 до -7°C , чаще всего в диапазоне от -24 до -13°C . Это связано с тем, что условия формирования кристаллической изморози, главным образом, связаны с сублимацией водяного пара, и не зависят от развития редко встречающихся

синоптических условий или возникновения редких атмосферных явлений. Опасные отложения кристаллической изморози наблюдаются при более высокой температуре воздуха, в среднем на 5°C , это связано с тем, что более теплый воздух содержит большее количество водяного пара необходимого для последующей сублимации.

Отложения зернистой изморози наиболее часто начинают формироваться при температуре воздуха от $-8,5$ до $-3,8^{\circ}\text{C}$, практически все случаи попадают в температурный диапазон от -15 до -1°C . Опасные отложения начинают формироваться при более высокой температуре воздуха – от $-0,5$ до -10°C . Это, как и в случае, с кристаллической изморозью связано с увеличивающимся пропорционально температуре воздуха влагосодержанием воздушных масс. Также, при более высокой температуре воздуха, капли переохлажденного тумана в среднем имеют больший диаметр, что способствует более интенсивному росту ледяных отложений.

Мокрый снег наблюдается в значительно более узком диапазоне температуры воздуха, чем другие гололедно-изморозевые отложения. Большая часть случаев отложений мокрого снега наблюдалась при температуре воздуха от -1 до 1°C . Опасные отложения мокрого снега вообще образуются при положительной температуре воздуха от 0 до $0,6^{\circ}\text{C}$. Столь узкий диапазон температур вызван физическими свойствами снега. С одной стороны, температура воздуха не может быть слишком низкой, в таком случае снежинки будут полностью твердыми и не смогут удерживаться на препятствиях. С другой стороны, температура воздуха не может быть слишком высокой, в противном случае отложения будут быстро таять и опадать с предметов, на которых происходит обледенение. Таким образом, благоприятные термические условия образования отложений мокрого снега ограничены двумя, очень близкими значениями температуры.

Вторым рассматриваемым параметром была скорость ветра в момент начала обледенения. Результаты исследования представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры выборок скорости ветра в момент начала формирования гололедно-изморозевых отложений

| | Гололед | | Изморозь (К) | | Изморозь (З) | | Отложения мокрого снега | |
|----------------|------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|-------------------------|-----------|
| | все случаи | случаи ОЯ | все случаи | случаи ОЯ | все случаи | случаи ОЯ | все случаи | случаи ОЯ |
| кол-во случаев | 18421 | 128 | 81052 | 108 | 12154 | 121 | 7590 | 256 |
| среднее | 4.2 | 5.1 | 1.5 | 4.0 | 2.6 | 5.5 | 3.2 | 1.2 |
| медиана | 4.0 | 5.0 | 1.0 | 3.0 | 2.0 | 5.0 | 3.0 | 0.0 |
| σ | 2.7 | 3.1 | 1.5 | 3.6 | 2.5 | 4.3 | 2.7 | 2.6 |
| Q0.05 | 1.0 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Q0.25 | 2.0 | 3.0 | 0.0 | 2.0 | 1.0 | 2.0 | 1.0 | 0.0 |
| Q0.75 | 6.0 | 6.0 | 2.0 | 5.0 | 4.0 | 7.0 | 4.0 | 1.0 |
| Q0.95 | 9.0 | 11.1 | 4.0 | 10.3 | 7.0 | 14.0 | 8.0 | 6.0 |

Также полученные данные из таблицы 3.2 были представлены в виде диаграммы размаха (рисунок 3.6).

По данным из таблицы 3.2 можно сделать вывод о том, что гололед образуется при относительно высокой скорости ветра, в среднем 4,2 м/с. Наиболее часто отложения в виде гололеда начинают формироваться при скорости ветра от 2 до 6 м/с. По данным наблюдений опасные отложения в виде гололеда наиболее часто формировались при более высокой скорости ветра. Это связано с тем, что при увеличении скорости ветра увеличивается количество капель замерзающей мороси и замерзающего дождя, которые сталкиваются с препятствием и образуют ледяное отложение.

Метеорологические условия образования кристаллической изморози отличаются низкой наблюдаемой скоростью ветра в момент начала обледенения – обычно от 0 до 2 м/с, и практически никогда при скорости ветра более 4 м/с. Данный вид отложений наиболее часто связан с сублимацией водяного пара, которая происходит в условиях радиационного выхолаживания, часто с образованием тумана. Высокая скорость ветра является неблагоприятным условием образования таких синоптических и мезометеорологических условий. Из

рисунка 3.6 видно, что опасные отложения кристаллической изморози наблюдались при более высокой скорости ветра. Это, вероятно, связано с ошибками в наблюдениях, когда наблюдатель записывал данные о зернистой изморози как о кристаллической.

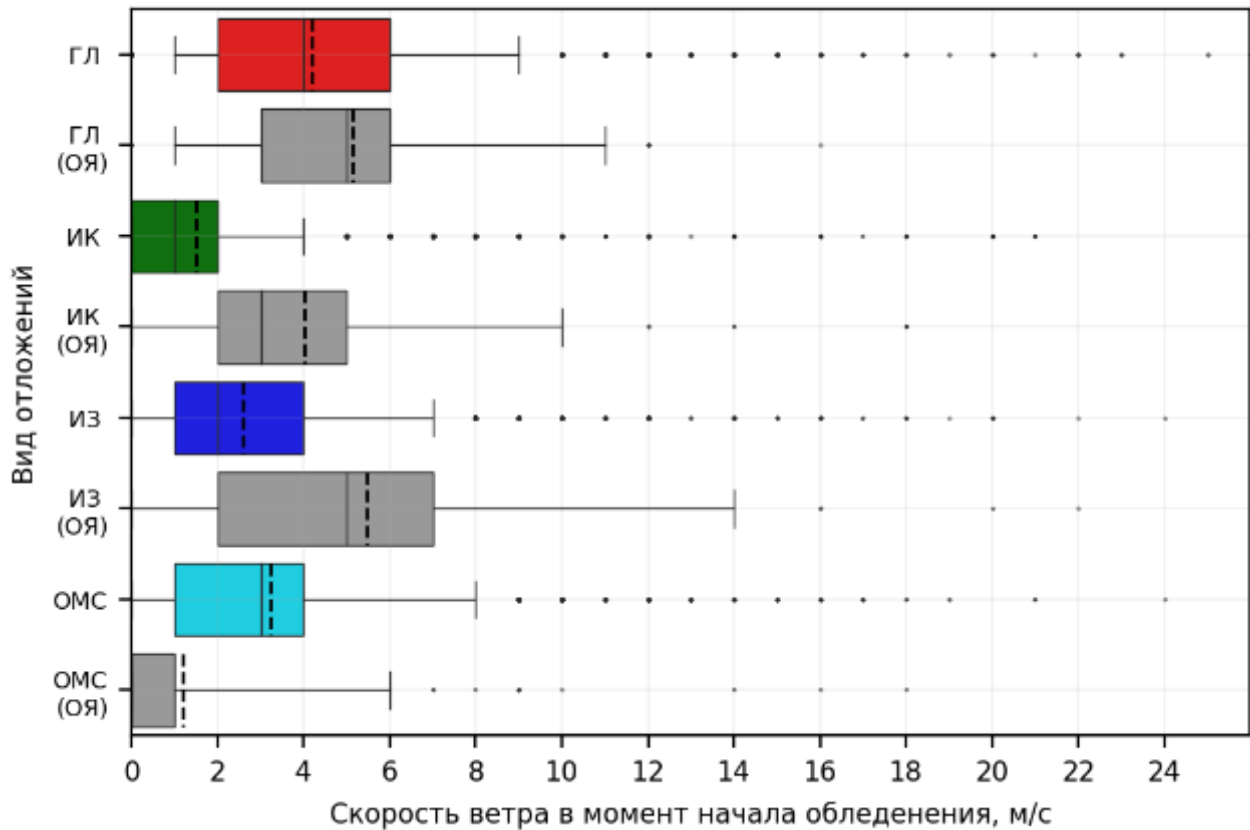


Рисунок 3.6 – Различия наблюдаемой скорости ветра в момент начала обледенения для каждого из видов гололедно-изморозевых отложений

Отложения в виде зернистой изморози формируются при столкновении капель переохлажденного тумана с предметами. Наиболее часто зернистая изморозь начинает образовываться при невысокой скорости ветра, от 1 до 4 м/с. Однако в отдельных случаях обледенение может происходить при очень высокой скорости ветра, достигающей 15 м/с и более. Такие условия формирования наиболее характерны для опасных отложений зернистой изморози, наблюдающихся в сложных орографических условиях, когда обледенение происходит в следствие усиления ветра при перетекании возвышенностей и при одновременном туманообразовании. Также высокая скорость ветра при зернистой

изморози может наблюдаться в моменты, когда нижняя граница облаков располагается ниже уровня станции.

Отложения мокрого снега чаще всего начинают образовываться при скорости ветра от 1 до 4 м/с. Однако данный вид гололедно-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 предметов 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 2 м/с.

На рисунке 3.7 представлены дифференциальные функции распределения температуры воздуха и скорости ветра в момент начала обледенения и диаграммы рассеяния для гололеда, мокрого снега, кристаллической и зернистой изморози. Цветом закрашены функции распределения для общего количества гололедно-изморозевых отложений, а серым цветом только для отложений достигших критериев опасного явления. Каждая точка диаграммы рассеяния представляет собой одно наблюдение в координатах температура-скорость ветра, цветные точки соответствуют общему количеству наблюдений, черные наблюдением опасным явлениям.

Представленные диаграммы суммируют описанную выше информацию об условиях формирования гололедно-изморозевых отложений и позволяют рассмотреть отличия метеорологических условий формирования гололедно-изморозевых отложений невысокой интенсивности и отложений, достигших опасных значений для каждого вида.

Приведенные оценки благоприятных температурно-ветровых условий образования изморози хорошо согласуются с полученными ранее оценками, сделанными по данным 15 метеорологических станций на территории ЯНАО [Leonov, Sokolikhina, 2022].

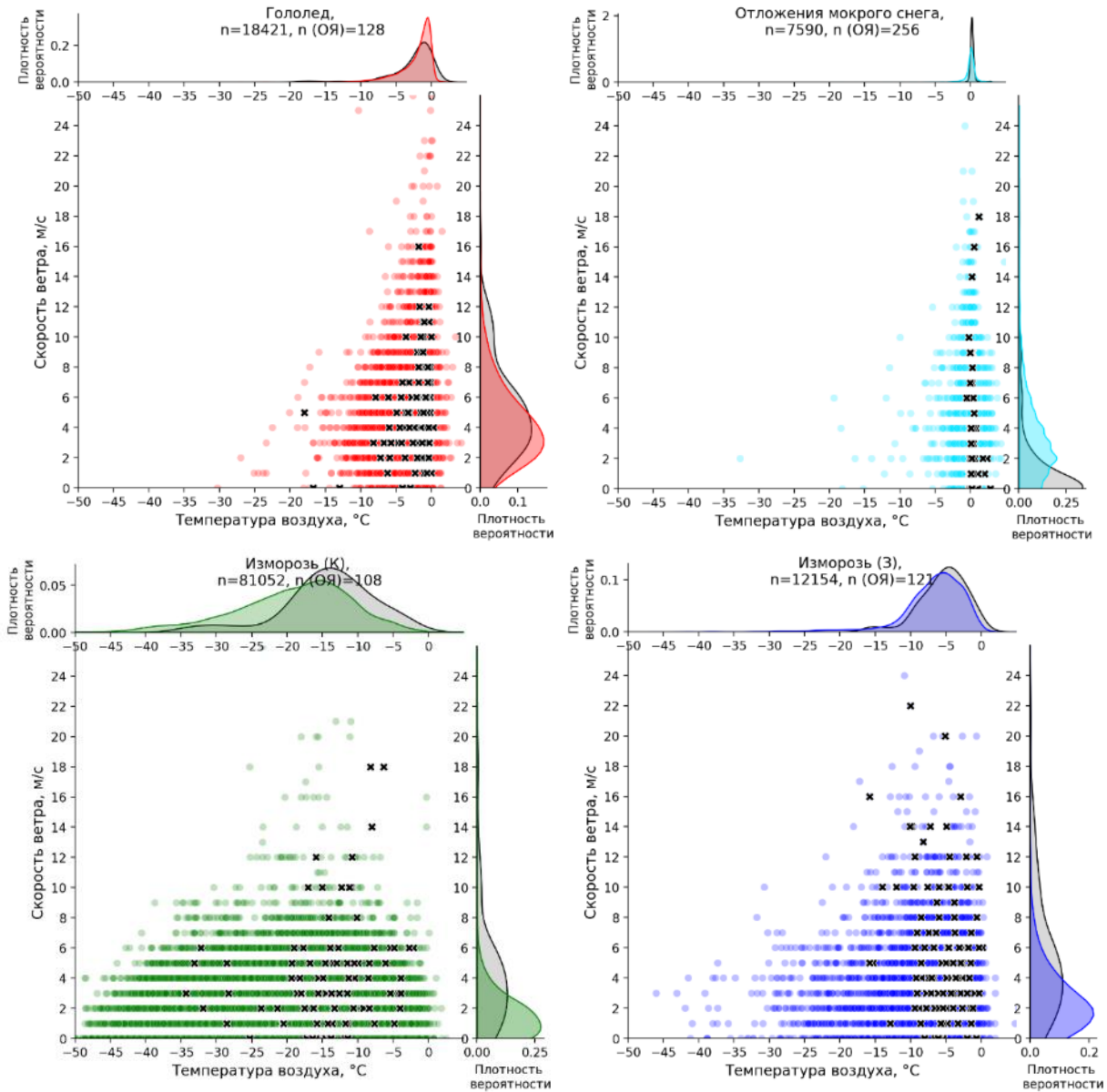


Рисунок 3.7 – Дифференциальные функции распределения температуры воздуха и скорости ветра в момент начала обледенения и диаграммы рассеяния для гололеда, мокрого снега, кристаллической и зернистой изморози

Важной характеристикой, наблюдаемой на метеорологических станциях, является продолжительность фазы нарастания обледенения. Продолжительность нарастания льда напрямую влияет на размеры и массу гололедно-изморозевых отложений. Кроме этого, продолжительность фазы нарастания обледенения имеет особенное прикладное значение. Так, например, при продолжающемся обледенении проводов линий электропередачи затруднена ликвидация последствий, возникающих из-за обледенения.

Данные о продолжительности фазы нарастания гололедно-изморозевых отложений для каждого из видов приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Параметры выборок продолжительности фазы нарастания гололедно-изморозевых отложений

| | Гололед | | Изморозь (К) | | Изморозь (З) | | Отложения мокрого снега | |
|-------------------|------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|-------------------------|-----------|
| | все случаи | случаи ОЯ | все случаи | случаи ОЯ | все случаи | случаи ОЯ | все случаи | случаи ОЯ |
| кол-во случаев | 18421 | 128 | 81052 | 108 | 12154 | 121 | 7590 | 256 |
| среднее | 4.5 | 22.2 | 8.8 | 47.4 | 6.9 | 26.8 | 3.3 | 6.5 |
| медиана | 3.0 | 16.0 | 6.0 | 36.0 | 5.0 | 22.0 | 2.0 | 5.0 |
| σ | 6.0 | 16.5 | 14.3 | 44.6 | 7.6 | 15.9 | 3.4 | 6.1 |
| Q _{0.05} | 0.0 | 6.0 | 2.0 | 13.0 | 1.0 | 11.0 | 1.0 | 1.0 |
| Q _{0.25} | 1.0 | 11.0 | 3.0 | 21.0 | 3.0 | 17.0 | 1.0 | 3.0 |
| Q _{0.75} | 5.0 | 28.0 | 9.0 | 55.0 | 9.0 | 34.0 | 4.0 | 8.0 |
| Q _{0.95} | 14.0 | 56.5 | 24.0 | 127.5 | 19.0 | 58.0 | 9.0 | 15.4 |

Для наглядности данные о продолжительности представлены в виде диаграмм размаха (рисунок 3.8).

Продолжительность фазы нарастания гололеда обычно составляет от 1 до 5 часов, в среднем 4,5 часа. В некоторых отдельных случаях продолжительность нарастания может превышать сутки и достигать продолжительности более 50 часов, такие условия обычно связаны с опасными отложениями гололеда.

Нарастание отложений изморози обоих видов в среднем имеет более высокую продолжительность – 8,8 и 6,9 часов для кристаллической и зернистой изморози соответственно. Большая средняя продолжительность фазы нарастания связана с иными условиями формирования отложений. Так, например, кристаллическая изморозь образуется во время сильного радиационного выхолаживания поверхности земли, которое можно продолжаться несколько суток. Как следствие этого, отложения кристаллической изморози в отдельных случаях нарастают в течение 5 и более суток. Наблюдаемые случаи зернистой изморози,

достигающие критериев опасного явления, также имеют существенно большую продолжительность фазы нарастания чем случаи образования изморози небольшого диаметра.

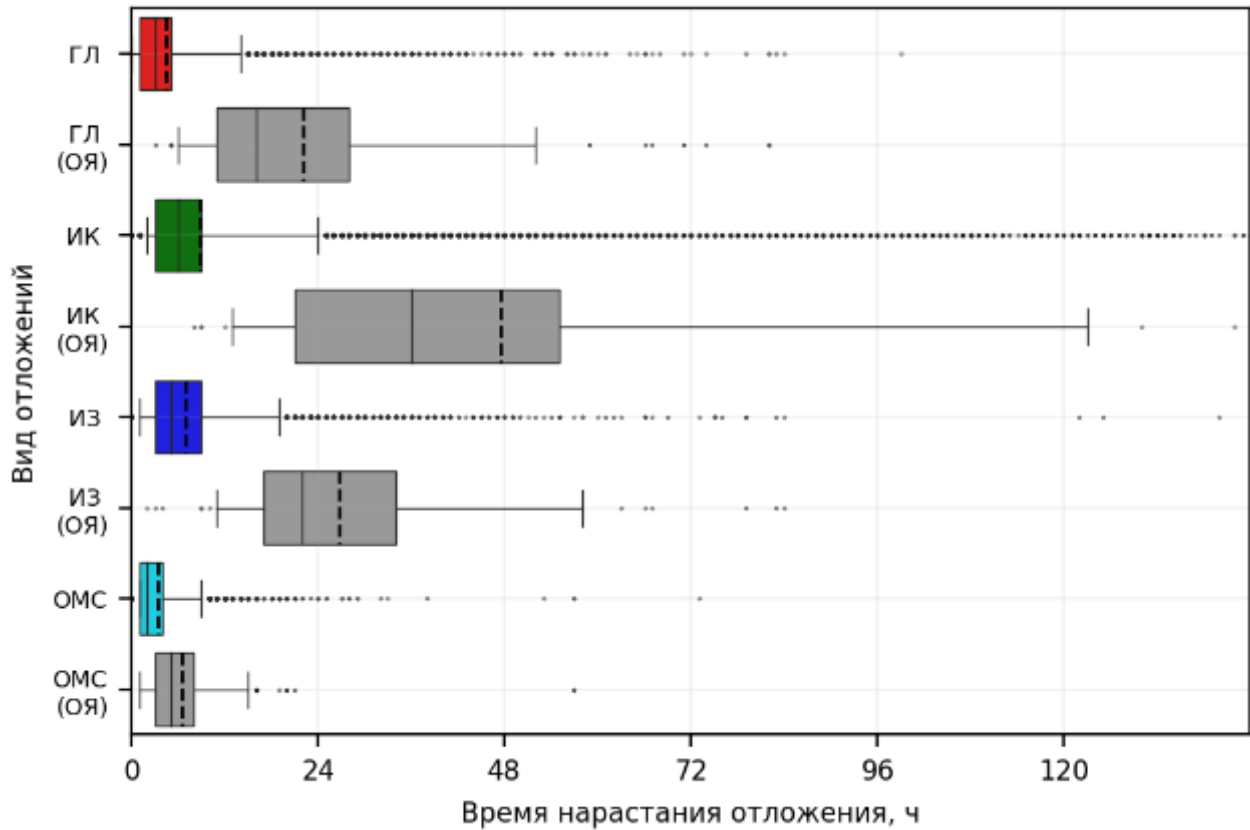


Рисунок 3.8 – Различия времени нарастания для каждого из видов гололедно-изморозевых отложений

Отложения мокрого снега имеют наименьшую продолжительность фазы нарастания отложений. Главным образом, это связано с условиями формирования отложений в виде мокрого снега. Отложения мокрого снега преимущественно связаны с выпадением интенсивных осадков в виде мокрого снега, которые наиболее часто вызваны прохождением атмосферных фронтов в мощных южных циклонах. Выше было показано, что температурные условия формирования лежат в очень узком диапазоне (от $-1,2$ до 1°C). Таким образом, период формирования отложений данного вида зависит от совокупности благоприятных условий и обычно не превышает 4 часов.

3.3. Диаметр и плотность гололедно-изморозевых отложений²

Следующий рассмотренный параметр – диаметр гололедно-изморозевых отложений. Этот параметр важен, поскольку именно величина диаметра отвечает за присвоение гололедно-изморозевым отложениям статуса опасного явления. Результаты анализа диаметра отложений представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Параметры выборок диаметра гололедно-изморозевых отложений

| | Гололед | | Изморозь (К) | | Изморозь (З) | | Отложения мокрого снега | |
|-------------------|------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|-------------------------|-----------|
| | все случаи | случаи ОЯ | все случаи | случаи ОЯ | все случаи | случаи ОЯ | все случаи | случаи ОЯ |
| кол-во случаев | 18421 | 128 | 81052 | 108 | 12154 | 121 | 7590 | 256 |
| среднее | 2.4 | 33.2 | 4.6 | 72.7 | 6.4 | 78.0 | 7.6 | 55.5 |
| медиана | 1.0 | 28.0 | 3.0 | 63.0 | 3.0 | 64.0 | 4.0 | 48.5 |
| σ | 3.7 | 16.5 | 6.2 | 28.6 | 11.0 | 47.2 | 11.5 | 20.3 |
| Q _{0.05} | 0.0 | 20.0 | 0.0 | 50.0 | 1.0 | 50.0 | 1.0 | 35.0 |
| Q _{0.25} | 1.0 | 23.8 | 1.0 | 56.0 | 2.0 | 54.0 | 2.0 | 39.0 |
| Q _{0.75} | 3.0 | 37.0 | 6.0 | 75.0 | 7.0 | 81.0 | 8.0 | 65.0 |
| Q _{0.95} | 7.0 | 60.0 | 15.0 | 129.5 | 22.0 | 161.0 | 28.0 | 96.2 |

Полученные данные были представлены в виде диаграммы размаха (рисунок 3.9).

По данным диаграммы отложения в виде гололеда имеют заметно более низкие значения диаметра отложений. 90% наблюдаемых случаев гололеда имеет диаметр отложений от 1 до 7 мм, а наиболее часто встречающиеся случаи не превышают 3 мм. В первую очередь это связано с тем, что гололед образуется в следствие выпадения замерзающих осадков, по этой причине гололед имеет более высокую плотность и как следствие меньший объем и диаметр. Опасные отложения гололеда могут достигать значения более 60 мм. Такие отложения наблюдаются крайне редко на метеорологических станциях, однако регулярно наблюдаются на

² Раздел написан на основе статьи [Леонов, Аржанова, 2023]

воздушных линиях электропередачи при ликвидации аварий, произошедших из-за образования гололеда.

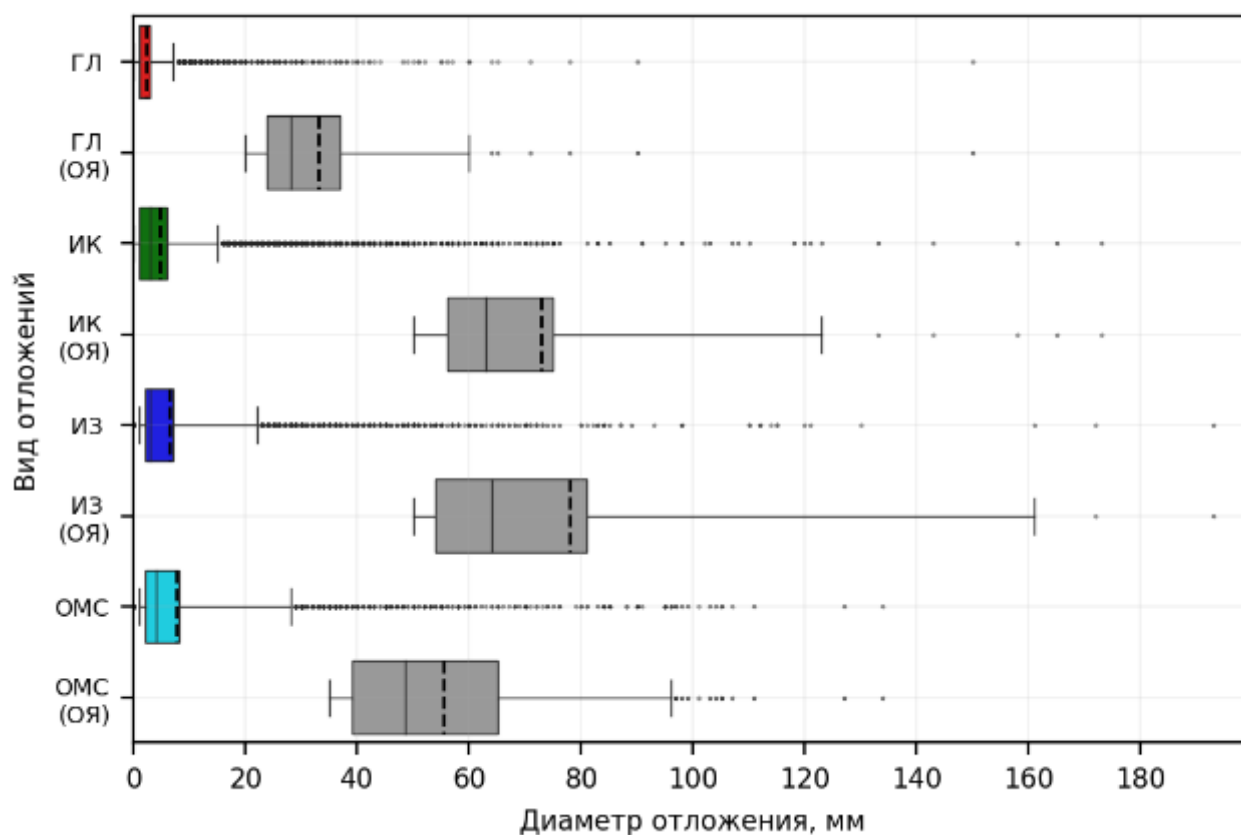


Рисунок 3.9 – Различие диаметра обледенения для каждого из видов гололедно-изморозевых отложений

Зернистая и кристаллическая изморозь в среднем имеют больший диаметр, чем гололед из-за меньше плотности отложений. Медианное значение для обоих видов изморози составляет 3 мм, однако среднее значение существенно отличается и равно 4,6 и 6,4 мм для кристаллической и зернистой изморози соответственно. Данное различие обусловлено высокими значениями наблюдаемых диаметров опасных отложений зернистой изморози. Значение 95-го перцентиля для опасных отложений зернистой изморози составляет 161 мм. Такие отложения, как правило, наблюдаются на метеорологических станциях, имеющих особенные микроклиматические условия, способствующие образованию высокоинтенсивных отложений изморози. К таким метеорологическим станциям относятся Рай-Из и Шаджатмаз.

Метеорологическая станция Рай-Из располагается на территории горного хребта Рай-Из, относящегося к Полярному Уралу. Наблюдения проводятся на высоте 890 м над уровнем моря. Метеорологическая станция Шаджатмаз располагается на высоте 2056 м над уровнем моря, на территории Скалистого хребта Большого Кавказа. Из-за горного расположения на данных метеорологических станциях часто наблюдается обтекание облаками горных хребтов, которое становится причиной особенно интенсивного внутриоблачного обледенения.

Отложения мокрого снега в среднем имеют больший диаметр чем у гололеда и у всех видов изморози. Этот факт является следствием того, что интенсивность обледенения вследствие выпадения атмосферных осадков выше, чем у внутриоблачного обледенения, а также мокрый снег имеет меньшую плотность, чем жидкие замерзающие осадки. Опасные отложения мокрого снега, напротив, имеют в среднем меньший диаметр, чем отложения зернистой изморози, т.к. их образование в первую очередь определяется синоптическими условиями и не столь сильно зависит от микроклиматических условий местности и местных мезомасштабных циркуляций.

На рисунке 3.10 представлены дифференциальные функции распределения продолжительности фазы нарастания обледенения и диаметра гололедно-изморозевых отложений, и диаграммы рассеяния для гололеда, мокрого снега, кристаллической и зернистой изморози в координатах диаметр-продолжительность нарастания.

Представленные схемы еще раз подтверждают вывод о том, что для опасных отложений в целом характерна более продолжительная фаза нарастания. Очевидно, что при сохранении благоприятных условий, величина отложения прямо пропорциональна времени обледенения.

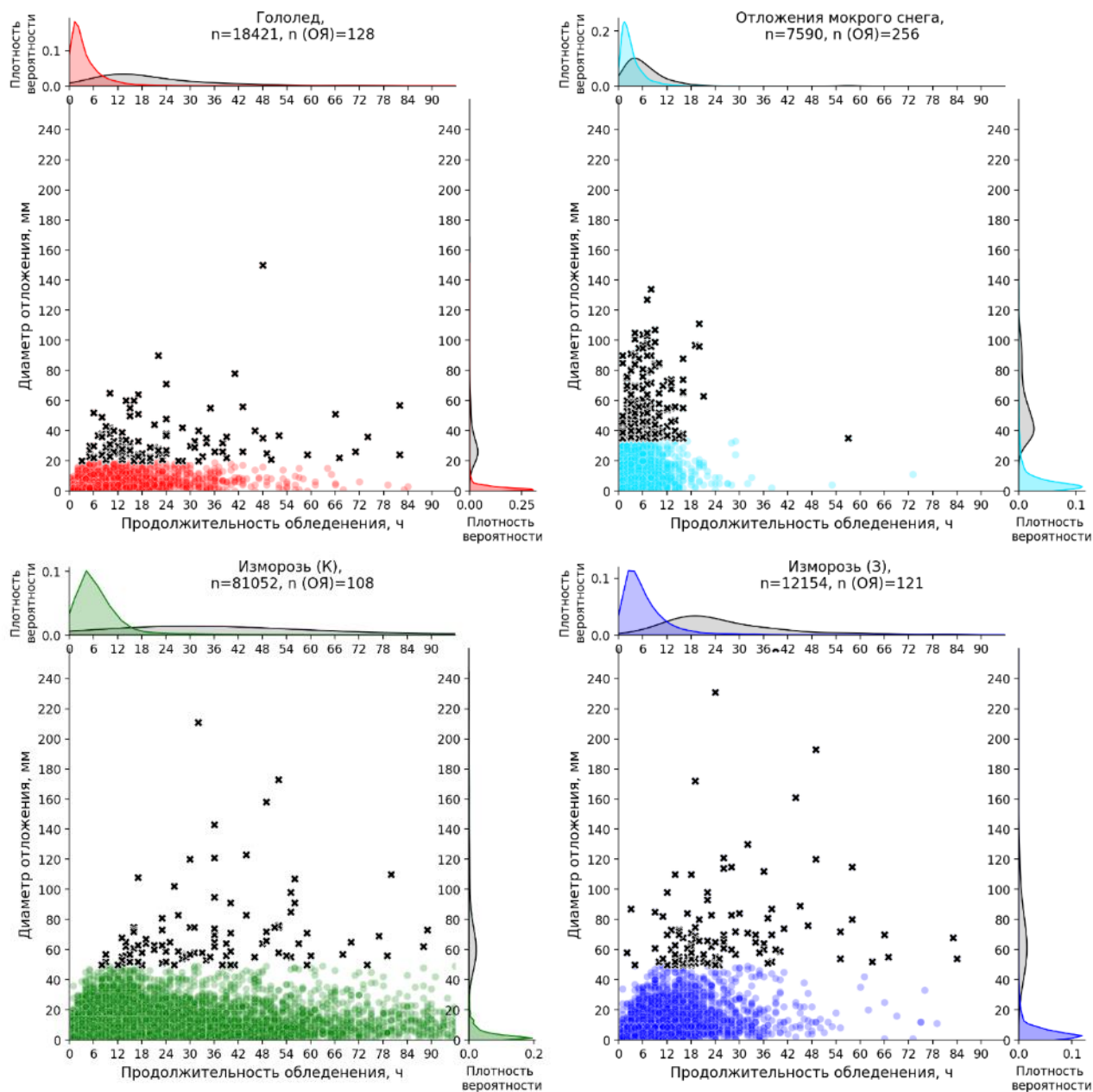


Рисунок 3.10 – Дифференциальные функции распределения продолжительности фазы нарастания обледенения и диаметра отложения и диаграммы рассеяния для гололеда, мокрого снега, кристаллической и зернистой изморози

В типовом перечне опасных и неблагоприятных явлений погоды в качестве критерия опасности принят диаметр отложения, хотя фактически на опасность гололедно-изморозевых отложений влияет их масса. Таким образом, одним из наиболее важных физических свойств гололедно-изморозевых отложений является их плотность. В данном разделе представлены результаты оценки плотности гололедно-изморозевых отложений различных видов, полученных с использованием методики, предложенной в разделе 2.1.3.

На рисунке 3.11 представлены гистограммы, показывающие повторяемость рассчитанной плотности гололедно-изморозевых отложений. Цветными столбцами показана повторяемость плотности общего количества отложений, серыми – отложений достигших критериев опасного явления.

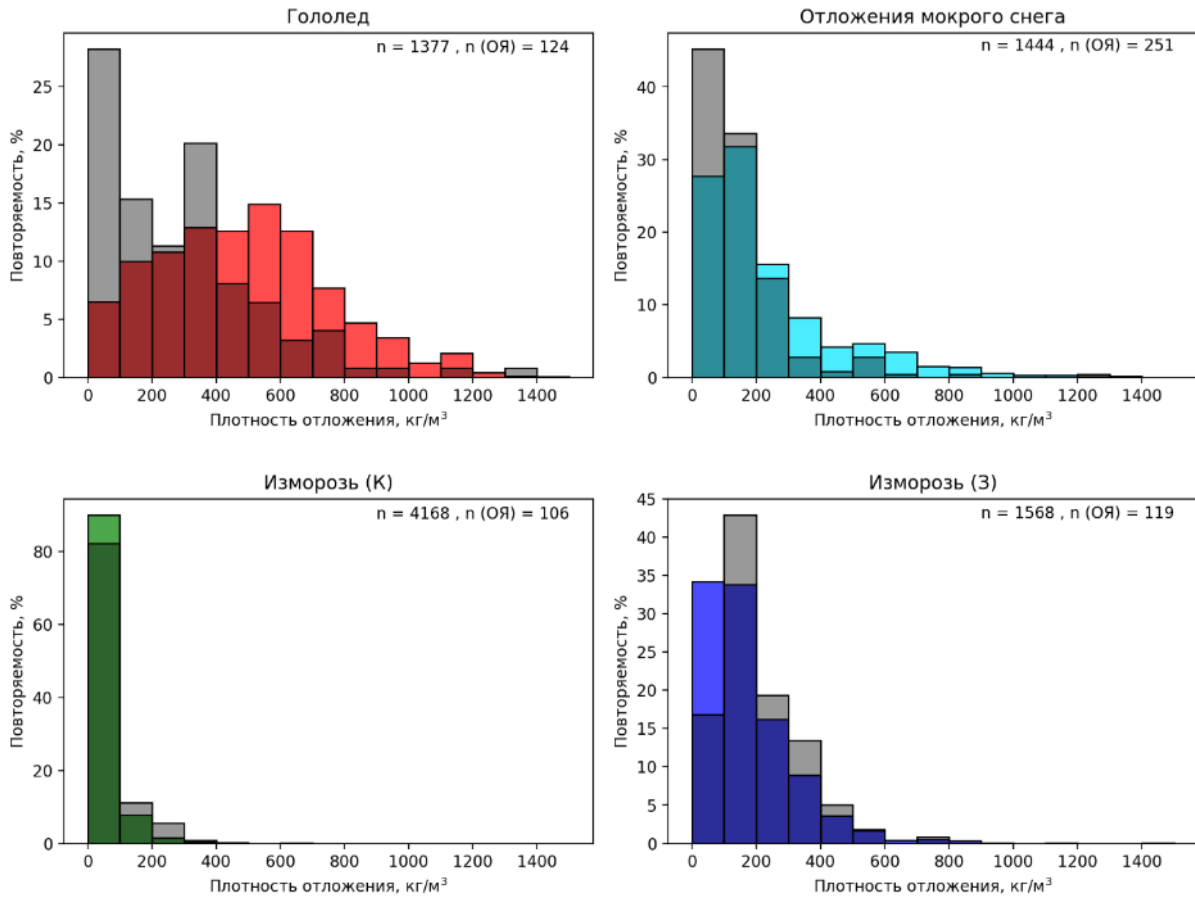


Рисунок 3.11 – Гистограммы повторяемости рассчитанной плотности отложений для гололеда, мокрого снега, кристаллической и зернистой изморози

Из рисунка 3.11 можно сделать вывод о том, что плотность каждого из видов гололедно-изморозевых отложений сильно отличается. Параметры выборок для каждого из видов представлены в таблице 3.5. Стоит отметить, что плотность была рассчитана не для всех отложений, а только для тех, где были проведены измерения массы отложения, поэтому размер выборки для общего количества явлений на порядок ниже, чем при анализе метеорологических условий, приведенном в главе 3.2.

Таблица 3.5 – Параметры выборок рассчитанной плотности гололедно-изморозевых отложений

| | Гололед | | Изморозь (К) | | Изморозь (З) | | Отложения мокрого снега | |
|----------------|------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|-------------------------|-----------|
| | все случаи | случаи ОЯ | все случаи | случаи ОЯ | все случаи | случаи ОЯ | все случаи | случаи ОЯ |
| кол-во случаев | 1386 | 124 | 4219 | 107 | 1577 | 119 | 1447 | 251 |
| среднее | 492 | 287 | 54 | 59 | 179 | 206 | 241 | 157 |
| медиана | 479 | 247 | 41 | 31 | 144 | 178 | 159 | 108 |
| σ | 282 | 246 | 50 | 63 | 147 | 126 | 236 | 200 |
| $Q_{0.05}$ | 78 | 29 | 15 | 13 | 30 | 62 | 44 | 40 |
| $Q_{0.25}$ | 275 | 77 | 26 | 20 | 79 | 118 | 92 | 71 |
| $Q_{0.75}$ | 656 | 397 | 64 | 71 | 236 | 267 | 301 | 182 |
| $Q_{0.95}$ | 975 | 759 | 139 | 206 | 452 | 461 | 680 | 410 |

Наибольшую плотность имеют отложения в виде гололеда. Среднее значение плотности – 492 кг/м^3 , медианное – 479 кг/м^3 . Наиболее часто, плотность гололеда составляет от 275 до 656 кг/м^3 (рисунок 3.12). Полученные значения достаточно сильно отличаются от литературных данных, где плотность гололеда часто принимается близкой к 900 кг/м^3 [Тимофеева, Титов, 2017]. В первую очередь это связано с тем, что за плотность гололеда часто принимается плотность чистого льда. В атмосфере чистый лед образуется довольно редко, обычно ледяные отложения содержат воздушную прослойку. Во-вторых, стоит учитывать погрешность в расчетах плотности из-за неточностей в измерении диаметра, толщины и массы отложения, а также несовершенстве метода расчета плотности по величине диаметра и толщины отложения.

Часть отложений в виде гололеда имеет плотность менее 200 кг/м^3 . Такие значения могут быть связаны как с погрешностями в расчетах, так и с особенностями отдельных разновидностей гололеда. Отложения, имеющие плотность более 900 кг/м^3 , можно считать выбросами.

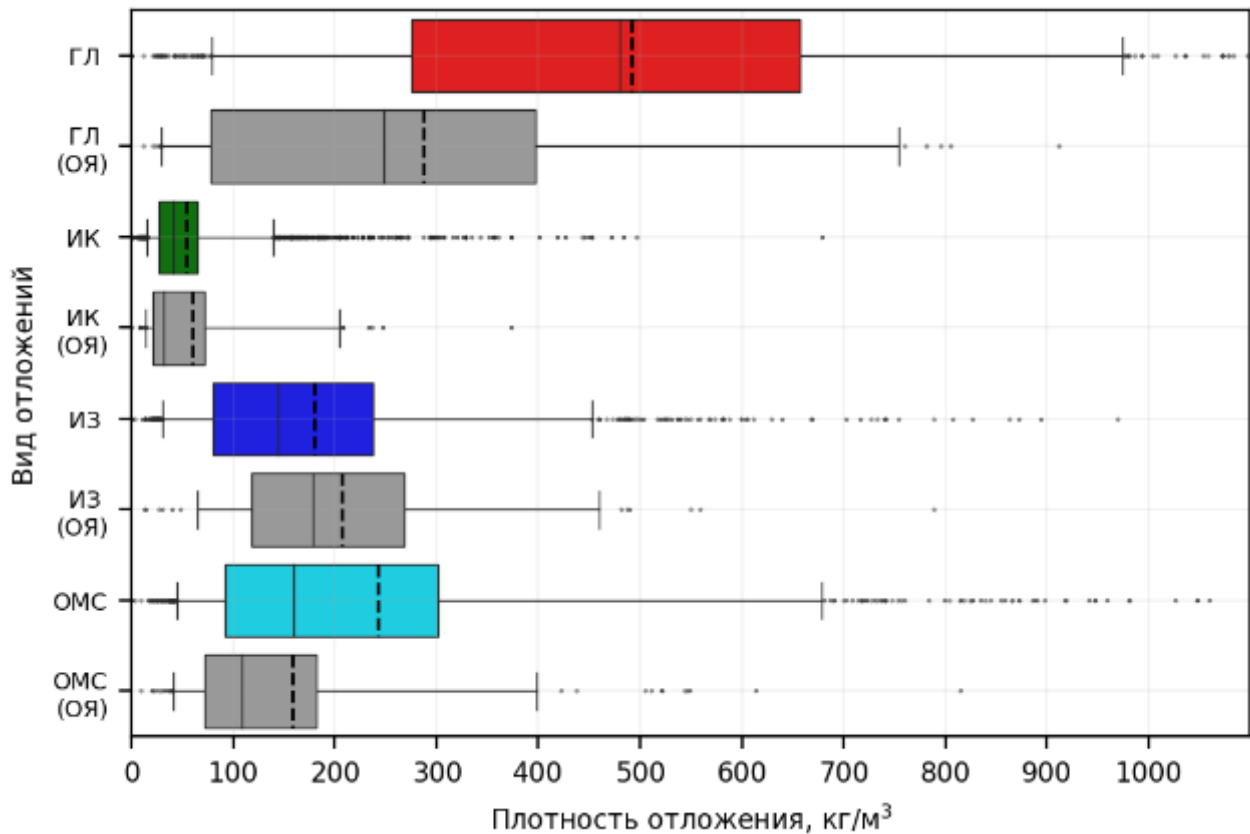


Рисунок 3.12 – Плотность гололедно-изморозевых отложений различных видов

Отложения кристаллической изморози имеют очень низкую плотность, очень редко превышающую 150 кг/м^3 , и наиболее часто располагающуюся в диапазоне от 26 до 64 кг/м^3 . Зернистая изморозь имеет существенно более высокую плотность, в среднем в три раза более высокую, чем у кристаллической, в отдельных случаях достигающую 450 кг/м^3 . Полученные значения плотности зернистой изморози также несколько ниже, чем обычно указывается в литературных источниках [Farzaneh, 2008].

Отложения в виде мокрого снега чаще всего имеют плотность от 92 до 300 кг/м^3 , немного выше плотности отложений зернистой изморози. В отдельных случаях плотность отложений мокрого снега достигает 700 кг/м^3 .

Различия плотности опасных гололедно-изморозевых отложений скорее всего связано с типом их образования. Для отложений, образующихся вследствие выпадения замерзающих осадков и осадков в виде мокрого снега, характерна меньшая плотность опасных отложений. Для внутриоблачного обледенения

плотность опасных отложений выше, чем плотность отложений небольшого диаметра.

Отложения в виде зернистой изморози имеют схожую плотность с отложениями мокрого снега. Таким образом, более целесообразно считать опасными отложения зернистой изморози, достигающие диаметра 35 мм, как и отложения в виде мокрого снега. В настоящий момент и для кристаллической и для зернистой изморози критерием опасного явления является достижение диаметра 50 мм.

Выводы к главе 3

В ходе работы были построены карты пространственного распределения количества гололедно-изморозевых отложений на территории России и карты преобладающего вида гололедно-изморозевых отложений за период с 1985 по 2020 год. Те же карты были построены отдельно для гололедно-изморозевых отложений, размер которых достиг критериев опасного явления.

Пространственный анализ наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями показал, что гололед и зернистая изморозь наиболее часто наблюдаются на юге России и на некоторых метеорологических станциях, расположенных на побережьях северных морей. На остальной территории России преобладают отложения в виде кристаллической изморози. Для высокоинтенсивных отложений характерно преобладание гололеда на Европейской территории России, зернистой изморози на некоторых метеорологических станциях, находящихся в горах, и отложений мокрого снега на Дальнем Востоке.

В ходе работы было установлено, что метеорологические условия формирования высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений различных видов отличаются от условий образования гололедно-изморозевых отложений невысокой интенсивности. Опасные отложения в виде изморози и мокрого снега начинали формироваться при более высокой температуре воздуха, чем отложения небольшого диаметра, а гололед, напротив, при более низкой. Опасные отложения

гололеда и изморози чаще наблюдаются при более высокой скорости ветра, чем отложения небольшого диаметра. Для высокоинтенсивных отложений мокрого снега, наоборот, характерна низкая скорость ветра или штиль. Также было показано, что продолжительность фазы нарастания напрямую влияет на диаметр отложений, особенно для зернистой и кристаллической изморози.

В ходе анализа данных инструментальных наблюдений были выявлены различия плотности гололедно-изморозевых отложений разных видов и интенсивности. Было показано, что плотность гололеда часто имеет меньшие значения, чем значения, приведенные в литературных источниках. Также было показано, что плотность отложений зернистой изморози близка к плотности отложений мокрого снега, и в несколько раз превышает плотность кристаллической изморози. Таким образом, при выделении опасных явлений, целесообразно использовать в качестве критерия опасных отложений зернистой изморози значение диаметра большего или равного 35 мм, как и для отложений в виде мокрого снега.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ СИНОПТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В главе представлены результаты синоптического анализа отдельных особенно опасных случаев образования гололедно-изморозевых отложений. Были рассмотрены случаи выпадения замерзающих дождей в декабре 2010 и ноябре 2016 года в Центральной России, и замерзающего дождя, прошедшего в ноябре 2020 года в Приморском крае. Синоптические условия формирования опасных отложений зернистой изморози были рассмотрены на примере случаев образования обледенения на территории горного массива Рай-Из, расположенного в Ямало-Ненецком автономном округе. Синоптические условия образования высокоинтенсивных отложений в виде мокрого снега были исследованы на примере трех случаев, произошедших на Дальнем Востоке и на территории Большого Кавказа.

4.1. Синоптические условия формирования гололеда³

В начале работы были рассмотрены синоптические условия, ставшие причиной выпадения замерзающего дождя в декабре 2010 года. В конце декабря в Московском регионе наблюдалась умеренно морозная погода с небольшими снегопадами и температурой воздуха от -6 до -8°C . Комплексный анализ аэросиноптического материала показал, что за сутки до начала замерзающего дождя в Москве центральный регион находился в обширной фронтальной зоне, генетически связанной с активной циклонической областью над югом Европы и Средиземноморьем. Центр средиземноморского циклона располагался над севером Италии, в районе Лигурийского моря. В Центральной России контраст температур в зоне фронта на приземной карте составлял около 20°C , от 2°C на юге (Курск) до -20°C на севере (Вологда). В это же время гололедные явления в виде замерзающей мороси наблюдались в Калининградской области и в Литве (рисунок 4.1).

³ Раздел написан на основе статей [Семенов и др. 2018; Леонов, Соколихина, 2021]

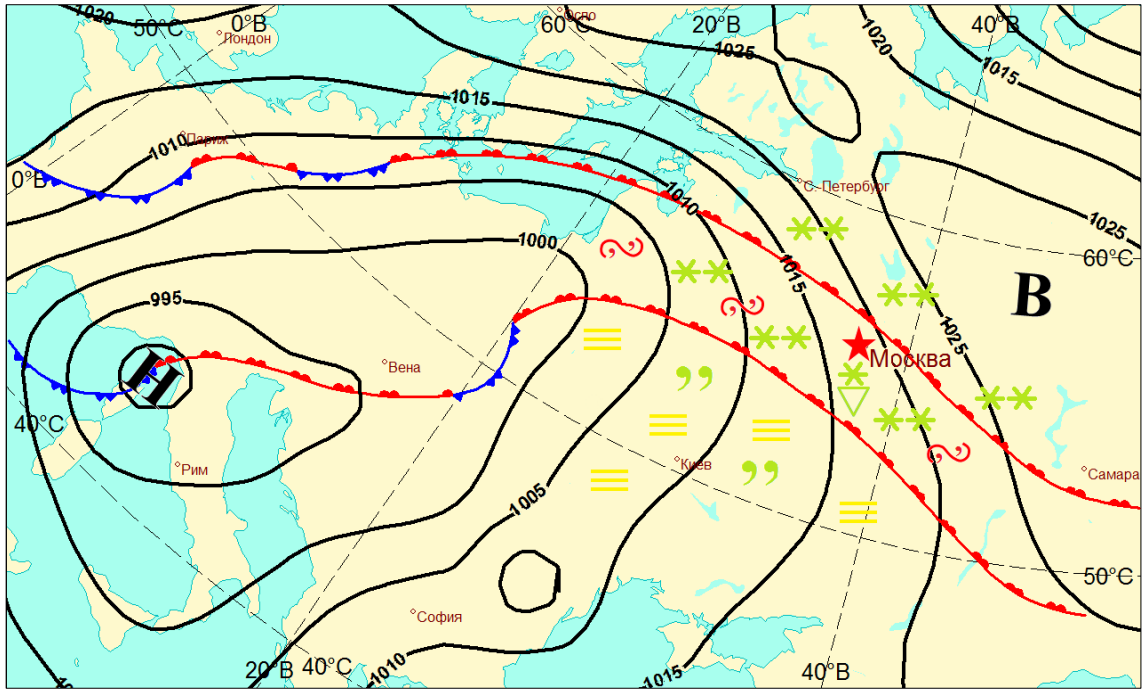


Рисунок 4.1 – 24.12.2010 12 ч ВСВ приземная карта

На карте изобарической поверхности 850 гПа этой фронтальной зоне соответствовало девять изотерм кратных 2°C (рисунок 4.2):

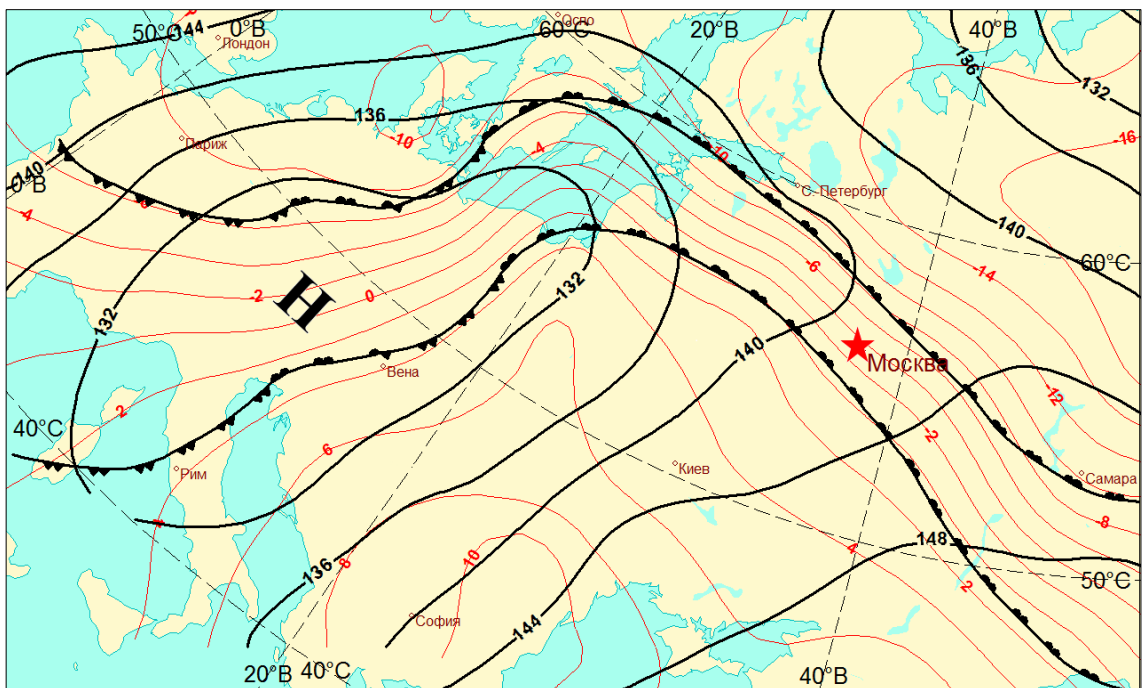


Рисунок 4.2 – 24.12.2010 12 ч ВСВ синоптический анализ 850 гПа

Рассмотренные выше факты позволили уверенно провести две линии фронта, связанные с арктическим и полярным фронтальными разделами. Таким образом, Москва находилась в непосредственной близости от двух резко контрастирующих

воздушных масс. С одной стороны, это теплый и влажный средиземноморский тропический воздух, который поступал в район столицы с юго-западными потоками, а, с другой, к северо-востоку от Москвы располагался в континентальном антициклоне, который не стремился покидать данный регион, холодный арктический воздух. В дальнейшем будет показано, что адвекция именно этого холодного воздуха в приземном слое приведет к формированию замерзающего дождя с образованием сильнейшего гололеда.

Из рисунка 4.3 видно, что в слое 500-2000 м наблюдалась мощная инверсия температуры, связанная с адвекцией теплого воздуха на заснеженную подстилающую поверхность.

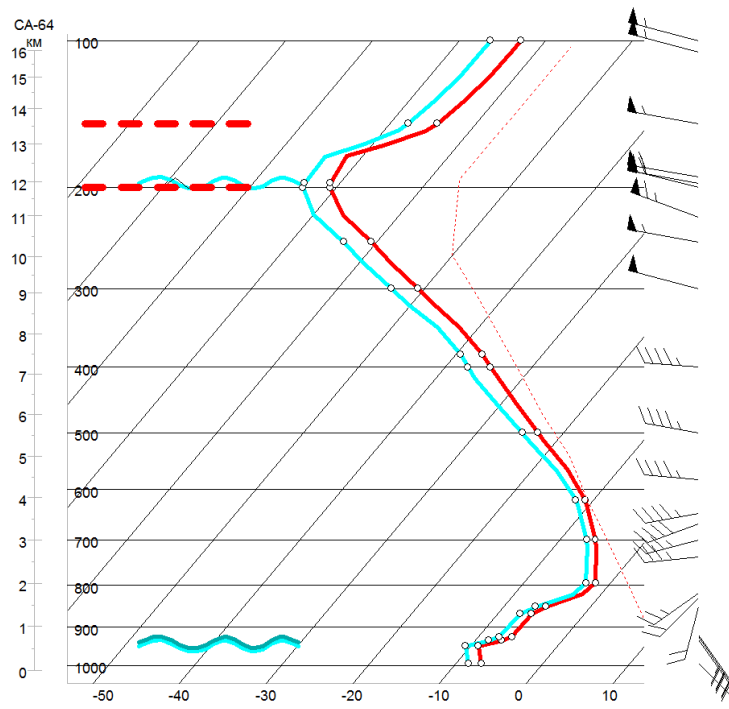


Рисунок 4.3 – Данные радиозондирования г. Долгопрудный 24.12.2010 12 ч ВСВ

Важно отметить, что у земли инверсии не было, и до высоты 500 м температура с высотой понижалась. Видно также, что кривая стратификации не пересекала изотерму 0°C и не уходила в область положительных значений. Через 12 часов (рисунок 4.4) приподнятая инверсия в нижней тропосфере еще более усилилась, а кривая стратификации в слое 900-2000 м уже находилась в области

положительных температур. Сформировалась характерная для выпадения сильного замерзающего дождя стратификация по типу «теплого носа».

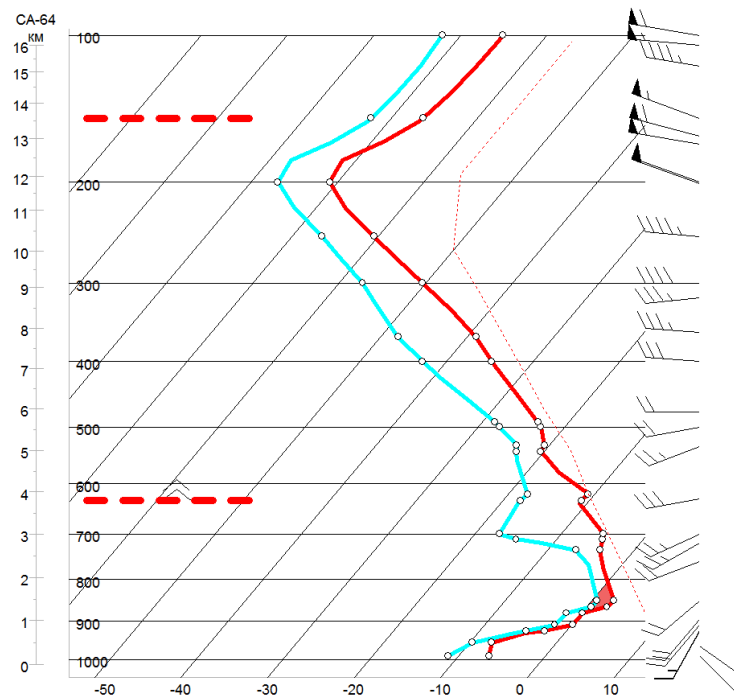


Рисунок 4.4 – Данные радиозондирования г. Долгопрудный 25.12.2010 00 ч ВСВ

Еще одним важным обстоятельством в синоптической обстановке за сутки до ледяного шторма в Москве явилась резкая активизация фронтальной волны (за счет вторжения холода со Скандинавии) над Польшей и Западной Беларусью, что привело к интенсификации юго-западного потока теплого и влажного воздуха в столичный регион. Смещение волны на восток сопровождалось интенсивным падением давления.

В Москве в связи с приближением теплого фронта пошел обложной снег, который ночью с 24 на 25 декабря сменился ледяной крупой и сильной моросью, перешедшей к полудню в замерзающий и ледяной дождь, продолжавшийся с разной интенсивностью до утренних часов 26 декабря. В последующем ледяной дождь перешел в морось с образованием гололеда.

Из приземной карты за 25 декабря (рисунок 4.5) видно, что вершина волны на полярном фронте располагалась в самостоятельном циклоне к северо-западу от Киева, а теплый фронт практически вплотную приблизился к Москве с юга.

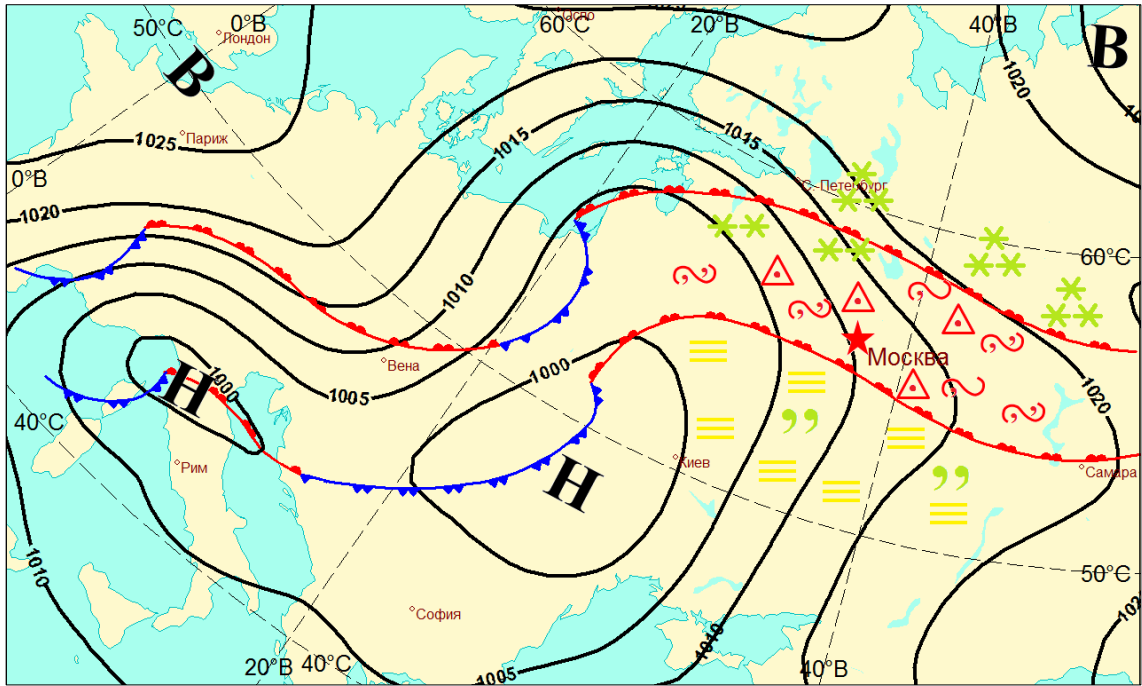


Рисунок 4.5 – 25.12.2010 12 ч ВСВ приземная карта

По данным карты синоптического анализа на изобарической поверхности 850 гПа (рисунок 4.6) фронтальный раздел уже перешел через столицу и находился примерно в 100 км севернее Москвы.

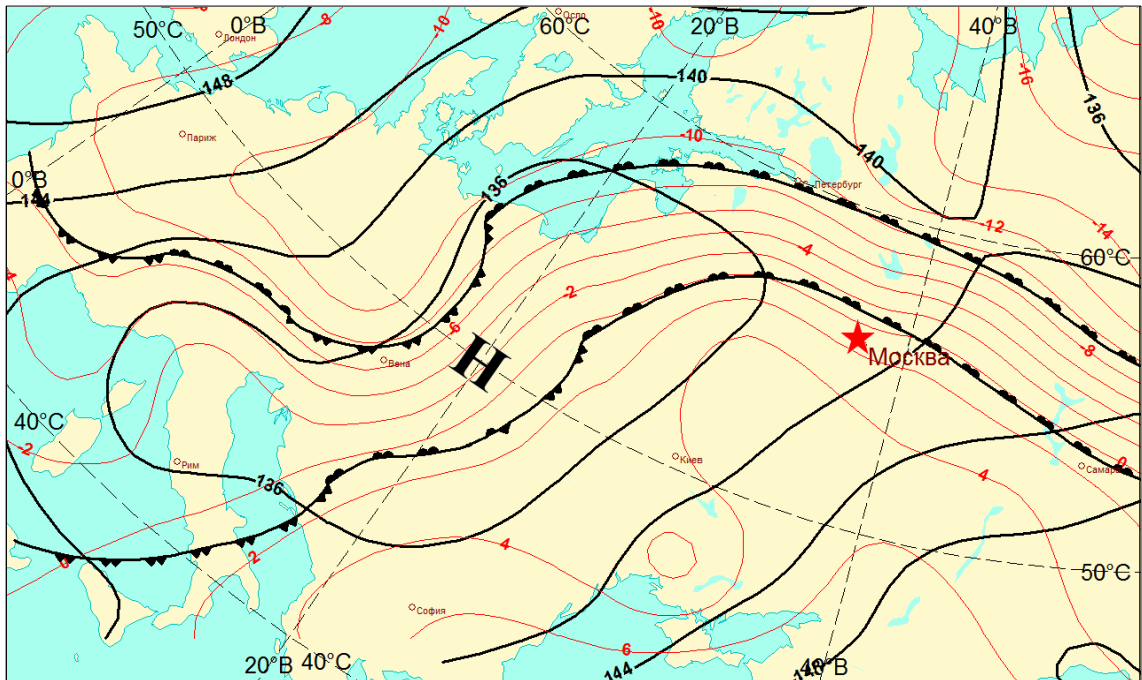


Рисунок 4.6 – 25.12.2010 12 ч ВСВ синоптический анализ 850 гПа

Таким образом, во второй половине дня 25 декабря Москва находилась в очень сложной обстановке: у поверхности земли теплый фронт еще не прошел

Москву, и город продолжал оставаться в холодной воздушной массе континентально-умеренного воздуха с отрицательными температурами (от -4 до -6°C), а с высоты 600-800 м над Москвой уже располагалась очень теплая и влажная воздушная масса из средиземноморья. В дальнейшем можно было бы предполагать, что теплый фронт с юга пройдет через Москву и в город придет теплый средиземноморский воздух с положительными температурами, что, в конечном счете, приведет к быстрому таянию, образовавшиеся в результате ледяного шторма корки намерзшего льда на земле и предметах. Однако дальнейшие события существенно изменили синоптическую обстановку в центральном регионе.

Когда замерзающие осадки достигли своей максимальной интенсивности, температура воздуха на высоте 1000 м приблизилась к 5°C , в то время как у земли было -5°C (рисунок 4.7).

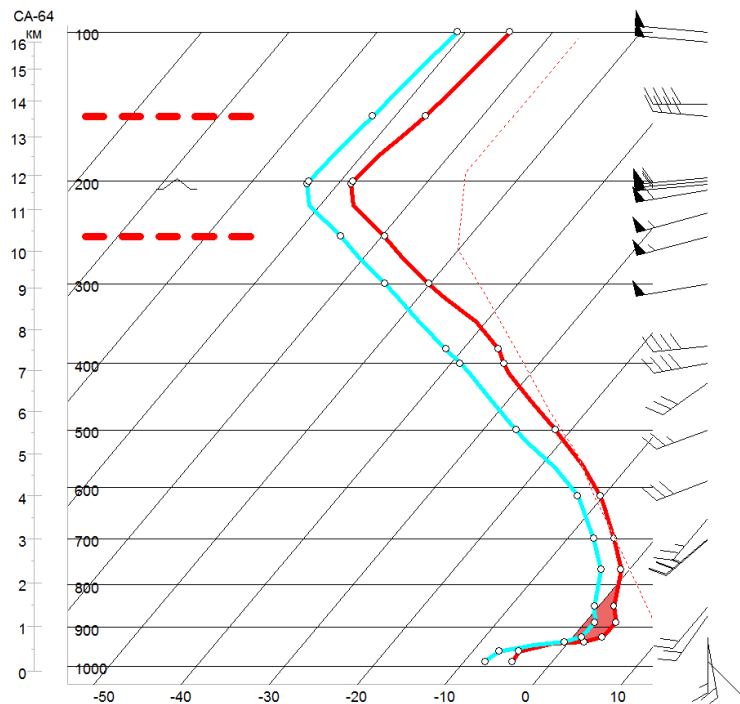


Рисунок 4.7 – Данные радиозондирования г. Долгопрудный 25.12.2010 12 ч ВСВ

В последующем слой положительных температур продолжал сохраняться в нижней тропосфере, а ледяной шторм продолжался в Московском регионе практически всю долгую декабрьскую ночь.

На карте погоды за 26 декабря (рисунок 4.8) видно, что смещавшийся к Москве циклонический вихрь замедлил свое передвижение и в результате окклюдирования стал интенсивно заполняться. В процессе окклюдирования теплый сектор со средиземноморским воздухом стал быстро сокращаться за счет подъема воздуха вверх, и ожидаемого повышения температуры у поверхности земли не произошло. К этому моменту центр заполняющегося циклона располагался в районе Смоленска.

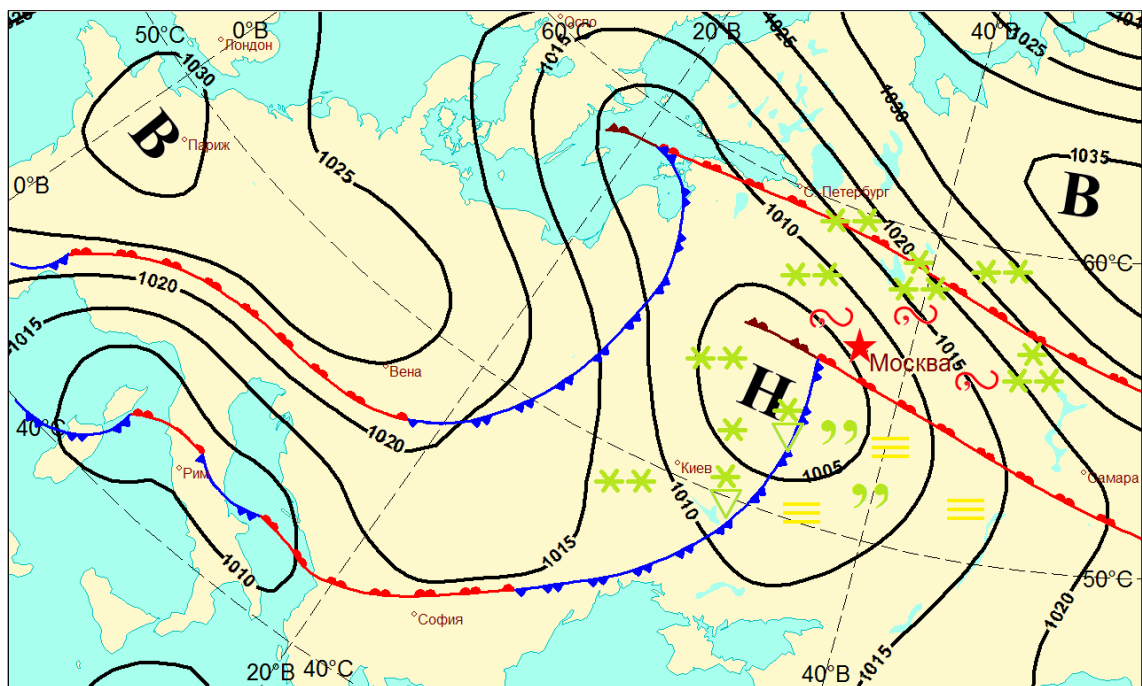


Рисунок 4.8 – 26.12.2010 12 ч ВСВ приземная карта

Еще одним свидетельством процесса окклюдирования циклона является увеличение его вертикальной мощности, которая к рассматриваемому моменту времени выросла до 300 гПа (рисунок 4.9). Циклонический вихрь хорошо просматривался на картах абсолютной топографии 700, 500 и 300 гПа.

В поле изотерм карты изобарической поверхности 850 гПа (рисунок 4.10) фронтальная поверхность наблюдалась вблизи Москвы, и в районе города продолжалась морось с образованием гололеда, что еще больше увеличивало толщину нарастающей ледяной корки при сохранении отрицательной температуры воздуха у поверхности земли.

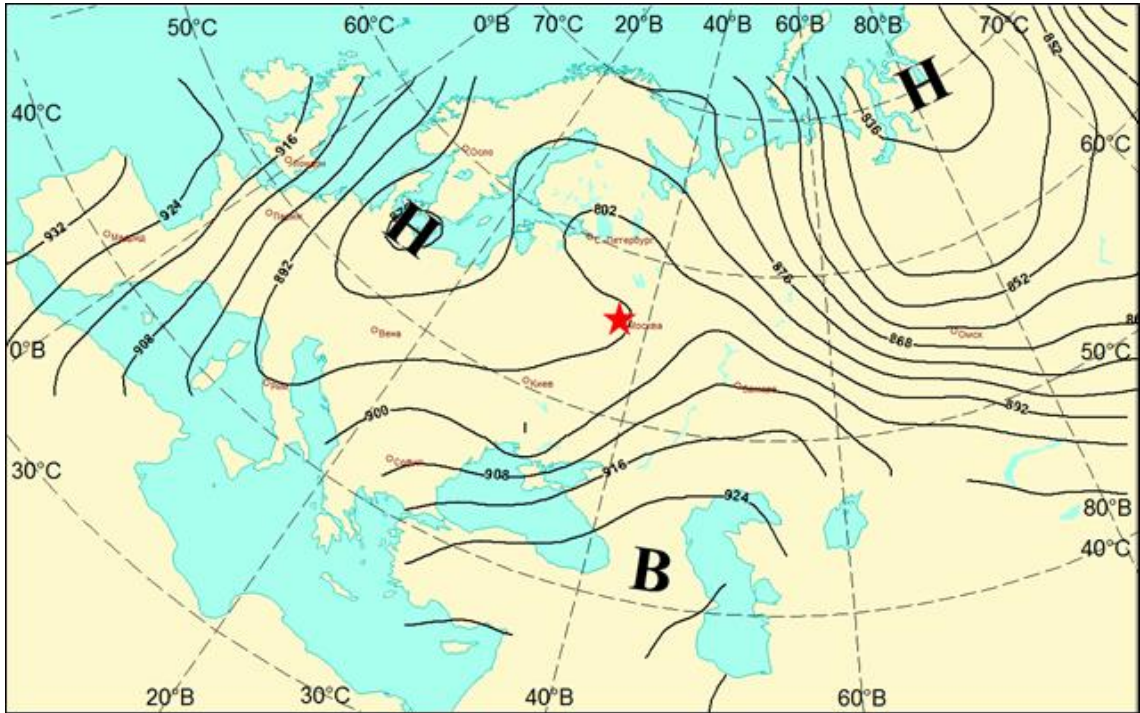


Рисунок 4.9 – 26.12.2010 12 ч ВСВ синоптический анализ 300 гПа

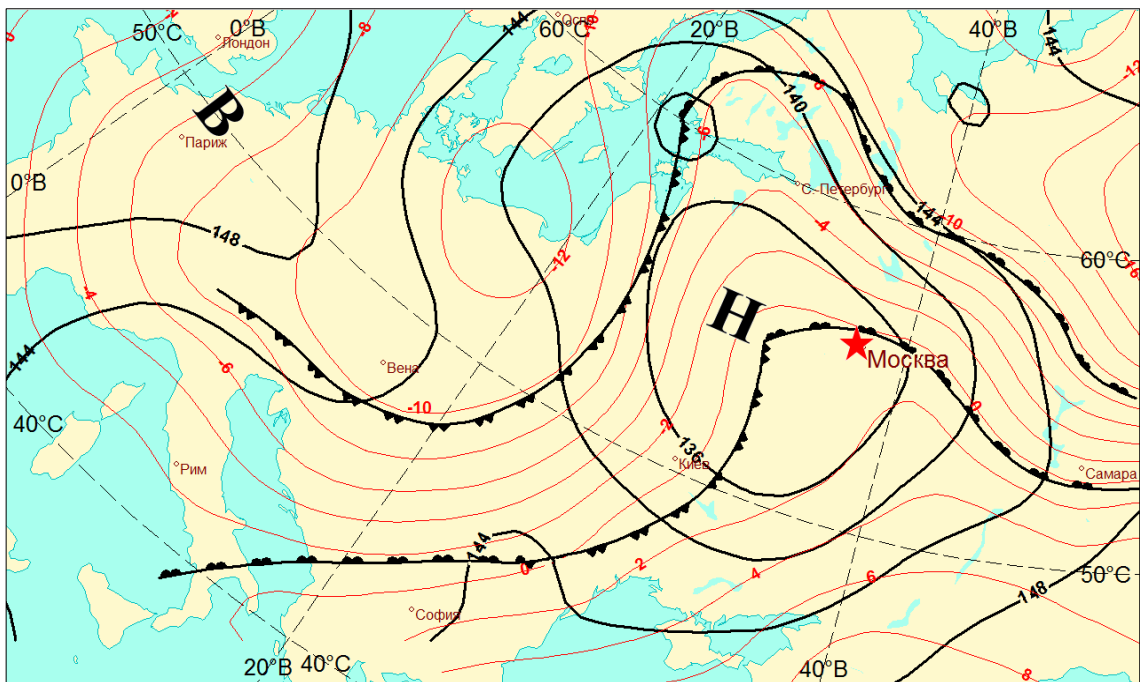


Рисунок 4.10 – 26.12.2010 12 ч ВСВ синоптический анализ 850 гПа

В последующие сутки процесс окклюирования продолжался, и на приземной карте 27 декабря (рисунок 4.11) видно, что циклоническая циркуляция слабо просматривается в поле изобар.

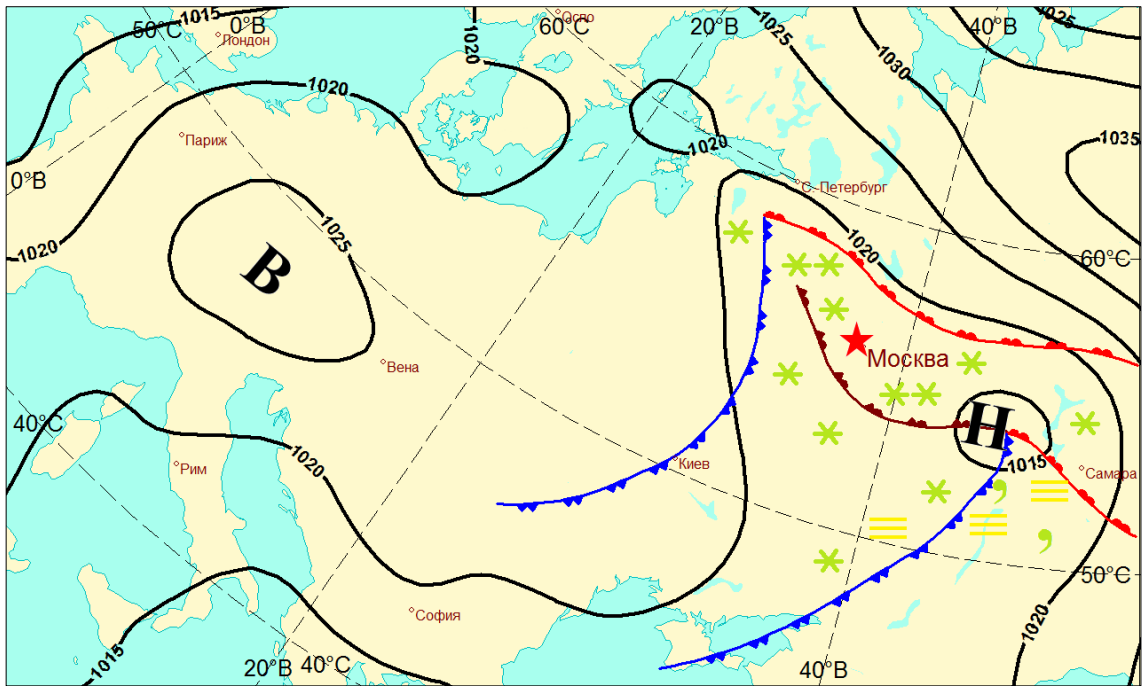


Рисунок 4.11 – 27.12.2010 12 ч ВСВ приземная карта

Однако под влиянием фронта окклюзии в Московском регионе все еще сохранялась слабая морось, замерзающая на земле. В связи с разбиением процесса теплой окклюзии, очаг положительных температур в нижней тропосфере стал постепенно размываться (Рисунки 4.12а, 4.12б).

Ледяной дождь перешел в замерзающую на земле морось, а к вечеру 27 декабря вновь пошел обложной снег. Такие изменения фазового состава осадков характерны для прохождения интенсивных замерзающих дождей.

Схематично процесс окклюдирования средиземноморского циклона в центральном регионе в декабре 2010 года представлен на рисунке 4.13.

Из данных радиозондирования видно также, что в приземном слое практически во все рассматриваемые сроки с ледяным дождем наблюдались юго-восточные и восточные ветры, а несколько выше, начиная с высот 300-400 метров, происходил резкий правый поворот ветра на юго-западные и западные направления.

Такой резкий правый сдвиг ветра является «визитной карточкой» теплого фронта и свидетельствует об интенсивной адвекции теплого воздуха на высотах. Примечательно, что после начала окклюзии, ветры восточных румбов уже

преобладали в обширном слое от земли до высоты 6-7 км, и правый поворот ветра не наблюдался в нижней тропосфере.

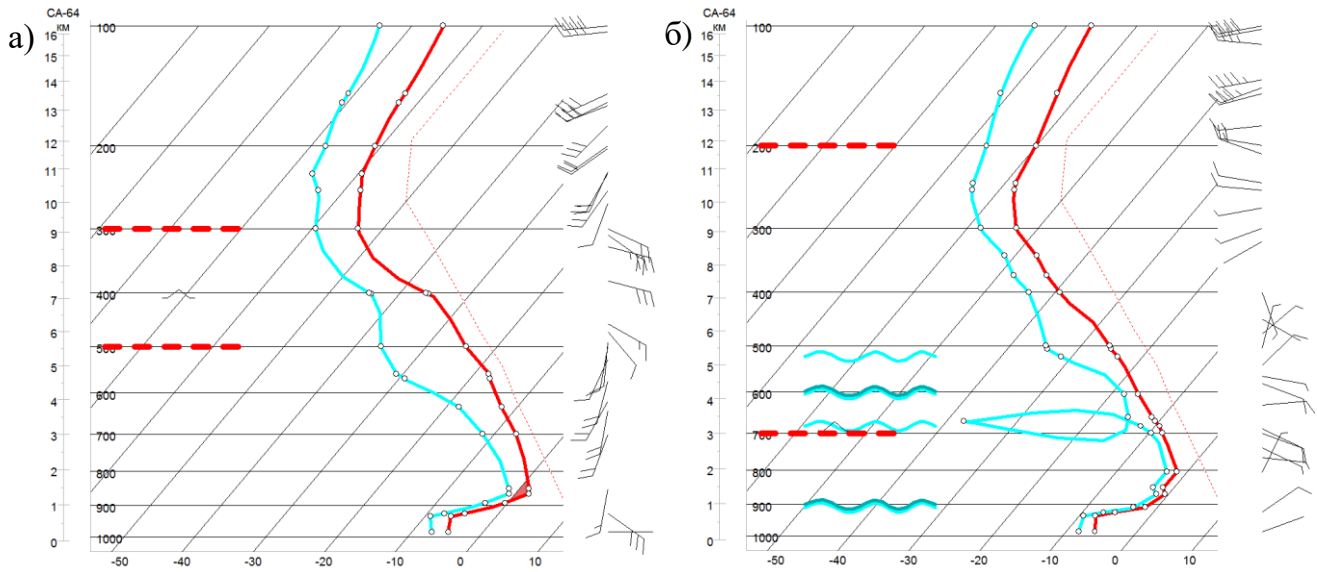


Рисунок 4.12 – Данные радиозондирования г. Долгопрудный а) 26.12.2010 12 ч ВСВ; б) 27.12.2010 00 ч ВСВ

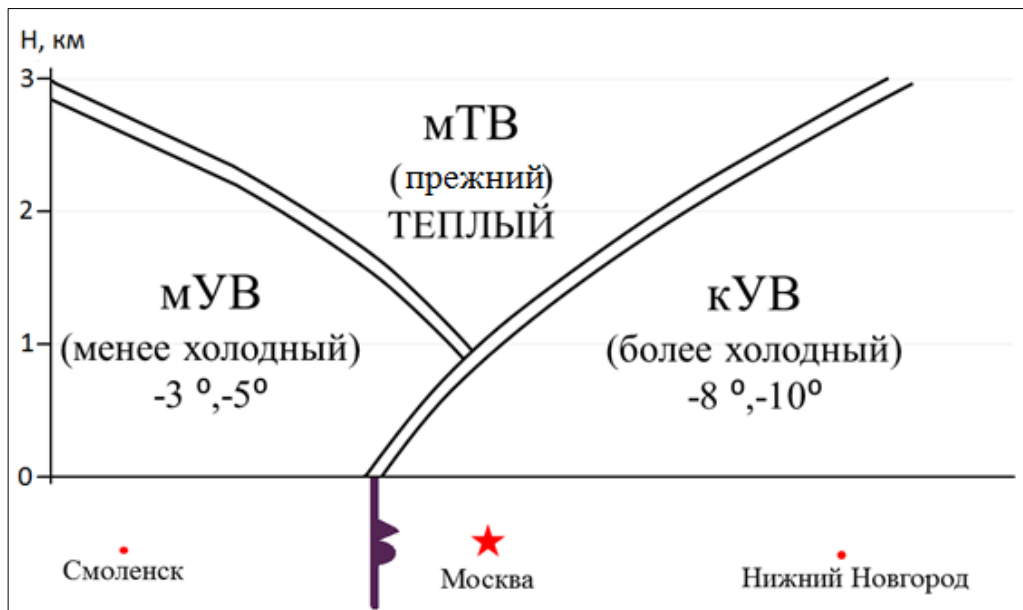


Рисунок 4.13 – Схема теплого фронта окклюзии 27.12.2010 12 ч ВСВ

Суммируя временной ход основных параметров стратификации в нижних слоях тропосферы над Москвой в период рассмотренных выше событий, была построена схема эволюции очага катастрофического замерзающего дождя (рисунок 4.14), которая наглядно иллюстрирует основные детали вертикальной структуры атмосферы и не нуждается в дополнительных комментариях.

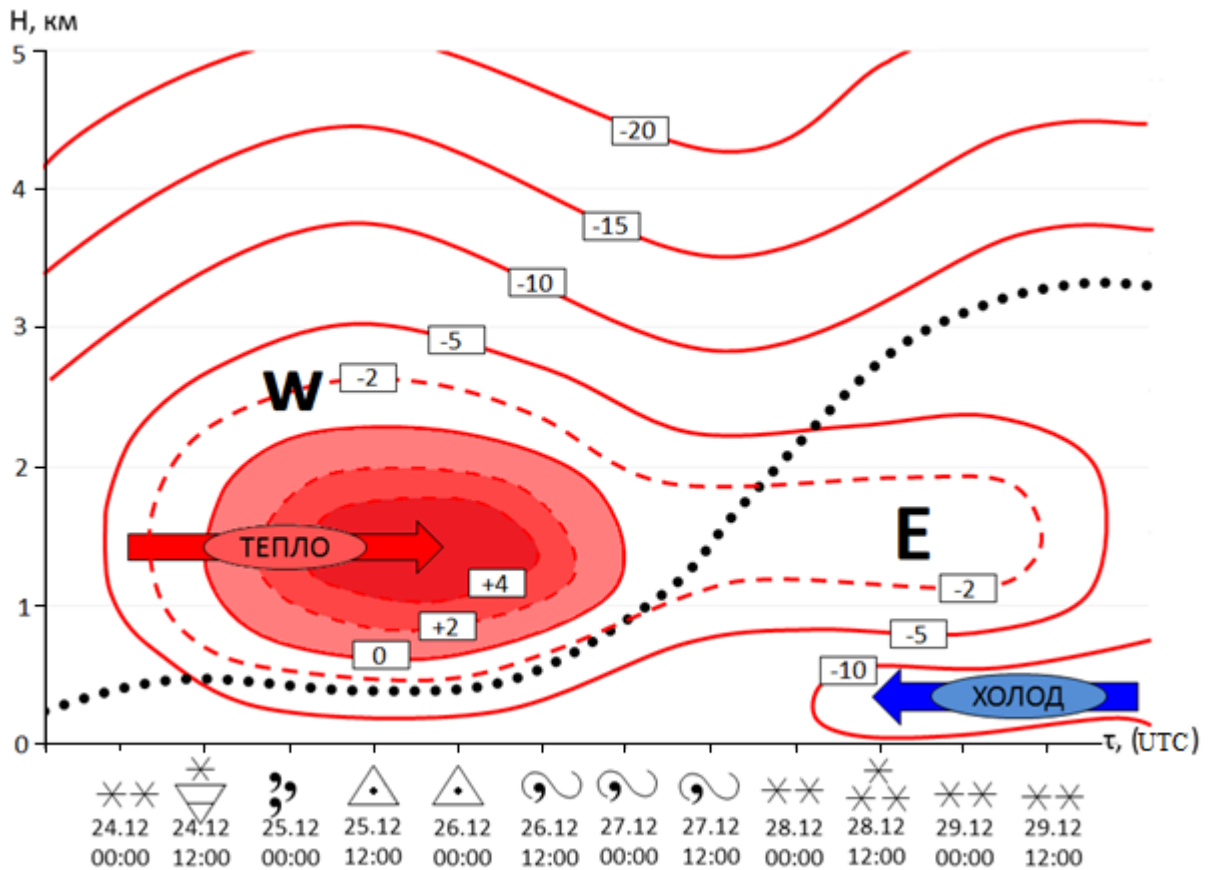


Рисунок 4.14 – Эволюция очага замерзающего дождя в Москве в декабре 2010 года

Можно отметить, что на предлагаемой схеме отчетливо проявилась теплая «линза» влажного воздуха, характерная для явления выпадения сильного замерзающего дождя.

Кроме временных изменений условий атмосферной стратификации над Москвой рассмотрим пространственную картину термической структуры тропосферы в зоне теплого фронта. С этой целью по данным радиозондирования в Курске, Смоленске, Москве и Нижнем Новгороде за 12:00 ВСВ 25 декабря был получен вертикальный разрез через фронтальную зону для периода (аэрологического срока) максимальной интенсивности выпадения замерзающих осадков в Москве (рисунок 4.15).

Видно, что при наличии замерзающих осадков слой с положительной температурой располагается на некоторой высоте над земной поверхностью, что обеспечивает необходимую эволюцию твердых обложных осадков в жидкие, а затем в переохлажденные.

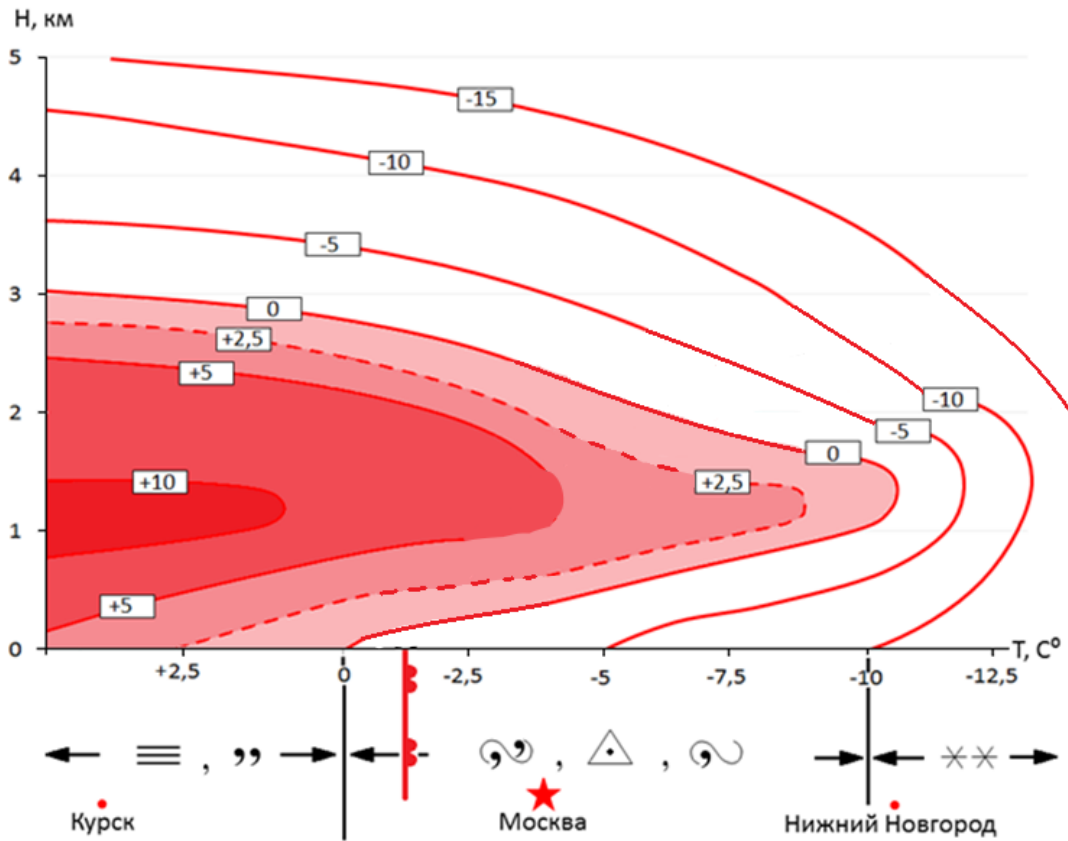


Рисунок 4.15 – Термическая структура тропосферы в зоне теплого фронта при выпадении замерзающих осадков 12 ч ВСВ 25 декабря 2010 года

В нашем случае слой с положительной температурой располагался несколько ниже фронтальной поверхности в холодной воздушной массе, что является наиболее характерным для фронтальных гололедных ситуаций [Ягудин, 1978]. Именно такая ситуация позволяет растаявшему снегу при дальнейшем падении к земле превращаться в переохлажденные капли замерзающего дождя или мороси, замерзающие на земле.

Рассмотренная картина, по-видимому, характерна для случаев интенсивных и продолжительных гололедообразующих ситуаций. Значительно реже слой с положительной температурой располагается над фронтальной поверхностью, примыкая к ней со стороны теплого воздуха [Кантер, Курмаз, 1983]. В этом случае гололедные явления непродолжительные и отличаются тонкой коркой нарастающего льда. Чаще всего зона замерзающих осадков и гололеда представляет собой сравнительно узкую полосу, вытянутую вдоль фронта и являющуюся частью общей зоны фронтальных осадков. Одна из границ этой

полосы обычно совпадает или близка к приземной линии фронта, а вторая является границей жидких переохлажденных обложных осадков. Как правило, ширина гололедной зоны не превышает 100-150 км [Руководство, 1987]. В декабре 2010 года гололедообразующие явления наблюдались в исключительно широкой полосе 300-400 км перед теплым фронтом и были, в первую очередь, связаны с экстремально глубоким выдвиганием слоя с положительной температурой в сторону холодной воздушной массы.

Выше неоднократно отмечалось, что аномальное искривление изотерм в подфронтальной холодной воздушной массе свидетельствует, что наряду с адвекцией теплого и влажного воздуха в приземном слое до высоты 300-800 м наблюдается не менее интенсивная адвекция холода, то есть в обширной полосе перед теплым фронтом существует двухсторонняя адвекция. Представляется, что чем интенсивнее указанная двухсторонняя адвекция, тем ярче проявляется аномальное искривление изотерм в подфронтальной холодной воздушной массе, тем более широкая зона гололедных явлений теплого фронта.

Далее были рассмотрены синоптические условия, ставшие причиной ледяного шторма в ноябре 2016 года. Анализ метеорологических данных наземных метеостанций показал, что за сутки до начала замерзающего дождя в Москве центральный регион находился в обширной фронтальной зоне, генетически связанной с активной циклонической областью над югом Европы (рисунок 4.16). Контраст температур в зоне фронта на приземной карте составлял около 20°C, от 10°C на юге (Курск) до -10°C на севере (Великий Новгород).

Такое распределение температуры воздуха позволило провести две линии фронта, связанных с арктическим и полярным фронтальными разделами. Таким образом, Москва находилась в непосредственной близости от трех контрастирующих воздушных масс. С одной стороны, это холодный арктический воздух, который поступал в Москву из континентального антициклона, располагавшегося к северо-востоку от столичного региона. Южнее Москвы располагалась область умеренного воздуха, значительно более теплого, чем на

севере. С юго-запада в сторону Центральной России продвигался средиземноморский циклон, который втягивал в свою циркуляцию очень теплый и влажный тропический воздух. Ситуация практически совпадала с 2010 годом.

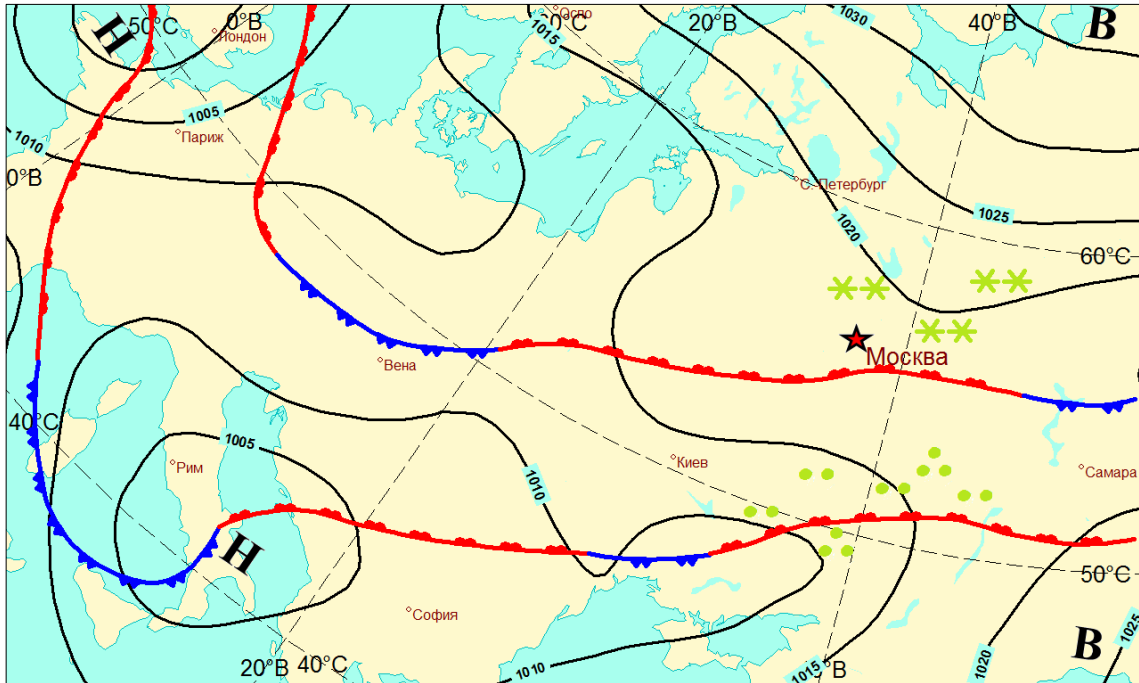


Рисунок 4.16 – 09.11.2016 00 ч ВСВ приземная карта

По картам синоптического анализа можно сделать вывод о том, что в ночь с 9 на 10 ноября в связи с вторжением холода со Скандинавии произошла активизация фронтальной волны над территорией Украины, что привело к интенсификации юго-восточного потока более теплого умеренного воздуха в Московский регион. Смещение волны в восточном направлении привело к небольшому понижению давления в Москве (рисунок 4.17).

В ночь с 9 на 10 ноября к столице приблизился теплый атмосферный фронт, а на карте изобарической поверхности 850 гПа фронтальный раздел ожидаемо прошел через Москву и находился севернее столицы (рисунок 4.18).

Таким образом, как и в декабре 2010 года, у поверхности земли все еще располагался холодный арктический воздух, а на высотах около 1500 метров более теплый умеренный воздух. Значения температуры у земли составляли от -2 до -4°C, а на высоте 850 гПа располагалась область положительных температур до 2°C.

Такая стратификация атмосферы привела к возможности выпадения замерзающего дождя, в соответствии описанному выше классическому механизму.

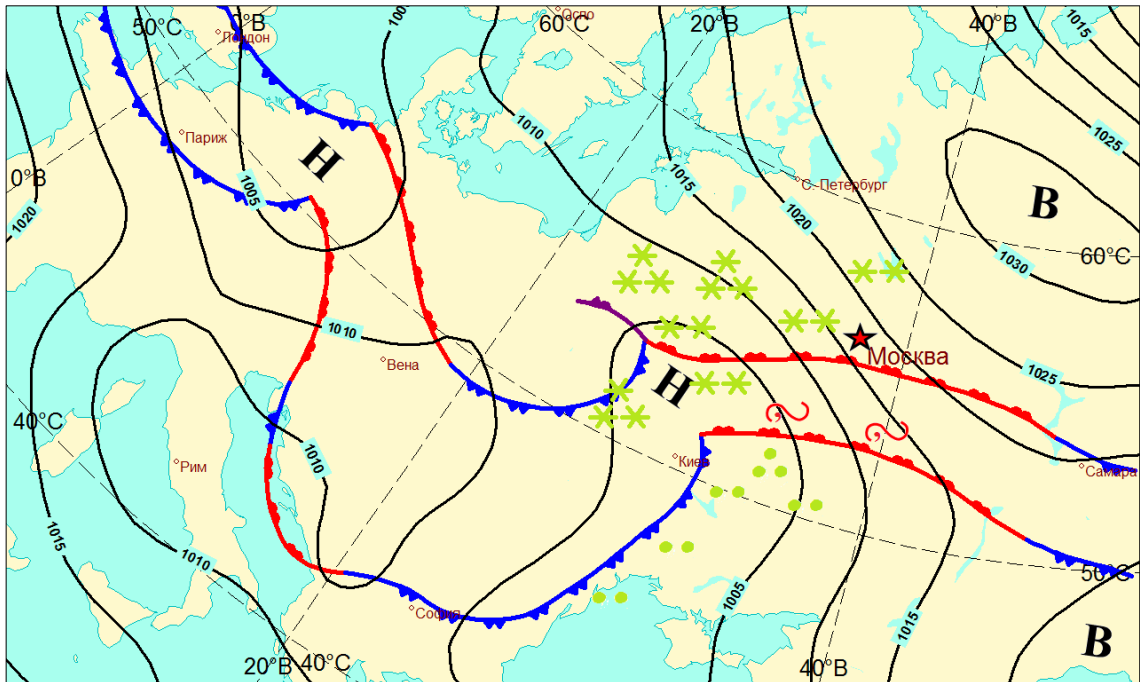


Рисунок 4.17 – 10.11.2016 00 ч ВСВ приземная карта

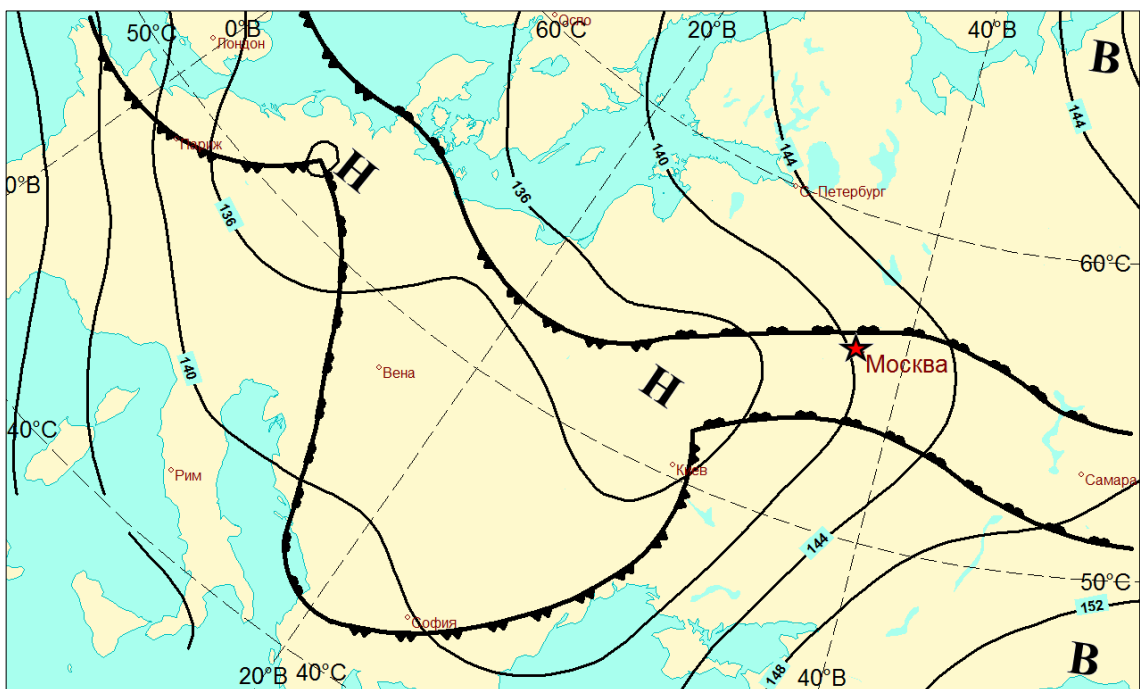


Рисунок 4.18 – 10.11.2016 00 ч ВСВ синоптический анализ 850 гПа

К 3 часам ночи 10 ноября в Москве пошел обложной снег средней интенсивности. Через несколько часов начался замерзающий и ледяной дождь, который примерно к 9 часа утра сменился замерзающей моросью. В это время в

некоторых районах Московской и соседних областей образовался гололед большой интенсивности. Однако температура воздуха у земли, в связи с приближением теплого атмосферного фронта, в дневные часы повысилась с $-5...-3^{\circ}\text{C}$ до $-1...1^{\circ}\text{C}$. Это стало причиной того, что гололед и обледенения предметов разрушились под действием положительных температур уже через несколько часов и не привели к катастрофическим последствиям в столице.

Схожая синоптическая картина наблюдалась в ночь с 10 на 11 ноября 2016 года. К этому времени к Москве подходил полярный фронт, а на высоте 850 гПа теплый атмосферный фронт уже прошел через столицу и располагался севернее нее (Рисунки 4.19, 4.20).

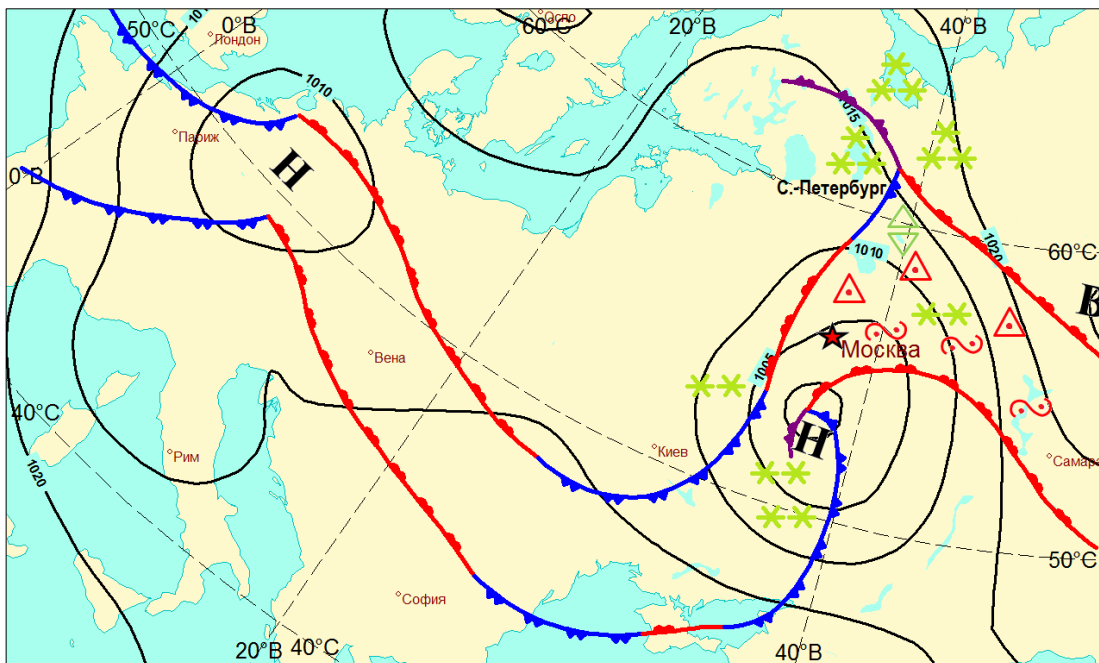


Рисунок 4.19 – 24. 11.11.2016 00 ч ВСВ приземная карта

Таким образом у поверхности земли располагался умеренный воздух с температурами $-1...1^{\circ}\text{C}$, а на высоте с 800-2500 метров находилась область с влажным топическим воздухом, с температурами выше 0°C , а в центре «линзы» тепла, на высоте около 1500 метров, температура воздуха превышала 5°C (рисунок 4.21). Метеостанции Московской области регистрировали замерзающую морось и замерзающий дождь, а также туманы с осаджением изморози.

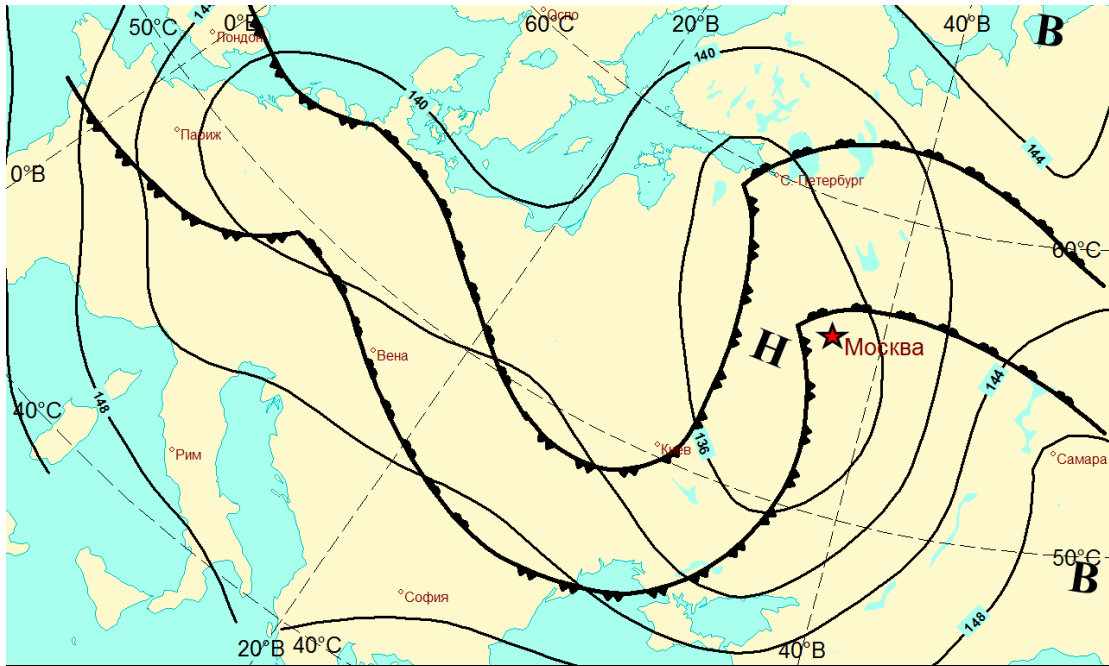


Рисунок 4.20 – 11.11.2016 00 ч ВСВ синоптический анализ 850 гПа

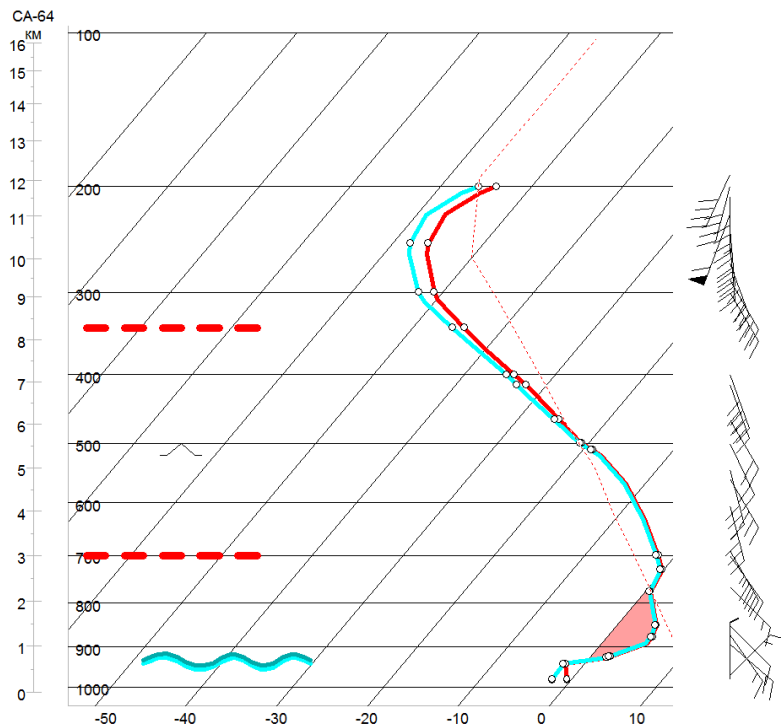


Рисунок 4.21 – Данные радиозондирования г. Долгопрудный 11.11.2016 00 ч ВСВ

Замерзающие осадки ночью 11 ноября не были зарегистрированы в столичном регионе, так как температуры воздуха для их выпадения были слишком высокими. Но в областях, располагающихся севернее и восточнее Московской – Тверской, Ярославской, Владимирской, Ивановской, Нижегородской наблюдались все типы замерзающих осадков. Осадки выпадали по классической схеме – ледяная

крупа с ледяным дождем сменялась замерзающим дождем и переходила в обложной дождь (рисунок 4.22).

В Московской области гололед, который смог образоваться, несмотря на слабо отрицательные температуры, растаял за несколько часов, как и в прошедшие сутки. Причиной этого стало прохождение теплого сектора циклона с положительными значениями температуры. В это время в Москве наблюдалась чрезвычайно низкая видимость (50-100 м), связанная с образованием адвективных туманов.

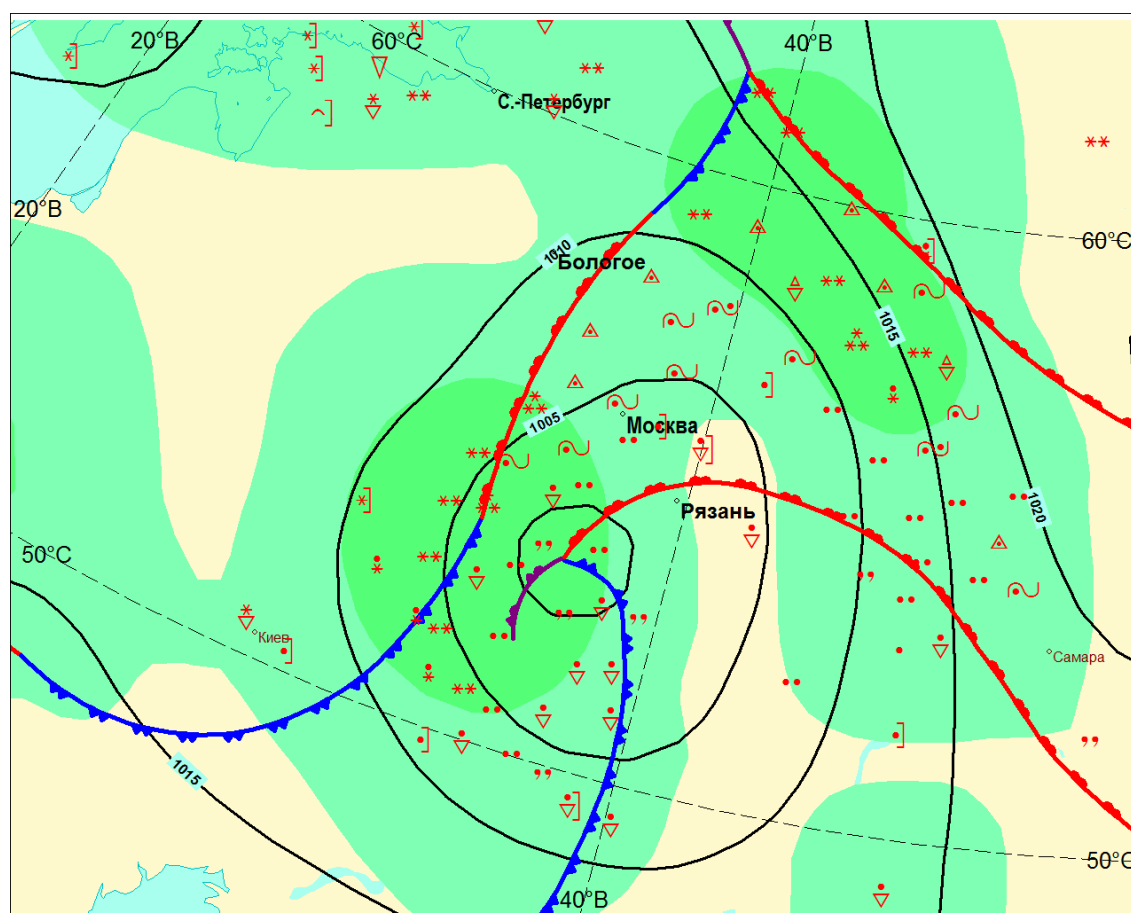


Рисунок 4.22 – Распространение замерзающих осадков 11.11.2016 00 ч ВСВ

Во второй половине 11 ноября циклонический вихрь замедлил свое передвижение на северо-запад и в результате окклюдирования стал интенсивно заполняться. К этому моменту центр окклюдирующего циклона располагался над Владимирской областью. Теплый сектор стал стремительно сокращаться за счет вытеснения вверх теплового средиземноморского воздуха, как и в декабре 2010 года (рисунок 4.23).

Следствием этого стало быстрое понижение температуры в Москве с $-1 \dots 1^\circ\text{C}$ до -7°C к полуночи 12 ноября. Понижение температуры позволило пройти небольшому ледяному дождю около 12 часов 11 ноября.

Свидетельством процесса окклюдирования циклона является увеличение его вертикальной мощности, которая к рассматриваемому моменту времени выросла до 300 гПа.

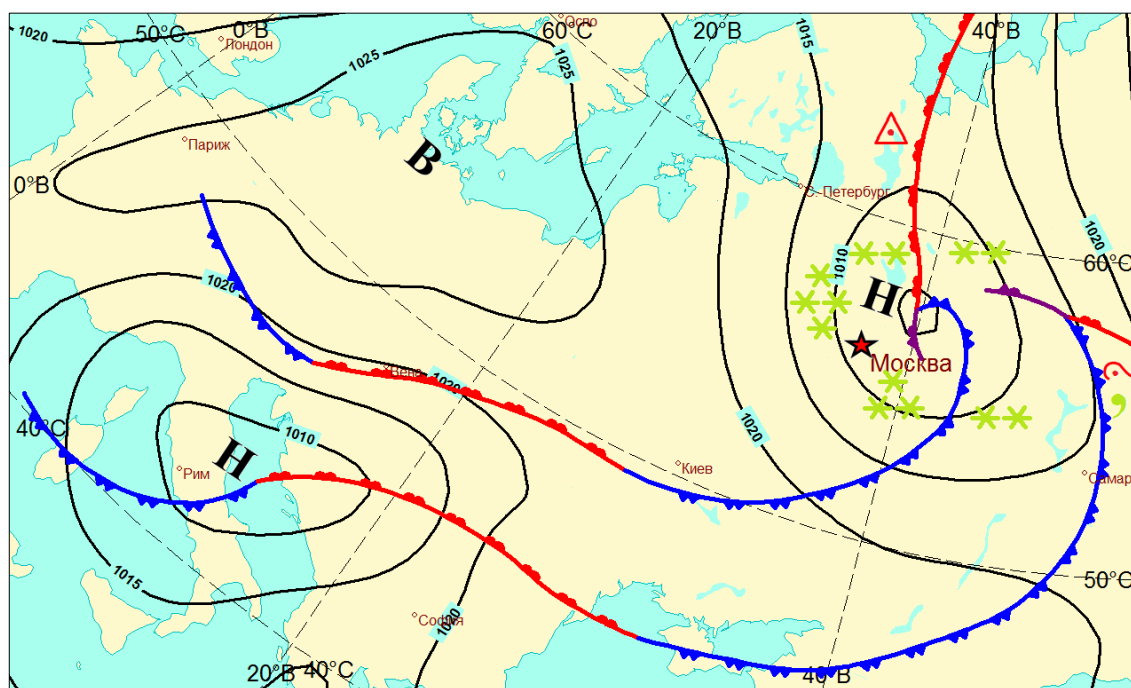


Рисунок 4.23 – 12.11.2016 00 ч ВСВ приземная карта

Под влиянием фронта окклюзии в Московской области прошли обложные твердые осадки в виде снега. В последующие сутки температура у поверхности земли оставалась низкой от -6 до -8°C , а морось сменилась обложным снегом. Схематично процесс окклюдирования средиземноморского циклона в центральном регионе в ноябре 2016 года можно изобразить так (рисунок 4.24):

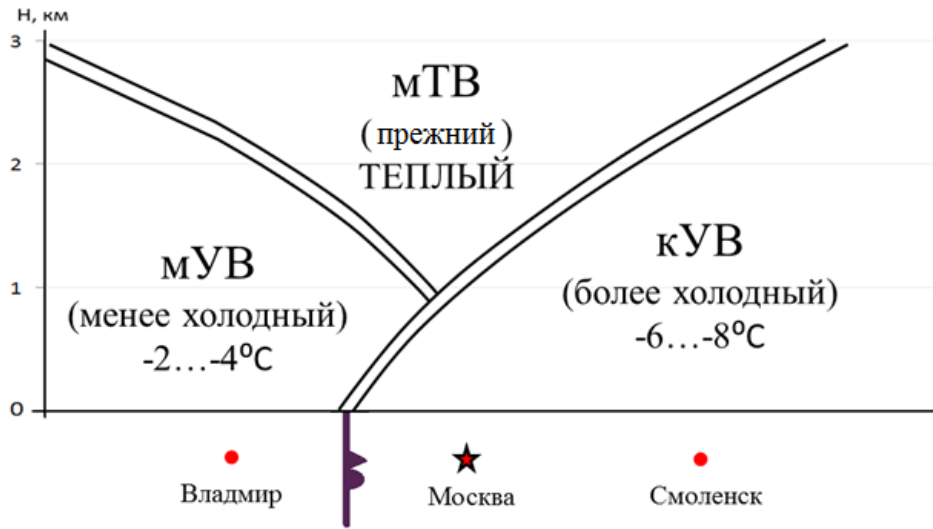


Рисунок 4.24 – Схема (авторская) теплого фронта окклюзии 12.11.2016 00 ВСВ

Суммируя временной ход основных параметров стратификации в нижних слоях тропосферы над Москвой в период событий ноября 2016 года, была построена схема эволюции очага замерзающего дождя (рисунок 4.25), которая наглядно иллюстрирует основные детали вертикальной структуры атмосферы.

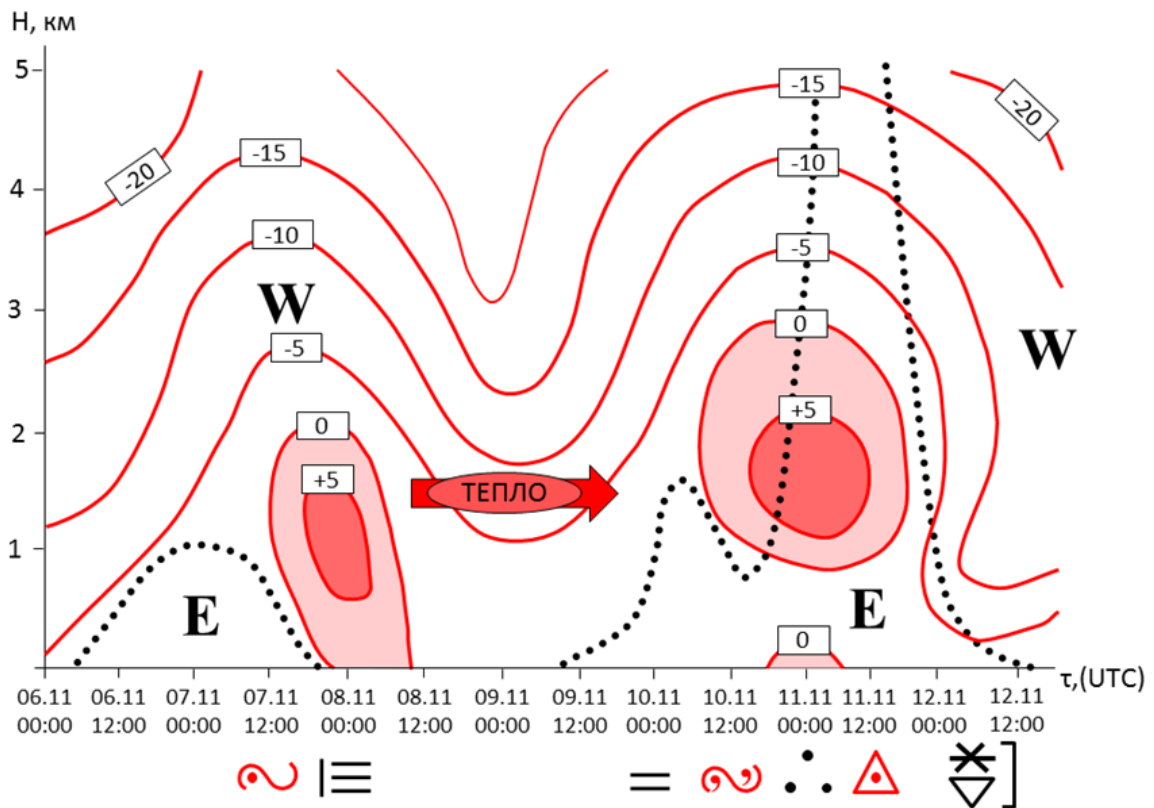


Рисунок 4.25 – Эволюция очага замерзающего дождя в Москве в ноябре 2016 года

Отметим, что на предлагаемой схеме отчетливо проявилась «линза» теплого и влажного воздуха, характерная для явления сильного замерзающего дождя, позволяющая выделить стратификацию по типу «теплого носа».

Кроме временных изменений условий атмосферной стратификации над Москвой, была рассмотрена пространственная картина термической структуры тропосферы в зоне теплого фронта. С этой целью по данным радиозондирования в Рязани, Москве, Бологом и Санкт-Петербурге за 00 ВСВ 11 ноября был получен вертикальный разрез через фронтальную зону для периода (аэрологического срока) максимально интенсивности выпадения замерзающих осадков в Москве (рисунок 4.26).

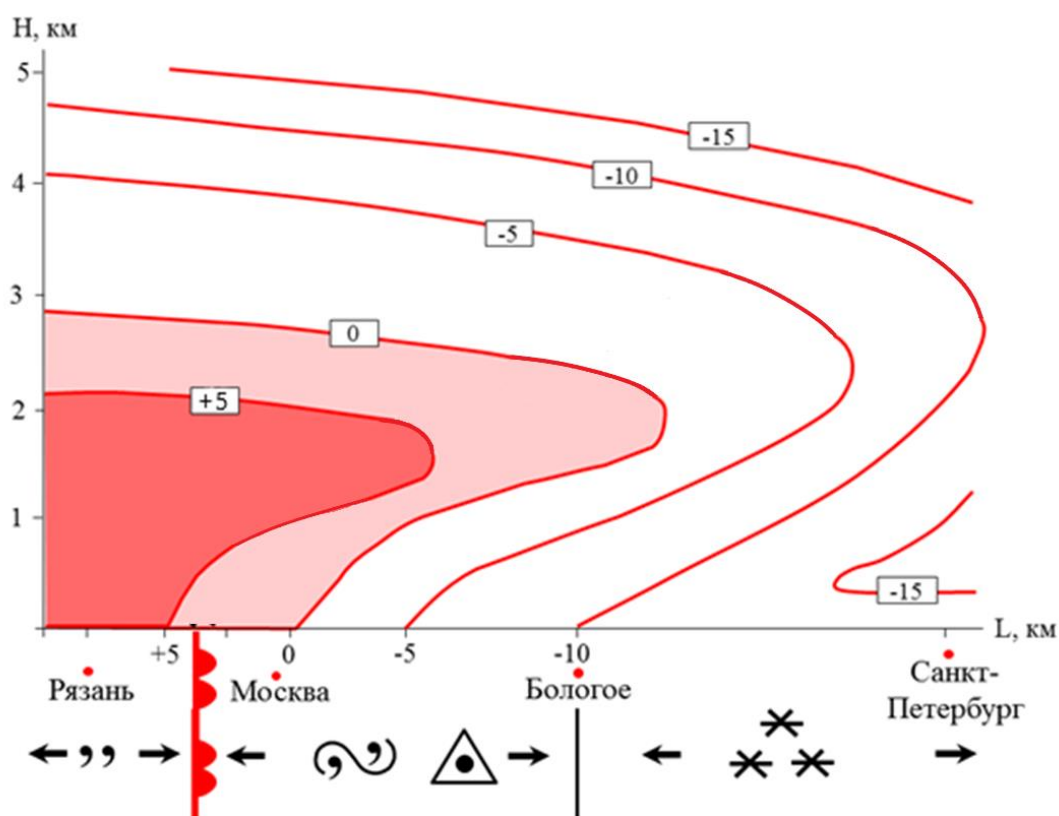


Рисунок 4.26 – Термическая структура тропосферы в зоне теплого фронта при выпадении замерзающего дождя с образованием гололеда 00 ч ВСВ 11 ноября 2016 года

Видно, что при наличии замерзающих осадков и гололеда слой с положительной температурой располагается на некоторой высоте над земной поверхностью, что обеспечивает необходимую эволюцию твердых обложных осадков в жидкие, а затем в переохлажденные.

Как и в случае декабря 2010 года слой с положительной температурой располагался несколько ниже фронтальной поверхности в холодной воздушной массе, что является наиболее характерным для фронтальных гололедных ситуаций. Именно такая ситуация позволяет растаявшему снегу при дальнейшем падении к земле превращаться в переохлажденные капли дождя, замерзающие на земле при наличии отрицательной температуры поверхности.

Так как в случае 2016 года наблюдалась двусторонняя адвекция температуры, было сделано предположение, что слой положительных температур, так же, как и в 2010 году, находился несколько ниже фронтальной поверхности. Замерзающие осадки имели большую интенсивность и гололедообразующие явления наблюдались в широкой полосе 300-400 км перед теплым фронтом.

Во Владимирской, Тверской, Ивановской и других областях ледяной шторм 2016 года привел к очень серьезным последствиям. Московская область избежала их благодаря адвекции теплого воздуха, которая поспособствовала быстрому таянию ледяной корки на земле и различных предметах.

Третий рассматриваемый период приходился на вторую половину ноября 2020 года. В первой половине ноября 2020 года в Приморье наблюдалась теплая погода, со средней температурой воздуха на несколько градусов выше нормы. Первая декада ноября по данным наблюдений оказалась теплее нормы на $1,5^{\circ}\text{C}$, вторая на $4,5^{\circ}\text{C}$.

За три дня до начала катастрофического ледяного шторма, 16 ноября, в южной части Приморья наблюдалась спокойная погода. Основным центром действия атмосферы, определяющим погодные условия, являлся сибирский антициклон. Температура воздуха в районе Владивостока составляла около 5°C днем, и около 1°C ночью и в утренние часы. Значение давления превышало 1025 гПа. Наблюдался ветер северных направлений со скоростью до 10 м/с и порывами до 16 м/с.

Днем 17 ноября (около 00 ВСВ 17.11.2020) через Владивосток прошел теплый атмосферный фронт, направление ветра сменилось на северо-западное, а

потом на юго-восточное. Температура воздуха начала повышаться. В это же время, над юго-восточным Китаем сформировался циклон, который под действием ведущего потока смещался на восток (рисунок 4.27).

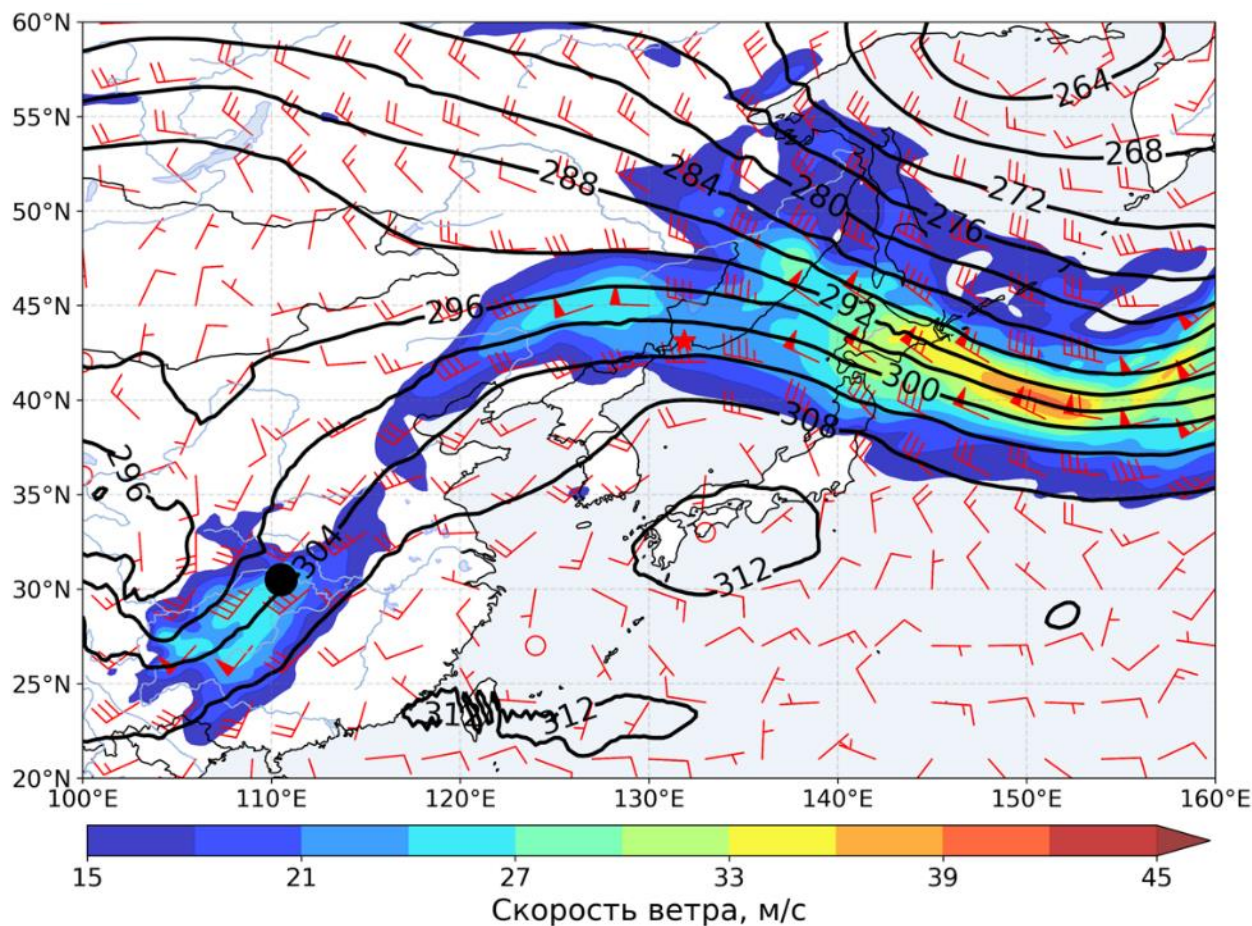


Рисунок 4.27 – Карта абсолютной барической топографии 700 гПа по данным реанализа ERA5 за 17.11.2020 00:00 ч ВСВ (черной точкой отмечено приземное положение центра южного циклона)

В течение 18 ноября южный циклон смещался в северо-восточном направлении, к концу дня пересек Желтое море и достиг района границы Китая и КНДР (рисунок 4.28).

В 3 часа ночи по местному времени во Владивостоке были зафиксированы первые отложения льда величиной 1 мм. В первой половине дня 18 ноября наблюдались осадки в виде слабого ливневого дождя с ухудшением горизонтальной дальности видимости до 200 метров. Во второй половине дня наблюдались осадки в виде мороси и ливневого дождя, направление ветра сменилось на северное.

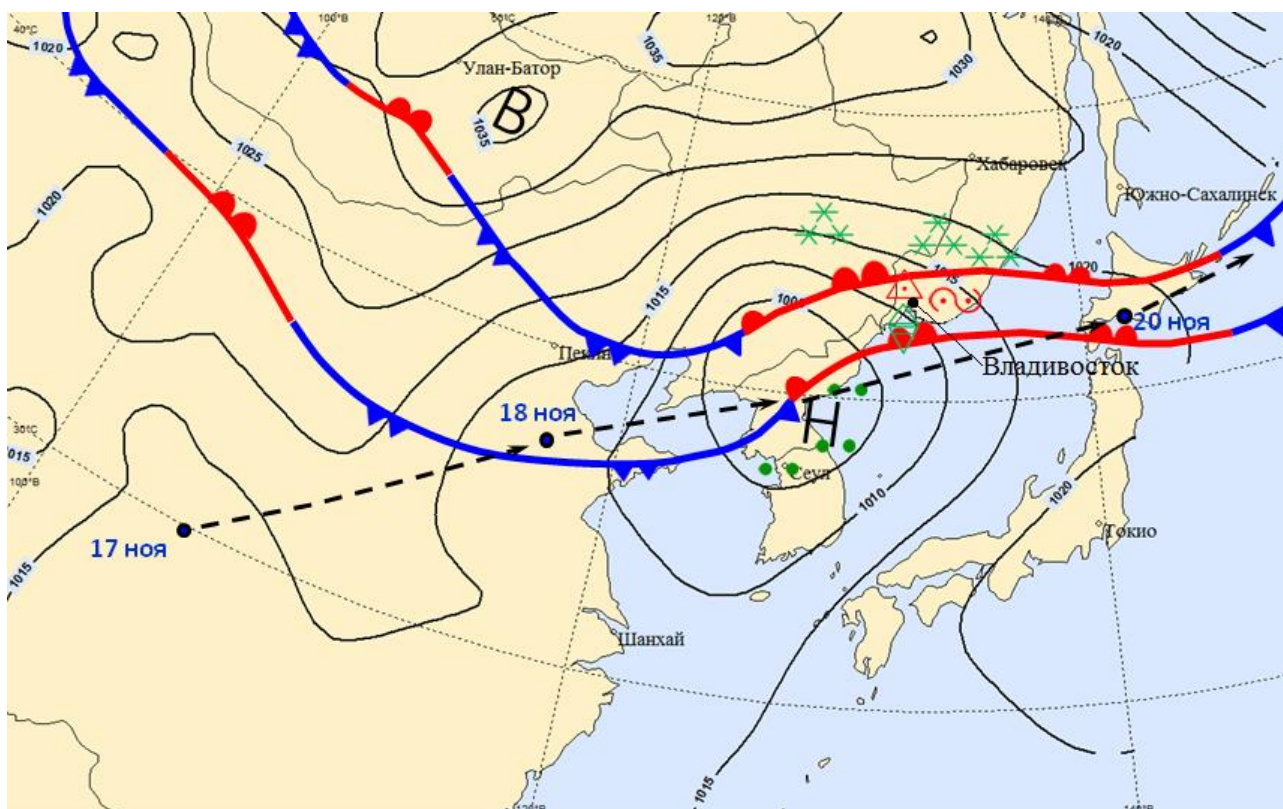


Рисунок 4.28 – Карта приземного синоптического анализа за 19.11.2020 00:00 ВСВ, траектория перемещения южного циклона (точками отмечено положение центра действия для 00:00 ч ВСВ каждого дня)

Ночью 19 ноября южный циклон продвинулся на восток. К этому времени давление в центре циклона составляло менее 1000 гПа. Атмосферное давление во Владивостоке продолжало понижаться, и к 19 часам по местному времени составило 1001,9 гПа. С приближением теплого фронта, теплый и влажный тропический воздух стал надвигаться на холодный умеренный континентальный воздух. В ходе вынужденной конвекции на юге Приморья усилился процесс осадкообразования. В районе Владивостока наблюдались осадки в виде крупы, ливневого снега, ледяного и замерзающего дождя (рисунок 4.28).

Таким образом, ночью 19 ноября юг Приморского края находился в сложной синоптической обстановке. Около земли наблюдалась отрицательная температура воздуха от -1 до -5°C , которая была обусловлена притоком холодной континентальной воздушной массы с севера. В то же время, на высотах от 800 до

2900 метров, располагалась теплая и очень влажная воздушная масса, с температурой воздуха выше 5°C , которую принес южный циклон.

Такая структура атмосферы привела к тому, что осадки в виде снега, проходя через слой воздуха с положительной температурой, превращались в капли дождя, далее, в приземном слое холодного воздуха переохлаждались и мгновенно замерзали при столкновении с поверхностью земли, образуя слой гололеда.

К часу ночи 19 ноября диаметр гололедных отложений составил 5 мм, к 7 часам утра следующего дня по местному времени – 12 мм, к 13 часам – 28 мм. Максимальный диаметр отложений гололеда сохранялся до 10 часов утра 20 ноября, общая продолжительность обледенения составила 210 часов, практически 9 дней.

По данным Приморского УГМС, гололедно-изморозевые отложения наблюдались также на метеорологических станциях Анучино и Тимирязевский.

На метеорологической станции Анучино образование гололеда началось 19 ноября в 4 часа утра и продолжалось 15 часов. Толщина отложения достигала 12 мм, диаметр – 29 мм. Максимальный вес отложения составил 184 г. Начало образования гололеда наблюдалось при слабо отрицательной температуре воздуха $-3,4^{\circ}\text{C}$, северо-восточном ветре, со скоростью 3 м/с. Отложения гололеда продержались 62 часа.

На метеорологической станции Тимирязевский образование гололеда началось 18 ноября в 22 часа по местному времени. Толщина отложения достигала 3 мм при диаметре 7 мм. Максимальный вес отложения составил 56 г. Начало гололедообразования наблюдалось при температуре воздуха $-2,3^{\circ}\text{C}$, северном ветре с направлением 17° , со скоростью 5 м/с. Отложения гололеда сохранялись 66 часов.

Временной ход нарастания и сохранения отложений гололеда на метеорологических станциях Владивосток, Анучино и Тимирязевский представлен на рисунке 4.29.

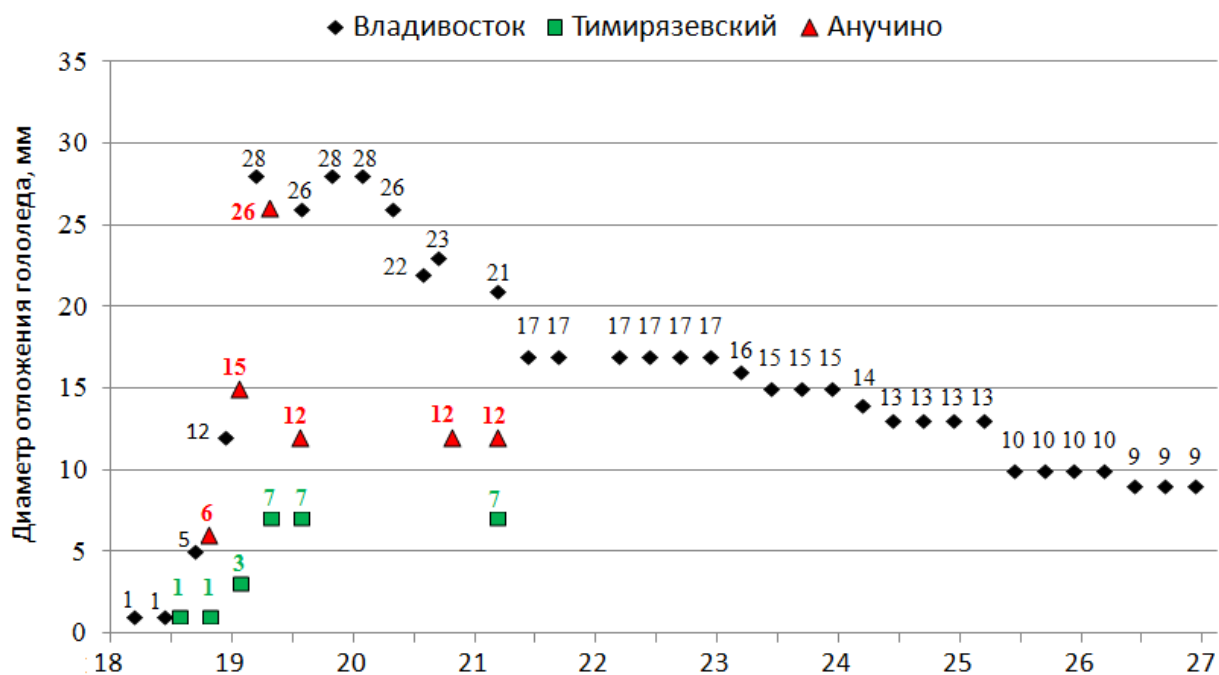


Рисунок 4.29 – График временного хода нарастания и сохранения отложений гололеда на метеорологических станциях Владивосток, Тимирязевский и Анучино на момент времени 00:00 ВСВ в период 18-27.11.2020 года

Помимо описанных выше случаев образования гололеда, 19-20 ноября 2020 года в Приморском крае, там же наблюдались и другие опасные явления погоды. В эти дни на всей территории края прошли сильные и очень сильные осадки в виде дождя, мокрого снега и снега. Общее количество выпавших осадков за период 19-20 ноября составило 30-74 мм, местами на западе и юго-востоке края 77-90 мм.

Еще одна особенность рассматриваемой синоптической ситуации состояла в том, что южный циклон продолжил смещаться на восток, и юг Приморья в последующие дни находился под действием отрога Сибирского антициклона, что привело к сохранению отрицательной температуры воздуха в данном регионе и, как следствие, сохранению отложений льда вплоть до 27 ноября 2020 года.

При анализе синоптических условий, приводящих к опасным гололедным явлениям, особенное значение имеет исследование вертикальной структуры тропосферы. С этой целью, по данным радиозондирования на аэрологических станциях Владивосток (Сад-Город), Дальнереченск и южнокорейского города Каннин за 00:00 ВСВ 19 ноября 2020 года был построен вертикальный разрез через

фронтальную зону для периода максимальной интенсивности замерзающих осадков дождя во Владивостоке (рисунок 4.30а).

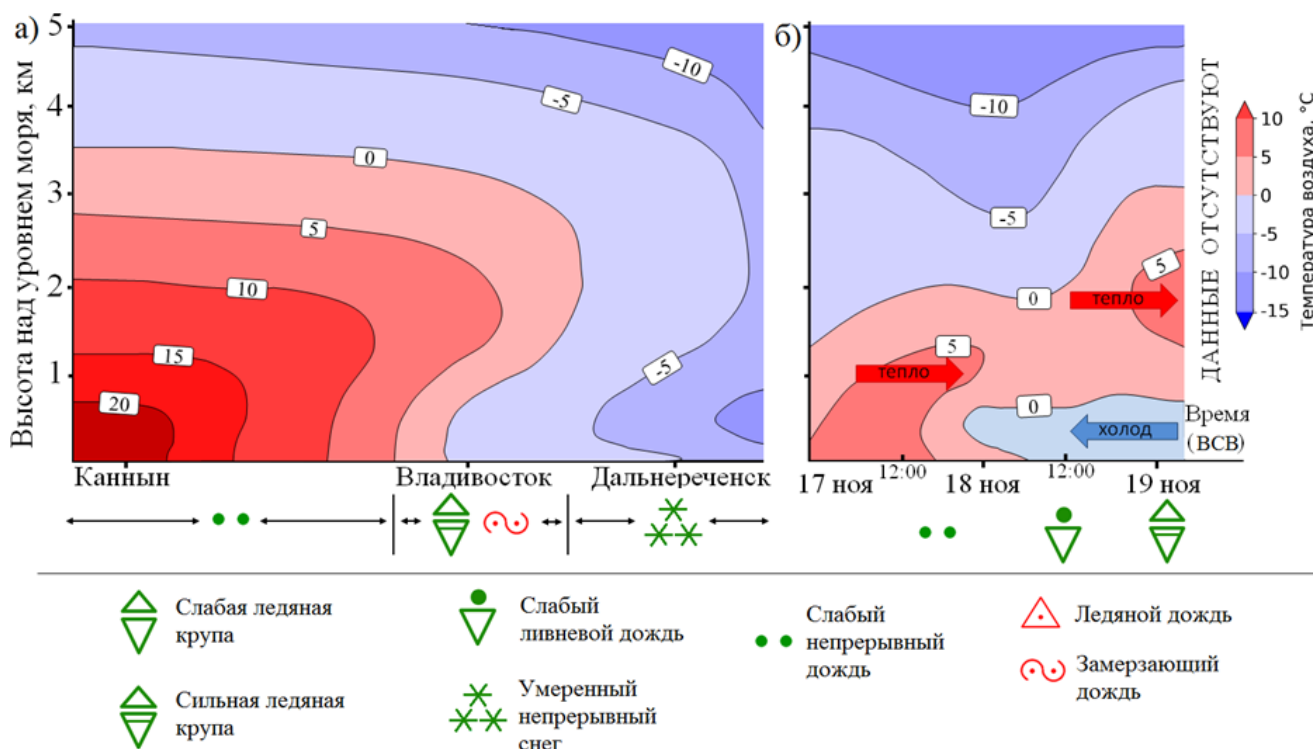


Рисунок 4.30 – а) Термическая структура тропосферы в 00:00 ч ВСВ 19.11.2020 г. в зоне теплого фронта при выпадении замерзающих осадков с образованием гололеда в ноябре 2020 года; б) эволюция очага замерзающего дождя во Владивостоке в период 17-19 ноября 2020 года

Утром 19 ноября, в момент максимальной интенсивности выпадения замерзающих осадков и образования гололеда, слой с положительной температурой воздуха располагался приблизительно от 700 до 3000 м над земной поверхностью, что создавало благоприятные условия перехода твердых обложных осадков в жидкие, а затем в переохлажденные в зоне отрицательных температур. Слой с положительной температурой располагался в холодной воздушной массе, что является наиболее характерным показателем для фронтальных гололедных ситуаций. Данные радиозондирования не позволяют оценить протяженность выдвигения слоя положительных температур с высокой точностью, но учитывая большую вертикальную мощность данного слоя и широкую полосу гололедообразования, можно сделать предположение, что выдвигение области

положительных температур в область холодной воздушной массы составляло не менее 150 км.

Описанная выше картина, как правило, характерна для случаев интенсивных и продолжительных гололедообразующих ситуаций. В ноябре 2020 года гололедообразующие явления наблюдались в широкой полосе (300-400 км) перед теплым фронтом и были, в первую очередь, связаны с глубоким выдвиганием слоя с положительной температурой в сторону холодной воздушной массы.

Значительное искривление изотерм в холодном подфронтальном воздухе свидетельствует о том, что наряду с адвекцией теплого и влажного тропического воздуха на высотах более 1200 м, в приземном слое до высоты 500 м наблюдается не менее интенсивная адвекция холода. Таким образом, в области перед теплым фронтом имеет место двухсторонняя адвекция.

Ранее автором работы было сделано предположение, что чем интенсивнее указанная двухсторонняя адвекция, тем ярче проявляется аномальное искривление изотерм в подфронтальной холодной воздушной массе, и тем больше протяженность зоны гололедных явлений теплого фронта [Семенов и др., 2018]. Ноябрьский случай образования гололеда на юге Приморского края стал очередным подтверждением этого предположения.

Помимо пространственной картины термической структуры тропосферы в зоне прохождения теплого фронта, были рассмотрены временные изменения условий атмосферной стратификации над Владивостоком.

В ходе анализа временного хода основных параметров стратификации в нижних слоях тропосферы над Владивостоком в период рассмотренных выше событий, была построена схема эволюции очага замерзающего дождя (рисунок 4.30б), которая наглядно иллюстрирует основные детали вертикальной структуры атмосферы. На предлагаемой схеме отчетливо проявилась обширная «линза» теплого и влажного воздуха, характерная для явления замерзающих и ледяных дождей высокой интенсивности.

4.2. Синоптические условия формирования зернистой изморози⁴

Чаще всего синоптические условия формирования зернистой изморози схожи с условиями формирования внутримассовых гололедов. Это процессы, связанные с образованием низкой внутримассовой облачности или плотного адвективного тумана [Воробьев, 1991].

В работе был проведен подробный синоптический анализ трех периодов, во время которых были зафиксированы опасные отложения зернистой изморози.

В конце сентября 1994 года погода на территории Полярного Урала определялась прохождением интенсивной циклонической серии. С 23 по 26 сентября 1994 года через область горного массива Рай-Из проходило два молодых циклона, смещавшихся в восточном направлении. В ночь с 26 на 27 сентября территория находилась в тылу уходящего на восток циклона, а в середине дня 28 сентября уже в области повышенного давления вблизи точки седловины, давление на метеорологической станции Рай-Из в тот момент составляло 1018,7 гПа. Под действием ведущего потока, к концу 28 сентября к территории подошел новый циклон серии (рисунок 4.31).

Утром 29 сентября, территория Полярного Урала располагалась в области сильной адвекции теплого воздуха. Она была обусловлена расположением исследуемой территории в теплом секторе мощного циклона, смещавшегося с района Балтийского моря в северо-восточном направлении. Температура воздуха начала повышаться с -2.9°C в сторону положительных значений, при этом относительная влажность воздуха достигла 100%. В момент начала обледенения на метеорологической станции Рай-Из был зафиксирован сильный ветер юго-западного направления со скоростью 16 м/с и с порывами до 23 м/с. В отдельные сроки наблюдений скорость возрастала до 20 м/с, а скорость порывов до 26 м/с (рисунок 4.32).

⁴ Раздел написан на основе статьи [Леонов, 2022]

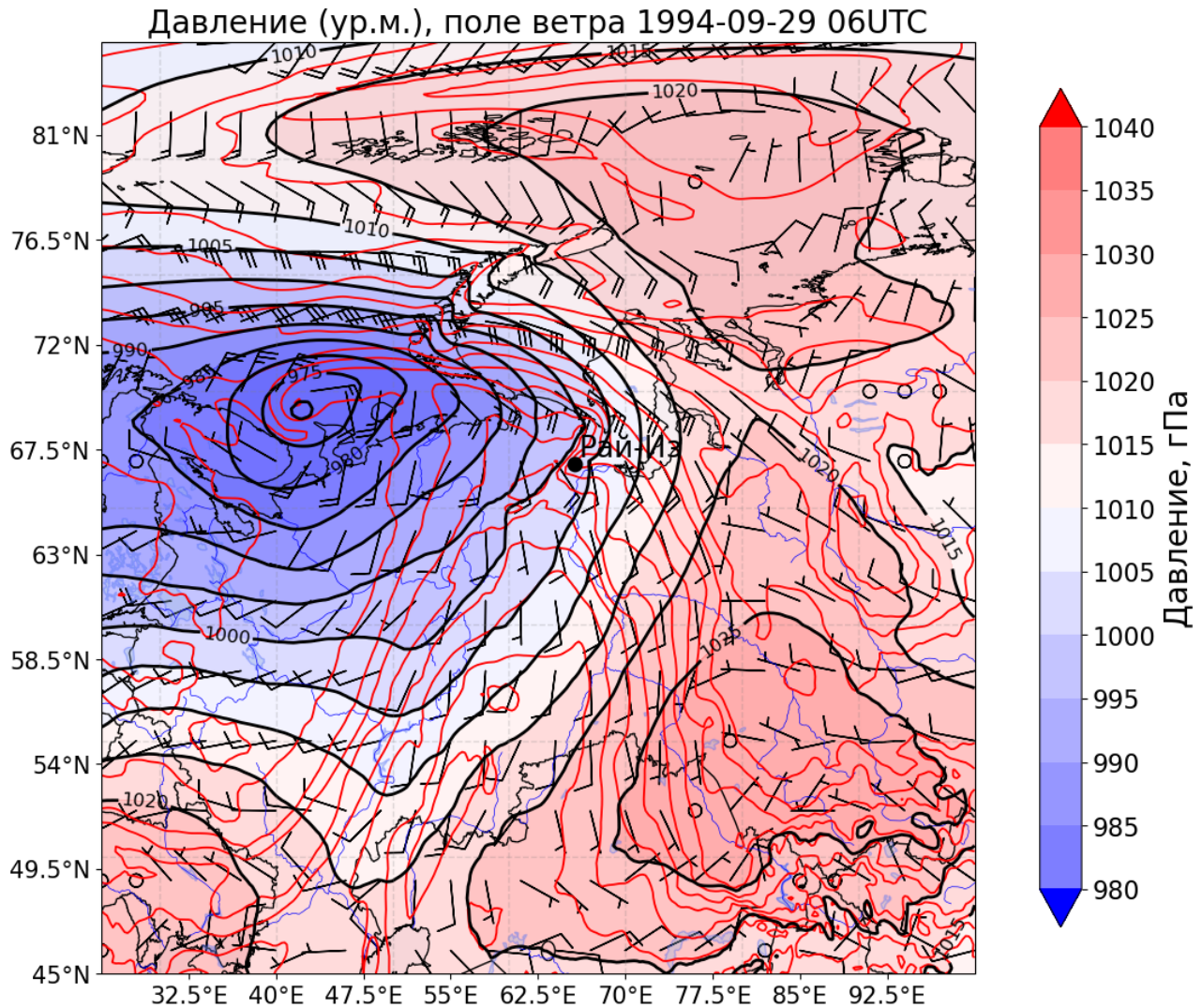


Рисунок 4.31 – Синоптические условия в период наиболее интенсивного образования отложений изморози на территории Полярного Урала: 29.09.1994 06 ч ВСВ

Фаза сохранения отложений зернистой изморози длилась 21 час, что всего на 2 часа больше, чем продолжительность фазы нарастания. Столь небольшая разница в продолжительности стадий была связана с продолжавшейся адвекции тепла и ростом температуры воздуха до положительных значений, а также с прохождением слабого ливневого дождя, который привел к быстрому разрушению отложений льда.

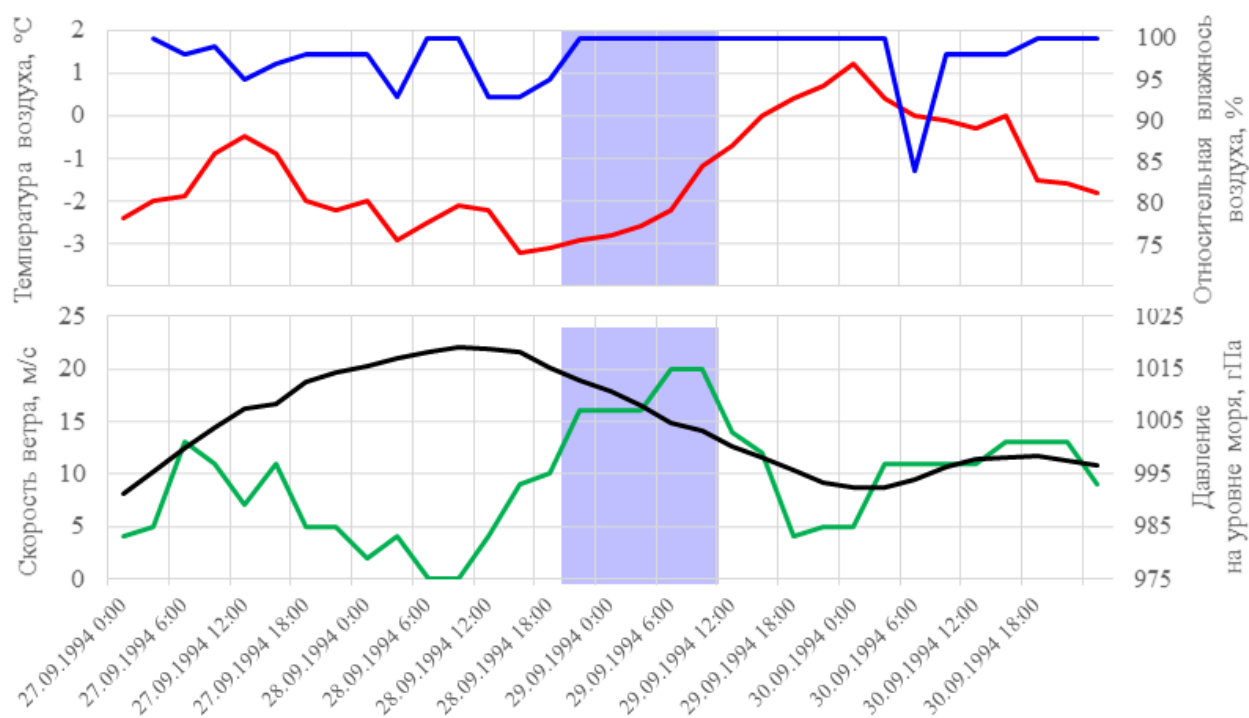
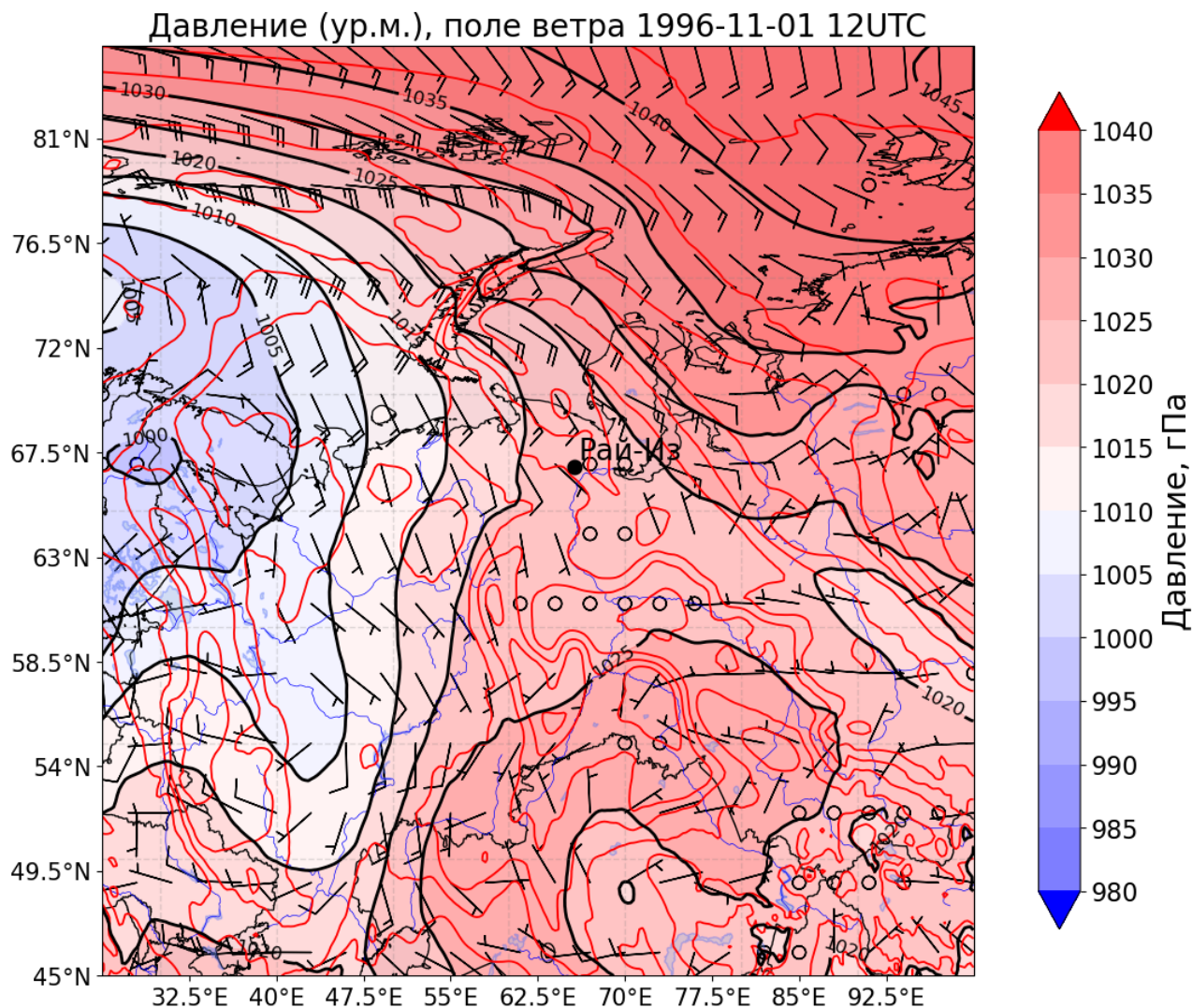


Рисунок 4.32 – Ход основных метеорологических величин с 27 по 30 сентября 1994 года: синяя линия – относительная влажность воздуха на высоте 2 м, красная – температура воздух на высоте 2 м, черная – атмосферное давление на уровне моря, зеленая – средняя скорость ветра на высоте 10 м

Иная ситуация наблюдалась в конце октября - начале ноября 1996. Во время второго рассматриваемого периода, район метеорологической станции Рай-Из находился в области размытого барического поля (рисунок 4.33).

По данным реанализа ERA5 наблюдался ветер юго-восточных направлений, который приносил холодный воздух с выхолаженной под действием антициклона территории полуострова Таймыр, это показывает масштабный процесс адвекции холода. Однако на метеорологической станции в момент образования зернистой изморози наблюдался ветер переменных направлений, от южного до западного. Этот факт объясняется мезомасштабной циркуляцией, возникшей в условиях размытого барического поля и влияния горного массива Рай-Из. Скорость ветра при обледенение составляла 10-12 м/с с порывами до 14 м/с. Температура воздуха в следствие адвекции холода понижалась, относительная влажность воздуха возрастала с 90 до 100% (рисунок 4.34).



Продолжительность фазы нарастания составила 79 часов, продолжительность фазы сохранения 122 часа. Столь продолжительная фаза нарастания изморози обусловлена слабо изменяющейся синоптической ситуацией. Действительно, метеорологическая станция Рай-Из находилась несколько дней в области размытого барического поля, также на протяжении всего периода наблюдалась отрицательная температура воздуха.

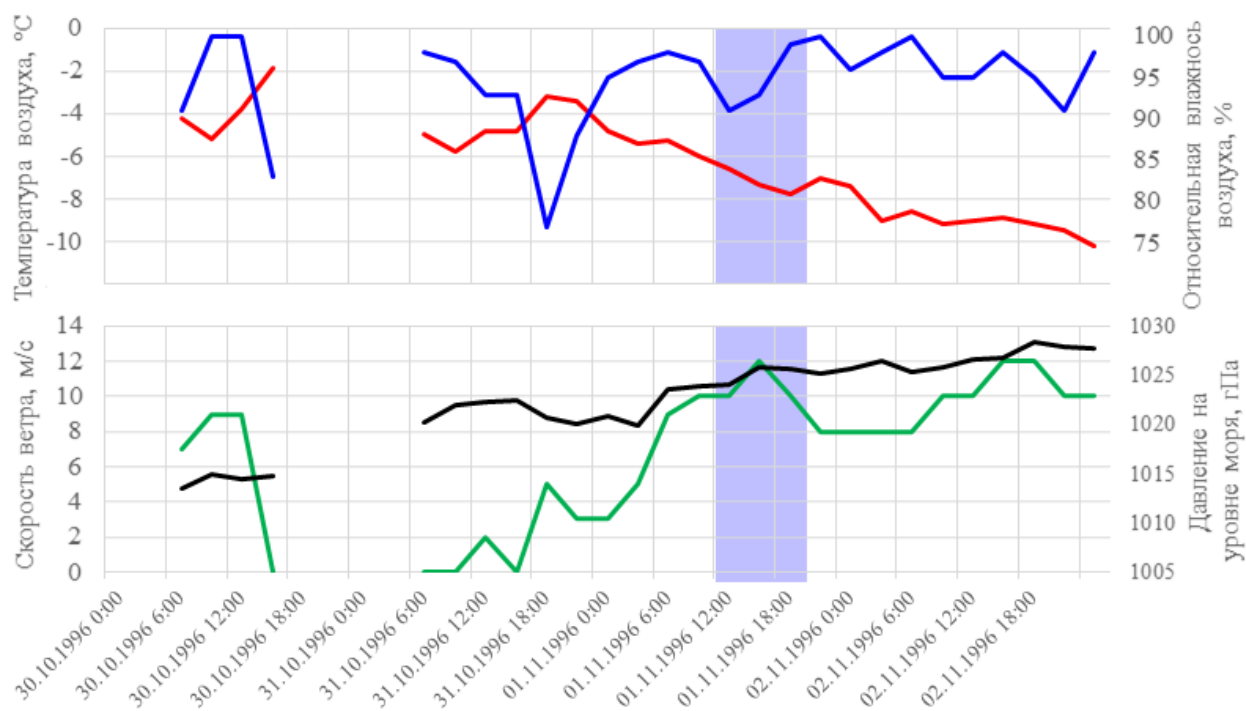


Рисунок 4.34 – Ход основных метеорологических величин с 30 октября по 2 ноября 1994 года: синяя линия – относительная влажность воздуха на высоте 2 м, красная – температура воздух на высоте 2 м, черная – атмосферное давление на уровне моря, зеленая – средняя скорость ветра на высоте 10 м

Третий рассмотренный синоптический период приходился на середину октября 1997 года. 18 октября 1997 года территория Полярного Урала располагалась в центре антициклона, значения атмосферного давления на метеорологической станции Рай-Из приведенные к уровню моря достигали 1030,8 гПа. В течение последующих суток область высокого давления смещалась на юго-восток, а в район горного массива Рай-Из продвигался мощный циклон с Баренцева моря. На момент начала обледенения массив Рай-Из находился практически в точке седловины (рисунок 4.35).

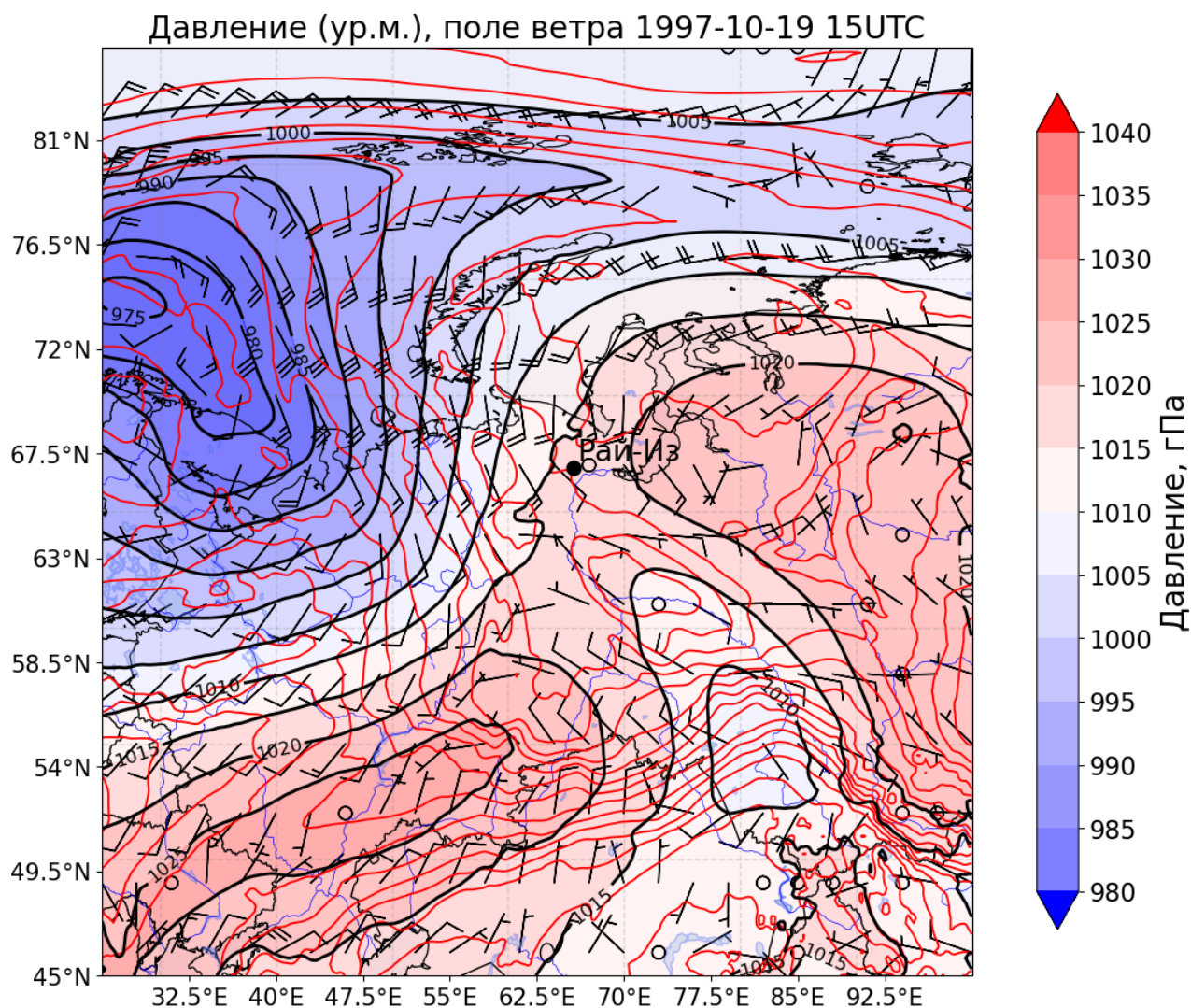


Рисунок 4.35 – Синоптические условия в период наиболее интенсивного образования отложений изморози на территории Полярного Урала 19.10.1997 15 ч ВСВ

С продвижением циклона на восток, усиливалась адвекция тепла. Температура начала повышаться. Относительная влажность воздуха на протяжении всего обледенения составляла 100%. Скорость ветра от 10 до 14 м/с с порывами до 20 м/с (рисунок 4.36). Направление ветра юго-западное и южное. Зернистая изморозь нарастала в течение 57 часов. Ледяные отложения сохранялись 72 часа, до полудня 22 октября 1997 года.

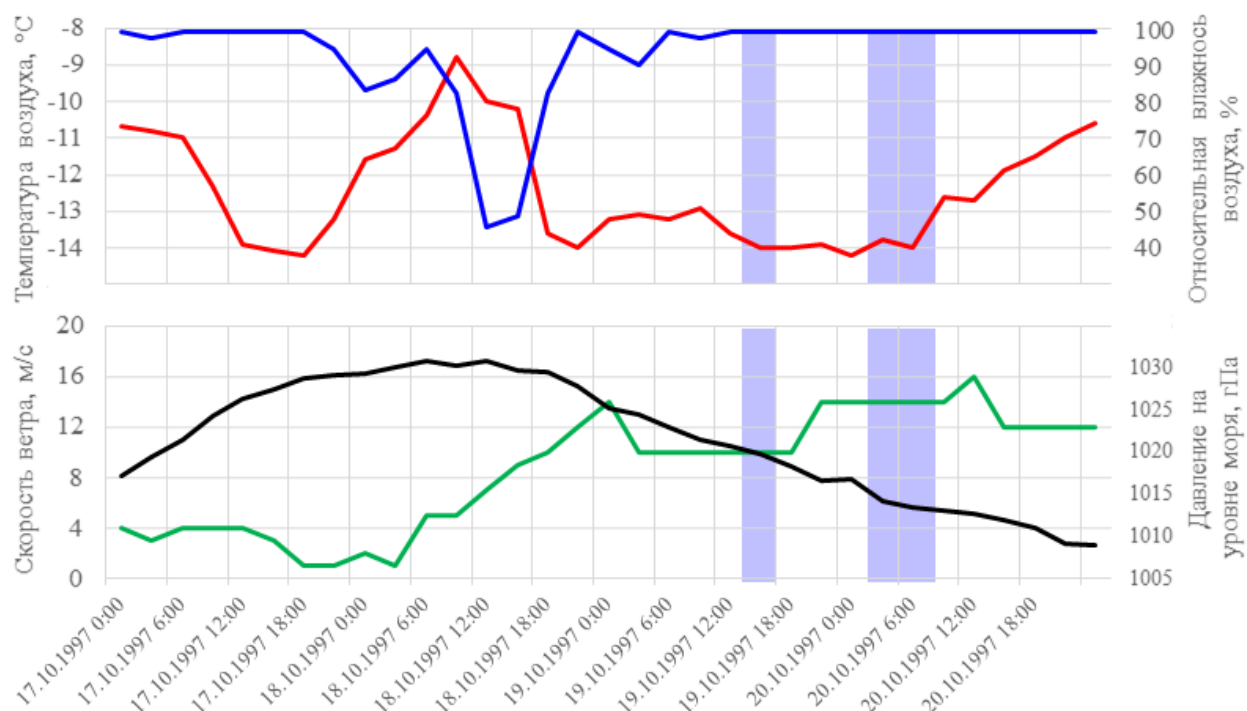


Рисунок 4.36 – Ход основных метеорологических величин с 17 по 20 октября 1994 года: синяя линия – относительная влажность воздуха на высоте 2 м, красная – температура воздух на высоте 2 м, черная – атмосферное давление на уровне моря, зеленая – средняя скорость ветра на высоте 10 м

Результаты синоптического анализа показали, что во всех трех случаях наблюдались различные синоптические ситуации. Особенно сильное влияние в формировании зернистой изморози оказывали именно мезометеорологические процессы: образования сплошного переохлажденного тумана, вызванного перетеканием воздушных масс через горный хребет, а также усиление скорости ветра. Показано, что во время проведения синоптического анализа для территорий слабо освещенных данными наблюдений целесообразно использовать данные расчетов численных моделей атмосферы.

4.3. Синоптические условия формирования отложений мокрого снега

На заключительном этапе работы был проведен анализ синоптических условий, во время которых были зафиксированы опасные отложения мокрого снега. Типичные условия формирования впадения осадков в виде мокрого снега описаны в главе 1.4.

В главе 3.1 было показано, что опасные отложения в виде мокрого снега чаще всего наблюдаются на территории Дальнего Востока и на Кавказе.

Первый рассмотренный случай произошел в конце ноября 1988 года. Тогда, 21 ноября на территории южного Китая образовался циклон, который начал смещаться на юго-восток под действием ведущего потока со скоростью около 35 км/ч, и через одни сутки, 23 ноября, располагался над Японским морем (рисунок 4.37).

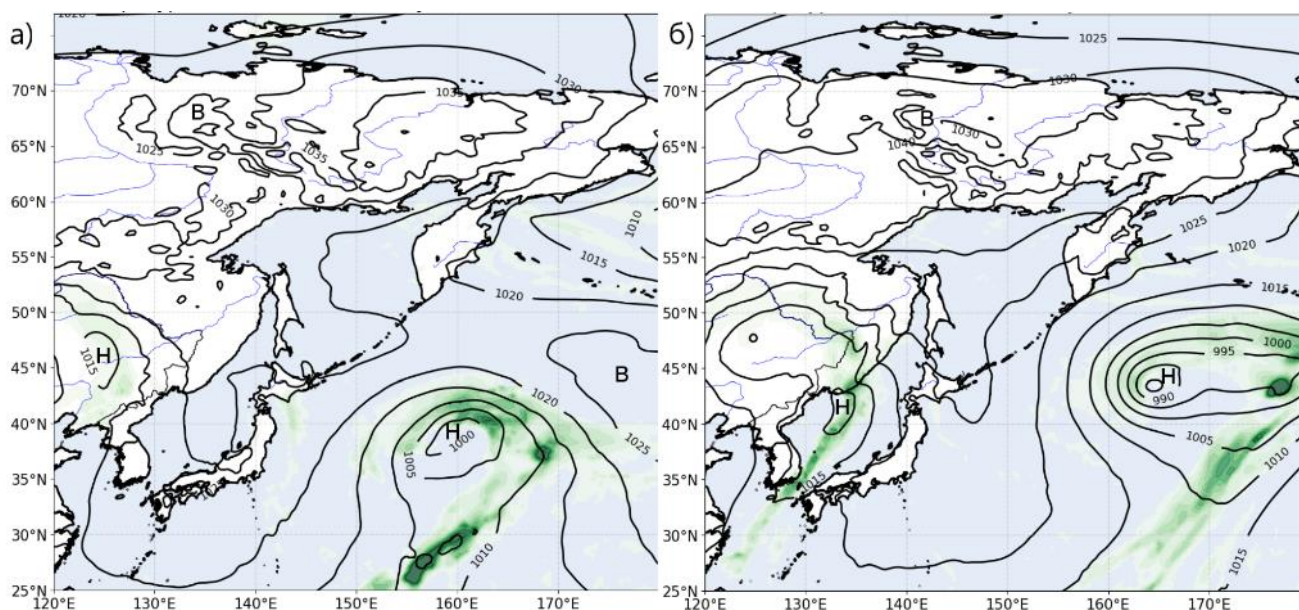


Рисунок 4.37 – Перемещение южного циклона, восстановленное по данным реанализа ERA5 а) 22.11.1988 00 ч ВСВ, б) 23.11.1988 00 ч ВСВ

Давление в центре циклона продолжало понижаться с течение 23 ноября. Через несколько часов, в конце 23 ноября теплый фронт полярной ветви циклона приблизился к южной части острова Сахалин.

На рисунке 4.38 представлен ход основных метеорологических величин с 23 по 28 ноября, измеренных на метеорологической станции, расположенной в селе Ильинское. Данная метеорологическая станция была выбрана для анализа, т.к. в последующем здесь будут зафиксированы отложения мокрого снега рекордного диаметра. 23 ноября на метеорологической станции начали отмечаться осадки в виде слабого дождя со снегом, который в течение нескольких часов перешел в

средний и умеренный ливневой снег, и продолжался непрерывно в течение двух с половиной суток, до 26 ноября 1988 года.

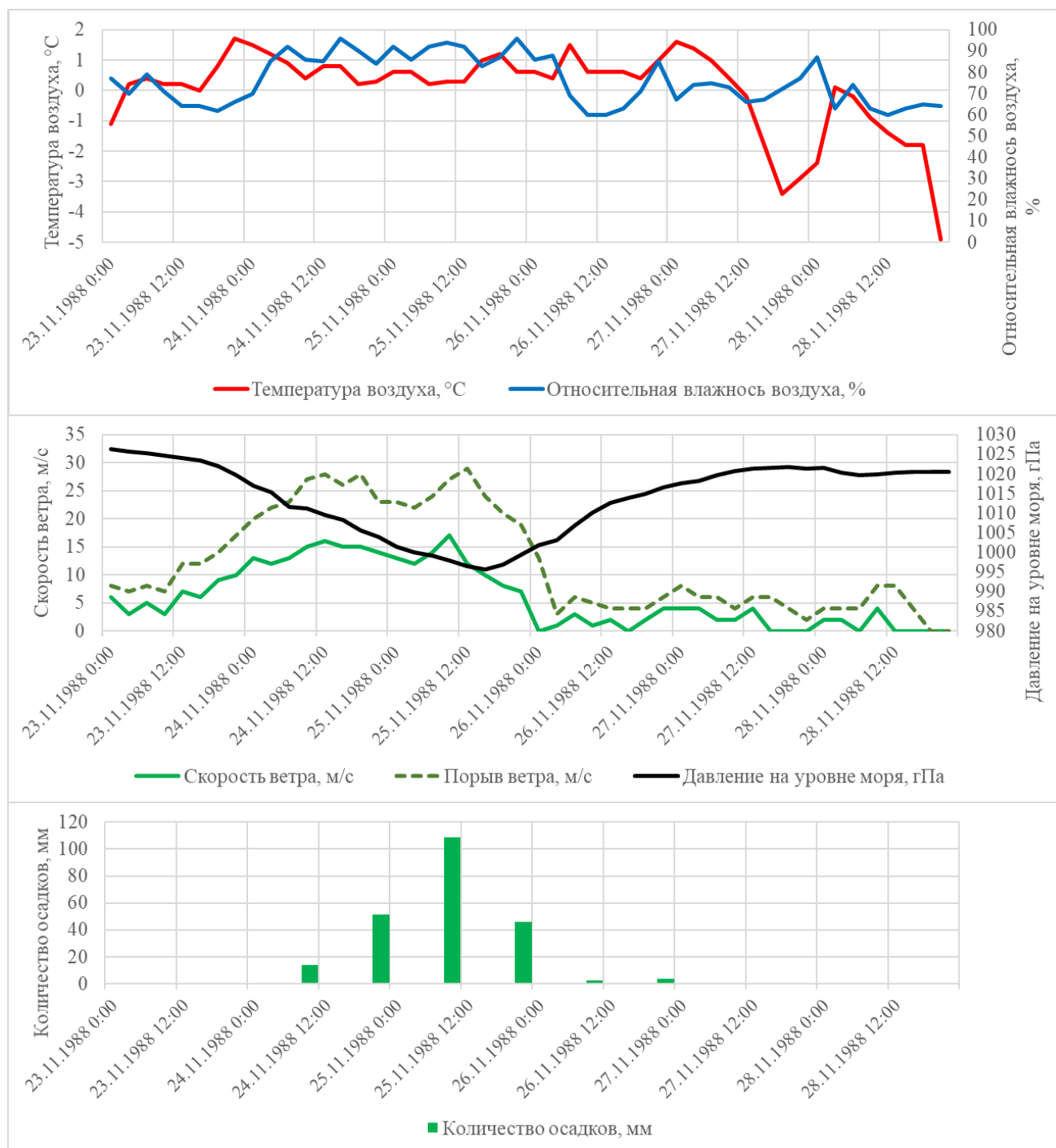


Рисунок 4.38 – Ход основных метеорологических величин с 23 по 28 ноября 1988 года на метеорологической станции Ильинский (о. Сахалин)

На рисунке 4.39 представлена синоптическая карта в момент начала отложений мокрого снега на юге Сахалина восстановленная с использованием данных реанализа ERA5. На данной карте видно, что мощный циклон втянул в

свою циркуляцию три воздушных массы. В передней части циклона наблюдалась мощная адвекция тепла с еще теплой южной части Охотского моря. В тылу циклона наблюдался заток арктического воздуха с континента (рисунок 4.40).

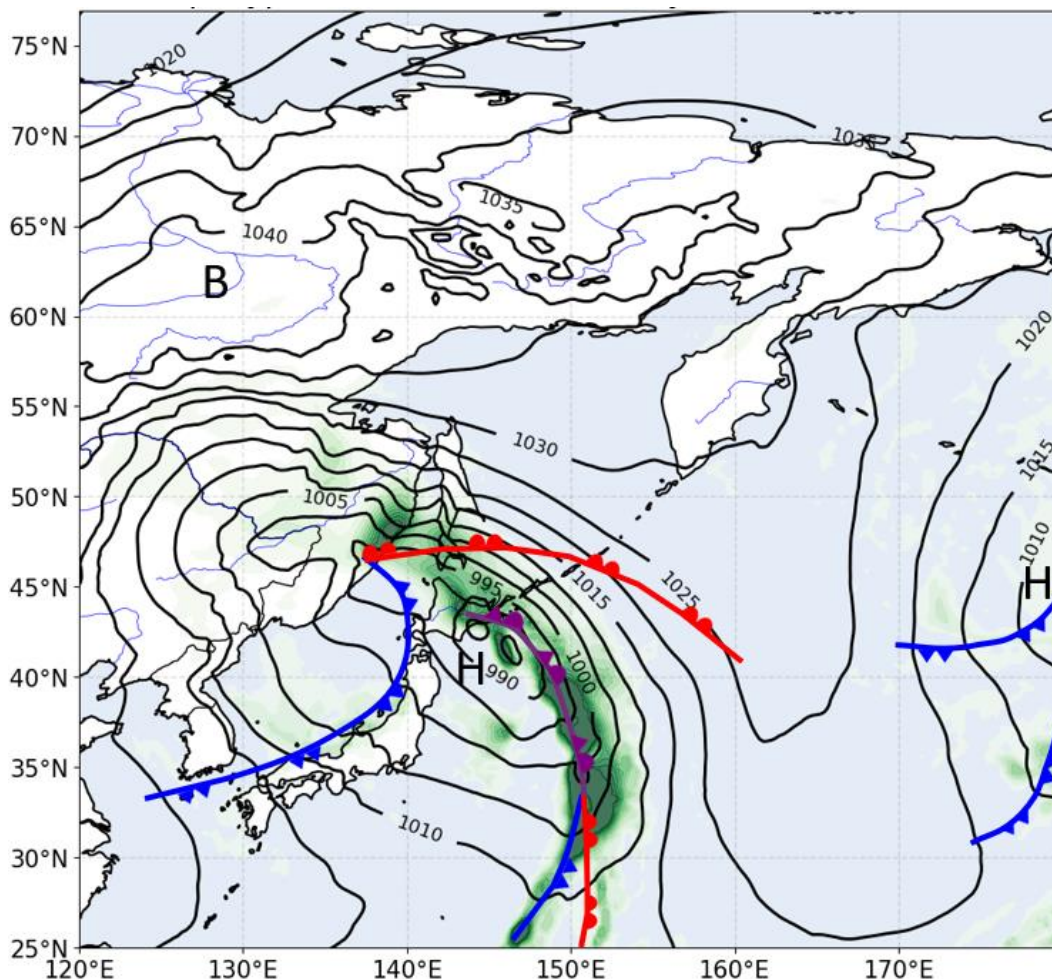


Рисунок 4.39 – Карта приземного синоптического анализа за 24.11.1988 21 ч ВСВ (составлена с использованием данных реанализа ERA5)

Во время прохождения циклона на территории юга Сахалина выпало несколько месячных норм осадков. Так, в Ильинском за трое суток выпало более 220 мм осадков. На нескольких метеорологических станциях были зафиксированы отложения в виде мокрого снега диаметром более 100 мм (рисунок 4.41). Отложения мокрого снега многократно превышающие критерии опасного явления привели к катастрофическим последствиям – было повреждено около 80% высоковольтных электрических сетей.

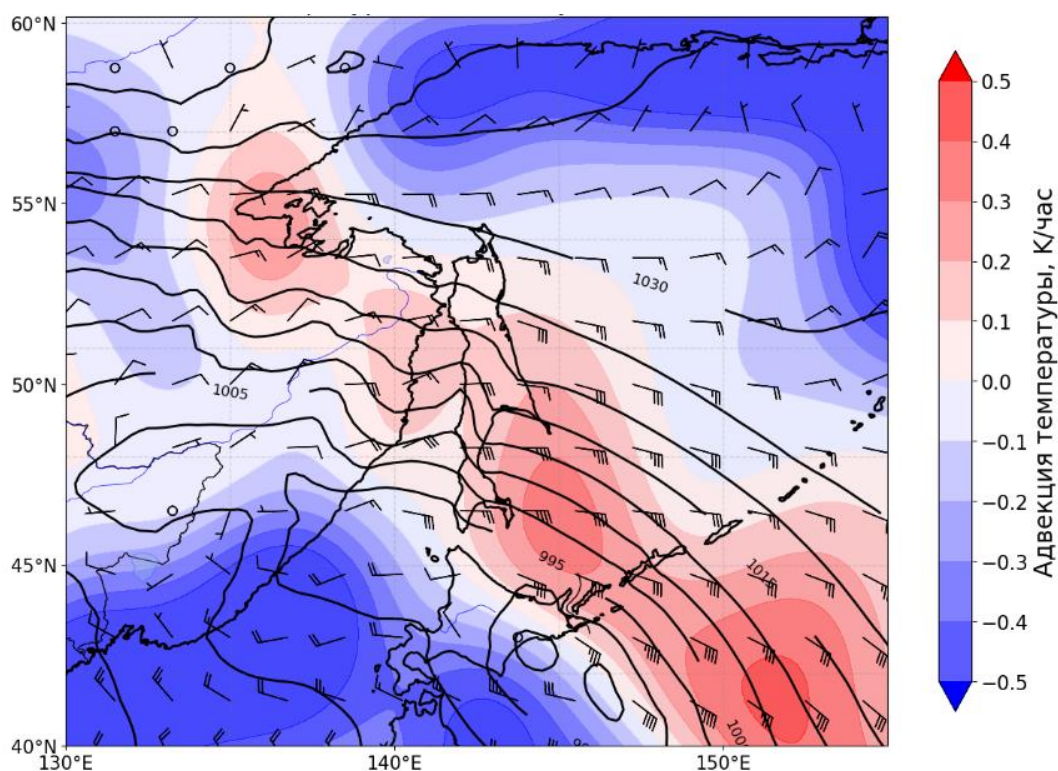


Рисунок 4.40 – Поле адвекции тепла по данным реанализа ERA5 за 24.11.1988 21 ч ВСВ

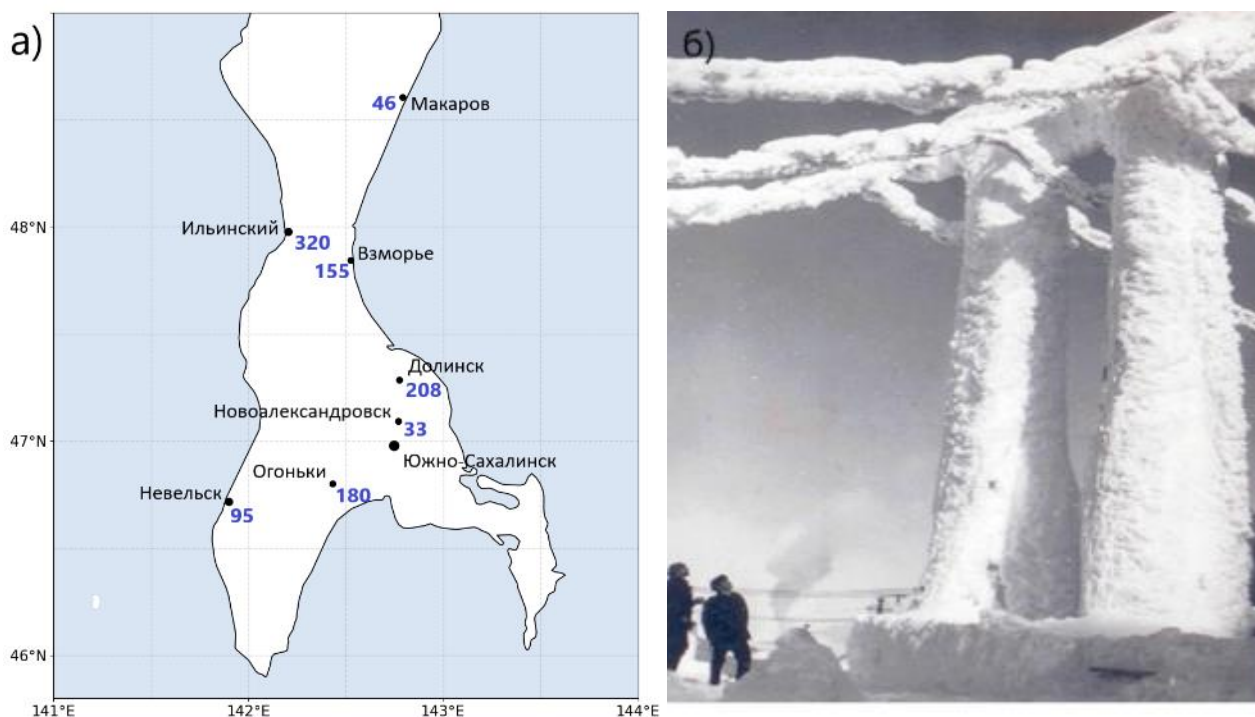


Рисунок 4.41 – а) диаметр отложений мокрого снега, образовавшихся в результате прохождения южного циклона 24 – 26 ноября 1988 г. Синими цифрами подписан диаметр отложений (мм), б) отложения мокрого снега на ВЛ 220 кВ «Макаров - Ильинское» (о. Сахалин) 24-26.11.1988 года

Десятки металлических опор воздушных линий электропередачи были повреждены, а многие деревянные опоры были полностью повалены. Более 500 тысяч человек остались без электроэнергии, в крупнейших шахтах прекратилась добыча угля [Сахалин и Курилы...]. 27 ноября циклон сместился на восток.

Территория Сахалина находилась под действием Сибирского антициклона – осадки прекратились, однако из-за понижения температуры отложения мокрого снега сохранялись на протяжении недели.

По данным реанализа ERA5 была рассмотрена вертикальная структура тропосферы в период формирования опасных отложений мокрого снега. На рисунке 4.42а и 4.42б представлены данные о временном изменении величин удельной и относительной влажности воздуха в Ильинском с 15 по 30 ноября 1988 года в нижнем пятикилометровом слое тропосферы.

На данных рисунках отчетливо проявляется прохождение мощного южного циклона. Во всем слое до 500 гПа наблюдалась высокая относительная влажность – 95-100%. Также в период образования мокрого снега в слое до 950 гПа (примерно до 400 м) наблюдалась положительная температура воздуха, что хорошо согласуется с известными условиями формирования отложений мокрого снега (рисунок 4.42в).

Наиболее ярко проявляется наличие восходящих потоков воздуха, с вертикальной скоростью более 2 м/с (Рисунки 4.42г). Восходящее скольжение теплого и влажного тихоокеанского воздуха способствовало формированию интенсивных осадков.

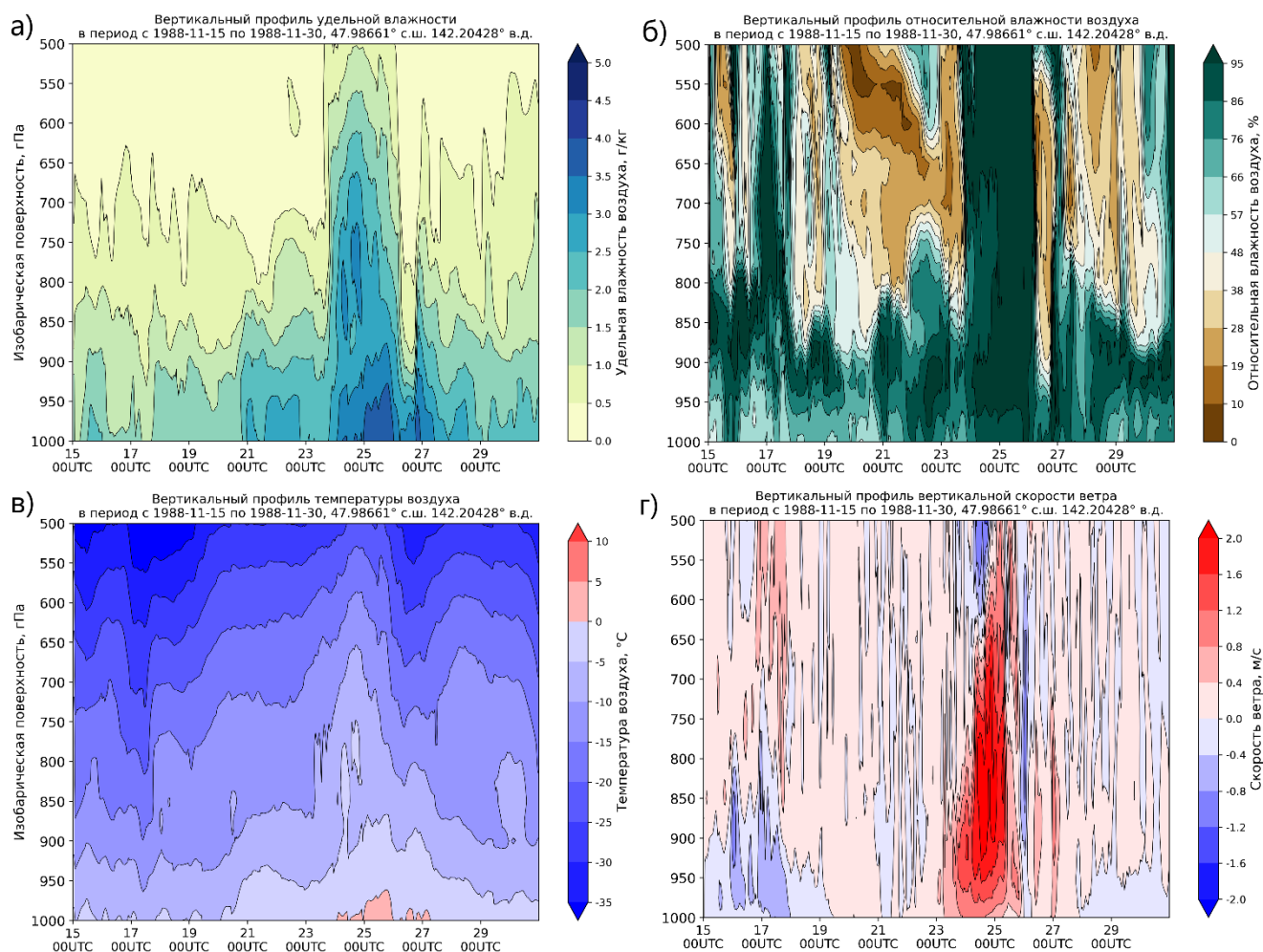


Рисунок 4.42 – Временные разрезы тропосферы по данным реанализа ERA5 для метеорологической станции Ильинский (о. Сахалин) с 15 по 30 ноября 1988:

- а) удельной влажности воздуха, б) относительной влажности воздуха, в) температура воздуха и г) вертикальной скорости ветра

В главе 3.2 было показано, что образование отложений мокрого снега обычно происходит при слабой скорости ветра или в момент штиля. При таких условиях снежинки не сдувает ветром, и они продолжают налипать на проводах, ветвях деревьев и других предметах. Наиболее ярко эти особенности проявляются для опасных отложений мокрого снега.

Случай, произошедший в ноябре 1988 года, является уникальным, т.к. образование отложений мокрого снега происходило при сильном ветре (рисунок 4.38). Средняя скорость ветра во время образования отложений мокрого снега на Сахалине достигала 15 м/с, отмечались порывы ветра со скоростью более 25 м/с. Причиной образования катастрофических отложений, в первую очередь, стало большое количество выпадающих осадков. Слабоположительная

температура воздуха (от 0 до 1°C) и высокая относительная влажность воздуха способствовала сильному обводнению снежинок и, как следствие, увеличению их способности к налипанию [Makkonen, 1989; Makkonen, Wichura 2010]. Высокая скорость ветра в совокупности с большим количеством осадков, вызывала сильный метелевый перенос, несущий в себе обводненные частицы снега. Таким образом, часть отложений мокрого снега, выпадающего из атмосферы и в последствие снесенная с проводов сильным ветром, компенсировалась отложениями мокрого снега, налипшими в процессе метелевого переноса.

Далее был рассмотрен случай высокоинтенсивных отложений мокрого снега, произошедший на полуострове Камчатка в 2008 году. В конце декабря 2008 года Камчатский полуостров подвергался прохождению циклонической серии. Один из циклонов этой серии образовался 24 декабря 2008 года в районе Японского моря, начал активно углубляться и смещаться на восток, и 26 декабря его центр располагался над акваторией Тихого океана, восточнее Курильских островов (рисунок 4.43). В этот момент циклон углубился до 985 гПа, замедлил свое перемещение и под действием ведущего потока начал смещаться на северо-запад (рисунок 4.44), где 28 декабря достиг стадии максимального развития (рисунок 4.45).

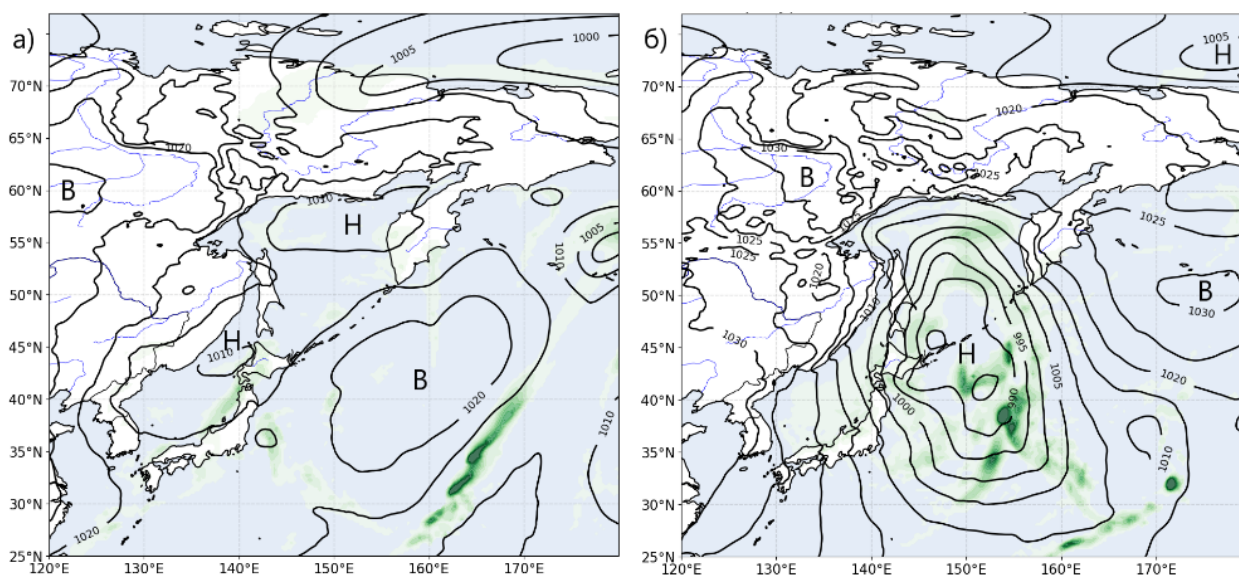


Рисунок 4.43 – Перемещение циклона, восстановленное по данным реанализа ERA5 а) 24.12.2008 15 ч ВСВ, б) 26.12.2008 00 ч ВСВ

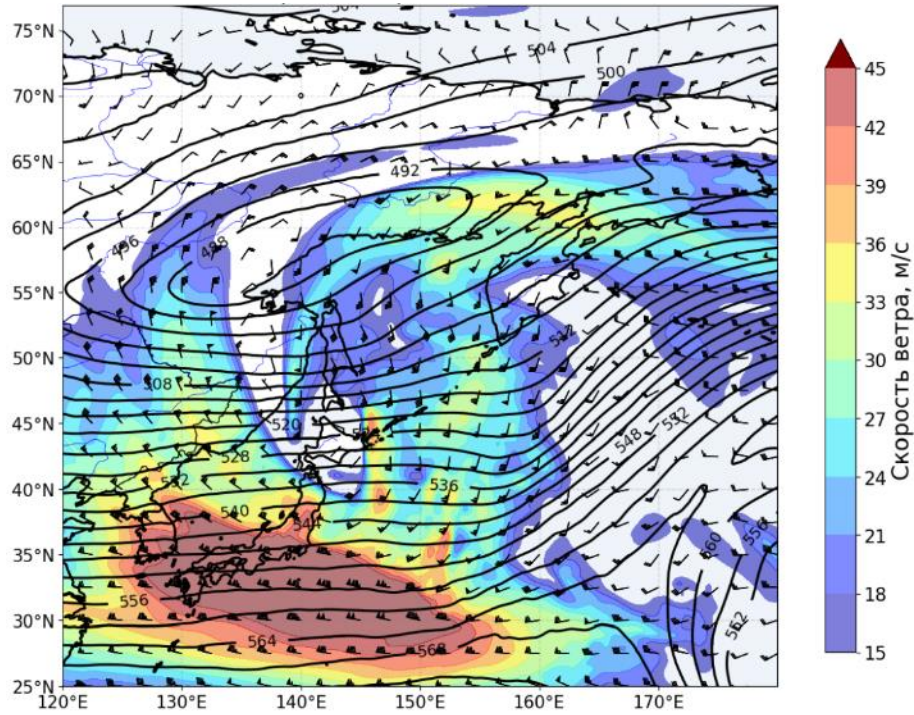


Рисунок 4.44 – Карта ведущего потока АТ500 гПа, восстановленная по данным реанализа ERA5 за 27.12.2008 00 ч ВСВ

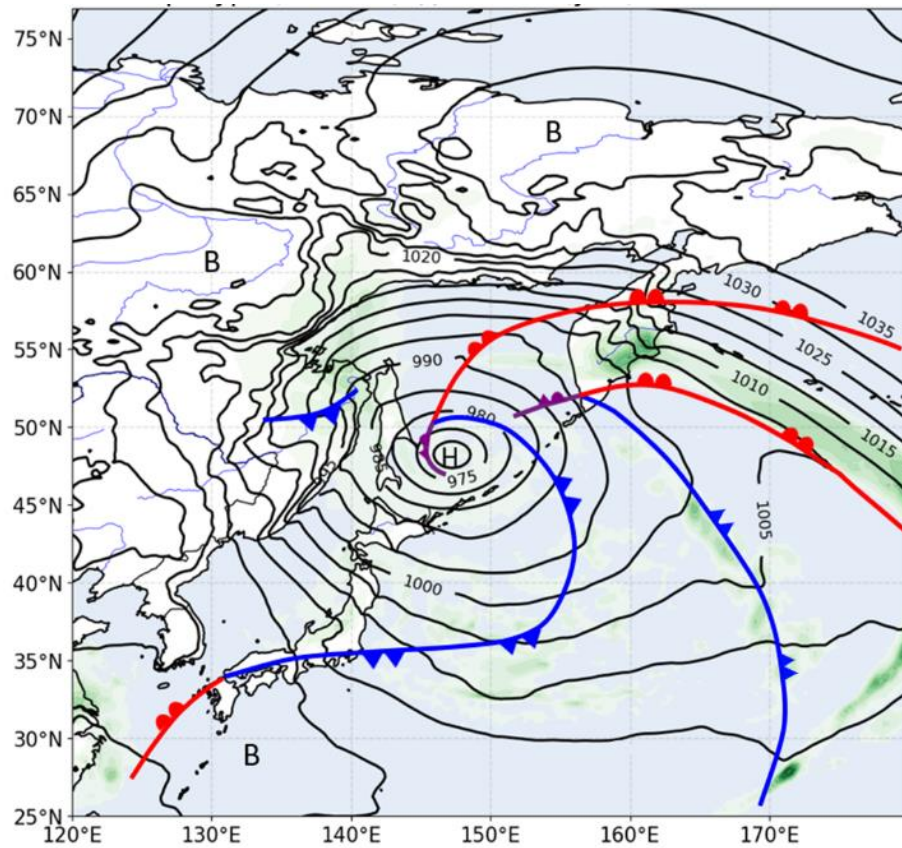


Рисунок 4.45 – Карта приземного синоптического анализа за 28.12.2008 00 ч ВСВ

В это время, в связи с приближением теплого фронта на метеорологической станции поселка Ключи, располагающейся в 75 км от восточного побережья Камчатки между Ключевской сопкой и влк. Шивелуч, наблюдался активный рост температуры. За двое суток температура воздуха поднялась с -26 до $0,5^{\circ}\text{C}$ (рисунок 4.46). С приближением теплого фронта было связано увеличение относительной влажности воздуха, которая в период с 27 декабря, по данным наблюдений, составляла 90-100%. Во время прохождения теплого фронта увеличилась скорость ветра, в момент формирования отложения мокрого снега она составляла от 2 до 8 м/с. Количество осадков, выпавших с 27 по 29 декабря, достигло 46 мм, что составляет около 70% от месячной нормы [Разуваев и др., 2020]. Осадки преимущественно выпадали в виде ливневого снега. Описанные выше синоптические условия привели к образованию отложений в виде мокрого снега, зафиксированных на метеорологической станции Ключи и достигающих 111 мм в диаметре, что превышает критерии опасного явления в несколько раз.

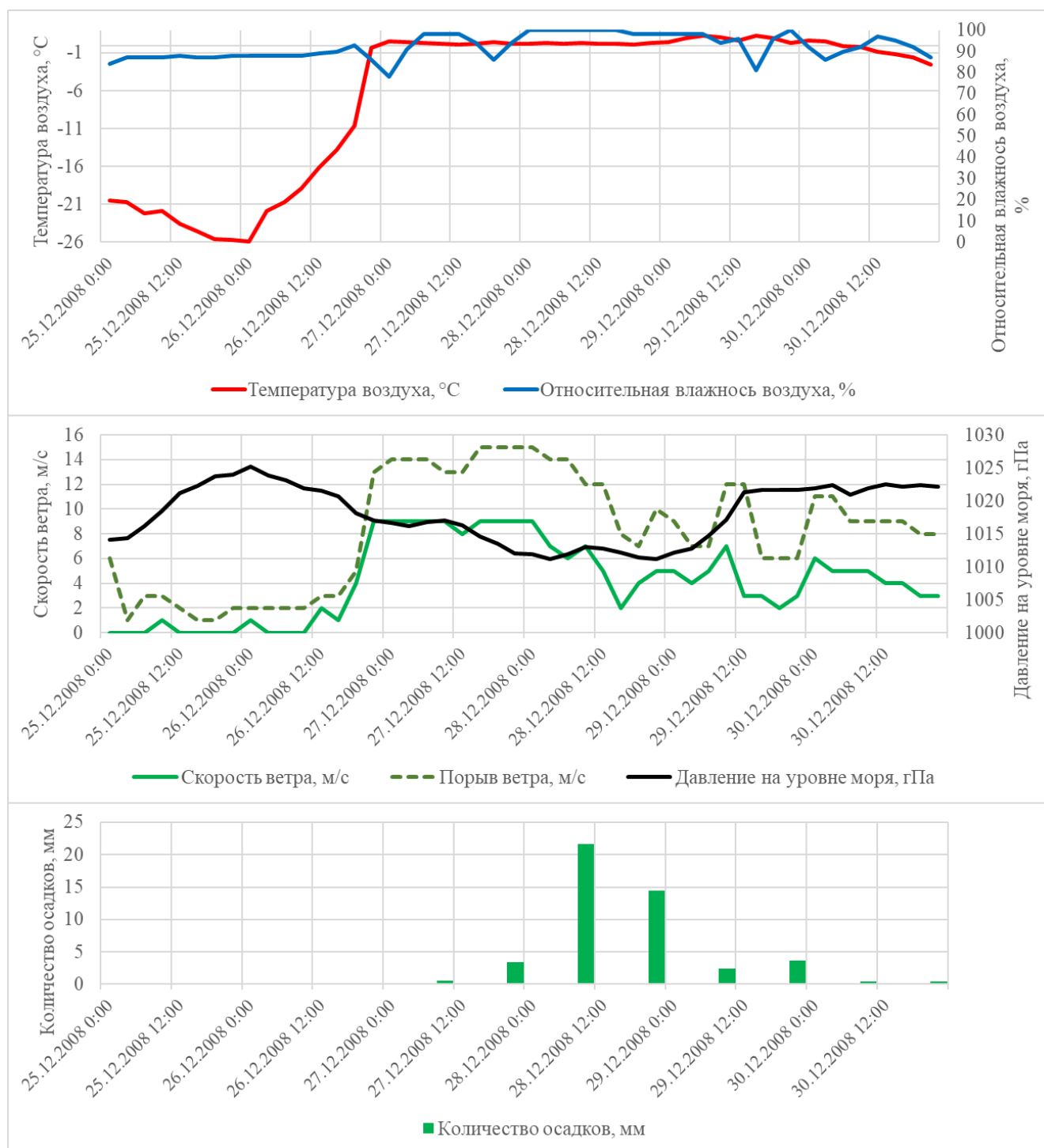


Рисунок 4.46 – Ход основных метеорологических величин с 25 по 30 декабря 2008 года на метеорологической станции Ключи (п-ов. Камчатка)

На рисунке 4.47 представлена карта адвекции температуры воздуха, рассчитанной по данным реанализа ERA5. Отчетливо прослеживается адвекция тепла с Тихого океана на восточном побережье полуострова Камчатка. В районе залива Шелихова, напротив, наблюдается адвекция холода с континентальной части полуострова.

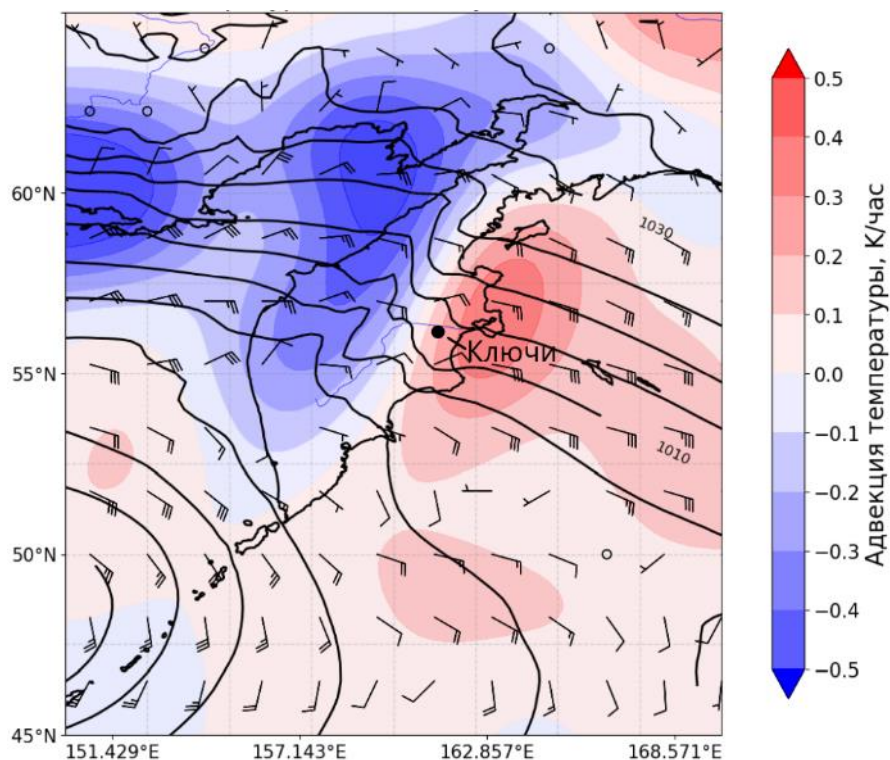


Рисунок 4.47 – Поле адвекции тепла по данным реанализа ERA5 за 28.12.2008 00 ч ВСВ

Далее была рассмотрена вертикальная структура тропосферы во время формирования гололедно-изморозевых отложений в виде мокрого снега. На рисунке 4.48 представлены данные радиозондирования на аэрологической станции Ключи. Приблизительно за 12 часов до начала формирования мокрого снега метеорологическая станция Ключи находилась в зоне приближающегося теплого фронта, о чем свидетельствует правый поворот ветра, наблюдаемый с высотой.

Через сутки, 28 декабря, приблизительно во время максимальной интенсивности выпадающих осадков практически во всей толще тропосферы наблюдались высокие значения относительной влажности воздуха, так как кривые стратификации и точки росы очень близки друг к другу. Также 18 декабря в 12 ч ВСВ наблюдалась слабopоложительная температура воздуха в нижнем километре, что способствовало образованию осадков в виде мокрого снега.

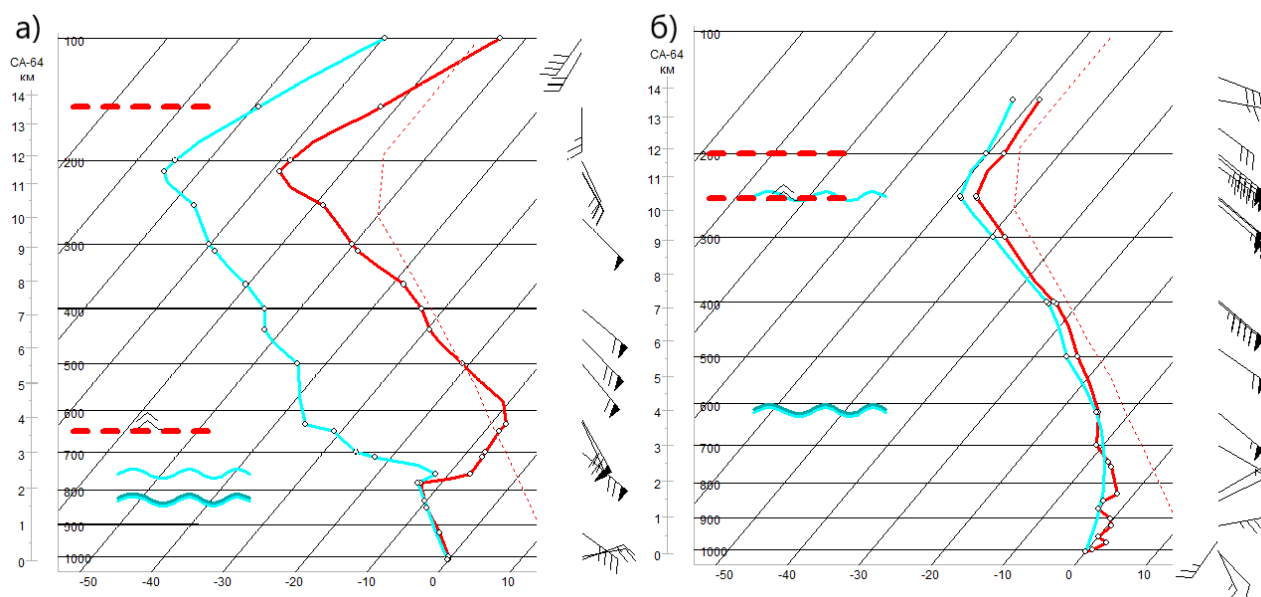


Рисунок 4.48 – Данные радиозондирования пос. Ключи а) 27.12.2008 12 ч ВСВ, б) 28.12.2008 12 ч ВСВ

Вертикальные разрезы нижних 5 км тропосферы, построенные по данным реанализа ERA5, подтверждают высокую относительную влажность в нижней тропосфере (рисунок 4.49б). По временным разрезам вертикальной скорости ветра можно проследить прохождение двух теплых атмосферных фронтов, 25 и 29 декабря, которое вызвало стремительный рост температуры воздуха на 20°C (рисунок 4.49г). На вертикальном разрезе нижней тропосферы не прослеживается наличие слоя с положительной температурой воздуха вблизи поверхности во время формирования отложений в виде мокрого снега (рисунок 4.50в). Это объясняется низким пространственным шагом данных реанализа. В связи с этим, для детального исследования термической структуры тропосферы необходимо использовать данные численного моделирования, способные представить данные с большим разрешением.

Стоит отметить, что, как и в случае образования опасных отложений в виде мокрого снега на Сахалине в 1988 году, в данном случае образование мокрого снега также проходило при существенной скорости ветра, до 8 м/с и с порывами до 14 м/с. В данном случае часть отложений мокрого снега была образована с помощью снеговетрового потока. Это предположение также объясняет

наблюденное отложение мокрого снега диаметром 111 мм, при 46 мм выпавших осадков.

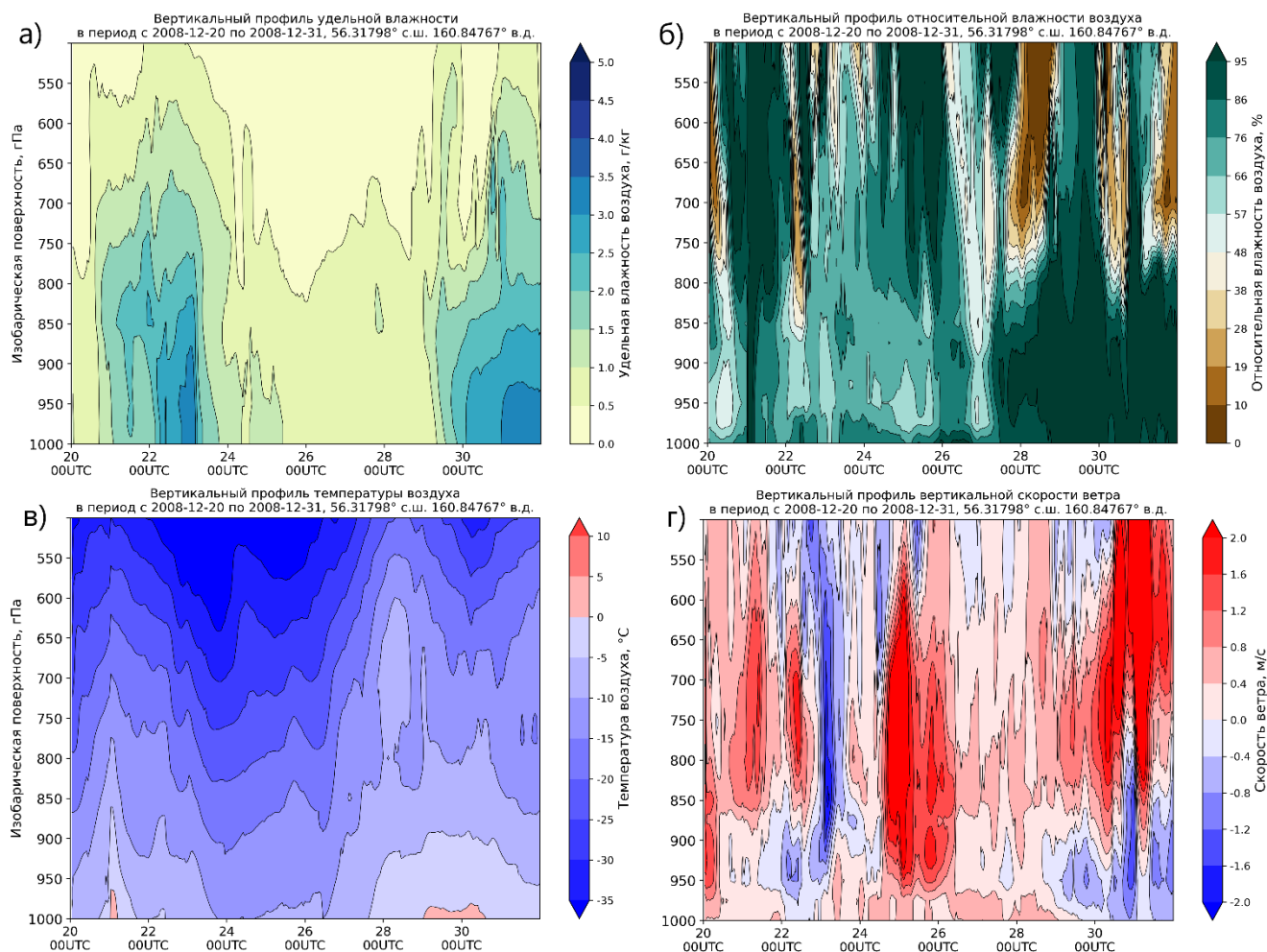


Рисунок 4.49 – Временные разрезы тропосферы по данным реанализа ERA5 для метеорологической станции Ключи с 20 по 31 декабря 2008 года: а) удельной влажности воздуха, б) относительной влажности воздуха, в) температура воздуха и г) вертикальной скорости ветра

Следующим рассмотренным случаем образования гололедно-изморозевых отложений в виде мокрого снега был случай, наблюдаемый на метеорологической станции Аибга, расположенной на одноименном горном массиве Большого Кавказа. Данный случай рассматривался в качестве примера образования опасных отложений мокрого снега на юге России.

В конце декабря 2018 года молодой циклон, располагающийся на территории Румынии смещался в восточном направлении со средней скоростью около 45 км/ч и 25 декабря 2018 года его центр располагался в районе Крымского полуострова (рисунок 4.50).

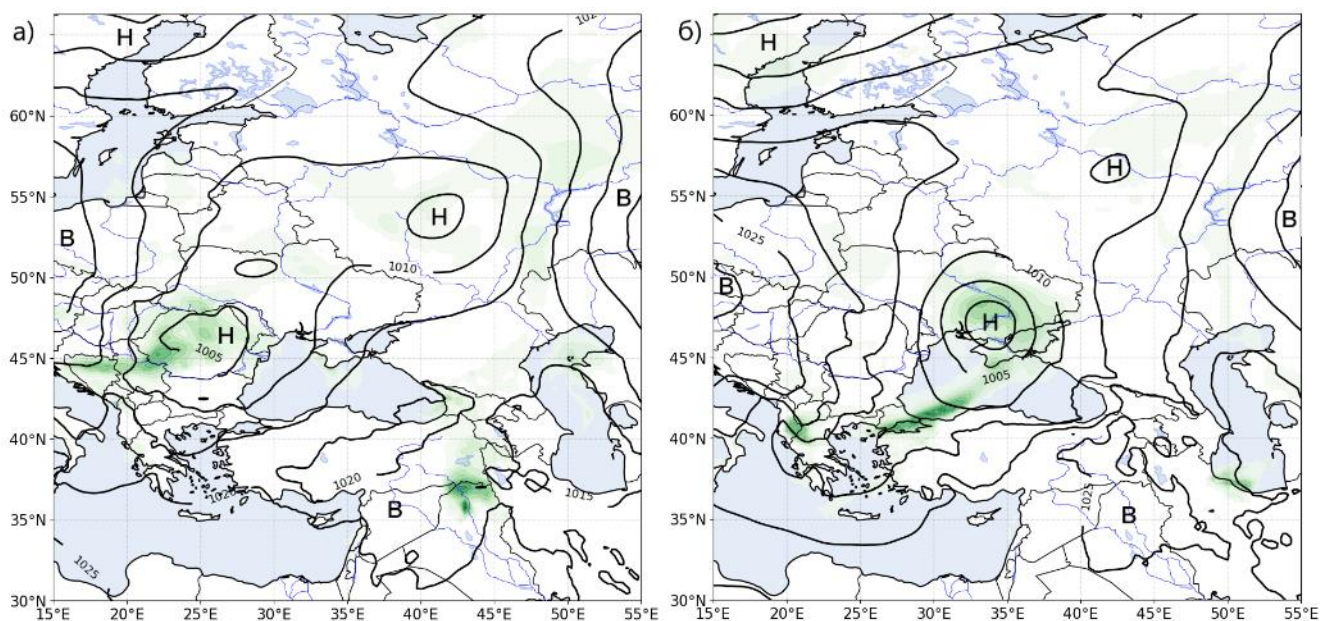


Рисунок 4.50 – Перемещение циклона, восстановленное по данным реанализа ERA5 а) 24.12.2018 12 ч ВСВ, б) 25.12.2018 00 ч ВСВ

Метеорологические условия формирования мокрого снега на территории горного массива Аибга рассматривались по данным метеорологической станции Красная Поляна, расположенной в 7 км к северу от массива.

25 декабря 2018 года через массив прошел холодный фронт, который вызвал понижение температуры воздуха с 2-3°C до около нулевых значений. Фронтальная облачность привела к повышению относительной влажности воздуха до 100% и выпадению осадков в виде ливневого снега, количество которых составило около 50 мм (рисунок 4.51). Важным фактором в образовании мокрого снега в данном случае являлись мезометеорологические процессы, связанные с влиянием орографии на прохождение и интенсификацию фронта (рисунок 4.52).

В данном случае, опасные отложения в виде мокрого снега формировались в безветренную погоду. За 7 часов на метеорологической станции Аибга образовались отложения мокрого снега диаметром 100 мм.

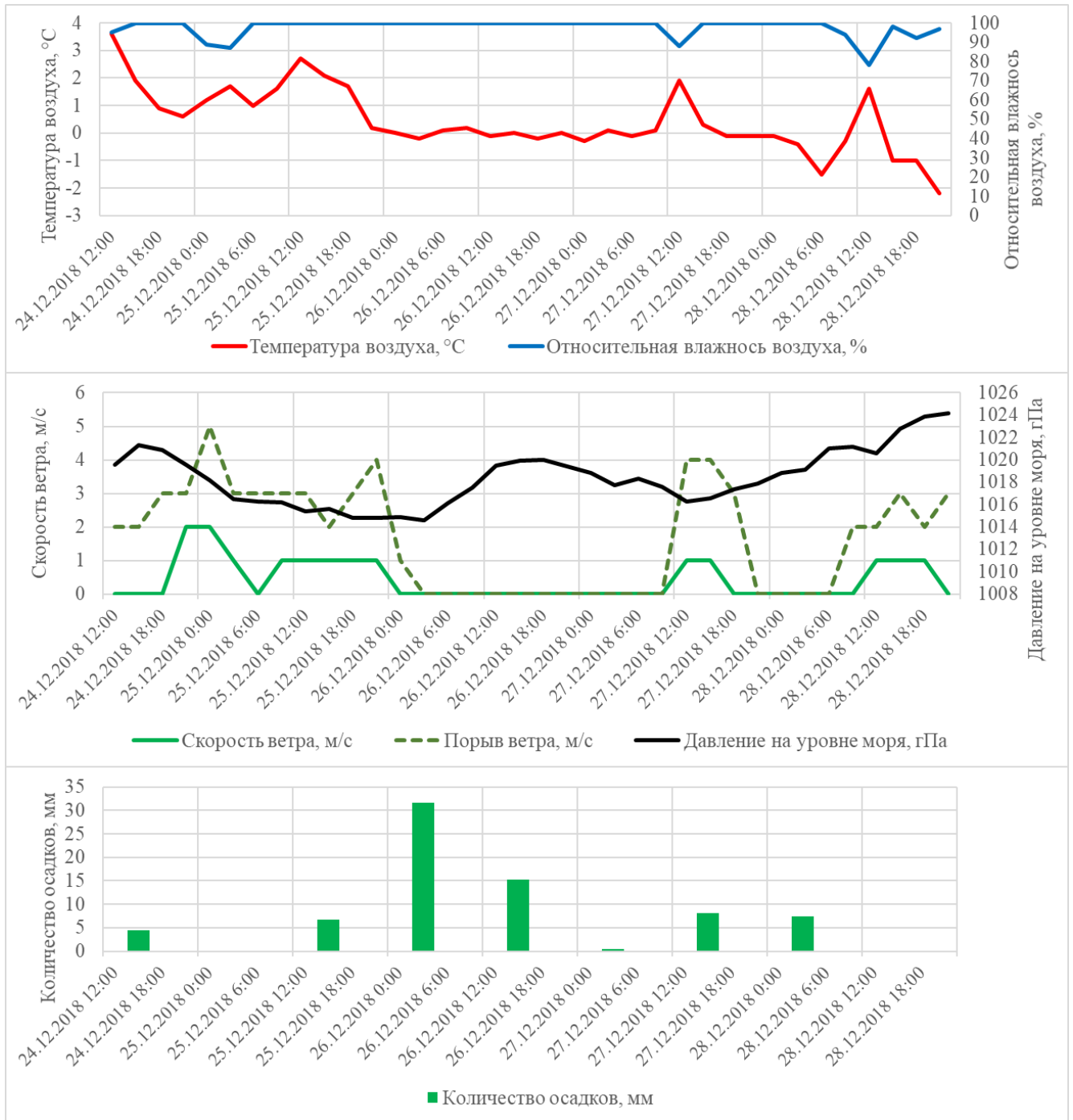


Рисунок 4.51 – Ход основных метеорологических величин с 24 по 28 декабря 2018 года на метеорологической станции Красная Поляна

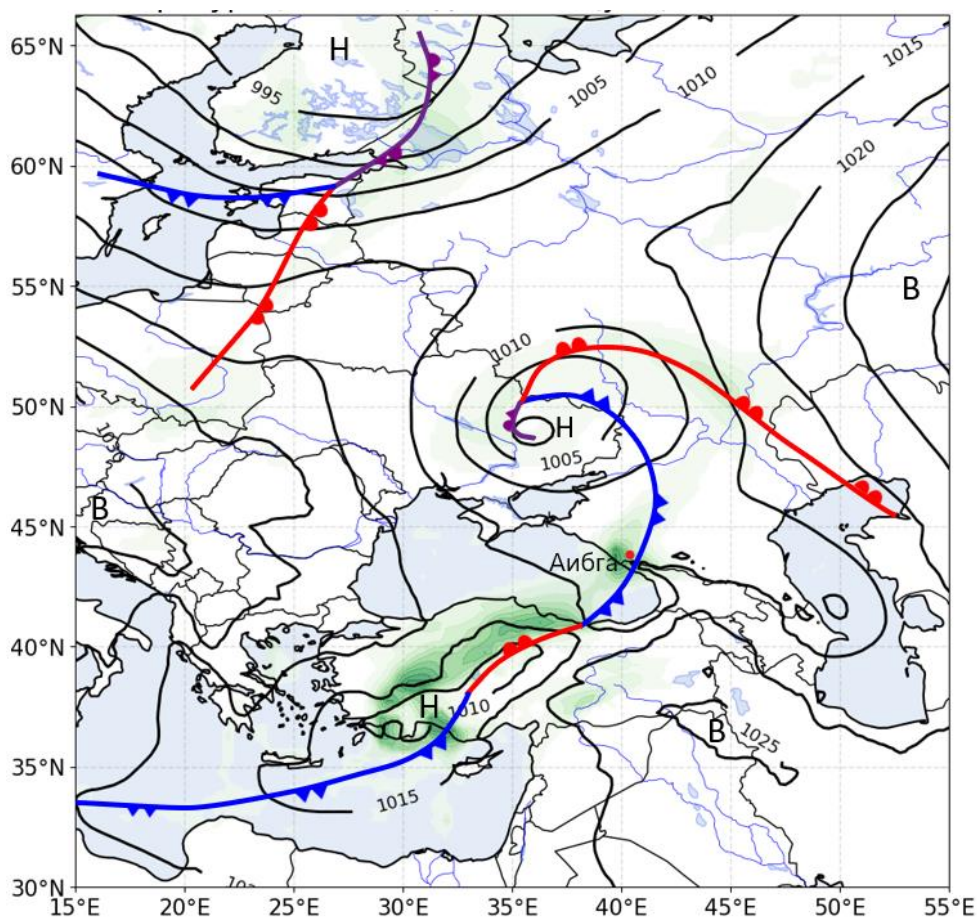


Рисунок 4.52 – Карта приземного синоптического анализа за 25.12.2008 18 ч ВСВ

Вертикальная структура тропосферы была рассмотрена по данным радиозондирования в г. Туапсе (рисунок 4.54). На рисунках 4.53а,б отчетливо проявилось прохождение теплого фронта 25 декабря и холодного фронта 26 декабря. Вертикальный профиль температуры показал, что во время выпадения осадков с образованием отложений в виде мокрого снега температура воздуха в слое 1000-950 гПа была положительной, что является благоприятным условием выпадения осадков в виде мокрого снега. Также можно отметить высокую относительную влажность воздуха во всей толще тропосферы (рисунок 4.53б).

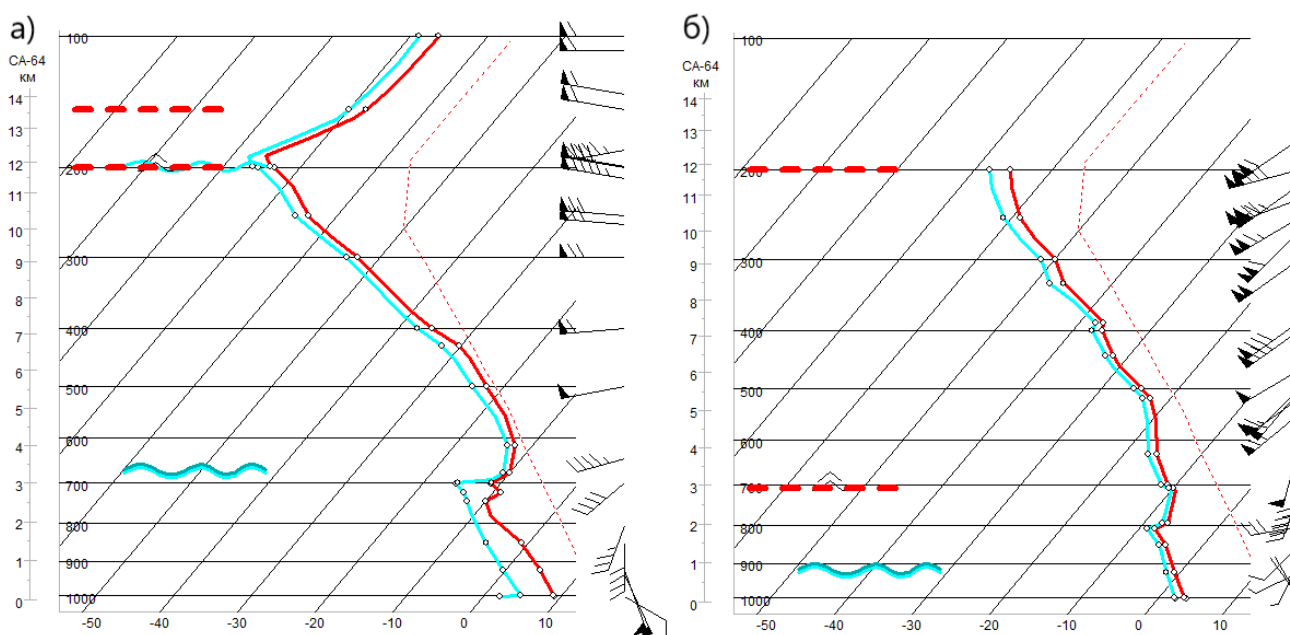


Рисунок 4.53 – Данные радиозондирования г. Туапсе а) 25.12.2018 00 ч ВСВ, б) 26.12.2018 00 ч ВСВ

Выводы к главе 4

В данной главе были рассмотрены синоптические условия, приводящие к образованию опасных гололедно-изморозевых отложений в виде гололеда, зернистой изморози и мокрого снега.

Рассмотренные случаи образования катастрофических случаев гололеда в центральной России в декабре 2010 и ноябре 2016 года, а также во Приморском крае в ноябре 2020 года можно отнести к классическому механизму образования замерзающего дождя – со стратификацией по типу «теплого носа». Во всех рассмотренных случаях на высотах, соответствующих изобарической поверхности 850 гПа, наблюдалась мощная адвекция тепла, а у земли адвекция холода. Данные условия были обусловлены взаимодействием трех резко контрастирующих воздушных масс.

Образование опасных отложений зернистой изморози было рассмотрено на примере трех случаев образования обледенения на территории горного массива Рай-Из, где наблюдается максимальная повторяемость опасных отложений данного вида. Рассмотренные случаи наблюдались при различных синоптических условиях. Более важную роль в формировании зернистой изморози играла

мезомасштабная циркуляция атмосферы, связанная со сложными условиями орографии. Главным фактором образования зернистой изморози являлись условия, благоприятствующие образованию переохлажденного тумана и низкой облачности.

Образование опасных отложений мокрого снега было рассмотрено на примере двух случаев, прошедших на территории Дальнего Востока России в ноябре 1988 и декабре 2008 года, а также на примере образования мокрого снега на Большом Кавказе в декабре 2018 года. Показано, что образование опасных отложений было связано, в первую очередь, с интенсивными фронтальными осадками в виде ливневого снега при слабopоложительной температуре воздуха. Также было показано, что отдельные, редкие случаи формирования опасных отложений мокрого снега наблюдаются при высокой скорости ветра, превышающей 15 м/с. В таких случаях важную роль в формировании отложений играет метелевый перенос, происходящий в условиях высокой относительной влажности воздуха и температуре воздуха выше 0°C.

ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Данных с наземных метеорологических станций, а особенно со станций аэрологического радиозондирования не всегда достаточно для детального описания какого-либо метеорологического явления. С целью получения значений метеорологических полей с более высоким пространственным и временным разрешением были проведены численные эксперименты по воспроизведению основных механизмов формирования высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений с использованием атмосферной модели WRF-ARW.

5.1. Результаты моделирования гололеда⁵

На первом этапе работы, с использованием модели WRF-ARW были проведены численные эксперименты по воспроизведению ледяного шторма, прошедшего в Москве в декабре 2010 года. Удалось воспроизвести основные схемы, полученные в результате синоптического анализа (см. главу 4). Это временные вертикальные разрезы тропосферы (схемы эволюции очага замерзающего дождя) и пространственные разрезы тропосферы (схемы термической структуры тропосферы) в зоне теплого фронта при выпадении замерзающего дождя с образованием гололеда.

На рисунке 5.1 представлены вертикальные разрезы тропосферы, которые показывают постепенное выдвигание слоя положительных температур в область холодного воздуха (рисунок 5.1а, б). Особенное внимание стоит обратить на разрез за полночь 26 декабря, где выдвигание теплой воздушной массы в область отрицательных температур максимально (рисунок 5.1в). Атмосферная модель WRF-ARW хорошо воспроизвела сильное искривление изотерм в зоне теплого фронта, характерное для двухсторонней адвекции теплого воздуха на высоте и холодного у земли. Отчетливо виден процесс размывания «линзы» теплого воздуха в процессе окклюдирования циклона 26-27 декабря 2010 года (рисунок 5.1г).

⁵ Раздел написан на основе статьи [Леонов, Соколичина, 2021]

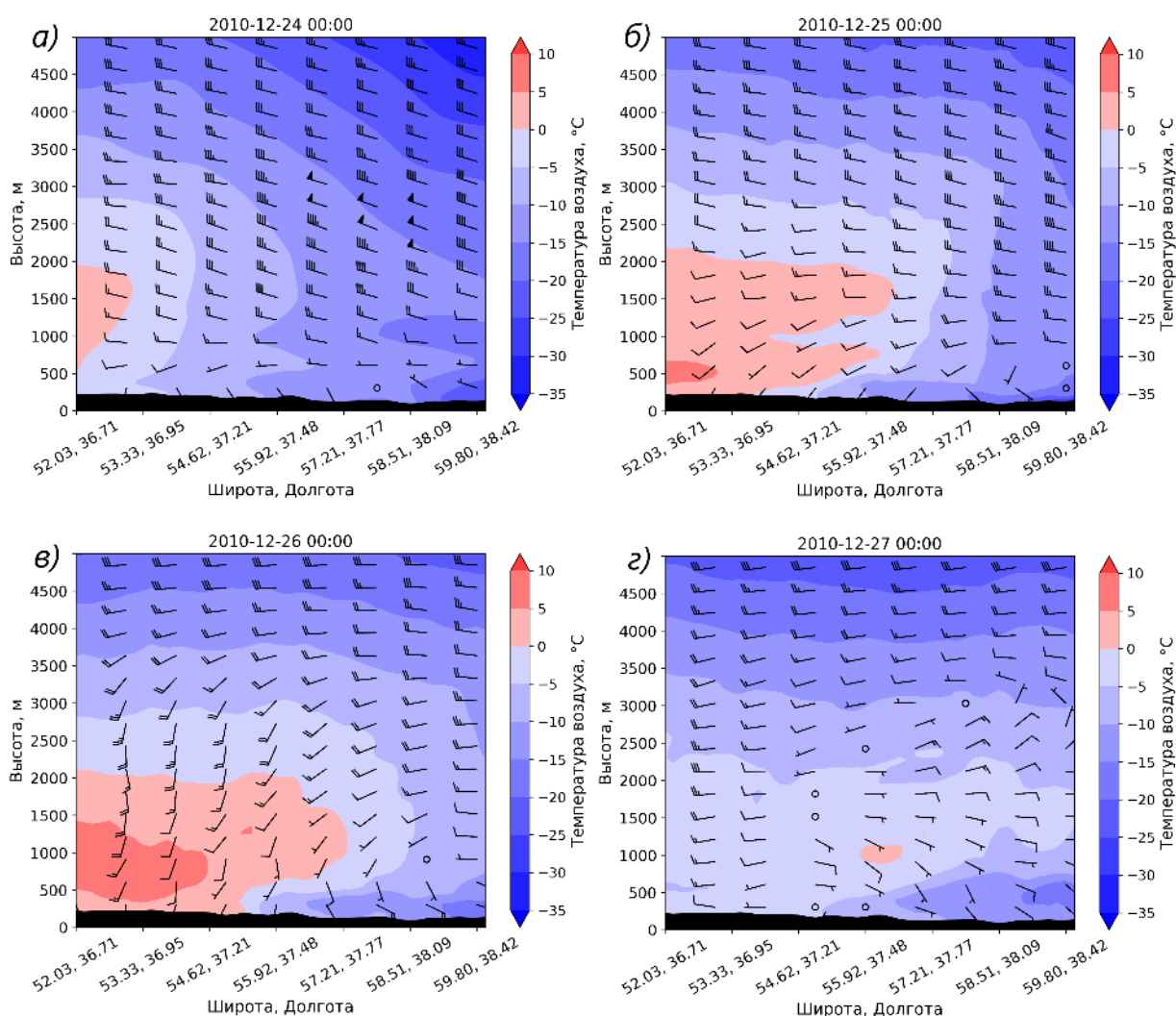


Рисунок 5.1 – Вертикальные разрезы тропосферы до 5 км по данным модели WRF-ARW а) 24.12.2010 00 ч ВСВ, б) 25.12.2010 00 ч ВСВ, в) 26.12.2010 00 ч ВСВ, г) 27.12.2010 00 ч ВСВ

Также, с помощью модели WRF-ARW, был воспроизведен вертикальный разрез тропосферы в период с 24 по 28 декабря, показывающий временное изменение термической структуры тропосферы (рисунок 5.2).

На данной схеме отчетливо проявилась «линза» теплого воздуха, характеризующая стратификацию по типу «теплого носа», расположение и время жизни которой хорошо согласуется с данными радиозондирования в г. Долгопрудном.

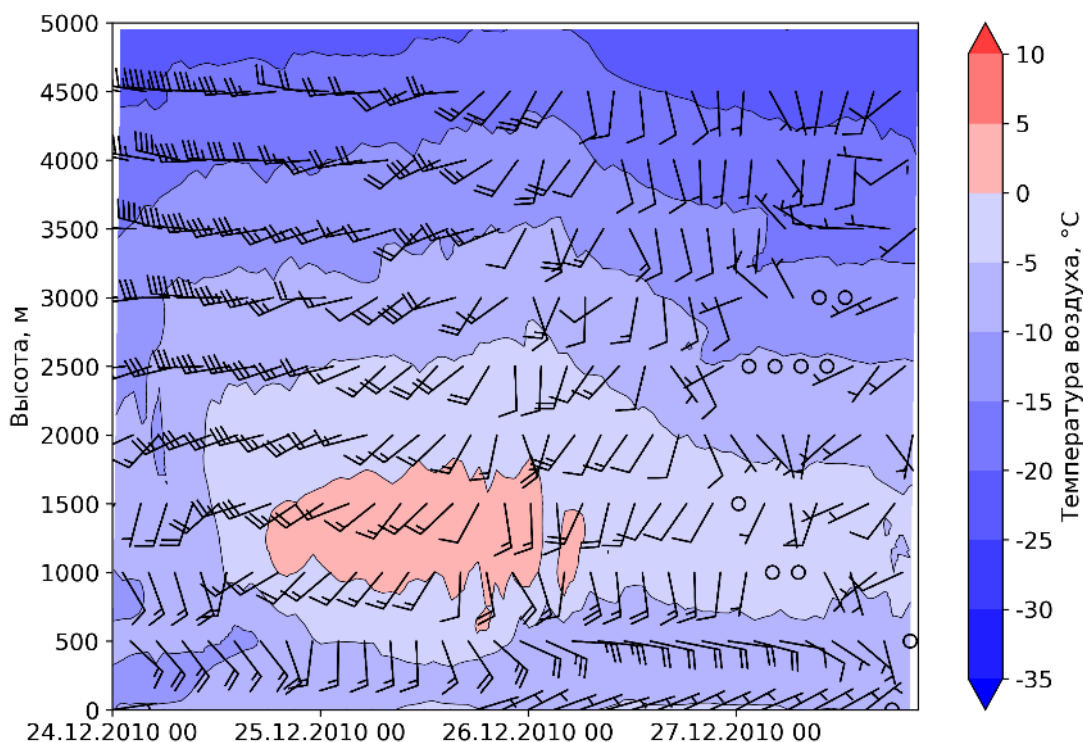


Рисунок 5.2 – Эволюция очага замерзающего дождя в Москве по данным модели WRF-ARW

Как неоднократно упоминалось выше, прогнозирование осадков является очень сложной задачей, тем более, если это осадки различных фазовых состояний. Представленные схемы термической структуры зимней тропосферы могут значительно облегчить изучение и прогнозирование формирования гололеда, в следствие выпадения замерзающих дождей. Важным фактом является то, что современные гидродинамические модели атмосферы, в том числе WRF-ARW, успешно прогнозируют температуру воздуха на ближайшие 48 часов. Это дает возможность получения подобных пространственных и временных разрезов тропосферы, и дальнейшее их использование для уточнения прогноза замерзающих осадков.

Помимо данных о температуре воздуха на различных высотах, в качестве вспомогательных, можно использовать данные о направлении и скорости ветра. Во время синоптического анализа был сделан вывод о том, что особенно интенсивное выпадение замерзающих осадков было связано с двухсторонней адвекцией температуры воздуха.

Для более подробного изучения этого предположения, моделью WRF-ARW были воспроизведены поля ветра на высотах до 5000 метров (рисунок 5.2). Данные моделирования показали, что 25 декабря на высотах до 200 метров над Московским регионом преобладали ветра северо-западных направлений со скоростью от 2 до 5 м/с. В это же время на высотах от 500 м наблюдались значительно более сильные, до 15 м/с, ветра западных и юго-западных направлений. Это подтверждает то, что 25-26 декабря Москва находилась в сложной синоптической обстановке: на высотах от 500 до 2000 в столичный регион проникал теплый и влажный тропический воздух, а с северными потоками у земли в Москву подкачивался холодный воздух.

Для более наглядного восприятия данной картины были построены карты адвекции температуры воздуха и поля ветра на высоте 2 м и на уровне изобарической поверхности 850 гПа над Московской и соседними областями, которые подтверждают наличие двухсторонней адвекции в данный период (рисунок 5.3).

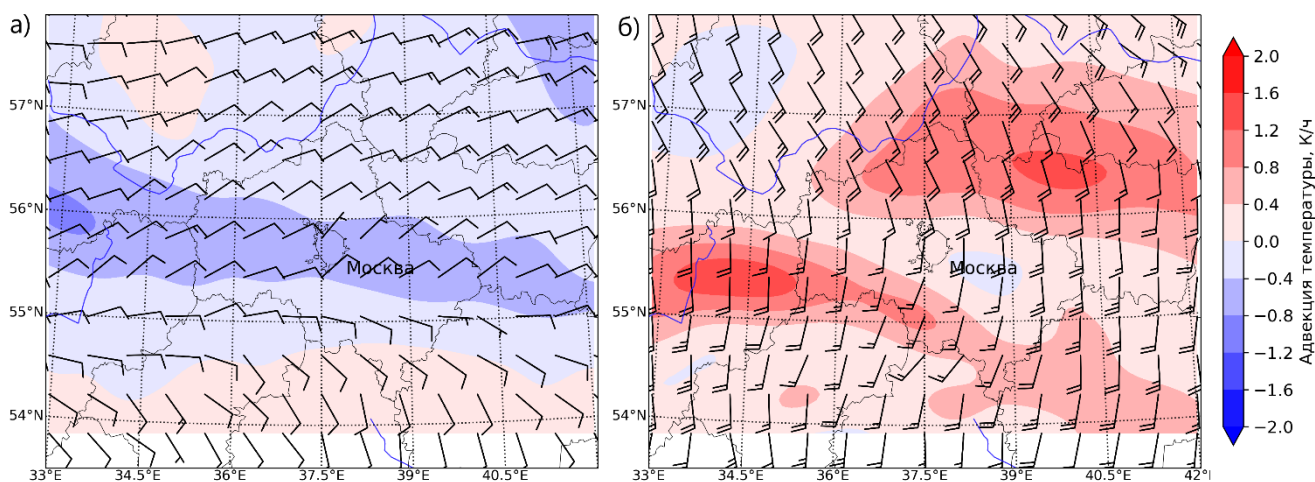


Рисунок 5.3 – Адвекция температуры и поле скорости ветра над центром Европейской России по данным модели WRF-ARW 26.12.2010 00 ч ВСВ а) у поверхности земли б) на высоте изобарической поверхности 850 гПа

На рисунке 5.4 представлено поле максимального диаметра отложений в виде гололеда, полученное в результате постпроцессинга выходных данных модели WRF-ARW.

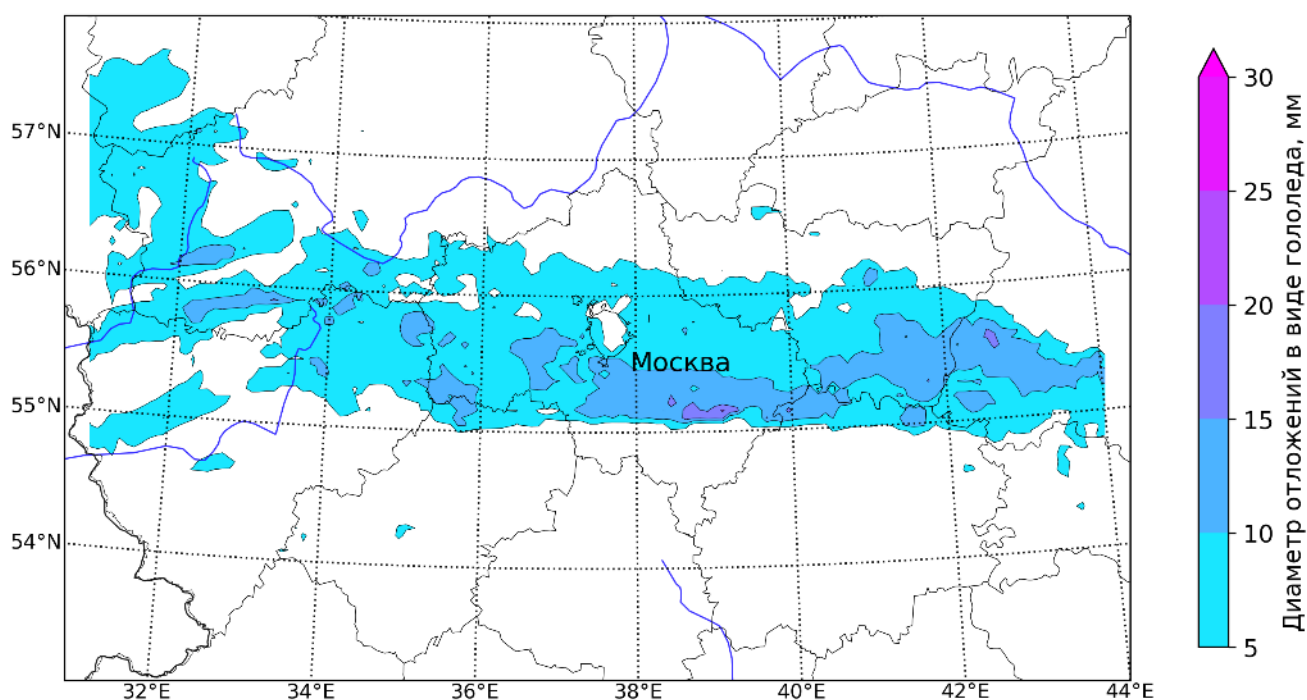


Рисунок 5.4 – Поле максимального диаметра гололеда на момент 18 ч ВСВ 27 декабря 2010 года по данным модели WRF-ARW

Важно отметить, что модель воспроизвела полосу выпадения замерзающих осадков на территории Центральной России. Такое поле хорошо согласуется с данными Гидрометцентра России о полосе гололедных явлений, образовавшихся с 24 по 28 декабря (рисунок 1.3). Отдельно стоит отметить проявившийся в поле отложений гололеда остров тепла г. Москвы.

Далее был проведен эксперимент по воспроизведению замерзающего дождя 2016 года. Здесь особенный интерес также вызывают вертикальные разрезы тропосферы, которые показывают выдвигание теплого воздуха в область, занимаемую холодной воздушной массой (рисунок 5.5а,б). Стоит отметить несколько важных особенностей. В разрезах за 12 ч ВСВ 9 и 10 ноября проявилась обширная область с изотермой 10°C (рисунок 5.5б). Это говорит об очень мощной адвекции тепла со Средиземноморья. 10-11 ноября «линза» теплого воздуха наблюдалась вплоть до 60°с.ш. , что является причиной выпадения замерзающего дождя в Вологодской области. Вертикальный разрез за 12 ч ВСВ 11 ноября наглядно иллюстрирует вытеснение теплого, средиземноморского воздуха наверх, и постепенное размытие области положительных температур (рисунок 5.5в,г).

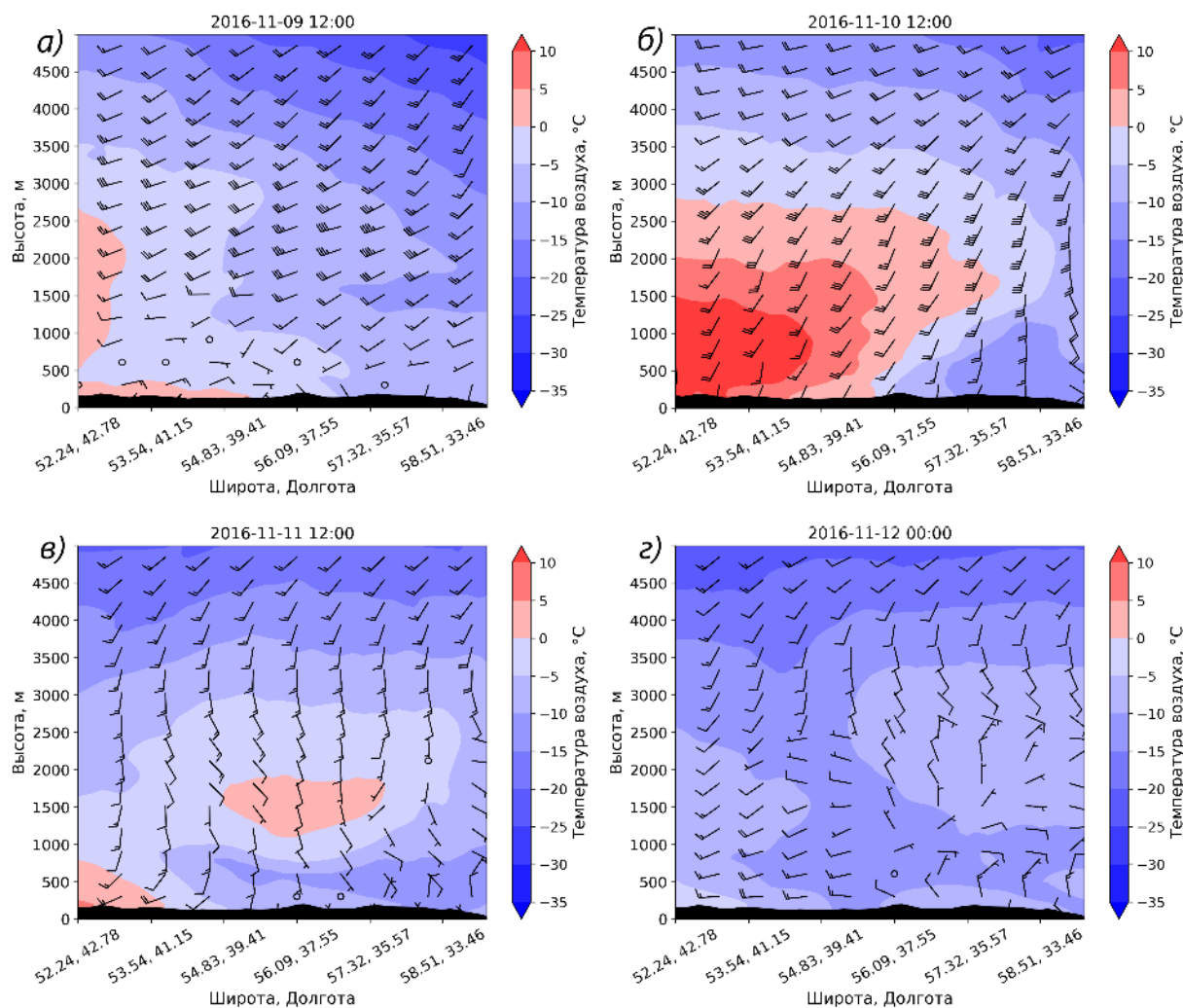


Рисунок 5.5 – Вертикальные разрезы тропосферы по данным модели WRF-ARW
 а) 09.11.2016 12 ч ВСВ, б) 10.11.2016 12 ч ВСВ, в) 11.11.2016 12 ч ВСВ,
 г) 12.11.2016 00 ч ВСВ

Далее был построен временной разрез тропосферы, с ярко выраженной стратификацией по типу «теплого носа» (рисунок 5.6). Особенностью случая замерзающего дождя, прошедшего в ноябре 2016 года, является быстрое таяние ледяных отложений в Московской области, это связано с адвекцией тепла в приземном слое, происходящей начиная с полуночи 11 ноября (рисунок 5.6).

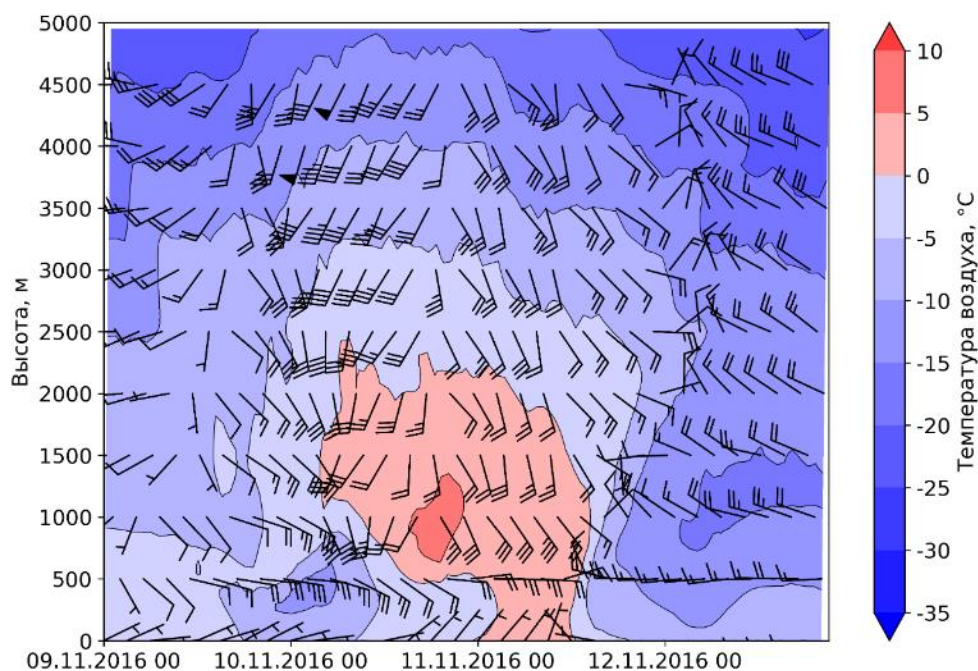


Рисунок 5.6 – Эволюция очага замерзающего дождя в Москве по данным модели WRF-ARW

На схеме проявилась мощная «линза» теплого воздуха, расположение и время жизни которой хорошо согласуется с данными радиозондирования в г. Долгопрудном, точно также, как и в случае 2010 года.

Был восстановлен временной ход скорости и направления ветра над Москвой (рисунок 5.6). Данные моделирования хорошо описывают реальную наблюдаемую картину. На высотах около 1500 метров 10-11 ноября наблюдались сильные (местами до 20 м/с) ветра южных направлений, а на высоте около 200 метров более слабые (до 5 м/с) северо-западных направлений. Также модель хорошо описала перемену направления ветра на восточное во второй половине 11 ноября.

На рисунке 5.7 представлены данные о скорости и направлении ветра над территорией Московской области за 12 ч ВСВ 10 ноября, а также данные об адвекции температуры воздуха. В целом поле ветра имеет схожий вид с полем ветра в декабре 2010 года. На высоте изобарической поверхности 850 гПа наблюдается адвекция тепла с южными потоками воздуха, а в приземном слое адвекция холода, с потоками воздуха с северо-востока.

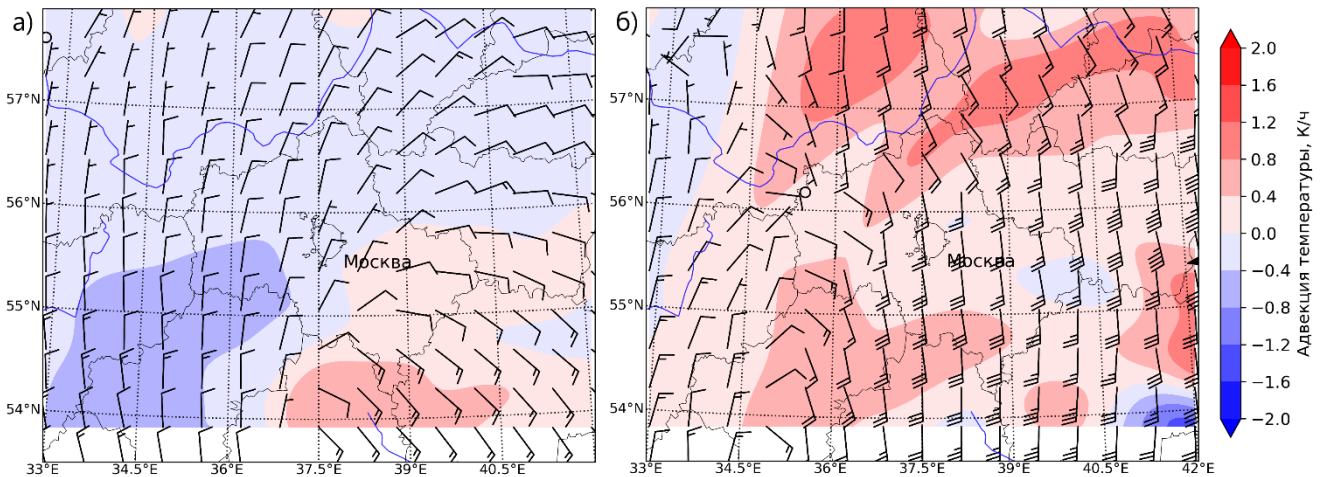


Рисунок 5.7 – Адвекция температуры и поле скорости ветра над центром Европейской России по данным модели WRF-ARW 10.11.2016 21 ч ВСВ а) у поверхности земли б) на высоте изобарической поверхности 850 гПа

Далее было проанализировано поле максимального диаметра отложений гололеда. Данные моделирования хорошо согласуются с данными синоптического анализа, приведенными в главе 4.1 (рисунок 4.22). Также, как и случае 2010 года, хорошо проявился эффект острова тепла г. Москвы.

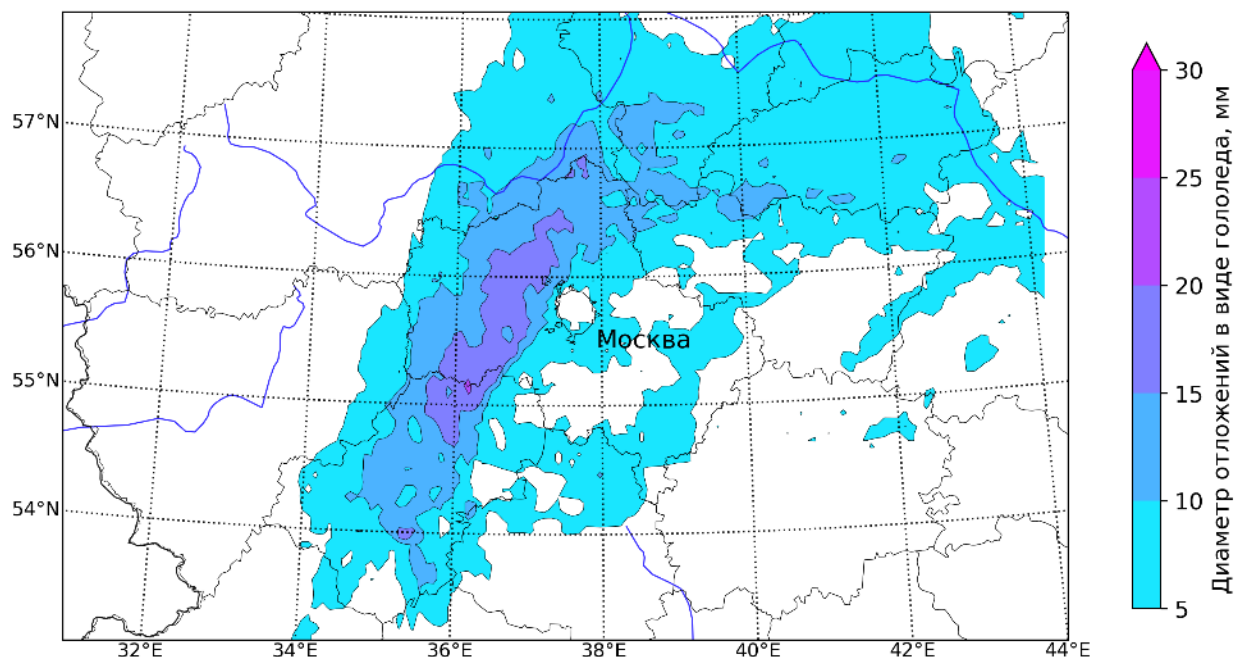


Рисунок 5.8 – Поле максимального диаметра гололеда на момент 18 ч ВСВ 12 ноября 2016 года по данным модели WRF-ARW

Заключительным экспериментом было воспроизведение моделью ледяного шторма 2020 года в Приморском крае. Из-за сильного обледенения приборов на метеорологической станции Владивосток не измерялись скорость и направление

ветра с 22 часов 18 ноября по 7 часов утра 20 ноября. Кроме этого, отсутствовали данные радиозондирования на аэрологической станции Сад-Город для сроков с 12 ч ВСВ 19 ноября по 00 ч ВСВ 22 ноября 2020 года. Этот факт делает невозможным изучение структуры тропосферы в указанные даты. С целью получения значений метеорологических полей с более высоким пространственным и временным разрешением были проведены численные эксперименты по восстановлению гололедных явлений в ноябре 2020 года с использованием атмосферной модели WRF-ARW.

На рисунках 5.9а,б представлен вертикальный разрез тропосферы, показывающий постепенное выдвигание слоя положительных температур в область холодного воздуха.

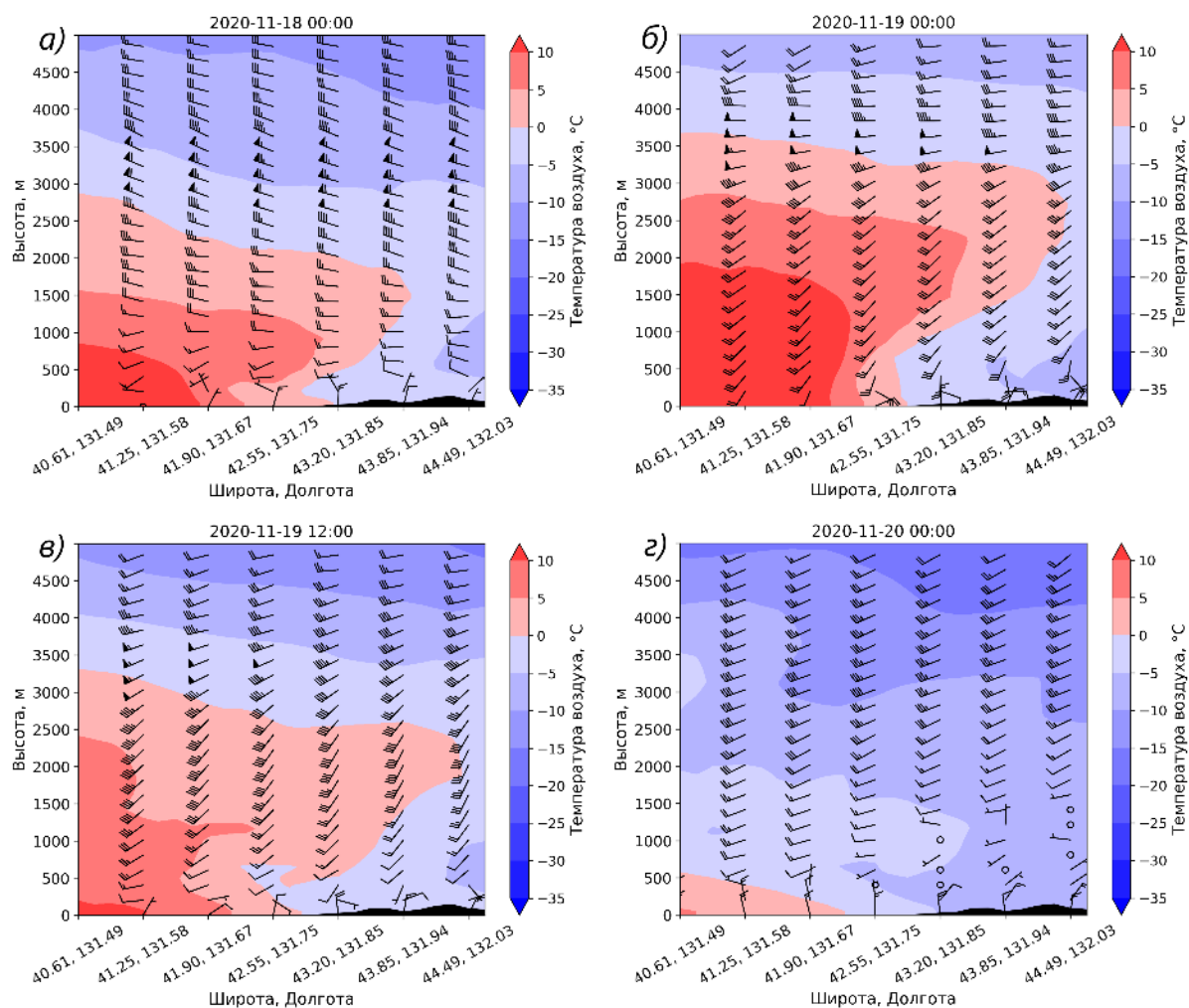


Рисунок 5.9 – Вертикальные разрезы тропосферы по данным модели WRF-ARW а) 18.11.2020 00 ч ВСВ, б) 19.11.2020 00 ч ВСВ, в) 19.11.2020 12 ч ВСВ, г) 20.11.2020 00 ч ВСВ

Атмосферная модель WRF-ARW хорошо воспроизвела сильное искривление изотерм зоне теплого фронта, характерное для двухсторонней адвекции: теплого воздуха на высоте и холодного у поверхности земли.

Также, с помощью модели WRF-ARW, был воспроизведен временной разрез тропосферы в период с 17 по 21 ноября (рисунок 5.10). На данной схеме отчетливо проявилась «линза» теплого воздуха, расположение и время жизни которой хорошо согласуется с данными радиозондирования в г. Владивосток (аэрологическая станция Сад-Город).

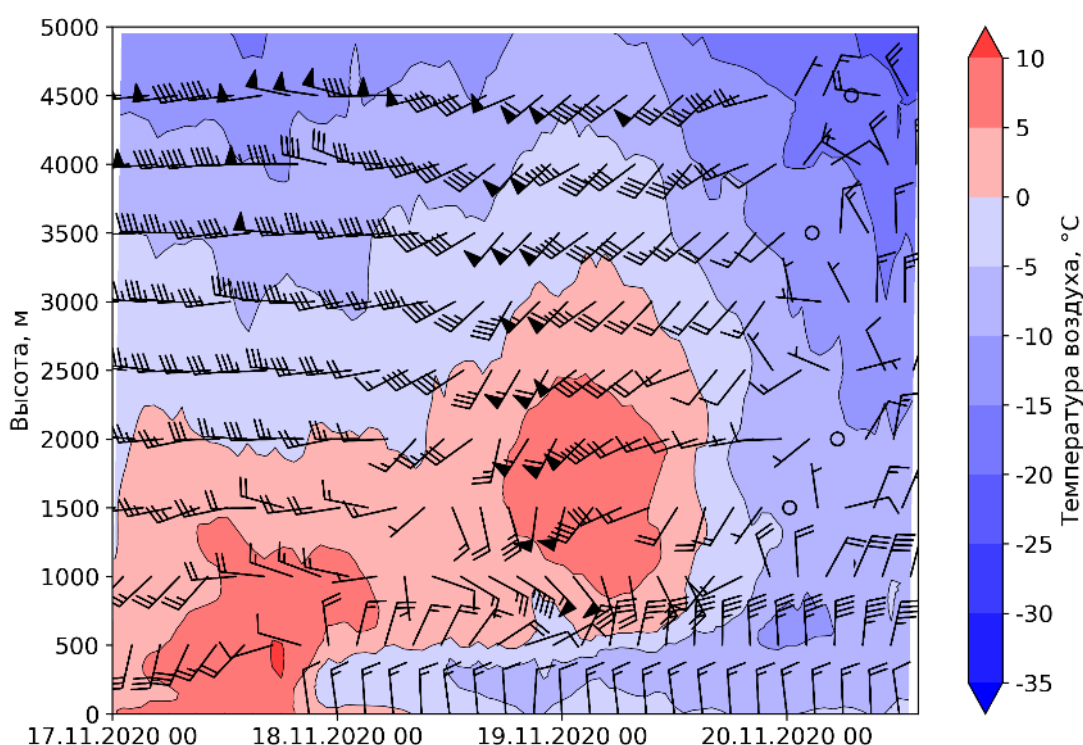


Рисунок 5.10 – Эволюция очага замерзающего дождя в Москве по данным модели WRF-ARW

Помимо данных о температуре воздуха на различных высотах, в качестве вспомогательных, можно использовать данные о направлении и скорости ветра. Во время синоптического анализа был сделан вывод, что интенсивное выпадение замерзающих осадков было связано с двухсторонней адвекцией воздуха. Для более подробного изучения этого предположения, моделью WRF-ARW были воспроизведены поля ветра на высотах до 5 км.

Данные моделирования показали, что 19 ноября на высотах около 300 метров над югом Приморского края преобладал северный ветер. В это же время, на высотах около 1500 метров наблюдался южный ветер. Это указывает на то, что 19 ноября район г. Владивостока находился в сложной синоптической обстановке: на высотах от 800 до 2000 в столичный регион Приморья проникал теплый и влажный тропический воздух, а с северными потоками у земли на территорию Приморского края подкачивался холодный воздух.

Для более наглядного восприятия данной картины были построены карты поля ветра и адвекции температуры воздуха у поверхности земли и на высоте изобарической поверхности 850 гПа над Приморским краем, которые подтверждают наличие двухсторонней адвекции в данный период (рисунок 5.11а,б).

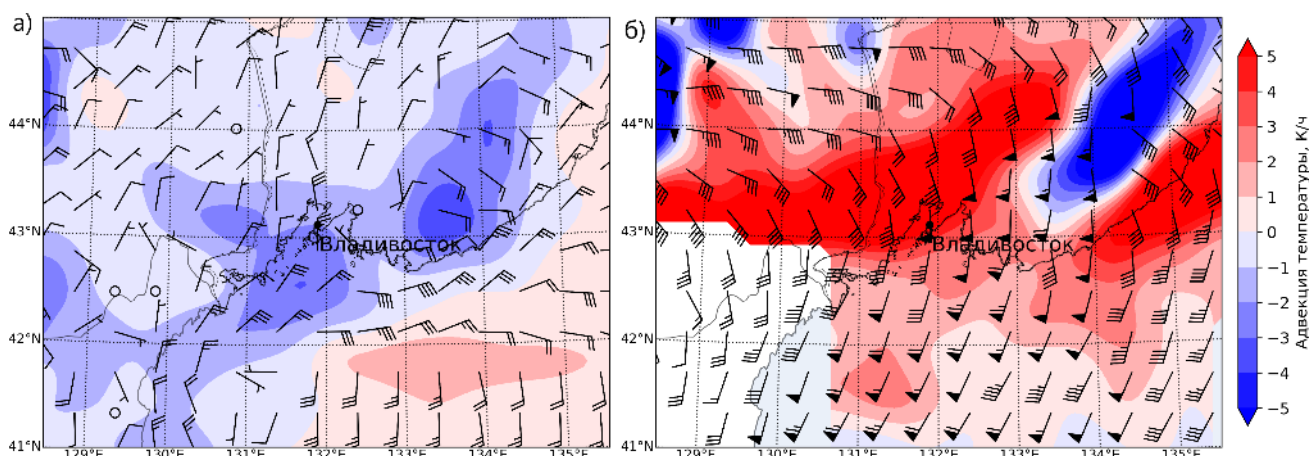


Рисунок 5.11 – Адвекция и поле скорости ветра над югом Приморского края по данным модели WRF-ARW 19.11.2020 00 ч ВСВ а) холода у поверхности земли б) тепла на высоте изобарической поверхности 850 гПа

В рамках завершающей фазы экспериментов, были построены поля максимального диаметра гололедных отложений согласно описанной выше методике (глава 2.3.3). На рисунке 5.12 представлено поле максимального диаметра отложений в виде гололеда, полученное в результате постпроцессинга выходных данных модели WRF-ARW.

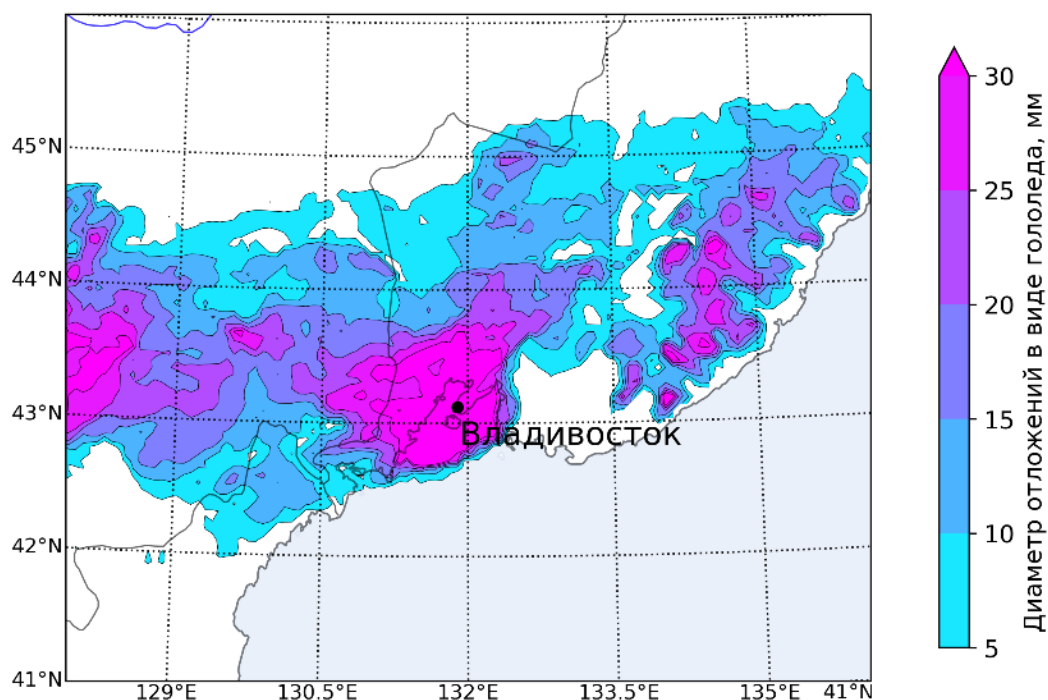


Рисунок 5.12 – Поле максимального диаметра гололеда на момент 18 ч ВСВ 20 ноября 2020 года по данным модели WRF-ARW

Важно отметить, что модель воспроизвела полосу выпадения замерзающих осадков на территории Приморского края, хорошо согласующихся с данными наблюдений на метеорологических станциях, оборудованных гололедными станками. Высокое пространственное разрешение модели позволило воспроизвести процесс гололедообразования высокой интенсивности на о. Русский.

В отличие от моделирования случаев гололеда 2010 и 2016 года, в ноябре 2020 не проявился эффект городского острова тепла. Этот факт объясняется меньшим размером города, его прибрежным расположением, более низкой плотностью и высотой застройки. Также это связано с более мощной двухсторонней адвекцией тепла и холода, ослабляющей эффект острова тепла.

Оценки воспроизведения основных метеорологических условий формирования и диаметра отложений моделью приведены в таблице 5.1. BIAS – ошибка смещения, MAE – средняя абсолютная ошибка, RMSE – среднеквадратичная ошибка. Ожидается, что увеличение разрешения моделирования улучшает точность моделирования основных метеорологических параметров атмосферы. Однако высокоинтенсивные отложения были

воспроизведены моделью даже с шагом 18 км, что соответствует разрешению глобального моделирования. Этого разрешения достаточно для описания области ожидаемого распространения опасных отложений гололеда, но недостаточно для описания мезометеорологических особенностей, например влияния орографии и острова тепла. Эксперименты, проведенные с использованием шага сетки 2 км и менее, выявили области отложений гололеда более 35 мм. Такие размеры гололеда не были зафиксированы на метеорологических станциях, однако наблюдались на проводах линий электропередачи и ветвях деревьев, о чем свидетельствуют многочисленные фотографии жителей города.

Таблица 5.1 – Оценка точности воспроизведения основных метеорологических условий формирования и диаметра отложений гололеда с 17 до 20 ноября 2020 года во Владивостоке

| шаг сетки | Температура воздуха, °С | | | Относительная влажность воздуха, % | | | Скорость ветра, м/с | | | Диаметр отложений, мм | | |
|-----------|-------------------------|-----|------|------------------------------------|-----|------|---------------------|-----|------|-----------------------|-----|----|
| | BIAS | MAE | RMSE | BIAS | MAE | RMSE | BIAS | MAE | RMSE | факт | WRF | Δ |
| 18 км | 1.4 | 1.9 | 2.0 | -4 | 9 | 12 | 0.3 | 2.7 | 2.4 | 29 | 27 | -2 |
| 6 км | 1.3 | 1.7 | 1.8 | -6 | 8 | 13 | -0.3 | 2.8 | 2.3 | 29 | 29 | 0 |
| 2 км | 0.5 | 1.2 | 1.5 | -9 | 11 | 15 | -3.1 | 3.7 | 2.5 | 29 | 31 | 2 |
| 0,67 км | 0.1 | 1.1 | 1.4 | -8 | 10 | 13 | -2.8 | 3.5 | 2.4 | 29 | 34 | 5 |

5.2. Результаты моделирования зернистой изморози⁶

Реанализ ERA5 с шагом по пространству 0,25° (около 28 км) хорошо подходит для описания явлений синоптического масштаба, но для описания мезомасштабных процессов такого разрешения недостаточно.

Были проведены численные эксперименты по восстановлению параметров нижней тропосферы при формировании опасных отложений зернистой изморози с использованием атмосферной модели WRF-ARW. Главной целью численного моделирования было воспроизведение мезомасштабных условий атмосферной циркуляции, приводящих к формированию отложений зернистой изморози.

На первом этапе обработки результатов численного моделирования были рассмотрены поля основных метеорологических величин: температуры воздуха, относительной влажности воздуха, скорости и направления ветра. От точности

⁶ Раздел написан на основе статьи [Леонов, 2022]

воспроизведения данных параметров напрямую зависит успешность воспроизведения зернистой изморози.

Температура воздуха влияет на распространение области обледенения. Так, например, моделью были воспроизведены особенности распределения области отрицательной температуры воздуха в районе горного хребта Рай-Из.

Во время проведения численных экспериментов были получены более точные поля ветра. Модель с минимальным шагом сетки воспроизвела скорость ветра на метеостанции Рай-Из намного более точно, чем с шагом 18 и 6 км. Так, например, в случае экспериментов с шагом 18 км скорость ветра в период с 17 по 20 октября 1997 года в среднем была ниже наблюдений на 3,7 м/с, с шагом 6 км на 3,3 м/с, с шагом 2 км 1,1 м/с, а с шагом 667 м уже 0,7 м/с. Несмотря на ощутимое улучшение качества моделирования с увеличением разрешения модели, скорость ветра значительно занижалась во всех случаях (таблицы 5.2, 5.3, 5.4). Как будет показано ниже, это повлияло и на занижение массы зернистой изморози. Направление ветра также более точно воспроизводится мезомасштабной моделью с высоким разрешением. Данные WRF-ARW показали, что модель воспроизводит направление ветра намного точнее, чем реанализ ERA5, данные которого принципиально отличались от наблюдаемых на станции.

Далее оценивалось пространственное распределение поля содержания жидкой фазы воды в воздухе – LWC. Данный параметр является наиболее важным для описания образования зернистой изморози. На рисунках 5.13а, 5.14а, и 5.15а рассматриваются вертикальные разрезы атмосферы, а на рисунках 5.13б, 5.14б, 5.15б представлено пространственное положение области возможного обледенения. Как было показано выше, пространственное разрешение модели имеет особенно важное значение при воспроизведении и прогнозировании явлений, на формирование которых большое влияние оказывает точность описания моделью рельефа местности. Результаты численных экспериментов позволили получить пространственные разрезы тропосферы во время формирования опасных отложений изморози на территории горного массива Рай-Из. Во всех трех случаях

модель воспроизвела область образования переохлажденного тумана, сформировавшегося в следствие обтекания влажной воздушной массой горных хребтов. Рассмотрим результаты всех трех случаев более подробно.

В случае 1994 года наблюдалась очень высокое содержание жидкой воды в воздухе, в области наблюдения изморози свыше $0,5 \text{ г/м}^3$ (рисунок 5.13). Данный случай отличается наиболее высокой скоростью обледенения при наибольшей массе отложения, 2400 грамм на метр провода гололедного станка, продолжительность обледенения составила всего 19 часов. Также данный случай характеризуется наибольшей плотностью отложения – около 400 г/см^3 . Это связано с большим влагосодержанием и с более высокой температурой воздуха в момент обледенения, так как размер облачных капель пропорционален влагосодержанию, а более крупные капли интенсивнее растекаются на поверхности тела и образуют более плотное отложение.

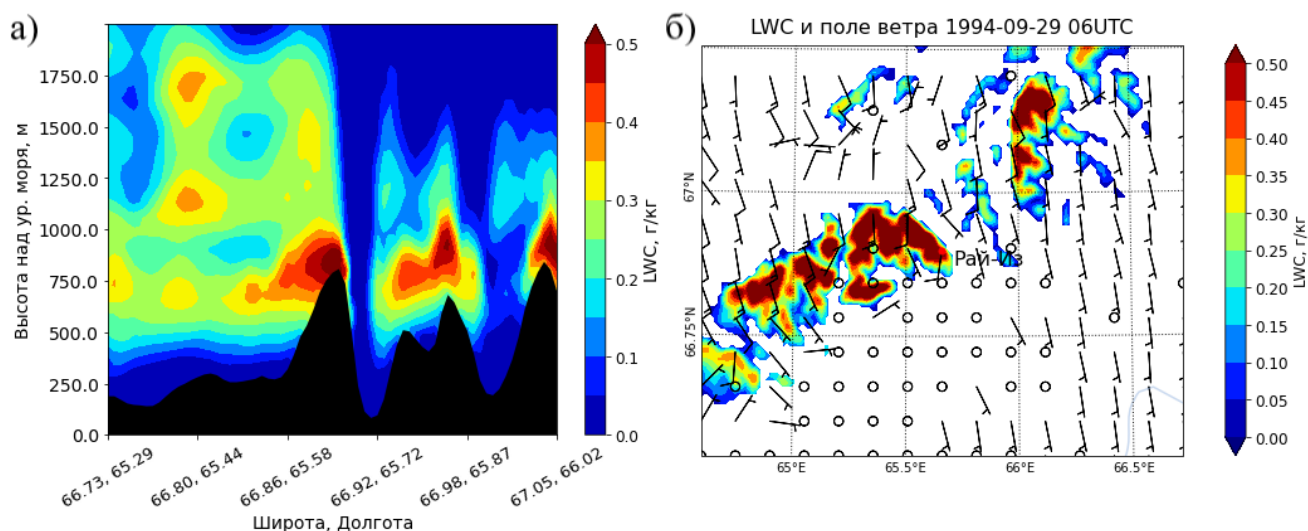


Рисунок 5.13 – Вертикальный разрез атмосферы через горный массив Рай-Из:
а) 29.09.1994 06 ч ВСВ; б) Поле содержания жидкой воды (LWC) на территории
Полярного Урала 29.09.1994 06 ч ВСВ

Образование изморози в ноябре 1996 года также было воспроизведено моделью (рисунок 5.14). Как видно из рисунка 5.14, по данным моделирования данному случаю соответствовало невысокое влагосодержание – до $0,2 \text{ г/м}^3$. Такие результаты хорошо согласуются с данными наблюдений, так как второй случай имел наименьшую интенсивность обледенения.

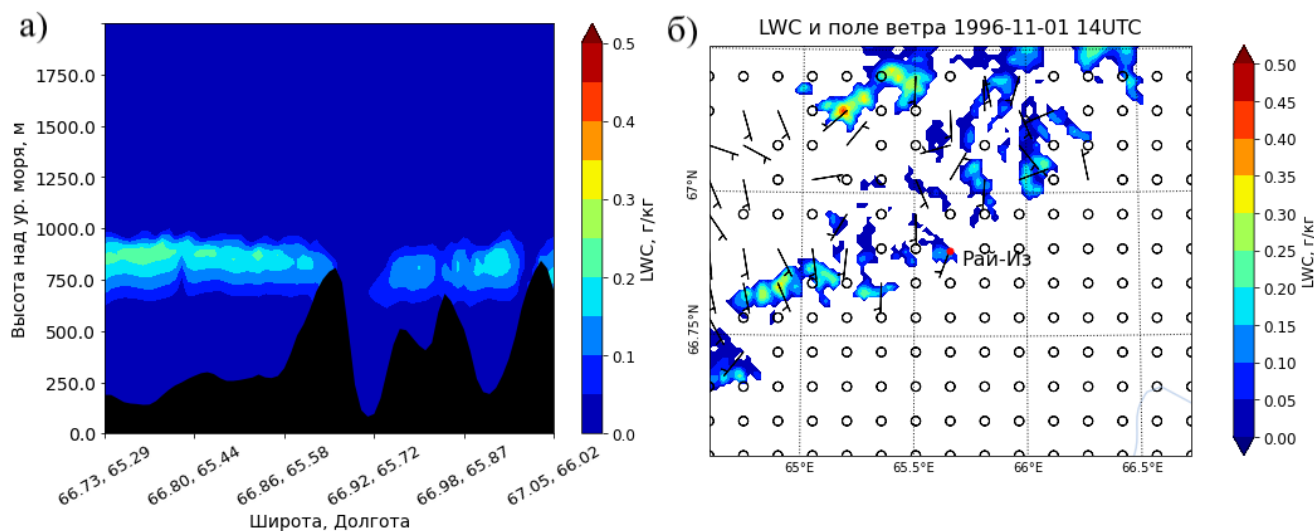


Рисунок 5.14 – Вертикальный разрез атмосферы через горный массив Рай-Из:
 а) 01.11.1996 14 ч ВСВ, б) Поле содержания жидкой воды (LWC) на территории
 Полярного Урала: 01.11.1996 14 ч ВСВ

Случай 1997 года отличается тем, что в первых двух случаях, области обледенения располагались в облаках, нижняя граница которых проходила через вершину горного массива, на которой располагается метеостанция. В данном случае, по данным моделирования, область обледенения располагалась непосредственно на склонах горного массива (рисунок 5.15).

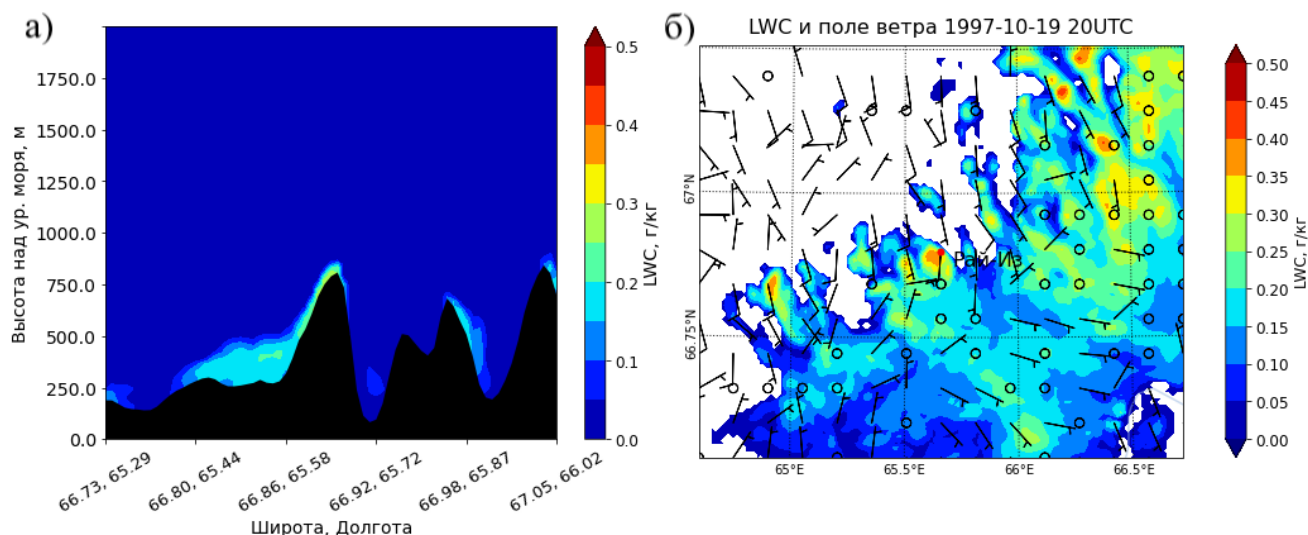


Рисунок 5.15 – Вертикальный разрез атмосферы через горный массив Рай-Из:
 а) 19.01.1997 20 ч ВСВ. б) Поле содержания жидкой воды (LWC) на территории
 Полярного Урала 19.01.1997 20 ч ВСВ

Далее рассматривались результаты численного моделирования зернистой изморози для метеорологической станции Рай-Из. На рисунке 5.16 представлены

графики хода образования зернистой изморози. Сплошной синей линией показана накопленная масса отложения в виде зернистой изморози по данным модели WRF-ARW с шагом 667 м, пунктирной синей линией с шагом 2 км. Голубой закраской отмечен период, во время которого на метеорологической станции Рай-Из наблюдатель отмечал наличие тумана с отложением изморози (код 49 КН-01). Рассмотрим результаты моделирования для каждого случая.

Как было показано выше, в случае 1994 года наблюдалась максимальная масса отложений при наименьшем периоде фазы нарастания изморози. Данные моделирования хорошо согласуются с данными наблюдений. Модель показала интенсивный рост отложений льда в период с 18 ч ВСВ 28 сентября. Наблюдатель на метеорологической станции отметил туман с отложением изморози примерно в то же время. Также хорошо согласуются и данные об окончании обледенения.

Моделирование случая 1996 года показывает другие результаты. По данным наблюдений фаза нарастания продолжалась 79 часов. Поэтому результирующая накопленная масса значительно ниже, чем по данным наблюдений. Модель достаточно точно воспроизвела время начала обледенения. На графике видно, что начиная с 21 часа 1 ноября модель показывала рост отложения, однако наблюдатель на метеостанции не отмечал туман. Это связано с тем, что наблюдатель отмечал выпадение осадков в виде слабого и умеренного снега, а по данным с гололедного станка обледенение продолжалось, то есть в данном случае нет расхождения в данных модели и в наблюдениях.

Наблюдения 1997 года также хорошо согласуются с данными моделирования. Модель успешно воспроизвела период образования изморози. Также, как и в случае 1996 года в наблюдениях есть перерыв между последовательными сроками кодом КН-01 49, опять же из-за выпадения осадков в этот срок. Несмотря на то, что по данным наблюдений продолжительность фазы нарастания была больше, чем период моделирования, можно сделать вывод о том, что модель также, как и в других экспериментах, занижает массу образовавшихся отложений.

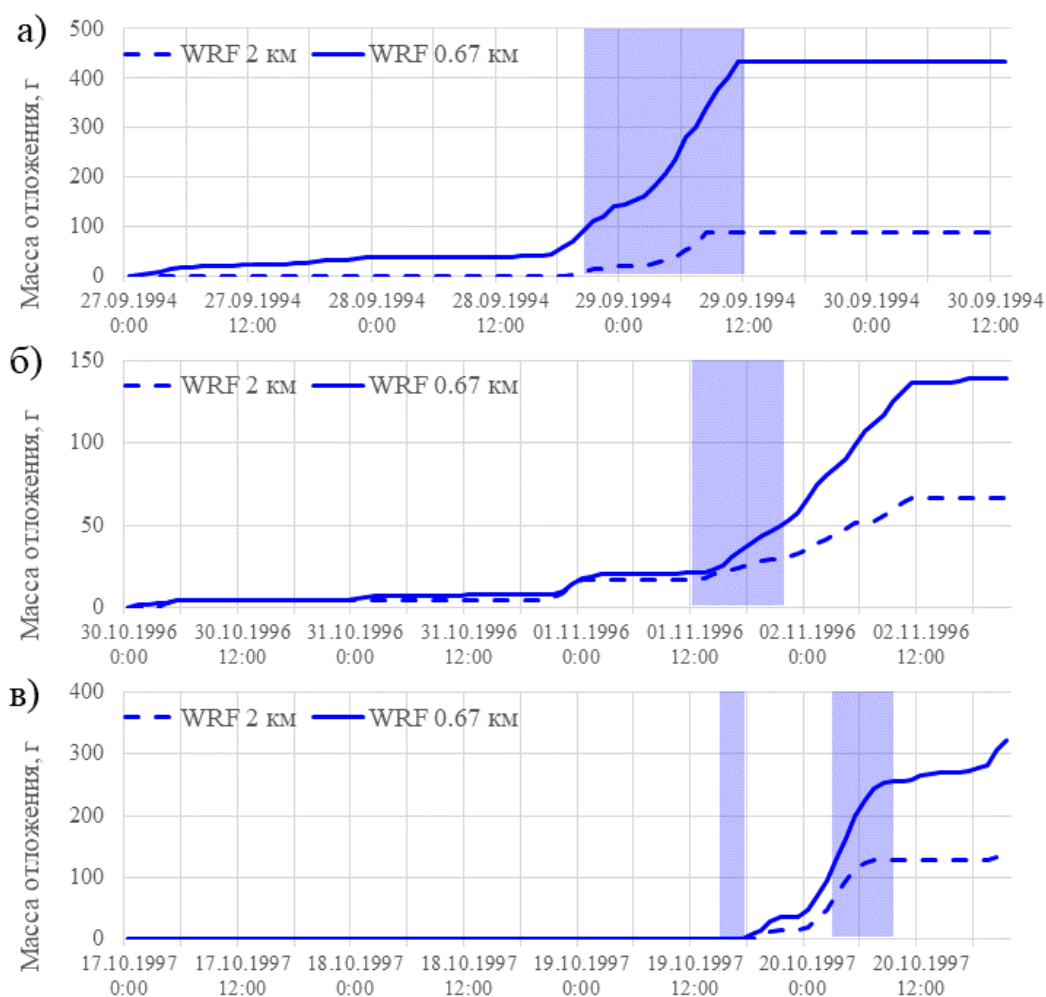


Рисунок 5.16 – Графики временного хода увеличения массы зернистой изморози по данным моделирования: а) 27-30 сентября 1994 года; б) 30 октября - 2 ноября 1996 года; в) 17-20 октября 1997 года. Синей заливкой показан период наблюдения тумана с отложением изморози

Оценка точности воспроизведения основных метеорологических условий формирования и массы отложений зернистой изморози моделью на метеорологической станции Рай-Из приведены в таблицах 5.2, 5.3 и 5.4.

Сравнение данных моделирования с фактически наблюдаемыми значениями показывает, что при использовании шага модели 18 и 6 км отложения зернистой изморози не воспроизводятся вовсе. Это происходит из-за неточного описания рельефа и, как следствие, невозможностью описания моделью мезометеорологических процессов.

Стоит отметить, что при уменьшении шага модели в три раза, с 2 км до 667 м, наблюдается существенное увеличение массы отложения зернистой изморози. Таким образом, увеличение разрешения моделирования является важной задачей

при прогнозировании явлений внутриоблачного обледенения. Систематическое занижение массы отложений в оперативной практике может быть решено путем введения поправочных коэффициентов. Значительно более важным результатом является близкое к данным наблюдений смоделированное время начала обледенения, в первую очередь необходимое для предупреждения негативных воздействий на хозяйственную деятельность человека. Успешное воспроизведение времени начала обледенения было получено и для не столь интенсивных случаев образования зернистой изморози в городах Надым и Новый Уренгой, произошедших в январе 2016 года [Leonov, Sokolikhina, 2022].

Таблица 5.2 – Оценка точности воспроизведения основных метеорологических условий формирования и массы отложений зернистой изморози, образовавшихся 27-30 сентября 1994 года.

| шаг сетки | Температура воздуха, °C | | | Относительная влажность воздуха, % | | | Скорость ветра, м/с | | | Масса отложений изморози, г | |
|-----------|-------------------------|-----|------|------------------------------------|-----|------|---------------------|-----|------|-----------------------------|-----|
| | BIAS | MAE | RMSE | BIAS | MAE | RMSE | BIAS | MAE | RMSE | факт | WRF |
| 18 км | 1.4 | 1.5 | 1.8 | -3.0 | 4.0 | 7.0 | -4.8 | 5.2 | 6.6 | 2400 | 1 |
| 6 км | 1.5 | 1.6 | 1.8 | -2.0 | 3.0 | 6.0 | -4.9 | 5.3 | 6.7 | 2400 | 9 |
| 2 км | 0.9 | 1.1 | 1.3 | -2.0 | 3.0 | 5.0 | -3.8 | 4.4 | 5.5 | 2400 | 87 |
| 0,67 км | -0.1 | 0.8 | 1.0 | 0.0 | 3.0 | 4.0 | -2.6 | 3.4 | 4.5 | 2400 | 434 |

Таблица 5.3 – Оценка точности воспроизведения основных метеорологических условий формирования и массы отложений зернистой изморози, образовавшихся 30 октября - 2 ноября 1996 года.

| шаг сетки | Температура воздуха, °C | | | Относительная влажность воздуха, % | | | Скорость ветра, м/с | | | Масса отложений изморози, г | |
|-----------|-------------------------|-----|------|------------------------------------|-----|------|---------------------|-----|------|-----------------------------|-----|
| | BIAS | MAE | RMSE | BIAS | MAE | RMSE | BIAS | MAE | RMSE | факт | WRF |
| 18 км | -1.6 | 2.0 | 2.5 | 4.0 | 5.0 | 7.0 | -4.2 | 5.3 | 5.4 | 2304 | 0 |
| 6 км | -1.6 | 1.9 | 2.5 | 4.0 | 6.0 | 7.0 | -3.2 | 5.1 | 5.1 | 2304 | 4 |
| 2 км | -2.0 | 2.4 | 2.7 | 4.0 | 5.0 | 6.0 | -1.0 | 3.6 | 3.7 | 2304 | 67 |
| 0,67 км | -2.3 | 2.6 | 2.8 | 5.0 | 5.0 | 7.0 | -1.5 | 3.5 | 3.8 | 2304 | 139 |

Таблица 5.4 – Оценка точности воспроизведения основных метеорологических условий формирования и массы отложений зернистой изморози, образовавшихся 17-20 октября 1997 года.

| шаг сетки | Температура воздуха, °C | | | Относительная влажность воздуха, % | | | Скорость ветра, м/с | | | Масса отложений изморози, г | |
|-----------|-------------------------|-----|------|------------------------------------|------|------|---------------------|-----|------|-----------------------------|-----|
| | BIAS | MAE | RMSE | BIAS | MAE | RMSE | BIAS | MAE | RMSE | факт | WRF |
| 18 км | -1.7 | 2.7 | 3.4 | 1.0 | 11.0 | 18.0 | -3.7 | 4.9 | 5.6 | 2096 | 1 |
| 6 км | -0.08 | 1.8 | 2.2 | -3.0 | 10.0 | 14.0 | -3.3 | 4.7 | 5.4 | 2096 | 12 |
| 2 км | 0.1 | 1.1 | 1.3 | -9.0 | 12.0 | 16.0 | -1.1 | 3.4 | 4.0 | 2096 | 142 |
| 0,67 км | -0.6 | 1.1 | 1.2 | -7.0 | 10.0 | 14.0 | -0.7 | 3.3 | 3.8 | 2096 | 322 |

5.3. Результаты моделирования отложений мокрого снега

На заключительном этапе рассматривались результаты численного моделирования гололедно-изморозевых отложений в виде мокрого снега. Как было показано в главе 4, рассмотренные случаи опасных отложений формировались во время интенсивных осадков, выпадающих при слабopоложительной температуре воздуха и высокой относительной влажности.

Рассмотрим результаты воспроизведения структуры атмосферы при формировании ледяного шторма на территории юга Сахалина численной моделью WRF-ARW. На рисунке 5.17 представлен временной разрез, описывающий термическую структуру тропосферы над с. Ильинское, где в ноябре 1988 года наблюдалась максимальная толщина отложений мокрого снега.

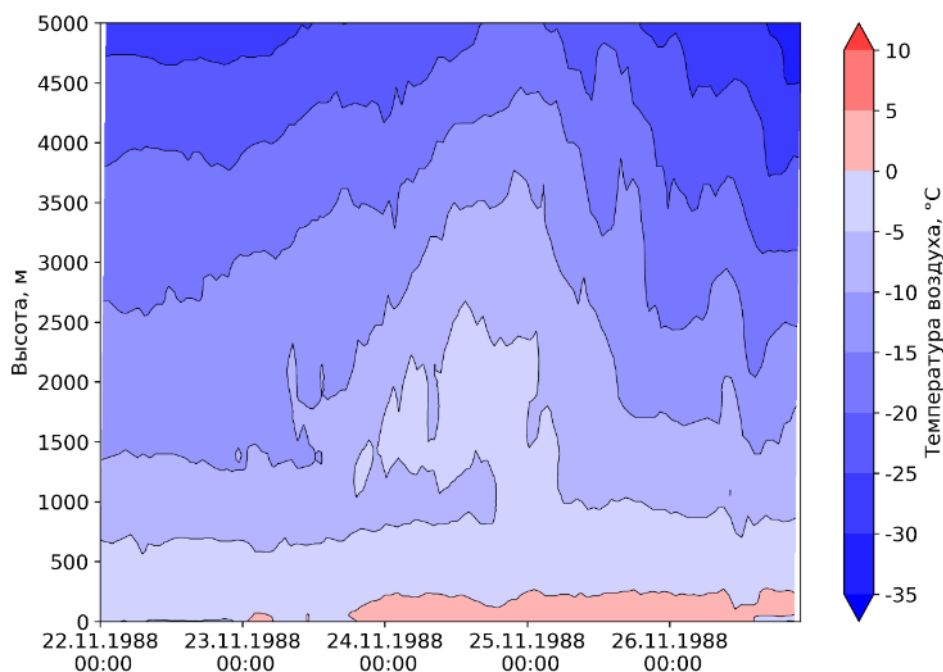


Рисунок 5.17 – Временной разрез термической структуры тропосферы для с. Ильинское с 22 по 26 ноября 1988 года по данным модели WRF-ARW

По данным рисунка 5.17 можно сделать вывод, что формирование отложений в виде мокрого снега происходило при слабopоложительной температуре воздуха в нижних 500 м. Выше 500 располагался воздух, имеющий отрицательную температуру, это хорошо согласуется с условиями формирования мокрого снега, описанными в литературных источниках (глава 1.4).

На рисунке 5.18 представлена накопленная сумма осадков в виде мокрого снега. На карте отчетливо проявляются возвышенные, углубленные в более континентальную часть острова участки суши, на территории которых наблюдалась отрицательная температура воздуха, препятствующая налипанию мокрого снега на предметы. В целом, модель воспроизвела большое количество выпавших осадков на территории юга Сахалина, однако по данным наблюдений невозможно достоверно проверить качество воспроизведения моделью выпадения осадков отдельно в виде мокрого снега.

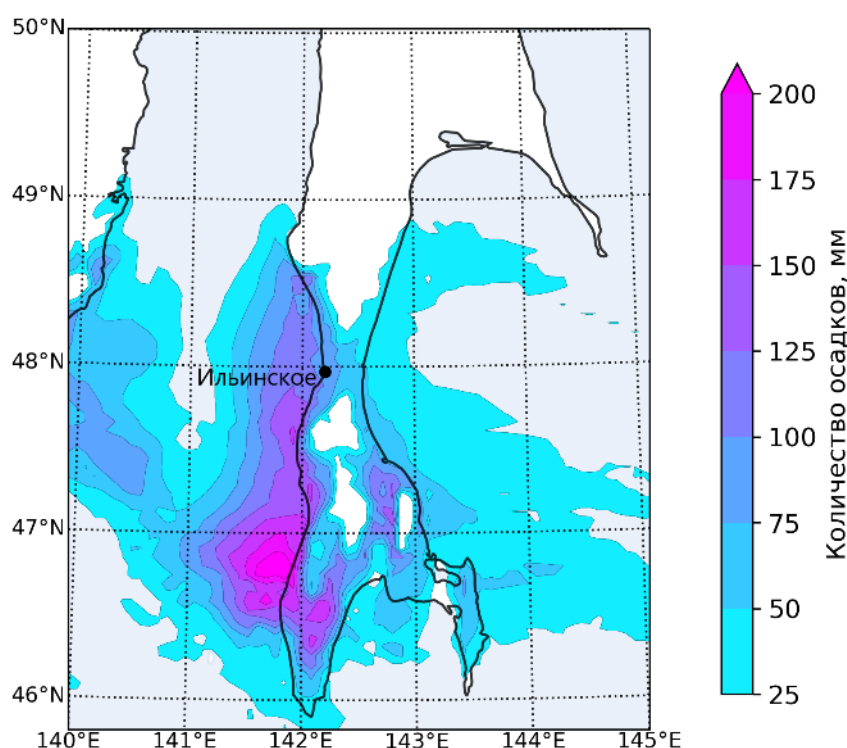


Рисунок 5.18 – Накопленная сумма осадков в виде мокрого снега 18 ч ВСВ 26 ноября 1988 года по данным модели WRF-ARW

Далее были получены карты полей основных метеорологических величин: скорости и направления ветра, температуры и относительной влажности воздуха (рисунок 5.19). На рисунке 5.19а отчетливо проявилась обширная область с положительной температурой воздуха, необходимая для образования отложений в виде мокрого снега. Также моделью была воспроизведена высокая относительная влажность воздуха, более 85%, что является благоприятным фактором налипания на препятствия обводненных снежинок. Отдельно стоит отметить высокие

скорости ветра, полученные на всем побережье Сахалина (рисунок 5.19в). Скорость ветра более 15 м/с в совокупности с количеством осадков более 3 мм за 12 часов соответствует очень сильной общей метели [Таран, Купянская, 1989; Веселова и др., 1995]. Этот факт косвенно подтверждает предположение о том, что образование опасных отложений мокрого снега, диаметром более 320 мм в ноября 1988 года на юге Сахалина являлось следствием не только большого количества осадков, выпадающих в виде мокрого снега, но и активного метелевого переноса при высокой влажности воздуха.

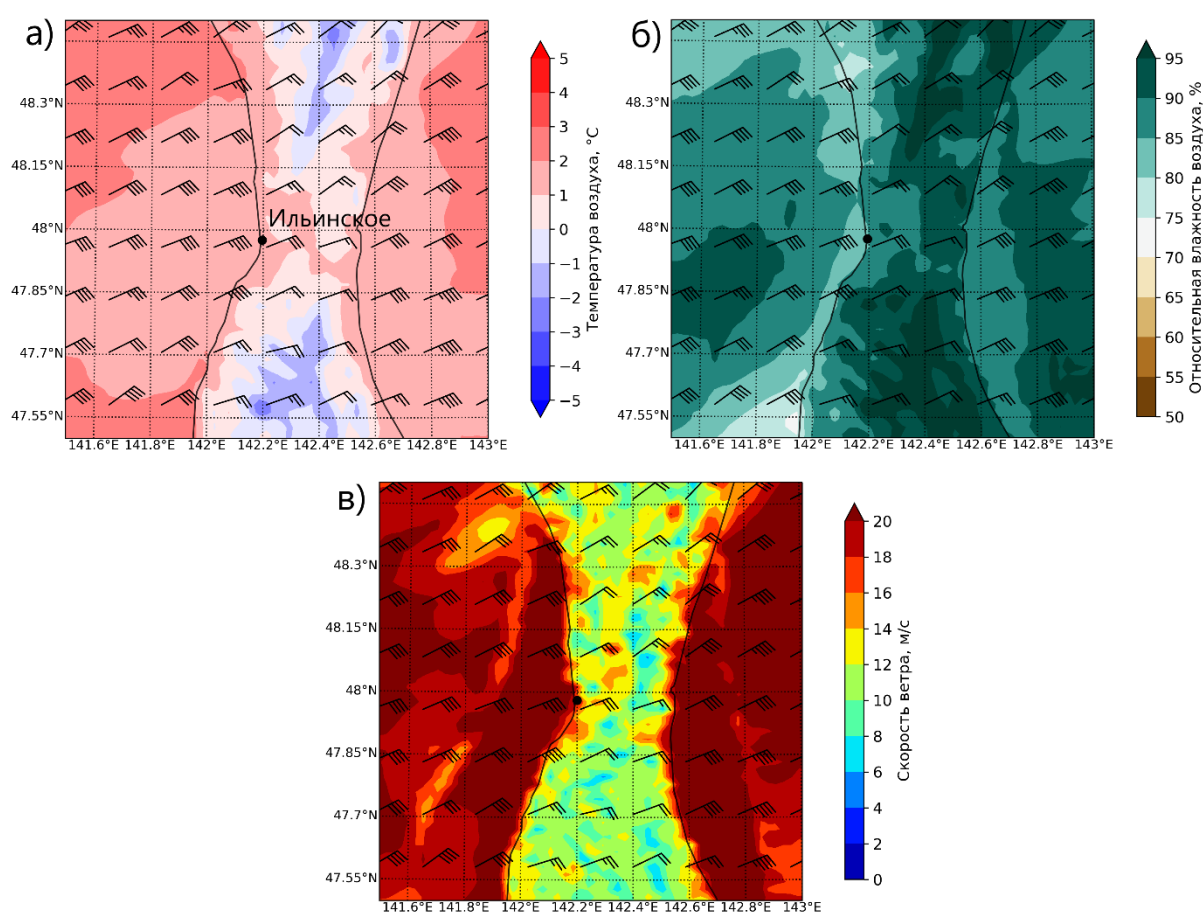


Рисунок 5.19 – Поля основных метеорологических величин на 00 ч ВСВ 25 ноября 1988 года: а) температура воздуха на высоте 2м, б) относительная влажность воздуха на высоте 2 м, в) скорость ветра на высоте 10 м

Оценка точности воспроизведения основных метеорологических условий формирования и количества осадков в виде мокрого снега на метеорологической станции Ильинское приведены в таблице 5.5. В данном случае не наблюдается улучшения воспроизведения температуры, скорости ветра и влажности воздуха с

увеличением разрешения модели. Это может быть связано с тем, что начальные данные 1988 года могли уступать по точности данным реанализа за последние годы. Кроме того, Ильинское располагается вблизи побережья залива Делангля, что также вносит дополнительные погрешности при расчете моделью. В последнем столбце таблицы 5.5 приводится сравнение общего количества осадков по данным наблюдений и количества осадков в виде мокрого снега по данным моделирования. Такое сравнение не вполне корректно, так как на метеорологических станциях при определении количества осадков не разделяют фазовый состав. Однако показано, что даже отдельная часть осадков в виде мокрого снега выпадала по данным модели в количестве, достаточном для образования отложений мокрого снега большого размера.

Таблица 5.5 – Оценка точности воспроизведения основных метеорологических условий и количества осадков в виде мокрого снега с 22 по 26 ноября 1988 г.

| шаг сетки | Температура воздуха, °C | | | Относительная влажность воздуха, % | | | Скорость ветра, м/с | | | Количество осадков, мм | |
|-----------|-------------------------|-----|------|------------------------------------|-----|------|---------------------|-----|------|------------------------|-----|
| | BIAS | MAE | RMSE | BIAS | MAE | RMSE | BIAS | MAE | RMSE | факт | WRF |
| 18 км | -0.1 | 0.8 | 1.0 | 7 | 13 | 15 | 3.0 | 3.7 | 5.3 | 222 | 98 |
| 6 км | -0.8 | 1.8 | 2.7 | 12 | 12 | 16 | 0.6 | 3.4 | 4.2 | 222 | 105 |
| 2 км | -0.5 | 1.5 | 2.0 | 7 | 12 | 15 | 3.6 | 4.1 | 5.6 | 222 | 124 |

Далее был рассмотрен случай образования опасных отложений мокрого снега на территории полуострова Камчатка в декабре 2008 года. Тогда, на метеорологической станции Ключи были зафиксированы отложения мокрого снега толщиной 111 мм.

В первую очередь была рассмотрена термическая структура тропосферы в ее нижних 5 км. Также, как и в случае 1988 года проявился тонкий слой с положительной температурой воздуха, толщина которого составляла около 100 м (рисунок 5.20). Стратификация такого типа наблюдалась на всем протяжении выпадения осадков.

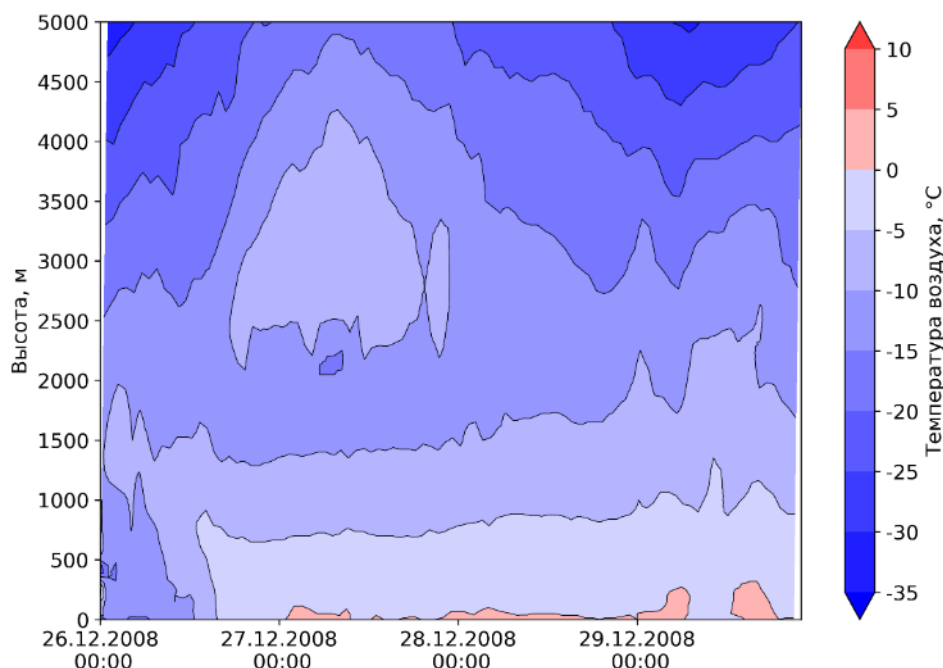


Рисунок 5.20 – Временной разрез термической структуры тропосферы над пос. Ключи с 26 по 29 декабря 2008 года по данным модели WRF-ARW

На рисунке 5.21 представлено поле накопленной суммы осадков в виде мокрого снега. Данная схема интересна тем, что наибольшее количество осадков в виде мокрого снега выпадало на побережье полуострова, где наблюдалась максимальная адвекция тепла. Также вблизи побережья наиболее сильно проявляется усиление осадков вследствие орографического влияния на проходящий теплый фронт. Важной особенностью является воспроизведение моделью обтекания влк. Ключевской сопки, вкл. Шивелуч, а также г. Харчинская (рисунок 5.22). Таким образом, результаты моделирования отражают мезомасштабные особенности образования отложений в виде мокрого снега.

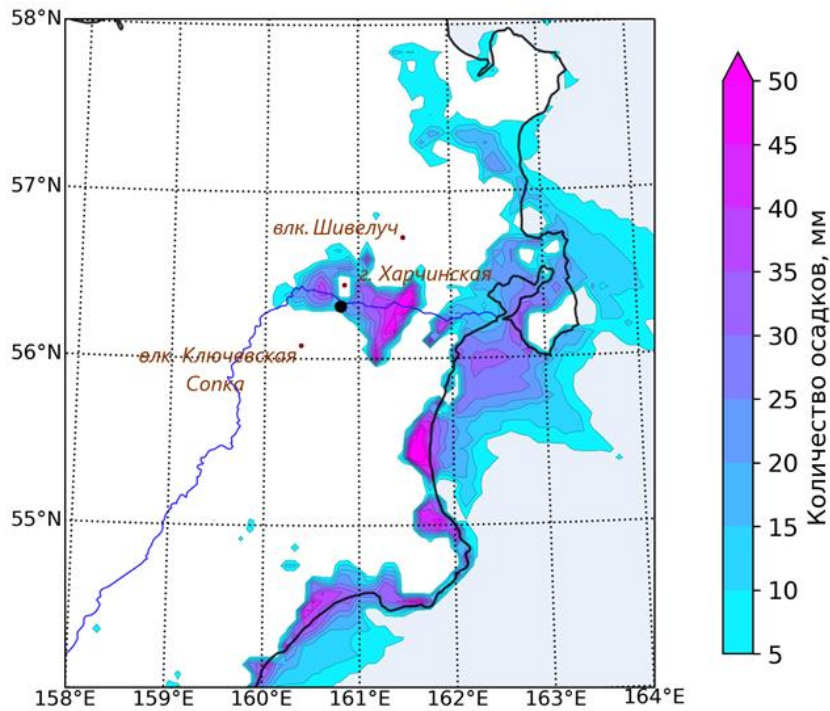


Рисунок 5.21 – Накопленная сумма осадков в виде мокрого снега 18 ч ВСВ 29 декабря 2008 года по данным модели WRF-ARW. Черной точкой отмечено положение метеорологической станции Ключи

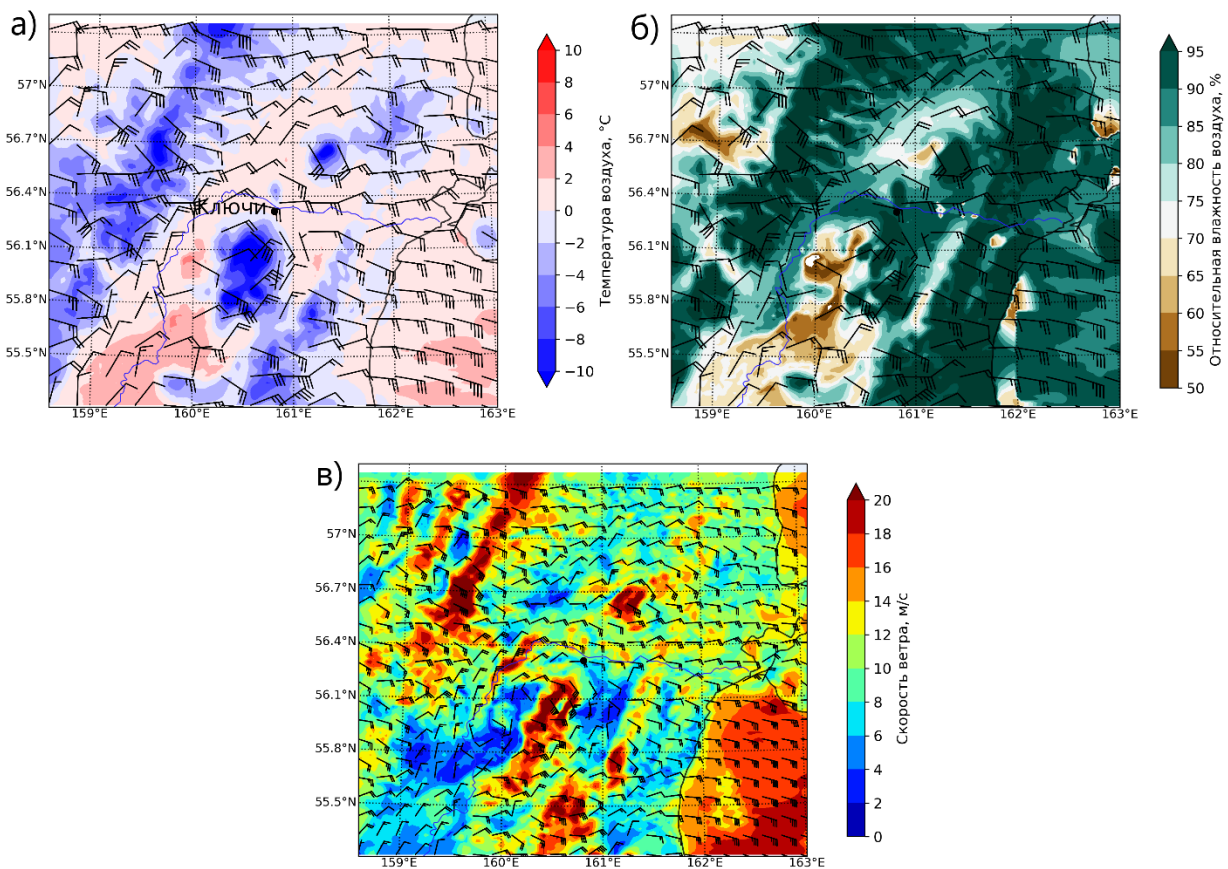


Рисунок 5.22 – Поля основных метеорологических величин на 03 ч ВСВ 28 декабря 2008 года: а) температура воздуха на высоте 2м, б) относительная влажность воздуха на высоте 2 м, в) скорость ветра на высоте 10 м

Оценка точности воспроизведения метеорологических условий формирования и количества осадков в виде мокрого снега на метеорологической станции Ключи приведена в таблице 5.6. Как и в случае 1988 года, с увеличением пространственного разрешения моделирования не происходит качественного улучшения воспроизведения метеорологических параметров. Также показано, что большая часть осадков по данным моделирования выпадала именно в виде мокрого снега.

Таблица 5.6 – Оценка точности воспроизведения основных метеорологических условий и количества осадков в виде мокрого снега с 26 по 29 декабря 2008 г.

| шаг сетки | Температура воздуха, °C | | | Относительная влажность воздуха, % | | | Скорость ветра, м/с | | | Количество осадков, мм | |
|-----------|-------------------------|-----|------|------------------------------------|-----|------|---------------------|-----|------|------------------------|-----|
| | BIAS | MAE | RMSE | BIAS | MAE | RMSE | BIAS | MAE | RMSE | факт | WRF |
| 18 км | 1.2 | 3.1 | 4.9 | -6.0 | 9.0 | 10.0 | 2.7 | 2.9 | 3.6 | 42 | 24 |
| 6 км | 1.3 | 2.3 | 4.1 | -7.0 | 9.0 | 11.0 | 2.1 | 2.5 | 3.1 | 42 | 27 |
| 2 км | 1.1 | 1.7 | 3.1 | -4.0 | 7.0 | 8.0 | 3.2 | 3.2 | 3.5 | 42 | 34 |

Последним рассмотренным случаем образования мокрого снега был случай, произошедший в декабре 2018 года, на горном хребте Аибга, расположенном в 7 км южнее Красной Поляны.

Исследование термической структуры тропосферы нижних 5 км показало, что в момент выпадения мокрого снега, 25 декабря 2018 года, нижний слой тропосферы толщиной 300-500 м имел положительную температуру воздуха (рисунок 5.23), что также как в предыдущих случаях хорошо согласуется с литературными источниками и с данными аэрологических наблюдений.

Пространственная картина распределения накопленных осадков в виде мокрого снега хорошо согласуется с полями температуры воздуха, относительной влажности воздуха и скорости ветра. На рисунках 5.24 и 5.25 показано, что осадки в виде мокрого снега вблизи метеорологической станции Аибга выпадали полосой, на небольшом удалении от побережья Черного моря. Наибольшее количество осадков выпадало в горных долинах, по которым с моря продвигался теплый и влажный воздух с положительной температурой. Кроме этого, в долинах наблюдалась минимальная скорость ветра, которая по данным моделирования не превышала 5 м/с.

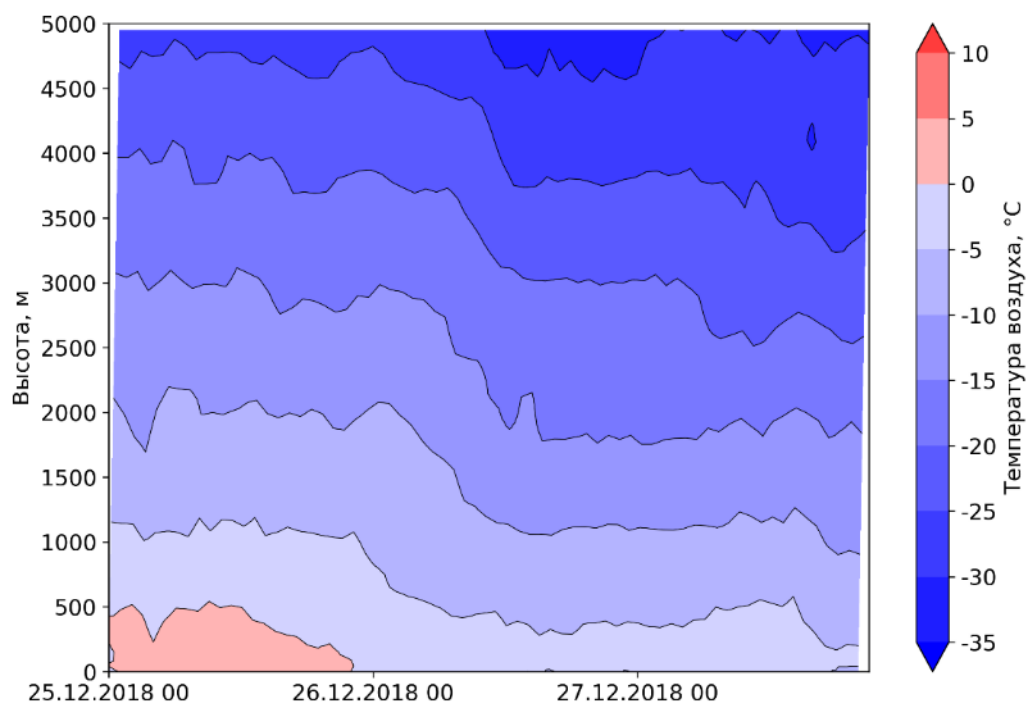


Рисунок 5.23 – Временной разрез термической структуры тропосферы над метеостанцией Аибга с 25 по 27 декабря 2018 года по данным модели WRF-ARW

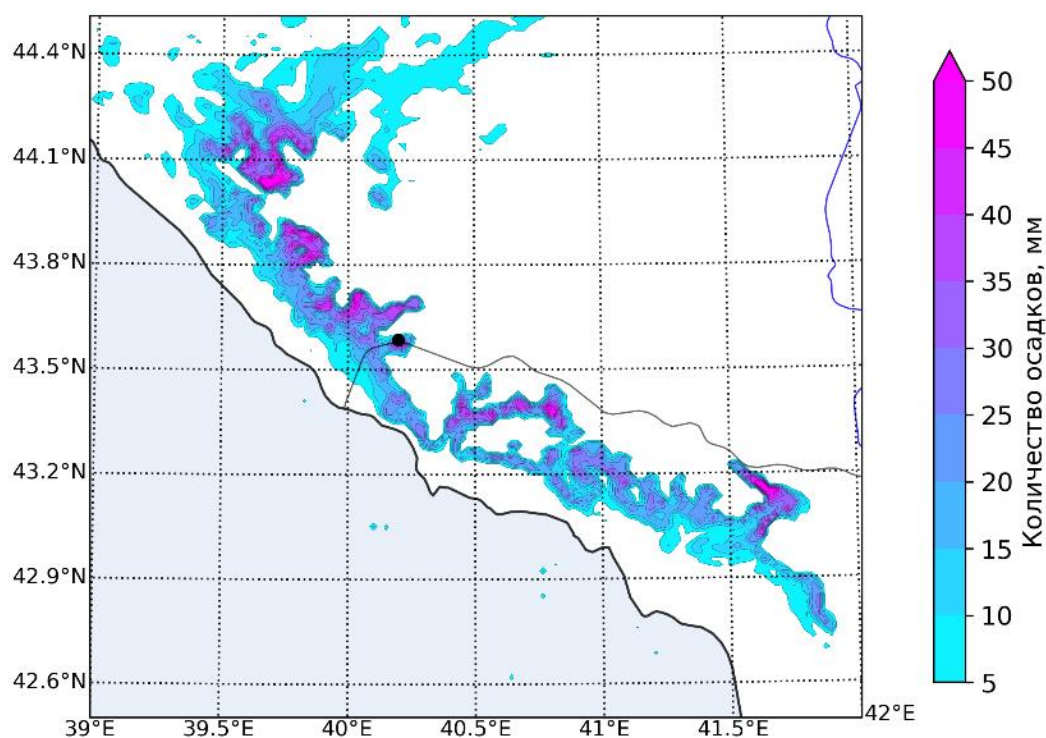


Рисунок 5.24 – Накопленная сумма осадков в виде мокрого снега 18 ч ВСВ 27 декабря 2018 года по данным модели WRF-ARW. Черной точкой отмечено положение метеорологической станции Аибга

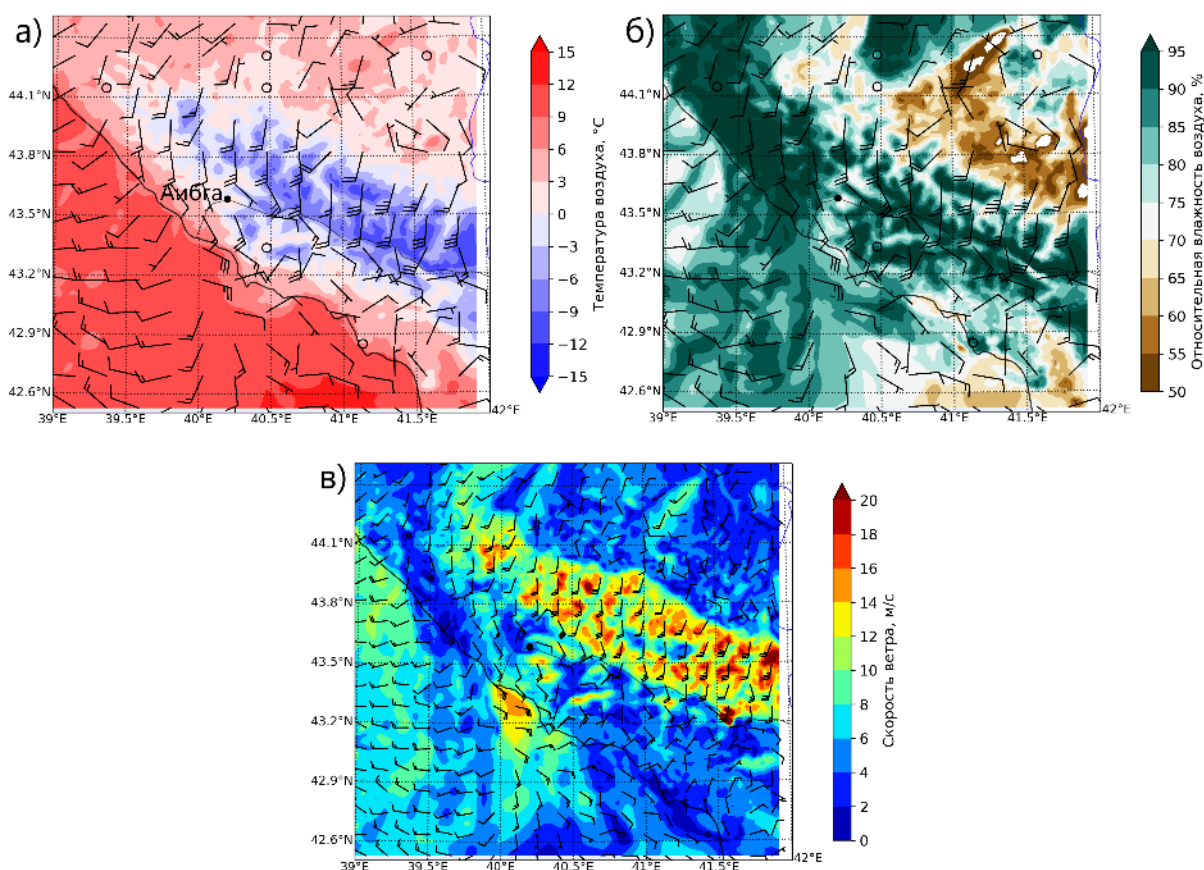


Рисунок 5.25 – Поля основных метеорологических величин на 15 ч ВСВ 25 декабря 2018 года: а) температура воздуха на высоте 2 м б) относительная влажность воздуха на высоте 2 м в) скорость ветра на высоте 10 м

Оценка воспроизведения случая образования высокоинтенсивных отложений мокрого снега на метеорологической станции Красная Поляна приведена в таблице 5.7. Получено преобладающее количество осадков в виде мокрого снега.

В данном эксперименте особенностью являлось существенное ухудшение качества моделирования относительной влажности воздуха. Причина этого, скорее всего, состоит в том, что моделировалась территория Большого Кавказа – изначально сложная для моделирования территория с множеством локальных особенностей. Во-вторых, сама относительная влажность является сложным для измерения параметром, особенно в зимнее время, когда погрешность наблюдений может составлять более 10%.

Таблица 5.7 – Оценка точности воспроизведения основных метеорологических условий и количества осадков в виде мокрого снега с 25 по 27 декабря 2018 г.

| шаг сетки | Температура воздуха, °С | | | Относительная влажность воздуха, % | | | Скорость ветра, м/с | | | Количество осадков, мм | |
|-----------|-------------------------|-----|------|------------------------------------|------|------|---------------------|-----|------|------------------------|-----|
| | BIAS | MAE | RMSE | BIAS | MAE | RMSE | BIAS | MAE | RMSE | факт | WRF |
| 18 км | -4.2 | 4.2 | 4.7 | -8.0 | 9.0 | 11.0 | 4.7 | 4.7 | 5.0 | 62 | 36 |
| 6 км | -3.0 | 3.0 | 3.6 | -11.0 | 11.0 | 14.0 | 1.9 | 1.9 | 2.2 | 62 | 42 |
| 2 км | -0.9 | 1.7 | 2.3 | -18.0 | 18.0 | 19.0 | 2.5 | 2.5 | 2.8 | 62 | 44 |

Выводы к главе 5

Результаты численного моделирования позволили получить необходимые метеорологические поля для изучения механизмов формирования высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений с высоким временным и пространственным разрешением.

Моделью WRF-ARW были воспроизведены схемы термической структуры тропосферы в период выпадения замерзающих осадков, ранее разработанные на основе аэросиноптического анализа. Помимо высокой детализации термической структуры тропосферы, результаты моделирования позволили получить метеорологические поля, недоступные по данным наблюдений, такие как поля адвекции температуры воздуха на различных высотах. Были получены поля максимального диаметра отложений гололеда, которые хорошо согласуются с данными наблюдений и иллюстрируют мезомасштабные особенности распределения гололедных отложений, такие как влияние островов тепла.

Моделью были воспроизведены пространственные области возможного образования зернистой изморози, были получены вертикальные разрезы тропосферы, по которым можно проследить образование внутриоблачного обледенения вследствие обтекания горных хребтов низкой облачностью и по причине образования переохлажденных туманов.

Также моделью были воспроизведены случаи образования опасных отложений мокрого снега на Дальнем Востоке и на Большом Кавказе. Показано, что наиболее важным фактором правильного воспроизведения моделью опасных отложений мокрого снега является точность воспроизведения выпадающего количества осадков.

Количества рассмотренных случаев недостаточно для проведения статистической оценки методов прогнозирования, однако результаты работы показывают то, что мезомасштабные модели воспроизводят основные механизмы формирования высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений. Таким образом, численное моделирование может быть использовано для прогнозирования явлений обледенения, а также региональных исследований, в частности для разработки карт районирования по гололедным и гололедно-ветровым нагрузкам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Температурно-ветровые условия образования высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений различных видов существенно отличаются от условий образования гололедно-изморозевых отложений невысокой интенсивности. Для опасных отложений гололеда характерна более низкая температура образования, в среднем на $0,3^{\circ}\text{C}$ ниже, чем для отложений малого диаметра. Опасные отложения мокрого снега наиболее часто образуются в безветренную погоду или при слабом ветре (не более 1 м/с)

2. Выявленное пространственное распространение гололедно-изморозевых отложений показало, что наибольшее количество отложений на территории России наблюдается в виде кристаллической изморози, которая преобладает на 86% метеорологических станций. Гололедно-изморозевые отложения, достигающие критериев опасного явления, наиболее часто наблюдаются в виде гололеда и мокрого снега – на 35 и 45% метеорологических станций.

3. Показано, что инициатором формирования опасных отложений гололеда становилось взаимодействие трех резко контрастирующих по температуре и влагосодержанию воздушных масс, приводящее к образованию стратификации атмосферы по типу «теплого носа» и наличие адвекции тепла в нижней и средней тропосфере и холода у поверхности земли.

4. Формирование рассмотренных случаев высокоинтенсивных отложений в виде зернистой изморози на территории горного массива Рай-Из (Полярный Урал) было связано с обтеканием хребта воздухом с близкой к 100% относительной влажностью, а также образованием переохлажденного тумана на его склонах.

5. Случаи образования отложений в виде мокрого снега, в первую очередь, были связаны с выпадением особенно интенсивных осадков при слабopоложительной температуре воздуха в нижних 500 м тропосферы и близкой к 100% относительной влажностью воздуха. Показано, что в отдельных редких случаях формирование опасных отложений мокрого снега происходит при сильном

ветре, что связано с вкладом в процесс обледенения воздействия метелевого переноса.

6. Анализ результатов численных экспериментов с использованием модели WRF-ARW показал, что модель реалистично воспроизводит все основные механизмы формирования гололедно-изморозевых отложений различных видов, что позволяет использовать данные моделирования для оценки их интенсивности и продолжительности.

7. Пространственное разрешение моделирования значительно влияет на точность воспроизведения интенсивности обледенения, в первую очередь это относится к зернистой изморози, образующейся в условиях сложной орографии. Для воспроизведения отложений в виде зернистой изморози необходимо использовать шаг модели по пространству 2 км и менее, в то время как для воспроизведения гололеда и мокрого снега достаточно шага 6 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аржанова Н.М., Коршунова Н.Н. Характеристики гололедно-изморозевых явлений на территории России в условиях современных изменений климата // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации - Мирового центра данных. 2019. № 184. С. 33–44.
- Аржанова Н.М., Коршунова Н.Н. Оценка многолетних изменений характеристик гололедно-изморозевых отложений на территории России // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации - Мирового центра данных. 2021. № 188. С. 18–29.
- Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. 2014. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549.
- Бучинский В.Е. Атлас обледенения проводов. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 114 с.
- Вельтищев Н. Ф., Жупанов В. Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM //80 лет Гидрометцентру России. 2010. С. 94-135.
- Веселова Г.К., Таран И.В., Купянская Т.П. Автоматизированный прогноз метелей для Европейской части Российской Федерации и результаты его испытания. // Информационный сборник № 23. Результаты испытания новых и усовершенствованных методов краткосрочных и долгосрочных прогнозов погоды. 1995. С. 3–6.
- Вильфанд Р.М., Голубев А.Д. Метеорологические условия выпадения ледяных дождей 25-26 декабря 2010 г. над центром Европейской части России // Лед и снег. 2011. №4 (115). С. 119–124.
- ВМО/ТД-№ 1390. Авиационные факторы риска. ВМО. Программа обучения и подготовки ETR - № 20. 2007.
- Волеваха Н.М. О влиянии орографии на гололедные отложения. // Труды УкрНИГМИ. 1958. Вып. 13. С. 27–31.

- Воробьев В.И. Синоптическая метеорология // Л.: Гидрометеиздат, 1991. 616 с.
- Всемирная метеорологическая организация : официальный сайт. – URL: <https://public.wmo.int/> – (дата обращения: 10.02.2019).
- Гидрометцентр России : описание синоптической ситуации 11 ноября 2016. – URL: <http://www.meteoinfo.ru/news/1-2009-10-01-09-03-06/13473-11112016> (дата обращения: 02.03.2019).
- Голикова Т.Н. Распределение ветровых нагрузок на провода воздушных линий при гололеде на равнинной части Европейской территории СССР // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 1978. № 408. С. 58–61.
- Голубев А.Д., Кабак А.М., Никольская Н.А. и др. Ледяной дождь в Москве, Московской области и прилегающих областях центра Европейской территории России 25-26 декабря 2010 года // Труды Гидрометцентра России. 2013. Вып. 348. С. 214–230.
- Гончар Л.Г., Ланда Н.М., Холмский Д.В. Об учете рельефа при определении гололедно-ветровых нагрузок на воздушные линии электропередачи // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 1974. № 333. С. 61–67.
- Гурвич И.А. и др. Ледяной шторм в Приморье 18–19 ноября 2020 года // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса Учредители: Институт космических исследований Российской академии наук. 2021. Т. 18. №. 6. С. 241–252.
- Заморский А.Д. Иней. Изморозь. Гололед. Л.: Гидрометеиздат, 1951. 64 с.
- Заморский А.Д. Атмосферный лед // Акад. наук СССР. Геогр. о-во СССР. Иней, гололед, снег и град. - Москва; Ленинград: Изд-во Академии Наук СССР, 1955. 378 с.
- Засыпкин А.С., Щуров А.Н., Тетерин А.Д. Применение датчиков гололедной нагрузки и датчиков продольного тяжения проводов Вл для оценки опасности гололедной обстановки // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2018. №. 2 (198). С. 48–53.
- Зверев А.С. Синоптическая метеорология, Л.: Гидрометеиздат, 1977 г. 711 с.

- Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г., Юсупов Ю.И. Численные эксперименты по прогнозу гололедных явлений // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. №. 9. С. 735–741.
- Игнатов Р. Ю., Рубинштейн К.Г., Юсупов Ю.И. Прогноз максимальной толщины гололедных отложений // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 05. С. 408–413.
- Калинин Н.А., Смородин Б.Л. Редкое явление замерзающего дождя в Пермском крае // Метеорология и гидрология. 2012. №. 8. С. 27–35.
- Кантер Ц.А., Курмаз С.Е. Гололед в Саратове. Вопросы климата и погоды Нижнего Поволжья. – Саратов, 1983, Вып. 8(15)
- Кислов А.В. Климатология с основами метеорологии. Москва, «Академия», 2016. 221с.
- Клинов Ф.Я. Гололед и изморозь в нижнем 300 -метровом слое атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. 66 с.
- Клинов Ф. Я. Изморозь и гололед в нижнем 500-метровом слое атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. 138 с.
- Код для оперативной передачи данных приземных метеорологических наблюдений с сети станций Росгидромета (КН-01 SYNOP), 2012
- Леонов И.И., Соколихина Н.Н. Условия формирования ледяного шторма во Владивостоке в ноябре 2020 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 4 (382). С. 69–83.
- Леонов И.И. Условия формирования опасных отложений зернистой изморози на Полярном Урале // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 20–35.
- Леонов, И.И., Аржанова, Н.М. Метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложений на территории России, Фундаментальная и прикладная климатология. 2023. Т. 9. № 1. С. 15–32 (в печати)
- Методическое пособие прогноза фазового состояния осадков. Условия выпадения мокрого снега и образования налипания мокрого снега на территории деятельности ФГБУ «Центрально-черноземное УГМС» в градации опасных явлений / составители Черногубова Ю.Я., Санникова Г.В. – Курск. 2012. 63 с.

- Минуллин Р.Г. и др. Современные методы обнаружения гололеда на проводах воздушных линий электропередачи часть 1. Методы прогнозирования и взвешивания проводов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. №. 7–8. С. 68–78.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Часть I. Метеорологические наблюдения на станциях // Л.: Гидрометеиздат, 1985. 300 с.
- Раевский А.Н. Влияние рельефа на распределение гололедно-изморозевых отложений // Труды ОГМИ. 1961. Вып. 23. С. 3–10.
- Разуваев В.Н. Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Клещенко Л.К., Кузнецова В.Н., Трофименко Л.Т., Шерстюков А.Б., Швець Н.В., Давлетшин С.Г., Зверева Г.Н. Научно-прикладной справочник «Климат России» Свидетельство о государственной регистрации № 2020621470 от 18 августа 2020 г.
- Расписание Погоды : сайт. – URL: <https://rp5.ru/> – (дата обращения: 10.01.2019).
- Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть II, вып. 1, Европейская часть СССР и Закавказье // Л.: Гидрометеиздат, 1987. 298с.
- Руководящий документ 52.04.563-2002. Инструкция. Критерии опасных гидрометеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения. В.И. Кондратюк (руководитель разработки), Е.А. Федорова (ГГО), Н.Н. Бобровицкая (ГГИ), В.Ф. Гридасов (ВНИИСХМ), Ю.В. Лупачев (ГОИН).
- Сатина Н.В. Погода на территории Российской Федерации в декабре 2010 г. // Метеорология и гидрология 2011. № 3. С. 108–112.
- Сахалин и Курилы. – URL: <https://sakh.online/> – (дата обращения: 15.05.2022).
- Семенов Е.К., Соколихина Н.Н., Леонов И.И., Соколихина Е.В. Атмосферная циркуляция над центром Европейской России в период ледяного дождя в декабре 2010 г. // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 91–101.
- Таран И.В., Купянская Т.П. Прогноз метели различной интенсивности, включая стихийные для Европейской территории СССР // Труды Гидрометцентра СССР. 1989. Вып. 299. С. 22–24.

- Тимофеева М. В., Титов Д. Е. Развитие моделей оценки ледяных отложений на проводах воздушных линий электропередачи // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. Т. 13. №. 4. С. 37–45.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. Санкт-Петербург: Научно-технические технологии, 2022. 676 с.
- ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» : официальный сайт. – URL: <http://meteo.ru/> – (дата обращения: 15.01.2019).
- Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. 586 с.
- Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Завьялова А.А. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. I. Аэропорты московского аэроузла // Метеорология и гидрология 2003. №4. С. 40–58.
- Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Завьялова А.А. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. II. Аэропорт Минеральные Воды // Метеорология и гидрология 2005. №2. С. 27–41.
- Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Завьялова А.А. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. III. Аэропорт Одесса // Метеорология и гидрология 2005. №9. С. 5–18.
- Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Завьялова А.А. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. IV. Аэропорт Нижний Новгород // Метеорология и гидрология 2007. №7. С. 25–39.
- Шакина Н.П., Хоменко И.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н., Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 348. С. 130–161.
- Шакина Н.П. и др. О результатах испытания метода прогноза зон возможного обледенения воздушных судов // Информационный сборник. 2010. №. 37. С. 142–153.
- Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: Триада лтд, 2016. 312 с.

- Шамин С.И., Бухонова Л.К., Санина А.Т. «Сведения об опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлениях, которые нанесли материальный и социальный ущерб на территории России». 2019. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621326 Электронный архив научно-производственного центра «Мэп Мейкер». – URL: <https://mapmakers.ru/> – (дата обращения: 05.11.2019).
- Ягудин Р.А. Рекомендации к прогнозу гололеда: метод. письмо // Новосибирск: ЗСРГМИ, 1978. 6 с.
- American Meteorological Society. 2020: «Term». Glossary of Meteorology. – URL: <https://glossary.ametsoc.org/> – (дата обращения: 01.08.2021)
- Baldwin M., Treadon R., Contorno S. Precipitation type prediction using a decision tree approach with NMCs mesoscale eta model // Preprints, 10th Conf. on Numerical Weather Prediction, Portland, OR. Amer. Meteor. Soc. 1994. Vol. 30. P. 31.
- Bennetts W.J. The sleet storm in Northern New York, March 25–27 // Mon. Weather Rev. 1913. Vol. 41. P. 372–373.
- Bernstein B.C. Regional and Local Influences on Freezing Drizzle, Freezing Rain, and Ice Pellet Events // Weather and Forecasting. 2000. Vol. 15. № 5. P. 485–508.
- Bochieri J.R. The objective use of upper level soundings to specify precipitation type // Mon. Weather Rev. 1980. Vol. 108. P. 596–603.
- Bourgouin P. A method to determine precipitation type // Weather and Forecasting. 2000. Vol. 15. P. 583–592.
- Bougeault P., Lacarrere P. Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model // Monthly weather review. 1989. Vol. 117. №. 8. С. 1872–1890.
- Bulygina O.N., Arzhanova N.M., Groisman P.Y. Icing conditions over Northern Eurasia in changing climate // Environmental research letters. 2015. Vol. 10. №. 2. P. 025003.
- Changnon S.A. Urban modification of freezing-rain events // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2003. Vol. 42. №. 6. С. 863–870.
- Climate Data Store. – URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/>– (дата обращения: 01.08.2020)

- Crevier L.P., Delage Y. METRo: A new model for road-condition forecasting in Canada // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2001. Vol. 40. №. 11. P. 2026–2037.
- Dee D. P. et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // *Quarterly Journal of the royal meteorological society*. 2011. Vol. 137. №. 656. P. 553–597.
- Dupigny-Giroux L. A. Impacts and consequences of the ice storm of 1998 for the North American north-east // *Weather*. 2000. Vol. 55. №. 1. P. 7–15.
- Eliasson Á., Hannesson G., Þorsteins E. Wet snow icing—Analysis of field measurements 1999–2016 // *Proceedings of the 17th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, IWAIS*. 2017.
- Farzahan M. *Atmospheric Icing of Power Networks*. // Springer Science+Business Media B.V. 2008
- FCM-H2-1988, Federal Meteorological Handbook No. 2 - Surface Synoptic Codes, Last Change - March 2005
- Fikke S.M., Kristjánsson J.E., Nygaard B.E.K. Modern meteorology and atmospheric icing // *Atmospheric Icing of Power Networks*. Springer, Dordrecht, 2008. P. 1–29.
- Finstad K.J., Lozowski E.P., Gates E.M. A computational investigation of water droplet trajectories // *Journal of atmospheric and oceanic technology*. 1988. Vol. 5. №. 1. P. 160–170.
- Forecast User Guide. Atmospheric Physics: Types of Precipitation – URL: <https://confluence.ecmwf.int/display/FUG/Types+of+Precipitation> – (дата обращения: 10.03.2021)
- Gascón E., Hewson T., Haiden T. Improving predictions of precipitation type at the surface: Description and verification of two new products from the ECMWF ensemble // *Weather and Forecasting*. 2018. Vol. 33. №. 1. P. 89–108.
- Google Earth. – URL: <https://earth.google.com/web/> – (дата обращения: 30.01.2022)
- Google Maps. – URL: <https://www.google.com/maps/> (дата обращения: 30.01.2022)
- Groisman P. Y. et al. Recent changes in the frequency of freezing precipitation in North America and Northern Eurasia // *Environmental Research Letters*. 2016. Vol. 11. №. 4. P. 045007.

- Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146. №. 730. P. 1999–2049.
- Higuchi K., Yuen C.W., Shabbar A. Ice Storm'98 in southcentral Canada and northeastern United States: A climatological perspective // Theoretical and applied climatology. 2000. Vol. 66. P. 61–79.
- Iacono M. J. et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2008. Vol. 113. №. D13.
- Ingvaldsen K. Atmospheric icing in a changing climate: Impact of higher boundary temperatures on simulations of atmospheric ice accretion on structures during the 2015-2016 icing winter in West-Norway: MS thesis. 2017.
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 3056 p.
- Jiménez P. A. et al. A revised scheme for the WRF surface layer formulation // Monthly weather review. 2012. Vol. 140. №. 3. P. 898–918.
- Keeter K.K., Cline J.W. The objective use of observed and forecast thickness values to predict precipitation type in North Carolina // Weather and forecasting. 1991. Vol. 6. №. 4. P. 456–469.
- Klima K., Morgan M. G. Ice storm frequencies in a warmer climate // Climatic Change. 2015. Vol. 133. P. 209–222.
- Kwon Y. C., Hong S. Y. A mass-flux cumulus parameterization scheme across gray-zone resolutions // Monthly Weather Review. 2017. Vol. 145. №. 2. P. 583–598.
- Langmuir I. A mathematical investigation of water droplet trajectories. Army Air Forces Headquarters, Air Technical Service Command. 1946. №. 5418.
- Leonov I.I., Sokolikhina N.N. Severe hard rime accretion in the Far North of Russia: Observations and modeling // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1023. № 1. P. 012012.

- Makkonen L. Estimation of wet snow accretion on structures // Cold regions science and technology. 1989. Vol. 17. №. 1. P. 83–88.
- Makkonen L. Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2000. Vol. 358. №. 1776. P. 2913-2939.
- Makkonen L., Wichura B. Simulating wet snow loads on power line cables by a simple model // Cold Regions Science and Technology. 2010. Vol. 61. №. 2–3. P. 73–81.
- Mansell E. R., Ziegler C. L., Bruning E. C. Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics // Journal of the Atmospheric Sciences. 2010. Vol. 67. №. 1. P. 171–194.
- Niu G. Y. et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2011. Vol. 116. №. D12.
- Ohba M., Sugimoto S. Impacts of climate change on heavy wet snowfall in Japan // Climate Dynamics. 2020. Vol. 54. №. 5–6. P. 3151–3164.
- Oke T. R. City size and the urban heat island // Atmospheric Environment (1967). 1973. Vol. 7. №. 8. P. 769–779.
- Pulkkinen S. et al. Improving snow nowcasts for airports // Extended Abstract. SESAR Innovation Days, Belgrade. – 2017.
- Ramer J. An empirical technique for diagnosing precipitation type from model output // International Conference on Aviation Weather Systems, 5 th, Vienna, VA. 1993. P. 227–230.
- Salamanca F. et al. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—part I. formulation, verification, and sensitivity analysis of the model // Theoretical and applied climatology. 2010. Vol. 99. P. 331–344.
- Skamarock, W.C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M., Huang X.-Y. A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 2019. 145 pp.

- Shabbar A., Higuchi K. Meteorological conditions associated with ice storm damage to forests // *Plant Disturbance Ecology*. Academic Press. 2021. P. 185-211.
- Stallabrass J.R. Trawler icing-A compilation of work done at the National Research Council // National Research Council of Canada, Mechanical Engineering Report MD-56, Ottawa, Canada.1980.
- Thompson G., Rasmussen R. M., Manning K. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis // *Monthly Weather Review*. 2004. Vol. 132. №. 2. P. 519–542.
- Thompson G. et al. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization // *Monthly Weather Review*. 2008. Vol. 136. №. 12. P. 5095–5115.
- Upper Air Observations : University of Wyoming website. – URL: <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения: 19.12.2019).
- Weather Research & Forecasting Model (WRF). – URL: <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf> – (дата обращения: 15.01.2021).
- WRF Model Users' Page. – URL: <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/> – (дата обращения: 28.03.2020).
- Yang Z. L. et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 2. Evaluation over global river basins // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2011. Vol. 116. №. D12.
- Zerr R.J. Freezing rain: An observational and theoretical study // *Journal of Applied Meteorology*. 1997. Vol. 36. №. 12. P. 1647–1661.