

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Леонов Игорь Иванович

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

1.16.18 – Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре метеорологии и климатологии
Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – *Соколихина Наталья Николаевна, кандидат географических наук, доцент*
- Официальные оппоненты** – *Вильфанд Роман Менделевич, доктор технических наук, доцент, научный руководитель Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*
- Курганский Михаил Васильевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории геофизической гидродинамики Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН*
- Василевская Любовь Николаевна, кандидат географических наук, доцент, доцент департамента наук о Земле Института Мирового океана Дальневосточного федерального университета*

Защита диссертации состоится «31» мая 2023 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.2(МГУ.11.02) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы д. 1, ГЗ МГУ, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 18-01 (тел. +7(495)9392238, факс +7 (495)9328836).

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.2/2494>

Автореферат разослан « » апреля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

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.

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.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, ее теоретическая и практическая значимость; показана научная новизна и личный вклад автора, представлены основные положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации работы, о структуре и объеме диссертации.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена существующим подходам к определению гололедно-изморозевых отложений, описанию их характеристик и классификаций, условиям их формирования, климатологии и современным методам изучения.

В **разделе 1.1** приведена терминология, используемая в ходе написания диссертации. Рассмотрены виды гололедно-изморозевых отложений и атмосферные явления, приводящие к обледенению различных видов. Наибольшее внимание в диссертации уделяется высокоинтенсивным гололедно-изморозевым отложениям в виде гололеда, мокрого снега и зернистой изморози, представляющим наибольшую опасность для хозяйственной деятельности человека. Высокоинтенсивными в данной работе считались отложения, диаметр которых достигал критериев опасного явления (20 мм для гололеда, 35 мм для мокрого снега, 50 мм для зернистой и кристаллической изморози). Для описания синоптических условий, во время которых диаметр образовавшихся гололедно-изморозевых отложений достигал опасных значений, употреблялся термин «ледяной шторм». В **разделе 1.2** рассмотрены существующие классификации гололедно-изморозевых отложений. В диссертации применяется классификация,

разделяющая обледенение по типу образования на 1) обледенение, происходящее вследствие выпадения атмосферных осадков (precipitation icing), 2) внутриоблачное обледенение (in-cloud icing) и 3) обледенения в виде мокрого снега, выделенное в отдельный тип. Существование отдельных типов образования гололедно-изморозевых отложений обуславливает необходимость различных подходов к их изучению. **Раздел 1.3** посвящен методике наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями. На метеорологических станциях производят визуальные и инструментальные наблюдения, позволяющие наиболее точно определить вид отложения и оценить его размеры и массу. В **разделе 1.4** рассмотрены синоптические условия формирования гололедно-изморозевых отложений. Наиболее хорошо изучены условия выпадения замерзающих осадков. Классический механизм образования гололеда подразумевает наличие стратификации по типу «теплого носа», во время которой в тропосфере присутствует слой воздуха с положительной температурой, располагающийся между слоями холодного воздуха. Однако большинство случаев выпадения замерзающих осадков происходит в полностью холодной атмосфере [Шакина и др., 2012]. Образование мокрого снега чаще всего связано с прохождением атмосферных фронтов и выпадением осадков в виде снега при положительной температуре воздуха в нижней тропосфере. Условия образования зернистой изморози изучены недостаточно. Обычно нарастание зернистой изморози связывают с образованием туманов при отрицательной температуре воздуха. **Раздел 1.5** посвящен климатологии гололедно-изморозевых отложений. В настоящий момент наиболее хорошо изучена климатология гололедно-изморозевых отложений на территории США, Канады и Северной Евразии. В настоящее время наблюдается тренд показывающий увеличение повторяемости замерзающих дождей на севере ЕТР. Рост числа случаев и продолжительности зернистой изморози отмечается на востоке ЕТР, 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]. В **разделе 1.6** более подробно рассмотрено влияние региональных процессов на формирование гололедно-изморозевых отложений. На образование обледенения наибольшее влияние оказывают орографические особенности местности и острова тепла крупных городов. **Раздел 1.7** посвящен методам изучения гололедно-изморозевых отложений с применением численного моделирования. В настоящее время разработано большое количество алгоритмов определения типа осадков, которые можно использовать с применением численных моделей атмосферы. К самым простым можно отнести алгоритмы, основанные на выявлении сочетаний благоприятных условий образования замерзающих осадков. Более современные методы используют данные численных моделей атмосферы, уравнения микрофизики в которых позволяют выделять осадки различной фазы. Моделирование внутриоблачного обледенения в виде зернистой изморози в настоящее время является более сложной задачей. Большинство современных методов выявления внутриоблачного обледенения основано на уравнениях, описывающих обтекание воздушным потоком цилиндрического тела [Makkonen, 2000].

Вторая глава посвящена материалам и методике исследования гололедно-изморозевых отложений высокой интенсивности. В **разделе 2.1** рассмотрены используемые в работе данные метеорологических наблюдений. В **разделе 2.1.1** рассматриваются данные срочных наблюдений. Данные были получены из массива ВНИИГМИ-МЦД [Булыгина и др., 2014] и архива ООО «Расписание погоды» [rp5.ru]. В данной работе использовались данные радиозондирования полученные из архива кафедры атмосферных наук университета Вайоминга [<https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>], а также данные электронного архива ГИС «Метео» НПЦ «Мэп Мейкер» [mapmakers.ru]. Данные радиозондирования использовались для изучения вертикальной структуры атмосферы в период формирования гололедно-изморозевых отложений (**раздел 2.1.2**). В **разделе 2.1.3** рассматриваются данные инструментальных измерений гололедно-изморозевых отложений по 183 станциям на территории России,

которые были предоставлены ВНИИГМИ-МЦД [meteo.ru]. 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 и скорости ветра в момент начала обледенения. В **разделе 2.2** приводится информация об использовании численного моделирования. В **разделе 2.2.1** приведена информация о данных реанализа ERA5. Данный реанализ использовался в качестве начальных и граничных условий для запуска мезомасштабных численных экспериментов с использованием модели WRF-ARW. В расчетах использовался реанализ с шагом по пространству $0.25 \times 0.25^\circ$ и с шагом 1 час по времени и 37 вертикальными уровнями. Данные реанализа ERA5 также использовались для проведения синоптического анализа. В **разделе 2.2.2** приводится информация об используемой мезомасштабной модели WRF-ARW (Weather Research and Forecasting – Advanced Research WRF). Данная модель имеет широкий диапазон выбора начальных данных, настроек запуска и инструментов для обработки полученных расчетов. В **разделе 2.2.3** описана используемая конфигурация модели WRF-ARW. Область интегрирования для воспроизведения гололеда и 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. Для изучения отложений в виде мокрого снега использовались первые три расчетные области (с шагом 18, 6 и 2 км). С целью более точного изучения вертикальной структуры атмосферы использовалось увеличенное до 78 количество вертикальных уровней модели. Модель запускалась на 72-120 часов для каждого из рассматриваемых периодов обледенения, результаты вычислений записывались с дискретностью в один час. В экспериментах по воспроизведению обледенения наибольшее значение имели параметризации микрофизики и пограничного слоя атмосферы. В ходе проведения численных экспериментов использовалась двухмоментная схема NSSL, включающая в себя расчет семи типов гидрометеоров

[Mansell et al., 2010]. Для пограничного слоя использовалась параметризация Bougeault-Lacarrere Scheme [Bougeault, Lacarrere, 1989].

Раздел 2.3 посвящен анализу условий формирования гололедно-изморозевых отложений на территории России. В **разделе 2.3.1** рассматриваются метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложений различных видов по данным инструментальных наблюдений. 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.

В **разделе 2.3.2** рассматривается анализ условий формирования опасных гололедно-изморозевых отложений на примере отдельных, особенно сильных случаев (case study). Были отобраны три случая образования гололеда, зернистой изморози и мокрого снега высокой интенсивности, которые привели к катастрофическим экономическим последствиям (табл. 1). Исследование синоптических условий обледенения проводилось по данным электронного архива ГИС «Метео» НППЦ «Мэп Мейкер», данным с метеорологических станций и станций радиозондирования. Для каждого из выбранных случаев обледенения были подробно рассмотрены синоптические периоды длиной в десять суток, во время которых формировалась атмосферная циркуляция, ставшая причиной

образования обледенения. В ходе синоптического анализа были выявлены расположение и перемещение центров действия атмосферы. Были построены приземные синоптические карты и синоптические карты на изобарической поверхности 850 гПа для всех сроков, по которым были отслежены перемещения атмосферных вихрей и образование атмосферных фронтов в районе образования гололедно-изморозевых отложений. По данным радиозондирования были построены пространственные и временные разрезы тропосферы до высоты 5 км, по которым была восстановлена термическая структура атмосферы во время формирования высокоинтенсивных отложений гололеда и мокрого снега.

Таблица 1 – Основные характеристики гололедно-изморозевых отложений для отобранных периодов

№ случая	Дата начала обледенения	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, горный массив Рай-Из
2	01.11.1996	379	Ямало-Ненецкий АО, горный массив Рай-Из
3	19.10.1997	280	Ямало-Ненецкий АО, горный массив Рай-Из
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)

В разделе 2.3.3 описывается методика численного моделирования гололедно-изморозевых отложений. Были проведены численные эксперименты с использованием модели WRF-ARW для более подробного изучения структуры тропосферы во время формирования гололедно-изморозевых явлений, приведенных в таблице 1. В настоящей работе замерзающими считались осадки, во время образования которых, отношение гидрометеоров жидкой фазы к общему числу гидрометеоров превышало 80%, и температура воздуха на высоте

2 метров принимала отрицательные значения. Отложения мокрого снега формировались при выпадении осадков смешанной фазы, с содержанием жидких гидрометеоров от 1 до 20%, выпадающих при температуре воздуха на высоте 2 м выше 0°C. Для моделирования внутриоблачного обледенения применялся более сложный подход. В настоящей работе интенсивность обледенения рассчитывалась по формуле:

$$\frac{dM}{dt} = E \cdot LWC \cdot V \cdot A, \quad (1)$$

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.

Данная формула позволяет рассчитать массу отложения льда, образовавшегося на подверженном обледенению предмете за единицу времени, которая зависит от параметров атмосферы и размеров предмета, подверженному обледенению [Makkonen, 2000].

Коэффициент ослабления показывает долю переохлажденных капель, которые преобразовались в отложения изморози, и рассчитывается по формуле:

$$E = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \quad (2)$$

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

В случае зернистой изморози коэффициенты прилипания и намерзания близки к единице. Коэффициент столкновения в данном случае необходимо рассчитывать. В текущей работе коэффициент столкновения α_1 рассчитывался по формуле [Finstad et al., 1988]:

$$\alpha_1(K_0) = \begin{cases} 0,489(\log_{10} 8K_0)^{1,978}, & 0,125 < K_0 < 0,9 \\ \frac{K_0}{K_0 + \frac{\pi}{2}}, & K_0 \geq 0,9 \end{cases}, \quad (3)$$

где K_0 – безразмерный параметр, рассчитываемый по уравнению

$$K_0 = 0,125 + \frac{K - 0,125}{1 + 0,0967Re^{0,6367}}, \quad (4)$$

где K – число Стокса, Re – число Рейнольдса.

В главе 3 показаны результаты обработки и анализа данных инструментальных наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями на территории России. В разделе 3.1 рассматривается пространственное распределение гололедно-изморозевых отложений. На рис. 1а показана карта преобладающего вида гололедно-изморозевых отложений на территории России. Практически на всей территории России чаще всего встречается кристаллическая изморозь. Гололед преобладает на юге России и в отдельных небольших регионах вблизи побережий морей Северного Ледовитого и Тихого океанов. Зернистая изморозь преобладает на метеорологических станциях, имеющих особенное расположение по отношению к рельефу местности, а отложения мокрого снега на некоторых горных станциях и станции на о. Кунашир. На рис. 1б показана карта преобладающего вида высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений. По сравнению с рис. 1а наблюдается значительно большее количество метеорологических станций, на которых преобладающим видом отложений являются гололед и мокрый снег.

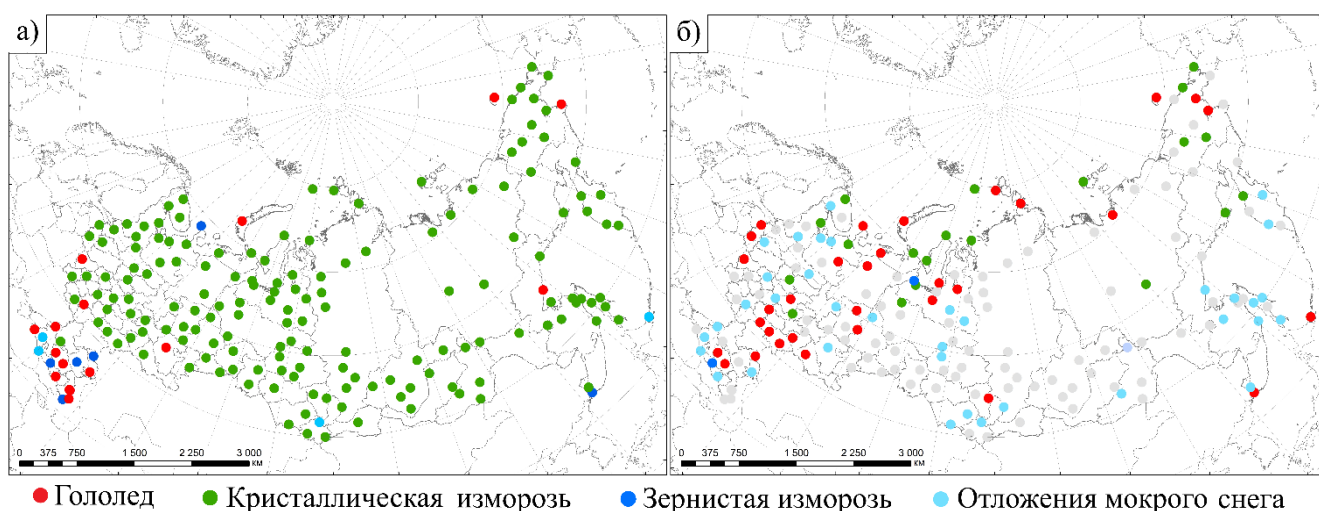


Рисунок 1 – Преобладающий вид гололедно-изморозевых отложений на территории России в период с 1985-2020 год для: а) всех отложений, б) высокоинтенсивных отложений, достигших критериев опасного явления.

В разделе 3.2 рассматриваются метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложений. На рис. 2 для наглядности представлены диаграммы размаха («ящичка с усами») для распределения температуры воздуха и скорости ветра в момент начала обледенения для гололеда (ГЛ), мокрого снега (ОМС), кристаллической (ИК) и зернистой (ИЗ) изморози. Данные диаграммы позволяют рассмотреть отличия метеорологических условий формирования гололедно-изморозевых отложений невысокой интенсивности и отложений, достигших опасных значений.

Данные диаграммы позволили получить сведения об особенностях метеорологических условий формирования высокоинтенсивных отложений. Для опасных отложений гололеда характерна немного более высокая скорость ветра в момент начала обледенения. Мокрый снег наблюдается в значительно более узком диапазоне температуры воздуха – от -2 до 2°C . Более интересна скорость ветра в момент начала отложений мокрого снега. Для общего количества отложений характерен ветер со скоростью от 1 до 4 м/с. Однако опасные явления наблюдаются обычно при скорости ветра до 1 м/с. Опасные отложения изморози всех видов наблюдаются при более высокой температуре воздуха. Также для опасных отложений зернистой изморози характерна более высокая скорость ветра, в среднем более 5 м/с.

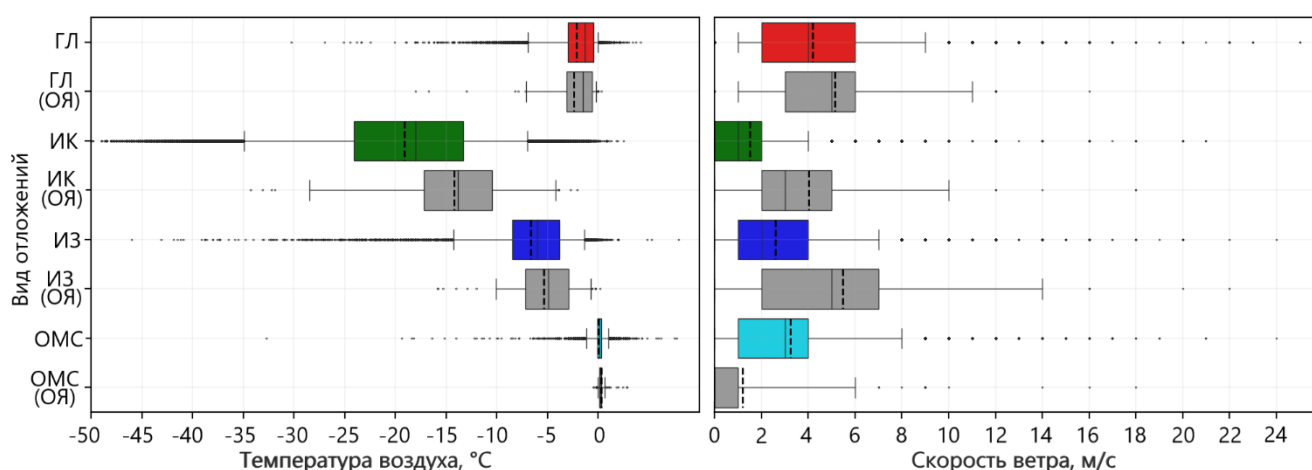


Рисунок 2 – Различия наблюдаемой а) температуры воздуха и б) скорости ветра в момент начала обледенения для каждого из видов гололедно-изморозевых отложений. Серым цветом показаны «ящички» для опасных явлений каждого вида. Границы «ящичков» – 25-й и 75-й процентиля. Границы «усов» показывают 5-й и 95-й процентиля. Черными точками отмечены выбросы.

В разделе 3.3 рассматриваются диаметр и плотность гололедно-изморозевых отложений. Наибольшую плотность имеют отложения в виде гололеда. Среднее значение плотности – 492 кг/м^3 . Полученные значения достаточно сильно отличаются от литературных данных, где плотность гололеда часто принимается равной 900 кг/м^3 . В атмосфере чистый лед образуется довольно редко, обычно ледяные отложения содержат воздушную прослойку. Отложения кристаллической изморози имеют очень низкую плотность, 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 . Отложения в виде мокрого снега чаще всего имеют плотность от 92 до 300 кг/м^3 . В отдельных случаях плотность отложений мокрого снега достигает 700 кг/м^3 . Отложения в виде зернистой изморози имеют схожую плотность с отложениями мокрого снега. Таким образом, более целесообразно считать опасными отложения зернистой изморози, которые достигли диаметра 35 мм, как и в случае отложений в виде мокрого снега. В настоящий момент и для кристаллической, и для зернистой изморози критерием опасного явления считается достижение диаметра 50 мм.

В главе 4 представлены результаты синоптического анализа. Подробный синоптический анализ проводился для всех отобранных случаев, приведенных в таблице 1. В разделе 4.1 рассматриваются синоптические условия, приводящие к образованию опасных отложений гололеда. Инициатором формирования интенсивных замерзающих осадков во всех рассмотренных случаях были южные циклоны, втянувшие в свою циркуляцию три резко контрастирующие по температуре и влагосодержанию воздушные массы. В это время на высотах около 1500 м вместе с притоком теплого тропического воздуха наблюдалась адвекция тепла, а у земли с притоком континентального воздуха адвекция холода. Это взаимодействие привело к образованию сложной термической стратификации по типу «теплого носа» с ярко выраженным слоем положительных температур на высоте и, расположившимся вблизи земли, слоем

с отрицательной температурой. Экстремально широкая полоса гололедных явлений была вызвана глубоким выдвиганием слоя положительных температур в сторону холодной воздушной массы. Результаты диссертации подтверждают предположение, о том, что такая стратификация характерна именно для опасных отложений гололеда. В качестве примера проиллюстрированы описанные выше особенности для случая выпадения замерзающего дождя, прошедшего во Владивостоке в ноябре 2020 года (рис. 3).

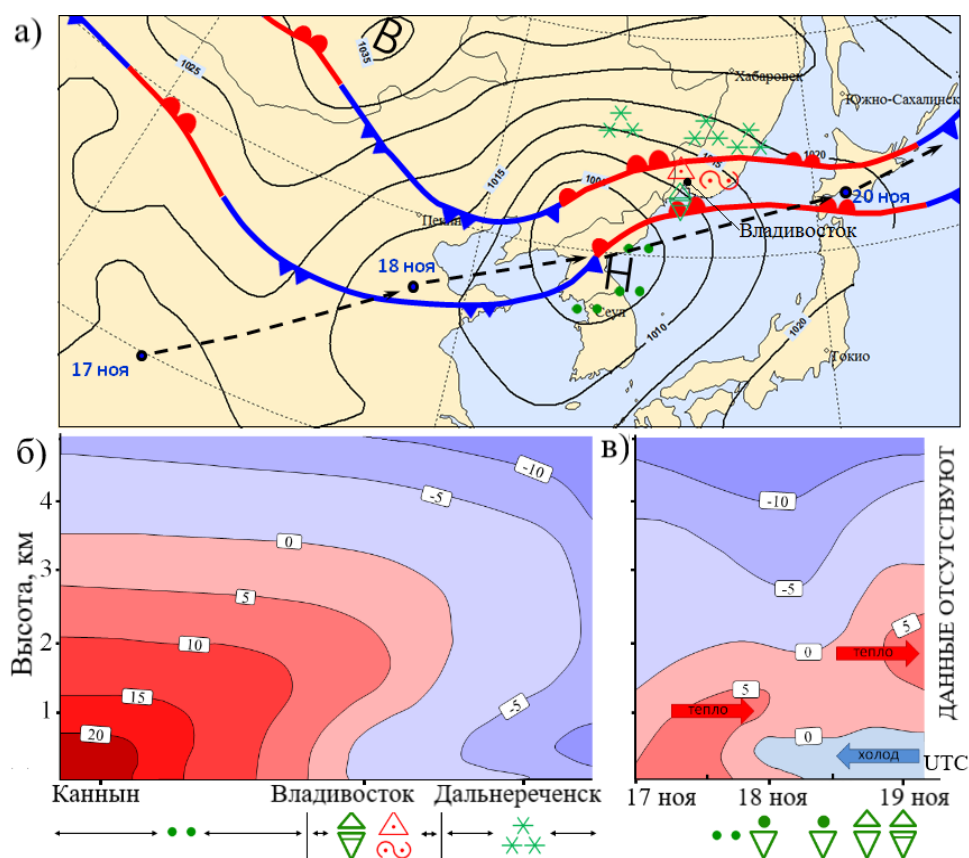


Рисунок 3 – а) Карта приземного синоптического анализа за 19.11.2020 00 ч ВСВ, пунктирная линия – траектория перемещения южного циклона (точками отмечено положение центра действия для 00 ч ВСВ каждого дня), б) Термическая структура тропосферы в 00 ч ВСВ 19.11.2020 г. в зоне теплого фронта при выпадении замерзающих осадков с образованием гололеда; в) Схема эволюции очага замерзающего дождя во Владивостоке в период 17–19 ноября 2020 года с формированием стратификации по типу «теплого носа».

В разделе 4.2 рассмотрены синоптические условия образования высокоинтенсивных отложений зернистой изморози. Результаты синоптического анализа показали, что во всех трех случаях наблюдались различные

синоптические ситуации. Особенно сильное влияние в формировании зернистой изморози оказывали именно мезометеорологические процессы: образование сплошного переохлажденного тумана, вызванного перетеканием воздушных масс через горный хребет, а также усиление скорости ветра. Такие метеорологические условия на примере случая 1994 года представлены на рис. 4. Показано, что во время проведения синоптического анализа для территорий слабо освещенных данными наблюдений целесообразно использовать данные расчетов численных моделей атмосферы.

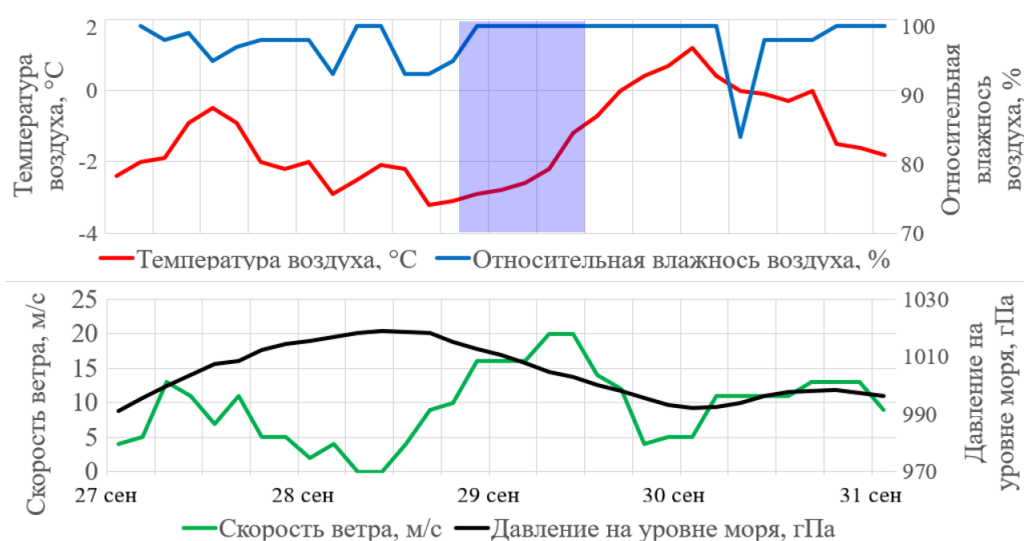


Рисунок 4 – Метеорологические условия в период интенсивного образования отложений изморози на территории Полярного Урала 27-31.09.1994 г. Синей заливкой показан период образования изморози.

В разделе 4.3 рассмотрены синоптические условия образования высокоинтенсивных отложений мокрого снега. Показано, что образование опасных отложений мокрого снега в рассмотренных случаях было связано, в первую очередь, с интенсивными осадками в виде ливневого снега при слабopоложительной температуре воздуха. В случае 2018 года наблюдалась низкая скорость ветра, способствующая налипанию мокрого снега на различные предметы. Также было показано, что отдельные, редкие случаи формирования опасных отложений мокрого снега наблюдаются при высокой скорости ветра. Такая синоптическая ситуация сложилась в 1988 году на Сахалине, где мощный южный циклон привел к выпадению нескольких месячных норм осадков, при

этом скорость ветра превышала 15 м/с (рис. 5). В данном случае важную роль в формировании обледенения играл метелевый перенос, происходящий в условиях высокой относительной влажности воздуха и температуре воздуха выше 0°C.

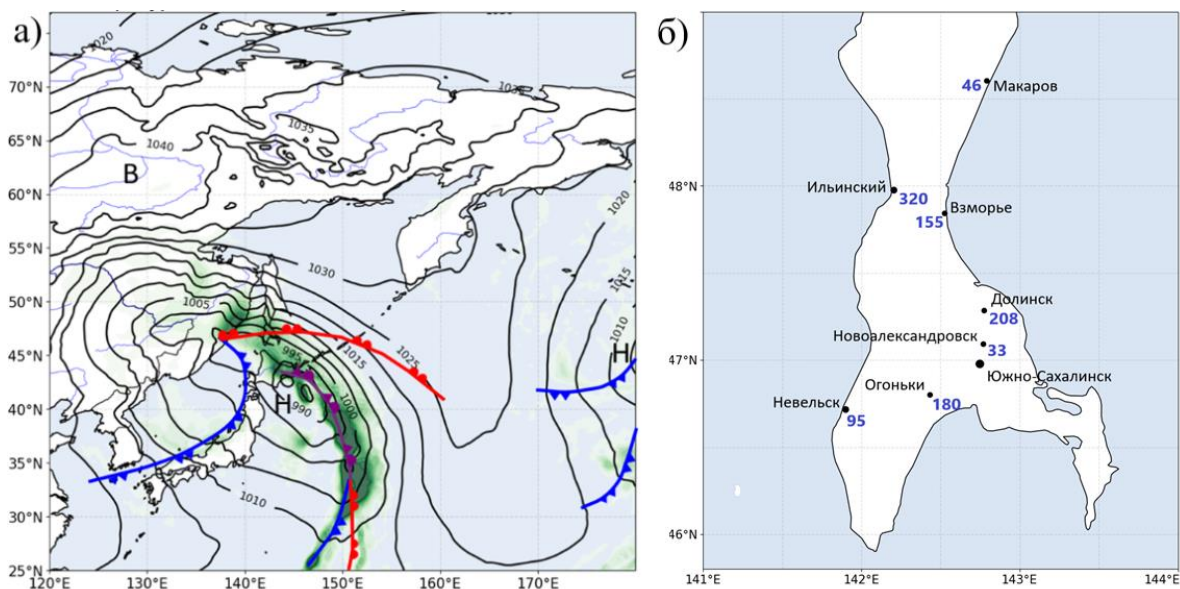


Рисунок 5 – а) Синоптические условия в период наиболее интенсивного образования отложений мокрого снега на территории о. Сахалина на 24.11.1988 21 ч ВСВ, (схема составлена с использованием данных реанализа ERA5), б) диаметр отложений мокрого снега, образовавшихся в результате прохождения южного циклона 24–26 ноября 1988 г. Синими цифрами подписан диаметр отложений (мм).

В главе 5 представлены результаты численного моделирования. С целью получения значений метеорологических полей с более высоким пространственным и временным разрешением были проведены численные эксперименты по восстановлению гололедных явлений с использованием атмосферной модели WRF-ARW. Также были проведены эксперименты по воспроизведению опасных отложений зернистой изморози и мокрого снега. В разделе 5.1 рассмотрены результаты воспроизведения высокоинтенсивных замерзающих осадков. Атмосферная модель WRF-ARW успешно воспроизвела сильное искривление изотерм зоне теплого фронта, характерное для двухсторонней адвекции теплого воздуха на высоте и холодного у земли и стратификацию по типу «теплого носа» (рис. 6а). Важно отметить, что модель хорошо воспроизводит полосы выпадения замерзающих осадков на

рассматриваемых территориях (рис. 6б). В случаях гололеда 2010 и 2016 годов модель воспроизвела влияние острова тепла г. Москвы на толщину стенки гололеда, где она оказалась меньше фоновых значений в несколько раз.

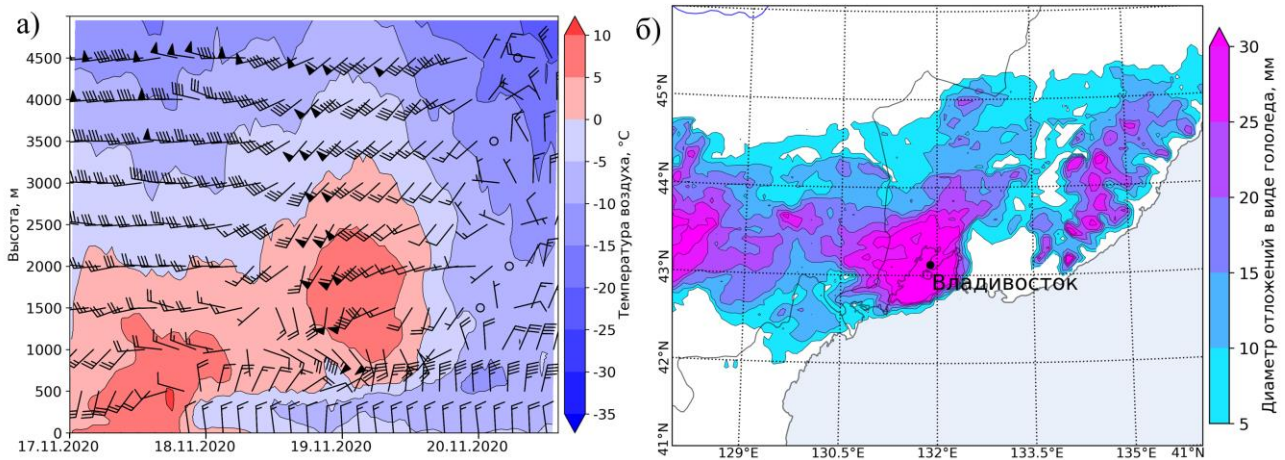


Рисунок 6 – а) Вертикальная термическая структура атмосферы по типу «теплого носа» по данным модели WRF-ARW, б) поле максимального диаметра отложений гололеда на момент времени 03 ч ВСВ 19.11.2020 по данным модели WRF-ARW.

В разделе 5.2 рассмотрены результаты воспроизведения отложений зернистой изморози. Во всех трех случаях модель воспроизвела область образования переохлажденного тумана, сформировавшегося в следствие обтекания влажной воздушной массой горных хребтов (рис. 7а, б). Далее рассматривались результаты численного моделирования зернистой изморози для метеорологической станции Рай-Из. На рис. 7в представлены графики хода образования зернистой изморози. Данные моделирования хорошо согласуются с данными наблюдений.

Показано, что увеличение разрешения модели наиболее сильно сказывается на точности воспроизведения внутриоблачного обледенения. Так, например, для случая 1994 года модель не воспроизвела образования изморози при использовании шагов 18 и 6 км, а при использовании шага 2 км масса отложений была сильно занижена (табл. 2). Таким образом, увеличение разрешения моделирования является важной задачей при прогнозировании явлений внутриоблачного обледенения.

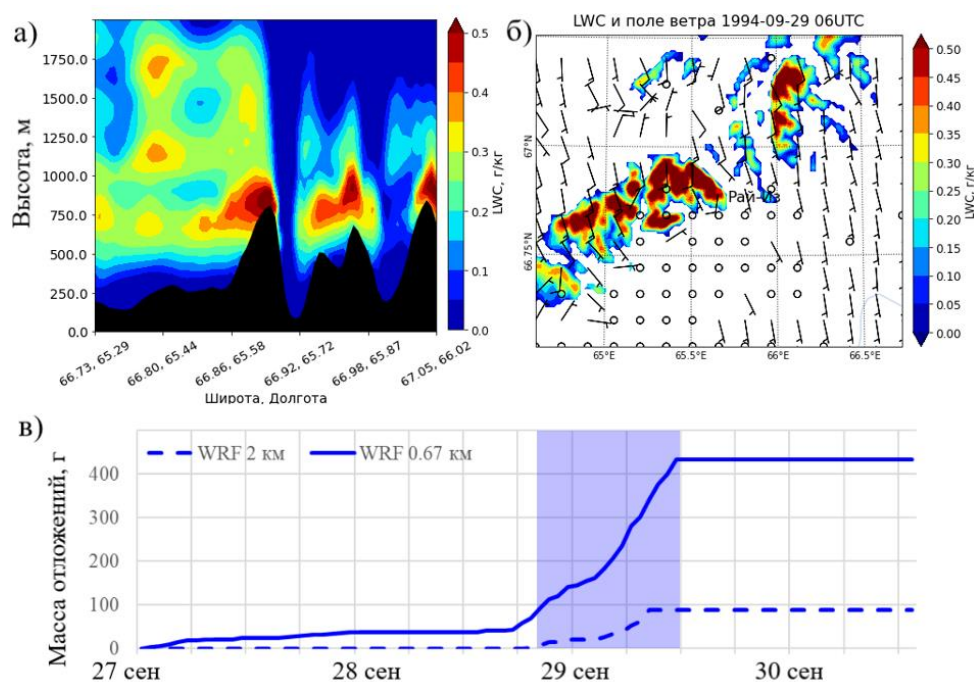


Рисунок 7 – а) Вертикальный разрез атмосферы через горный массив Рай-Из 29.09.1994 06 ч ВСВ, б) Поле содержания жидких гидрометеоров (LWC) на территории Полярного Урала 29.09.1994 06 ч ВСВ, в) График временного хода увеличения массы зернистой изморози по данным моделирования 27–30 сентября 1994 года. Синей заливкой показан период наблюдения на метеорологической станции тумана с отложением изморози.

Таблица 2 – Оценка точности воспроизведения основных метеорологических условий формирования и массы отложений зернистой изморози, образовавшихся в сентябре 1994 года

Шаг сетки модели	Температура воздуха			Относительная влажность воздуха			Скорость ветра			Масса отложений изморози	
	BIAS	MAE	RMSE	BIAS	MAE	RMSE	BIAS	MAE	RMSE	факт	WRF
18 км	1.4	1.5	1.8	-3	4	7	-4.8	5.2	6.6	2400	1
6 км	1.5	1.6	1.8	-2	3	6	-4.9	5.3	6.7	2400	9
2 км	0.9	1.1	1.3	-2	3	5	-3.8	4.4	5.5	2400	87
0,67 км	-0.1	0.8	1.0	0	3	4	-2.6	3.4	4.5	2400	434

В разделе 5.3 рассмотрены результаты воспроизведения отложений 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. Была воспроизведена характерная структура тропосферы с нижними «теплыми»

500 м (рис. 8а). Моделью было воспроизведено большое количество осадков, приводящих к отложению мокрого снега (рис. 8б). Также были выявлены области с благоприятными метеорологическими условиями для возникновения сильного метелевого переноса, приводящего к образованию отложений мокрого снега при высокой скорости ветра.

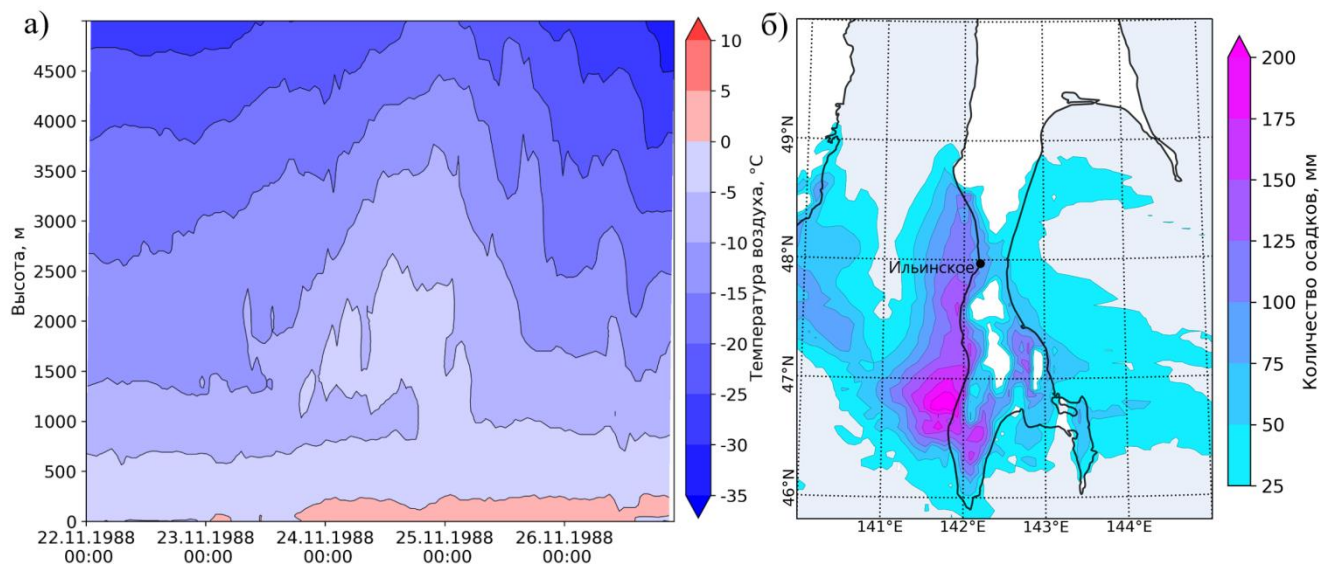


Рисунок 8 – а) Временной разрез термической структуры тропосферы для с. Ильинское с 22 по 26 ноября 1988 года по данным модели WRF-ARW; б) Накопленная сумма осадков в виде мокрого снега на 18 ч ВСВ 26 ноября 1988 года по данным модели WRF-ARW.

В **заклучении** диссертации сформулированы следующие основные выводы:

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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных в п. 2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова:

1. 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. ИФ РИНЦ = 0,947, доля участия 1/4.

2. **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. ИФ РИНЦ = 0,734, доля участия 1/2.

3. **Леонов И.И.** Условия формирования опасных отложений зернистой изморози на Полярном Урале // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 20–35. ИФ РИНЦ = 0,734.

4. **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. Scopus IF (SiteScore) = 0.45, доля участия 1/2.

Иные публикации:

5. **Leonov I.**, Semenov E., Sokolikhina N. Synoptic mechanisms of freezing rain events // Practical Geography and XXI Century Challenges. Moscow, 2018. P. 95. IF = 0, доля участия 1/3.

6. **Леонов И.И.**, Соколихина Н.Н. Метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложений на территории Иркутской

области // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Иркутск, 2020. С. 253–259. IF = 0, доля участия 1/2.

7. **Леонов И.И.**, Соколихина Н.Н. Численное моделирование опасных изморозевых отложений на территории Крайнего Севера России // Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде, посвященные памяти чл.-корр. РАН В.Н. Лыкосова CITES 2021. Москва, 2021. С. 128–131. IF = 0, доля участия 1/2.

8. **Леонов И.И.**, Соколихина Н.Н. Гололедно-изморозевые отложения высокой интенсивности на побережье Карского моря // Всероссийская научная конференция «Моря России: год науки и технологий в РФ – десятилетие наук об океане ООН». Севастополь, 2021. С. 130–132. IF = 0, доля участия 1/2.

9. **Леонов И.И.**, Черешнюк С.В. Численное моделирование сверхнормативных гололедных нагрузок на примере замерзающего дождя во Владивостоке // Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS–2022. Томск, 2022. С. 105–107. IF = 0, доля участия 1/2.

10. Несвятипаска А.И., Черешнюк С.В., **Леонов И.И.** Использование данных реанализа ERA5 для уточнения карт климатического районирования для электроэнергетики // Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS–2022. Томск, 2022. С. 349–351. IF = 0, доля участия 1/3.