

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт природных ресурсов, экологии и криологии
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



Козлов Алексей Константинович

**АНОМАЛИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОВЕРХНОСТНЫХ ЛЕДЯНЫХ СТРУКТУР ПРИ ОБРАЗОВАНИИ
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЛЬДА**

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, доцент
Гурулев Александр Александрович

Чита – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ	17
1.1 Фазовая диаграмма льда.....	17
1.2 Открытие льда 0	19
1.3 Переохлажденная вода в природной среде.....	24
1.4 Возможные механизмы образования льда 0 в природной среде в виде поверхностных ледяных структур	27
1.5 Дистанционное зондирование ледяных покровов	34
1.6 Выводы и постановка задач.....	36
ГЛАВА 2. МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД.....	38
2.1 Влияние тонкой пленки льда 0 на холодной поверхности на радиотепловое излучение	38
2.2 Влияние рассеяния радиотеплового излучения в дисперсных средах, содержащих лед 0	39
2.2.1 Описание используемой модели.....	40
2.2.2 Расчеты рассеяния в модели	42
2.2.3 Оценка влияния фактора формы частиц	47
2.2.4 Экспериментальное определение электропроводности льда 0	49
ГЛАВА 3. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	52
3.1 Методика исследования льда 0, образованного в различных увлажненных нанопористых материалах.....	52
3.1.1 Поиск льда 0 по отражению от увлажненных сорбентов	52
3.1.2 Исследование низкочастотных шумов увлажненных сорбентов.....	54
3.2 Методика исследования льда 0 в резонаторе	55
3.2.1 Исследование атмосферного льда	55
3.2.2 Исследование осажденного льда на кварцевом стекле	58
3.3 Методика просвечивания тонких диэлектрических пластинок с	

конденсированными на них парами воды.....	60
3.4 Методика исследования переохлажденного водного аэрозоля	62
3.4.1 Лабораторные измерения и моделирование в натурных условиях..	62
3.4.2 Измерения над открытой водной поверхностью оз. Кенон	65
3.4.3 Измерения приземного ледяного тумана.....	68
3.4.4 Измерения приземного замерзающего тумана.....	70
3.5 Методика исследования серебристых облаков	71
3.6 Методика исследования различных криосферных образований.....	73
3.6.1 Электромагнитные характеристики растительности	73
3.6.2 Измерения града и снега.....	75
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО	
ПОИСКУ ЛЬДА 0 И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ	78
4.1 Результаты исследования различных увлажненных нанопористых	
сорбентов.....	78
4.2 Результаты измерений с использованием резонаторного метода	82
4.3 Измерения экстинкции лазерного и микроволнового излучений в	
поверхностных пленках льда 0	93
4.4 Эксперименты с переохлажденным водным аэрозолем.....	95
4.5 Результаты исследования серебристых облаков.....	106
4.6 Результаты поисков льда 0 в различных криосферных образованиях	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	124

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования связывается с широким распространением увлажненных дисперсных образований и необходимостью их спектроскопии и мониторинга дистанционными методами, в том числе и с использованием искусственных спутников Земли [1]. Одним из таких образований является лед, актуальность изучения которого связана с его влиянием на климат Земли. На сегодняшний день известно о существовании 21 экспериментально подтвержденных кристаллических модификаций льда [2,3]. На основе особенностей образования каждой модификации льда и правилах существования их кристаллической структуры, в настоящее время с помощью компьютерного моделирования предсказано образование более 131 тысяч ледяных структур [4]. Важным вопросом для исследования новых модификаций льда является представление об их реальном существовании, т.е. устойчивости на время выполнения измерений. При нормальном атмосферном давлении известны несколько кристаллических льдов: гексагональный (Ih), кубический (Ic), лед с нарушением укладки (Isd) и лед XI. Другим кандидатом на попадание в данную группу является недавно открытый лед 0, образующийся при температурах ниже -23°C [5]. Его элементарная ячейка содержит 12 молекул воды, структура которой не имеет центра симметрии, что характерно для сегнетоэлектриков.

Отсутствие центра симметрии имеет чрезвычайно важное значение для особых электромагнитных характеристик льда 0, определяемых сильным рассеянием и поглощением излучения в дисперсной среде. Данное свойство существенно отличает его от льдов Ih и Ic, которые являются обычными диэлектриками. Обладая таким особым свойством, лед 0 влияет на электрофизические характеристики объектов криосферы и распространение в ней электромагнитного излучения. В свою очередь, это требуется учитывать при научных разработках и технической деятельности, например, при интерпретации снимков Земли, полученных с космических аппаратов.

Поэтому, для выполнения эффективного аэрокосмического дистанционного зондирования, функционирования систем связи, навигации и в других сферах деятельности необходимы знания физических свойств льда 0 в природных мерзлых средах, т.е. необходимо исследовать его электромагнитные характеристики. Таким образом, тема исследования является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Относительно недавно, теоретически была предсказана модификация льда, названная льдом 0 [5]. Он образуется из переохлажденной воды при температуре ниже -23°C при низком давлении. Используя компьютерное моделирование, было установлено, что данная модификация льда обладает сегнетоэлектрическими свойствами [6].

В дальнейшем, основываясь на эти знания, в работах [7,8] образование льда 0 впервые удалось подтвердить в лабораторных условиях посредством измерений экстинкции лазерного излучения: его пропускали через тонкие диэлектрические пластинки, на поверхности которых были конденсированы пары воды. В микроволновом диапазоне образование льда 0 было выявлено экспериментально: при охлаждении увлажненного нанопористого силикагеля, размещенного в волноводе, наблюдалось значительное увеличение коэффициента отражения при температуре ниже -23°C [9]. В другой работе [10] подтверждено, что сегнетоэлектрический лед 0 также формируется при осаждении паров воды на образцы из гексагонального льда – это регистрировалось по резкому снижению интенсивности проходящего излучения в видимом диапазоне.

В работе [11] рассмотрен механизм нуклеации льда Ih и представлены результаты моделирования. Выяснилось, что между переходом от воды ко льду образуется тонкий слой порядка нанометра, схожий по своей структуре со льдом 0. В работе [12] использовалась высокочувствительная система детектирования, работающая при низких температурах, изменения плотности воды в реальном времени на основе плазмонного отклика. Авторы этой

работы выделили диапазоны температур, в частности, диапазон 180...250 К, который характеризовался резким снижением передаваемого сигнала в системе поверхностно-плазмонного детектирования. Это связывается с присутствием высокоплотных нанокластеров воды между модификациями льдов. При этих температурах образуется сегнетоэлектрическая модификация – лед 0, которая возможно способствовала возникновению поверхностного плазмонного резонанса в исследуемой системе.

Однако в настоящее время имеется небольшое количество научных работ по исследованию характеристик природных сред, в которых может образовываться лед 0. Один из основных вопросов о важности исследования льда 0 связан с возможностью его образования в природных условиях.

Цель диссертационной работы – изучить аномалии электромагнитных характеристик поверхностных ледяных структур, вызванных образованием сегнетоэлектрического льда 0 из переохлажденной воды при температурах ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ и низком давлении.

Конкретные задачи, поставленные в диссертации:

1. Проанализировать имеющуюся в современной научной литературе информацию о физических свойствах льда 0 при температурах ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ и возможностях его возникновения в природных средах, в том числе в атмосфере, гидросфере, биосфере.
2. Разработать специальные электромагнитные методики обнаружения льда 0 в исследованиях природных сред и различных объектов в лабораторных условиях при отрицательных температурах.
3. Исследовать механизмы образования новой кристаллической модификации воды – льда 0 в различных объектах в лабораторных условиях и при натурных измерениях с использованием электромагнитных методов измерений.
4. Провести измерения дистанционными методами различных природных объектов, в частности туманов и льдов, для выявления аномалий

их электромагнитных характеристик при отрицательных температурах, при которых ожидается возникновение льда 0.

5. Показать влияние льда 0 на результаты дистанционного зондирования при температурах ниже -23°C при микроволновых и инфракрасных радиометрических измерениях различных природных сред в атмосфере, гидросфере и биосфере.

6. Провести расчеты оценки влияния тонкого слоя сегнетоэлектрического льда 0 на экстинкцию электромагнитного излучения атмосферных слоев облаков и туманов.

Методы исследований

В исследовании использовали методы, опирающиеся на аномалии электромагнитных характеристик (экстинкции, рассеяния, отражения) для обнаружения сегнетоэлектрического льда 0 в криосферных образованиях. Исследования основывались на дистанционное зондирование объектов в широком диапазоне частот. При проведении экспериментов использовались скалярные и векторные анализаторы цепей, микроволновые и ИК радиометры. Для выполнения расчетов влияния тонкой пленки льда 0 на радиотепловое излучение использовались методы численного моделирования. Применялись специальные установки для контролируемого изменения температуры с использованием климатической камеры фирмы «ESPEC».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Возникновение высокопроводящего слоя с проводимостью, близкой к металлической, на границе диэлектрика и льда 0 связано с наличием у него сегнетоэлектрических свойств, что впервые подтверждено экспериментально.

2. Рост экстинкции электромагнитного излучения в широком интервале частот на ледяных частицах атмосферных осадков (град, снег) и

пылевых частицах объясняется образованием сегнетоэлектрического льда 0 в их структуре и возникновением резонанса поверхностных плазмонных мод.

3. Регистрация сегнетоэлектрического льда 0 в природной среде, в том числе впервые в приземных туманах, по аномалиям экстинкции электромагнитного излучения в микроволновом и оптическом диапазонах обусловлена возникновением поверхностного плазмонного резонанса при конденсации водяных паров и кристаллизации воды при температуре ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ и контакте с диэлектриками.

Научная новизна

Впервые обнаружен лед 0 в природной среде при радиометрических измерениях в микроволновом диапазоне на частотах 13 ГГц, 22 ГГц, 34 ГГц, 90 ГГц и в ИК диапазоне на длине волны 8...14 мкм. Лед 0 образовался из переохлажденного водного аэрозоля в приземном слое над открытой водной поверхностью (на оз. Кенон в Забайкальском крае), что представляет интерес для практического применения в системах дистанционного зондирования, связи и навигации. При измерении собственного теплового излучения искусственного холодного тумана, образованного распылением пресной воды генератором тумана, в ИК диапазоне при температурах воздуха ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ регистрировалось уменьшение радиационной температуры, что связывается с образованием льда 0 в холодном тумане. Экспериментально показано, что новая модификация льда обладает сегнетоэлектрическими свойствами. Определена проводимость контактного слоя между сегнетоэлектрическим льдом 0 и диэлектриком, значение которого приблизительно соответствует проводимости графита. В утренние часы зафиксировано отражение теплового излучения Солнца от серебристых мезосферных облаков на частотах в диапазоне от 13 ГГц до 90 ГГц. Измерения показали, что радиояркостьная температура серебристых облаков возрастает приблизительно на 5–15 К на всех указанных частотах. Проявление льда 0 обнаружено во многих объектах по их аномалиям

электромагнитных характеристик (экстинкции, рассеяния, отражения) при изменении температуры. Аномалии связываются с образованием тонких поверхностных структур изо льда 0 на границах сред и обнаружены для малых частиц из диэлектриков в увлажненных пористых сорбентах, грозовых облаках, частицах града и снега, в древесной растительности. Это позволяет считать, что лед 0 достаточно широко распространен в природной среде.

Практическая значимость

Основные теоретические и практические результаты диссертационного исследования получены в период с 2022 года по настоящее время в рамках выполнения государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ и отражены в четырех годовых научно-технических отчетах лаборатории геофизики криогенеза ИПРЭК СО РАН по проекту FURF-2021-0003 «Электромагнитные характеристики холодной воды, мерзлых сред и совершенствование микроволновых методов зондирования вод суши». Теоретические результаты и полученные новые экспериментальные данные позволяют уточнить влияние образованного сегнетоэлектрического слоя льда 0 в атмосферных образованиях на распространение электромагнитного излучения, в частности, в микроволновом диапазоне. Исследование имеет важное практическое применение для мониторинга территорий Арктики и Субарктики, систем связи и навигации, а также для изучения космических объектов, например, Марса, в условиях наличия облаков при температурах ниже -23°C .

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на следующих международных и всероссийских конференциях, симпозиумах: International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics/Atmospheric Physics (2023); Международная открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" (Москва, 2022–2025); Международная научно-практическая конференция «Кулагинские чтения:

техника и технологии производственных процессов» (Чита, 2021–2025); Международная конференция по геотехнологии, недропользованию и рациональному использованию природных ресурсов (Узбекистан, 2023, 2024); Российская научная конференция «Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества» (Омск, 2024); Всероссийская конференция с международным участием "Эволюция биосферы и техногенез" (Чита, 2024); Всероссийские открытые Армандовские чтения (Муром, 2025).

Личный вклад автора

Автором диссертации проведен анализ современного состояния теоретического и экспериментального обнаружения новых модификаций льда. Автор исследовал механизмы образования льда 0 в природных объектах при температурах ниже -23°C и впервые экспериментально подтвердил существование его новой кристаллической модификации. Она формируется вблизи земной поверхности в холодных туманах при указанных температурных условиях. Автором выполнены лабораторные исследования, доказывающие наличие у льда 0 сегнетоэлектрических свойств, а также определено время существования данной модификации в атмосферных образованиях. Автором показано влияние льда 0 на радиотепловое излучение природных объектов. У автора нет конфликта интересов с другими коллегами, принимавшими участие в исследованиях, отраженных в диссертации.

Публикации

Основные результаты диссертации представлены в 20 работах, проиндексированных в РИНЦ. На момент завершения диссертационного исследования в изданиях из перечня ВАК – 10 статей. Пять публикаций с индексированием в «Белом списке». В системе Web of Science (WoS) и Scopus проиндексированы пять статей.

Список основных публикаций:

1. Gurulev A. A. Radiometric research of the winter atmosphere in the city of Chita in the infrared and microwave ranges / A. A. Gurulev, V. A. Kazantsev, A. K. Kozlov // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2023. – Vol. 12780. – P.12780.
2. Kozlov A. Relationship of precipitation intensity in the form of snow with atmospheric electricity and radiothermal radiation of the snow cover / A. Kozlov, V. Kazantsev // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 525. – P. 02013.
3. Бордонский Г. С. Поиски льда 0 в земной атмосфере / Г. С. Бордонский, В. А. Казанцев, А. К. Козлов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2024. – Т. 60, № 6. – С. 968-976.
4. Бордонский Г. С. Исследование возможности образования пленки льда 0 на поверхности диэлектрика в микроволновом резонаторе / Г. С. Бордонский, В. А. Казанцев, А. К. Козлов // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 211-216.
5. Аномалии теплового излучения переохлаждённого водного аэрозоля над открытым участком водной поверхности / Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев, А. О. Орлов, А. К. Козлов, В. А. Казанцев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2025. – Т. 22, № 4. – С. 364-371.
6. Козлов А. К. Измерение вариаций атмосферного электрического поля в г. Чите / А. К. Козлов, В. А. Казанцев, В. Б. Венславский // Естественные и технические науки. – 2022. – Т. 173, № 10. – С. 124-127.
7. Козлов А. К. Особенности радиотеплового изучения наледей в микроволновом диапазоне / А. К. Козлов, А. А. Гурулев // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 3. – С. 73-85.
8. Дистанционное изучение опасного атмосферного явления (выпадение града) в г. Чита / А. А. Гурулев, А. О. Орлов, А. К. Козлов, В. А.

Казанцев // Естественные и технические науки. – 2023. – Т. 184, № 9. – С. 30-34.

9. Венславский В. Б. Методика измерения радиотеплового излучения атмосферы с использованием сканирующего устройства / В. Б. Венславский, А. К. Козлов, Д. В. Середин // Успехи современного естествознания. – 2024. – № 10. – С. 96-101.

10. Козлов А. К. О возможности обнаружения льда новой модификации в ледяном тумане по радиометрическим данным / А. К. Козлов, В. А. Казанцев // Техника радиосвязи. – 2025. – №3 (66). – С. 82-88.

Структура и объем диссертации

Диссертационное исследование включает следующие структурные элементы: введение, четыре главы, заключение и список литературы. Общий объем работы составляет 137 страниц машинописного текста. В диссертацию включены 66 рисунков и 1 таблица; список литературы содержит 127 наименований.

Благодарности. Автор благодарит профессора Георгия Степановича Бордонского (главный научный сотрудник ИПРЭК СО РАН) и научного руководителя, доцента Александра Александровича Гурулева за привлечение внимания к теме исследования микроволновых свойств увлажненных мерзлых дисперсных сред и пресного льда. Благодаря их наставничеству и привлечению внимания к проблематике исследования появилась возможность представить к защите настоящую диссертацию. Автор также признателен сотрудникам лаборатории геофизики криогенеза ИПРЭК СО РАН, оказавшим поддержку при проведении полевых исследований.

Краткое содержание работы

Введение обосновывает актуальность темы, показывает необходимость исследований сегнетоэлектрического льда 0 и его влияние на электромагнитные характеристики ледяных структур. Определена цель работы, поставлены задачи, сформулированы основные положения,

выносимые на защиту, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Представлены сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертационного исследования.

В первой главе анализируется современное состояние знаний о фазовой диаграмме льда и возможных особенностях образования льда 0 из переохлажденной воды в природной среде при температурах ниже -23°C . Одна из гипотез образования льда 0 связана с отрицательным поверхностным натяжением. Именно это поверхностное натяжение, как выяснили в работе [11], запускает невидимый механизм кристаллизации. Под его действием в приповерхностном слое воды начинают формироваться особые структуры — так называемые «прекурсоры» льда (их структура схожа со структурой льда 0). В работе [13] установлено, что в переохлажденном состоянии на поверхности воды доминирует тетраэдрический порядок. Это приводит к формированию локальных областей с повышенной упорядоченностью, напоминающих структуру льда 0. В главе представлен обзор имеющихся теоретических и экспериментальных данных, которые помогают понять возможные механизмы и области образования льда 0. Приведены данные о существовании переохлажденной воды в природе. Показаны уникальные возможности дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне, вследствие проявления аномального поведения электромагнитных характеристик (экстинкции, рассеяния, отражения), в структурах со льдом 0. Представлено обоснование выбранной темы исследования, сформулированы задачи работы.

Вторая глава. В работе [14] рассматривали вопрос поверхностной проводимости на границе раздела между сегнетоэлектрической керамикой и трансформаторным маслом. Было установлено, что на границе раздела между сегнетоэлектриком и диэлектриком возникает слой порядка 1 нм с высокой электропроводностью со значением до шести порядков выше, чем у контактирующих сред. Такие частицы приобретают «металлическую»

проводимость, и в том случае, если форма этих частиц анизотропная, они создают сильное рассеяние падающего излучения в широком интервале частот [15]. В связи с этим в работе приведены оценки влияния тонкой пленки льда 0 на экстинкцию электромагнитного излучения мерзлых дисперсных сред. Рассмотрена модель рассеяния излучения на малых частицах, покрытых льдом 0. Показаны оценки влияния фактора формы частиц на рассеяние электромагнитного излучения в микроволновом диапазоне. Представлены результаты выполненного эксперимента по измерению электропроводности возникающего проводящего слоя между льдом 0 и диэлектриком при осаждении водяного пара. Для этой цели на пластину наносили плоские электроды на расстоянии ~ 1 см и измеряли электрическое сопротивление на постоянном токе системой сбора данных фирмы «Agilent». Осаждение пленки льда проводилось по методике, схема которой представлена в главе 2 на рисунке 2.5.

В начале эксперимента камера заполнялась холодными парами азота, и пластинка охлаждалась до температуры ~ -120 °C. Далее подача паров азота прекращалась, и камера с образцом нагревалась до 0 °C в лабораторном помещении. При этом на пластинке начиналась конденсация паров воды, диффундирующих от стенок камеры и из внешнего пространства, в виде островковых пленок (механизм Фольмера-Вебера). Данный механизм представляет собой процесс формирования на подложке отдельных, изолированных друг от друга трехмерных образований (островков) вместо сплошного слоя. По результатам данного эксперимента определена проводимость контактного слоя между сегнетоэлектрическим льдом 0 и диэлектриком, значение которого приблизительно соответствует проводимости графита.

В **третьей главе** описана методика и техника экспериментального исследования электромагнитных характеристик дисперсных сред, использованных в диссертационном исследовании. Приведена методика

поиска льда 0 при циклическом процессе охлаждение-нагревание различных увлажненных нанопористых сорбентов по отраженной мощности на частоте 34 ГГц и их собственных флуктуаций при низкочастотных измерениях в каналах 1...70 Гц и 0,5...800 кГц. Показана методика исследования льда 0 резонаторными методами. Были проведены измерения атмосферного льда, полученного из частиц свежеснежного града вблизи частоты 4,4 ГГц, а также проведены исследования осажденного льда на кварцевом стекле на частоте 2,8 ГГц. Проведена методика измерения экстинкции лазерного излучения на длине волны 532 нм и микроволнового излучения на длине волны 0,3 см при просвечивании тонких диэлектрических пластинок с конденсированными на них парами воды. Показана возможность исследования переохлажденного водного аэрозоля для выявления различных аномалий, в частности возникновения сегнетоэлектрического льда 0 при температурах ниже -23°C , используя радиометрические приемники на различные длины волн, как в лабораторных исследованиях, так и натуральных экспериментах. Описана методика исследования мезосферных серебристых облаков и различных криосферных образований (растительность, град, снег).

В четвертой главе представлены полученные результаты по поиску сегнетоэлектрической модификации льда – лед 0 в различных криосферных образованиях при отрицательных температурах ниже -23°C вблизи атмосферного давления. При исследовании различных нанопористых увлажненных сорбентов наблюдается гистерезис при циклическом охлаждении-нагревании образцов в климатической камере, что связывается с образованием сегнетоэлектрического льда 0 при температурах ниже -23°C . Резонаторный метод исследования атмосферного льда вблизи частоты 4,4 ГГц также показал гистерезис диэлектрической проницаемости. Обнаруженное сложное поведение можно объяснить появлением льда 0 при охлаждении пленок переохлажденной воды в градинах и неустойчивостью электрической структуры данной модификации при ее дальнейшем

нагревании. В выполненном эксперименте с микроволновым резонатором вблизи резонансной частоты 2,8 ГГц, в интервале температур $+5...-140\text{ }^{\circ}\text{C}$, заполненным кварцевыми пластинками, наблюдали изменение пропускаемой мощности на резонансной частоте и его добротности. В результате экспериментов были обнаружены характерные изменения данных параметров при температуре $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует значению, при котором образуется лед 0. Измерения экстинкции лазерного и микроволнового излучений при просвечивании тонких диэлектрических пластинок с конденсированными на них парами воды показали максимум поглощения вблизи температуры образования льда 0. В экспериментах по исследованию переохлажденных водных аэрозолей получены убедительные данные об образовании в облаке тумана сильно отражающего слоя, особенно проявившегося, в микроволновом диапазоне. При достижении в некотором слое облака температуры фазового перехода льда 0 в лед I_h происходило резкое уменьшение рассеяния (и поглощения), что привело к значительному уменьшению яркости объекта. Факт резкого изменения яркости указывает на фазовый переход в облаке. Экспериментальные данные исследования мезосферных серебристых облаков показывают, что это лед 0 влияет на радиотепловое излучение объектов, изменяя значение радиояркостной температуры в некоторых случаях на десятки Кельвинов. Показано, что при достижении температуры ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ в различных увлажненных дисперсных средах возможно образование сегнетоэлектрического льда 0.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

В данной главе приводится аналитический обзор состояния изученности новой кристаллической модификации льда – сегнетоэлектрического льда 0 и его возможное влияние на обработку данных дистанционного зондирования Земли из космоса и на характеристики криосферных образований при температурах ниже -23°C . Приведен обзор механизмов образования льда 0 и его областей проявления.

1.1 Фазовая диаграмма льда

На сегодняшний день известно о существовании 21 экспериментально подтвержденных кристаллических модификаций льда, что показано на рисунке 1.1 [2,3]. Они отличаются друг от друга взаимным расположением молекул воды и свойствами, однако их объединяет тот факт, что в их кристаллической структуре атомы кислорода связаны водородными связями с четырьмя соседними атомами. На рисунке 1.2 представлена фазовая диаграмма льда, на которой расположены некоторые его известные модификации с условиями их образования (температура и давление).

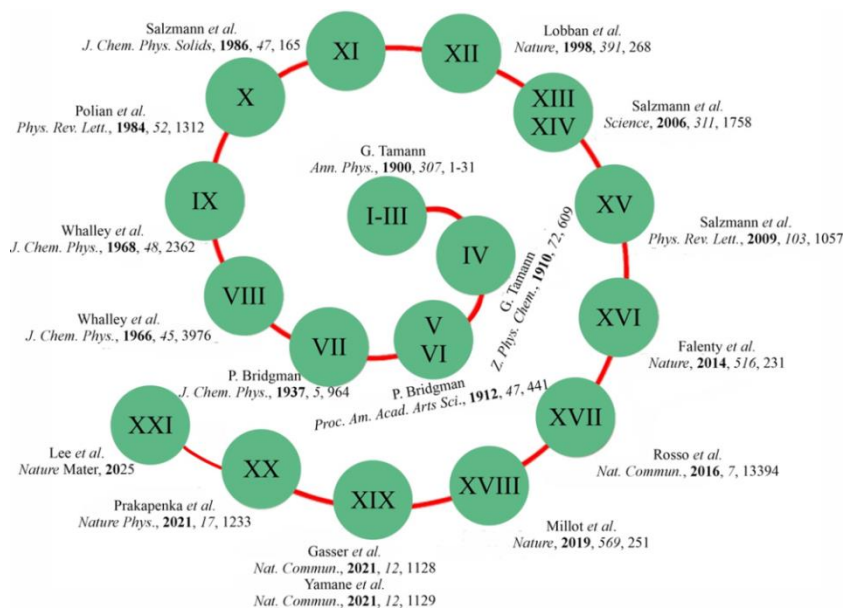


Рисунок 1.1 – Экспериментально подтвержденные трехмерные кристаллические модификации льда [2]

Также имеется не кристаллическая модификация льда, называемая аморфной, которая обладает структурой, больше похожей на жидкую воду, чем на кристаллический лед [16]. Изучение ее модификаций играет важную роль в понимании природы фазовых переходов при высоких давлениях и отрицательных температурах. На сегодняшний день известно о трех экспериментально подтвержденных модификациях аморфного льда – низкой плотности (LDA), высокой плотности (HDA) и сверхвысокой плотности (VHDA). Определены области стабильного состояния каждого из них [20].

При низких давлениях известно о следующих кристаллических модификациях. Это гексагональный лед (Ih), кубический лед (Ic), лед с нарушением укладки (I_{sd}) и лед XI. Самой распространенной и часто встречаемой модификацией льда на Земле является лед Ih. Он встречается в виде шестиугольного льда, что подтверждается шестикратной симметрией кристаллов льда, выращенных из водяного пара [21].

Другим льдом, который также может встречаться в природе [22], является лед Ic, который считается метастабильным кристаллом. Он может образоваться в результате конденсации водяного пара при атмосферном давлении, но при температуре ниже $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ [23] и при температуре ниже $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ в крошечных каплях (диаметром около 6 мкм) [24]. Чистый лед Ic без дефектов укладки был экспериментально подтвержден только в 2020 году в работах [25,26].

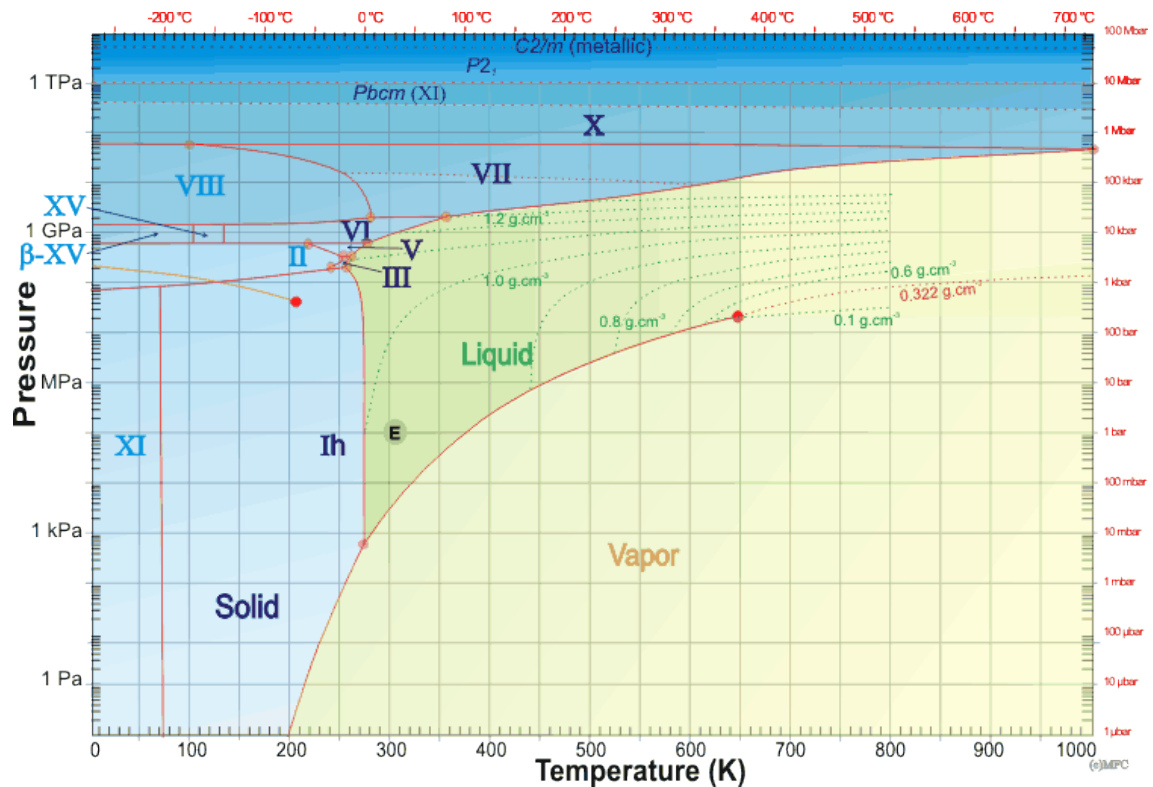


Рисунок 1.2 – Фазовая диаграмма льда [27]

Лед с нарушением укладки Isd состоит из различного соотношения гексагональных и кубических структур [28-30]. В работе [31] показаны результаты исследования структуры льда, в которой лед Isd имеет 5 кристаллических структур при переходе в кубический из гексагонального.

Основываясь на особенности образования каждой модификации льда и на правила существования кристаллической структуры льда, в настоящее время с помощью компьютерного моделирования предсказано образование более 131 тысяч ледяных структур [2]. Возникает вопрос, какие из них достаточно стабильны для экспериментального обнаружения, а также, какие из них образуются вблизи нормального атмосферного давления.

1.2 Открытие льда 0

В работе [32] авторы построили навигационную карту кристаллических структур с уже известными модификациями льда и новыми кандидатами, что показано на рисунке 1.3. Координаты на схеме тесно коррелируют с

плотностью и конфигурационной энергией, но в конечном итоге отражают абстрактные структурные характеристики, что лишает их числовое значение интуитивного смысла. Вместо этого плотность и статическая энергия решетки каждой структуры кодируются размером и цветом соответствующей точки на карте.

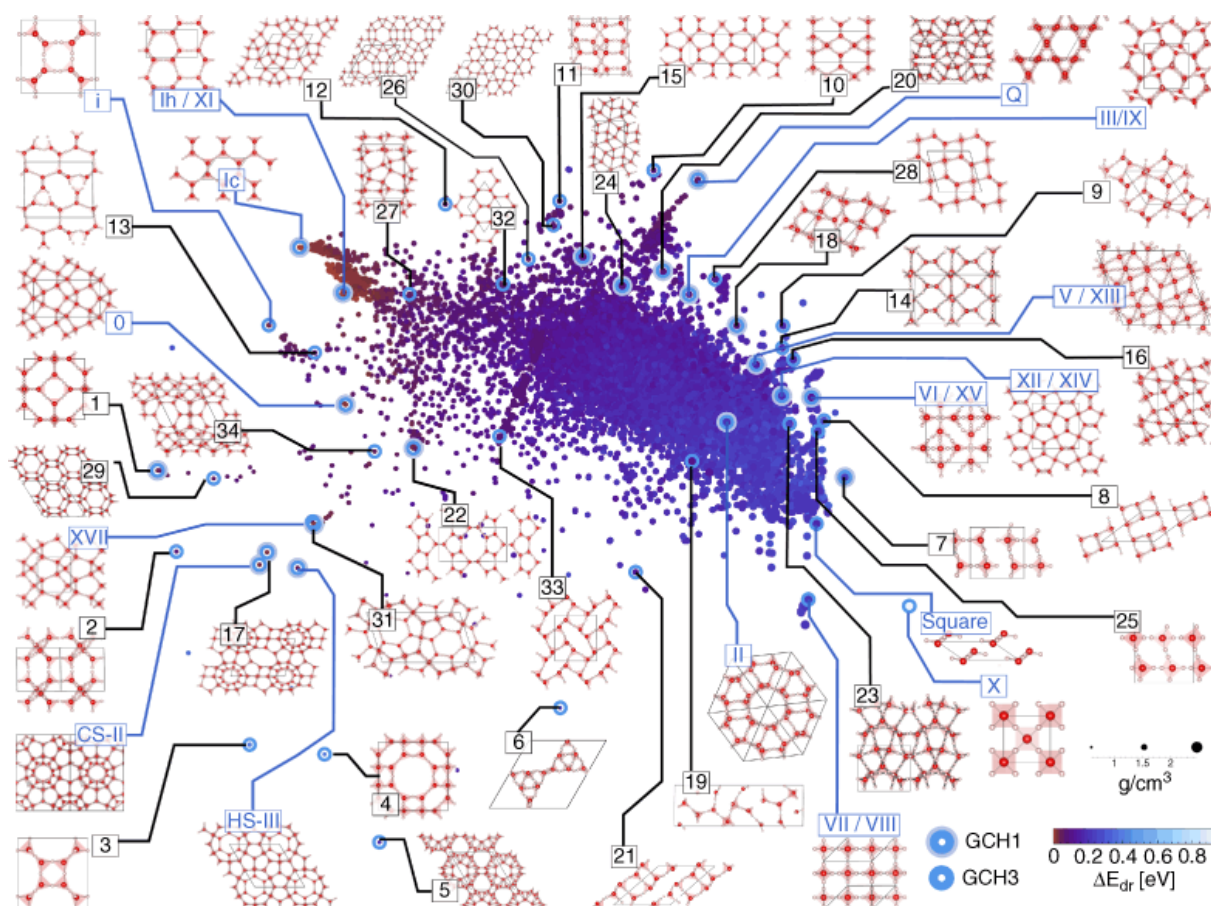


Рисунок 1.3 – Навигационная карта кристаллических структур [32]

Кристаллические структуры льда соответствуют тетраэдральности водородных связей воды, в связи с этим, с помощью компьютерного моделирования возможно создание новых «метастабильных» состояний льда. Одним из таких льдов, созданным с помощью компьютерного моделирования, является лед 0 [5]. Этот лед образуется из переохлажденной воды при температурах ниже -23°C (при низком давлении) и при нагревании может перейти в лед Ic или лед Ih. При компьютерном моделировании было предсказано, что данный лед обладает сегнетоэлектрическими свойствами [6]. На рисунке 1.4 представлена возможная структура льда 0 и

его элементарная ячейка. Также стоит отметить, что имеются результаты моделирования, в котором рассматривали механизм нуклеации льда. Выяснилось, что между переходом от воды ко льду образуется тонкий слой порядка нанометра, схожий по своей структуре со льдом 0 [11]. В работе [12] использовалась высокочувствительная и неразрушающая система плазмонного детектирования, работающая при низких температурах, для исследования реального времени изменения плотности воды. В работе авторы выделили несколько диапазонов температур, в частности, диапазон 180...250 К, который характеризовался резким снижением передаваемого сигнала в системе поверхностно-плазмонного детектирования. Это связывается с присутствием высокоплотных нанокластеров воды между модификациями льдов. При этих температурах образуется сегнетоэлектрическая модификация – лед 0, которая способствовала возникновению поверхностного плазмонного резонанса в исследуемой системе.

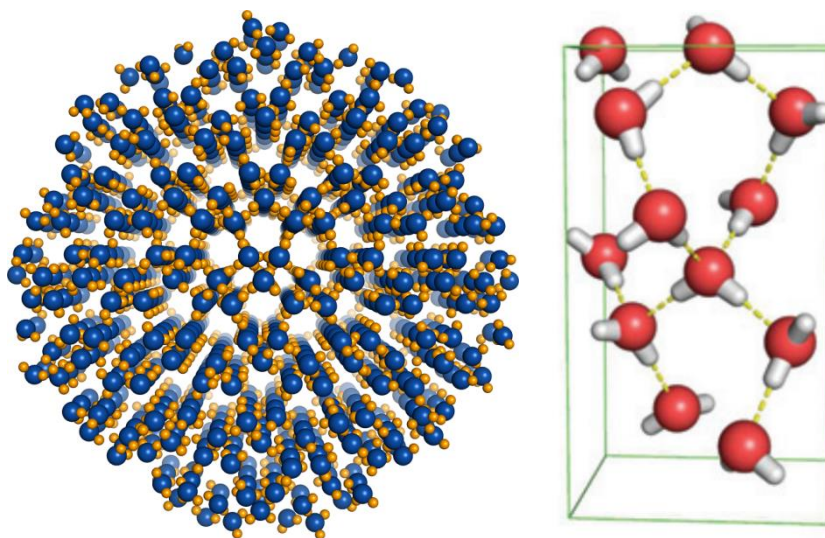


Рисунок 1.4 – Структура льда 0 и его элементарная ячейка из 12 молекул [5]

Однако его непосредственное определение, весьма затруднено. Сегодня самым эффективным методом изучения взаимного расположения атомов является дифракция микрочастиц: фотонов, электронов, нейтронов. Именно этими методами, в основном, получены данные о структуре кристаллов и

молекул, экспериментально доказанных модификаций льда. Для наблюдения дифракции необходимо, чтобы длина волны де-Бройля дифрагирующих частиц была меньше периодов кристаллической решетки. Для проведения рентгеноструктурного анализа льда 0 необходимо, чтобы размеры образца монокристаллов неорганического материала были диаметром 0,1 – 0,3 мм. Просвечивающая электронная микроскопия позволяет проводить фазовый, кристаллогеометрический анализ (в том числе анализ дислокационной структуры) с пространственным разрешением от 0,15 нм, полуколичественным анализом элементов от бора до урана с локальностью ~10 нм [33]. Однако при этом методе при температурах близких к 250 К требуются дополнительные меры предосторожности (оценка стабильности образца, тестовые съемки при разных дозах облучения и его влияния на исследуемый образец и т.п.). Это является основной проблемой, ведь толщина образующегося слоя сегнетоэлектрического льда 0 имеет значение от одного до десяти нанометров, что было отмечено в работах [10,11], причем данный слой может иметь островковый характер.

В связи с этим была предложена новая методика по обнаружению и исследованию этой модификации льда, учитывающая его сегнетоэлектрические свойства [7]. Оказалось, что лед 0 можно эффективно изучать радиофизическими методами, например, пропусканием электромагнитного излучения через образцы и измерением электромагнитных потерь и рассеяния излучения. Это связано с резким возрастанием электрической проводимости на контакте сегнетоэлектриков (с высоким значением статической диэлектрической проницаемости) с диэлектриками (с низким ее значением), что было рассмотрено в работе [14]. В таких структурах появляются плазмонные эффекты в высоко проводящем тонком слое толщиной порядка нанометра на границе лед 0 – диэлектрик, которые позволяют увеличить взаимодействие излучения с молекулярными структурами на много порядков величины. Например, при гигантском

комбинационном рассеянии на периодических проводящих пленках усиление чувствительности установки может повышаться в $10^9 - 10^{12}$ раз [34-36]. На рисунке 1.5 представлена схема образования тонкого слоя с высокой электропроводностью на контакте диэлектрика и льда 0. Основываясь на исследовании [14], в работе [7] при использовании электромагнитного просвечивания был впервые экспериментально обнаружен лед 0. В своей работе авторы, зная особенности этой модификации льда по теоретическим представлениям, – образование из переохлажденной воды при определенной температуре и возникновение в нем сегнетоэлектрического упорядочения, использовали воду, находящуюся в порах нанометровых размеров силикатных материалов. Данная методика удобна тем, что в поровом пространстве существует объемная вода, которая переохлаждается на десятки градусов относительно 0°C . Для подтверждения сегнетоэлектрических свойств льда 0 при проведении экспериментов авторы выполняли циклический процесс охлаждения и нагревания исследуемых образцов, в результате чего им удалось выявить температурный гистерезис диэлектрических характеристик, который характерен для сегнетоэлектрического льда 0, образующегося при температуре -23°C . Ряд новых задач, связанных со льдом 0, был представлен в работе [8].

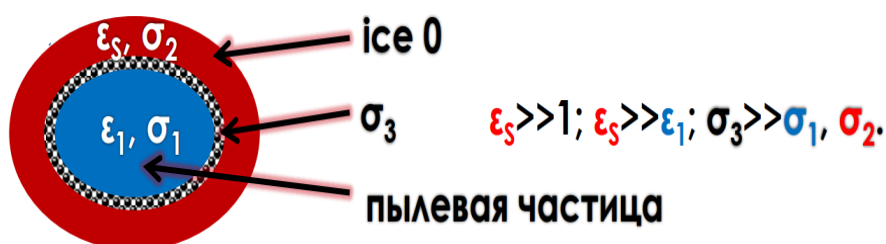


Рисунок 1.5 – Схема образования тонкого слоя с высокой электропроводностью (σ_3) на контакте диэлектрика и сегнетоэлектрика с различным значением статической диэлектрической проницаемости (ϵ_s)

В работах [9,10] лед 0 был зарегистрирован при измерениях экстинкции лазерного излучения в видимом диапазоне через пластинки из разнообразных диэлектриков со слоем конденсированного из паров воды льда 0. Эффект

исчезал при температурах выше -23°C , что указывало на образование льда 0. Пластинки состояли из стекла, слюды, льда Ih и кристаллов хлорида натрия.

Таким образом, в дисперсной среде поверхностные структуры, содержащие в себе лед 0, обладают особыми электрофизическими свойствами. Данные особенности будут влиять изучение природных сред при отрицательных температурах, а также, на распространение электромагнитного излучения, что в свою очередь влияет, например, на интерпретацию снимков Земли, полученных с космических аппаратов. Эту модификацию льда, благодаря его особому свойству, можно обнаружить, используя электромагнитное излучение, в частности, в микроволновом диапазоне, что открывает возможности развития радиоспектроскопии увлажненных сред в криосфере. Однако в настоящее время имеется мало работ по исследованию характеристик разнообразных сред, в которых может образовываться лед 0. Один из основных вопросов связан с возможностью его образования и существования длительное время вблизи земной поверхности в среде обитания человеческого общества.

1.3 Переохлажденная вода в природной среде

В настоящем исследовании будет рассмотрена только вода, близкая по своим свойствам к объемной воде. Связанная вода имеет другие характеристики, определяемые поверхностью природных сред и в большинстве случаев свойства ее близки к таковым для твердых диэлектриков. В природной среде существование переохлажденной жидкости возможно в водоемах [37], горных породах [38], в биологических системах [39], в атмосферных водных аэрозолях [40].

В атмосфере переохлажденная вода встречается в облаках [40], за счет пылевых частиц, которые способствуют процессу конденсации паров воды. Известно, что температура переохлаждения капель в облаках может достигать

-40°C , что способствует образованию осадков и влияет на климатические процессы [41,42]. В зависимости от размера частиц время существования переохлажденных капель воды будет отличаться, так, например, для капель микронных размеров температура замерзания начинается вблизи -15°C . В работе [43] показано, что температура переохлаждения капель воды может достигать значения $-42,55^{\circ}\text{C}$.

Знания о существовании переохлажденной воды необходимы при рассмотрении климатических моделей, в которых рассматривается вопрос переноса излучения в атмосфере, а также для изучения распространения электромагнитного излучения в природных средах, ведь оно существенно различается в жидком аэрозоле или в кристаллических облаках.

В работе [44] получили инфракрасные спектры пленок переохлажденной воды при температурах от 135 до 235 K, которые образовались в течение нескольких наносекунд путем сверхбыстрого нагрева и охлаждения. Переохлажденная вода термически уравнивается перед кристаллизацией выше 170 K, и в диапазоне исследованных температур было показано, что структура воды представляет собой линейную комбинацию жидкости высокой и низкой плотности. Данное исследование объясняет природу необычных осадков, таких как граупель, объясняет то, как жидкая вода может существовать на таких холодных планетах, как Уран и Нептун, и создавать хвосты комет.

При нормальном атмосферном давлении толщина квазижидкого слоя на ледяной поверхности зависит от температуры, что показано на рисунке 1.6 [45]. При таких толщинах свойства переохлажденной воды близки к свойствам объемной воды [46,47]. Стоит отметить, что квазижидкий слой сохраняется до низких температур (около 90 K).

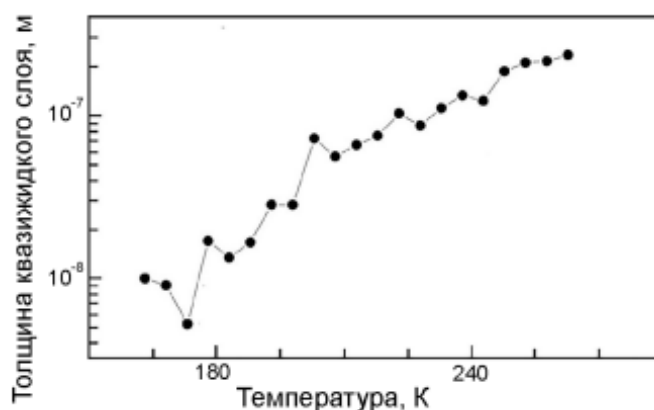


Рисунок 1.6 – Температурные зависимости толщины квазизжидкого слоя на поверхности гранул льда [45]

В природной среде переохлажденную воду можно встретить в растительности. Так, в работе [48] рассматривался вопрос возможности содержания переохлажденной жидкости в порах древесины сосны, размеры которых на 75 % от общего объема составляют менее 2 нм. Для определения температуры фазового перехода лед-вода в поровом пространстве используется формула Гиббса–Томсона (1.1):

$$\Delta T = \frac{C}{r-t} [49], \quad (1.1)$$

где r – радиус поры, нм, t – 0,4 нм для силикатных материалов, C – константа, приблизительно равная 50 (°C × нм). Стоит отметить, что поры открываются при увлажнении древесины и исчезают при высушивании среды.

Таким образом, знание того, когда вода замерзает и когда она остается жидкой при таких низких температурах, может улучшить понимание образования атмосферного льда и помочь исследователям разработать более надежные климатические модели, а также в дистанционном зондировании Земли при мониторинге различных природных сред.

1.4 Возможные механизмы образования льда 0 в природной среде в виде поверхностных ледяных структур

Рассматривая границу двух сред вода–воздух, отметим, что вода ведет себя совсем не так, как в объеме. Молекулы воды на поверхности испытывают сильное притяжение со стороны молекул внутри жидкости, в то время как со стороны воздуха такого притяжения нет. Это создает эффект натянутой пленки — возникает так называемое поверхностное натяжение.

Именно это поверхностное натяжение, как выяснили в работе [11], запускает невидимый механизм кристаллизации. Под его действием в приповерхностном слое воды начинают формироваться особые структуры — так называемые «прекурсоры» льда. Они похожи на мельчайшие зародыши будущих кристаллов, но обладают необычной симметрией. Эти структуры получили название лед 0. Данный лед стремится к переходу в более устойчивую форму — гексагональную или кубическую. Моделирование показало, что лед 0 является переходной формой от жидкой переохлажденной воды к ее твердому кристаллическому состоянию при температурах ниже -23°C , в случае, если она находится при низком давлении. Прекурсоры, под действием поверхностного натяжения, соединяются друг с другом, образуя все более крупные кристаллические образования, которые в конечном итоге и превращают воду в лед. Сам процесс замерзания происходит не на самой поверхности, а немного глубже, в том самом слое, где концентрируются прекурсоры. Авторы предполагают, что это связано с большей подвижностью молекул воды на границе с воздухом, которая мешает им «успокоиться» и принять упорядоченную структуру.

В работе [13] рассматривался вопрос поверхностного натяжения воды, который по их результатам возникает из-за динамического взаимодействия двух типов структур водородных связей на ее поверхности: беспорядочных

(неупорядоченных) структур, где водородные связи расположены хаотично и тетраэдрических структур, характерных для объемной воды, где каждая молекула воды образует четыре водородные связи с соседними молекулами, формируя тетраэдрическую сеть. Эта конкуренция между двумя типами структур определяет нелинейную температурную зависимость поверхностного натяжения воды, включая его аномальное увеличение в переохлажденном состоянии при температуре вблизи $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ [50]. В переохлажденном состоянии на поверхности воды доминирует тетраэдрический порядок. Это приводит к формированию локальных областей с повышенной упорядоченностью, напоминающих структуру льда 0. Именно эти области стабилизируют поверхностное натяжение в переохлажденном состоянии.

В связи с тем, что воду для получения льда 0 необходимо переохладить до температур ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, то можно использовать воду, находящуюся в поровом пространстве. Средняя температура воздуха вблизи поверхности Земли по данным метеонаблюдений имеет значение $\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$. В полярных областях температура может понижаться до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже, а в отдельные периоды на больших высотах до $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$. В связи с этим, образование льда 0 может происходить в верхних слоях почв, грунтов, растительных и снежно-ледяных покровов в холодных регионах планеты. Поиски данной модификации льда можно производить в атмосфере, а также на других планетах, например, на Марсе, что, возможно, подтверждается работой [51]. Это объясняется тем, что в верхней тропосфере, в стратосфере, мезосфере и термосфере наблюдаются стабильно низкие температуры, ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рисунке 1.7 приведена схема строения земной атмосферы [52] с зависимостью температуры от высоты. Эти данные позволяют предположить, где возможно образование новой модификации льда – лед 0. Из графика видно, что высота от нескольких десятков до сотни километров соответствует необходимым температурным условиям. Однако с

понижением температуры давление насыщенных паров падает, и на больших высотах температура конденсации водяного пара заметно понижается. При этом конденсация облегчена на пористых гидрофильных частицах, поступающих в верхние слои атмосферы из космического пространства, с поверхности Земли и из ее недр. Это позволило предположить, что в мезосфере образуются ледяные облака из частиц, содержащих некоторое количество льда 0 [8].

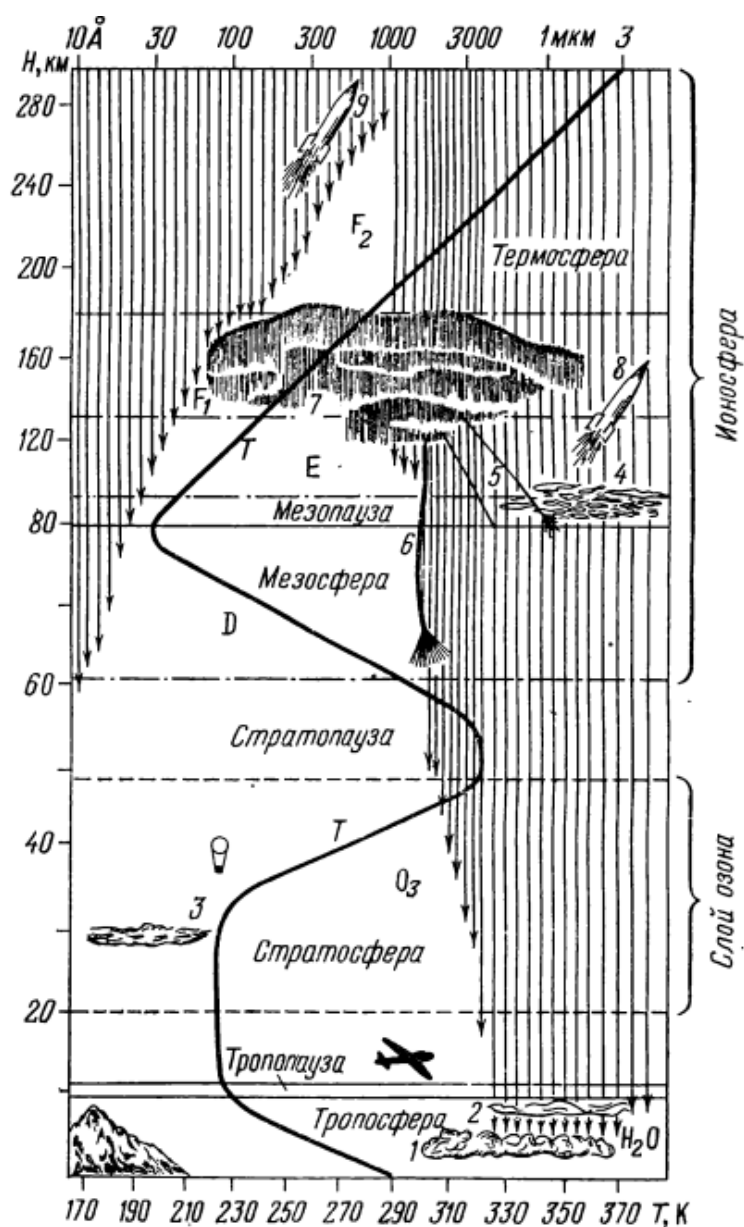


Рисунок 1.7 – Схема строения земной атмосферы: 1 – тропосферные облака нижнего яруса, 2 – перистые облака, 3 – перламутровые облака, 4 – серебристые облака, 5 – метеоры, 6 – болиды, 7 – полярные сияния, 8 – метеорологическая ракета, 9 – геофизическая ракета [52]

В мезосфере на высотах от 80 км и выше при осаждении льда на пылинки космического и вулканического происхождения образуются частицы, формирующие полярные мезосферные облака [52]. Они были впервые достоверно отмечены летом 1885 г., и с тех пор появлялись практически каждый год [53] (рис. 1.8). Наиболее благоприятны для наблюдений серебристых облаков широты 55–60°. Однако в последние десятилетия их интенсивность возрастает, что дает возможность наблюдать серебристые облака на широтах ниже 50°.



Рисунок 1.8 – Фотография серебристых облаков, выполненная в г. Чита в июне 2021 года

Полярные мезосферные облака обладают необычными физическими свойствами. Их средние размеры частиц составляют 50–100 нм, а масса в единице объема ~ 50 нг/м³ при концентрации 100–200 частиц/см³ [54,55]. Эти результаты хорошо согласуются с результатами, полученными с помощью лидаров [56]. Несмотря на низкую концентрацию и малые размеры частиц в серебристых облаках, обнаружено выраженное отражение от них не только светового излучения, но и сигналов радаров от слоев толщиной ~ 100 м на частотах от 2,7 МГц до 1,3 ГГц [57-59]. Причины такой отражательной способности до сих пор дискуссионные, и однозначного мнения нет. В

работах [60,61] объяснили наблюдаемую аномально высокую радиолокационную отражаемость серебристых мезосферных облаков наличием на их ледяных частицах тонкой металлической пленки. Эта пленка образуется в результате осаждения атомов железа и натрия на ледяные частицы из слоев железа и натрия, расположенных непосредственно над слоем серебристых облаков. Однако эта гипотеза не была подтверждена другими исследователями [61].

В работе [62] говорится о том, что в 2018 году в атмосферу была запущена суборбитальная геофизическая ракета, которая распылила 220 литров воды на высоте 85 км. Уже спустя 18 секунд после распыления наземный лидар зафиксировал увеличение отраженного сигнала, говорящее о формировании небольшого серебристого облака, первого, намеренно созданного человеком.

В работе [51] зафиксировали образование серебристых облаков на Марсе, что показано на рисунке 1.9. Авторы наблюдали красочные полосы в ультрафиолетовом диапазоне, которые показывают эволюцию облаков, а рассеивающая корона показывает однородность размера на больших площадях. При этом не уточняется физический механизм их свечения.

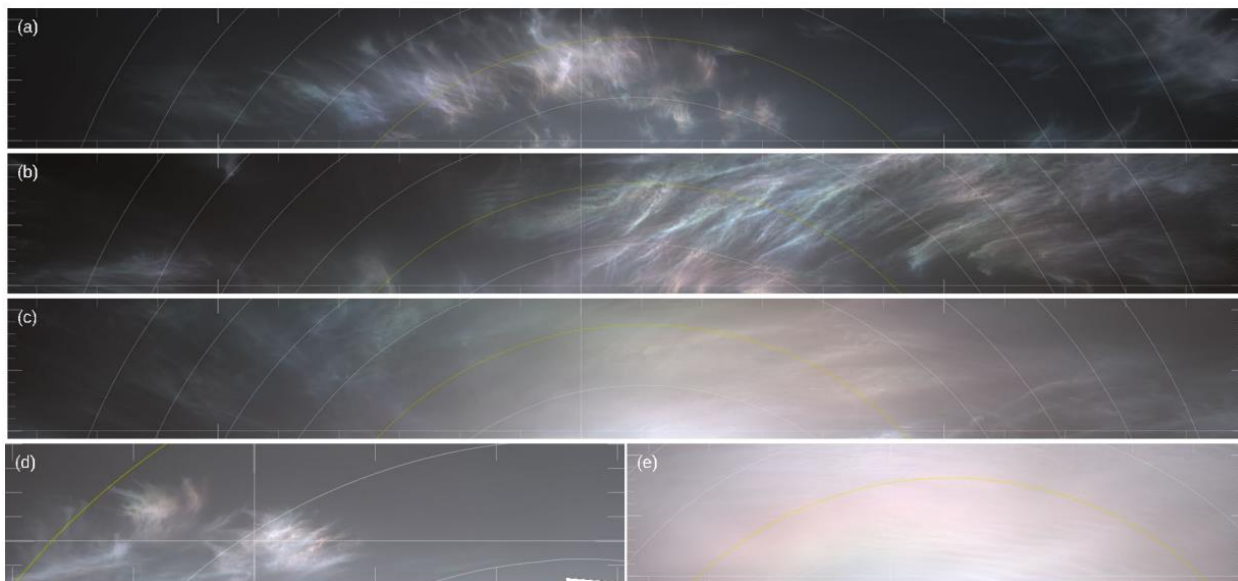


Рисунок 1.9 – Фотография марсианских серебристых облаков, выполненных с марсохода Curiosity [51]

В работах [8,63] высказывалось предположение, а в работе [64] выдвинута гипотеза, что отражательная способность серебристых облаков обусловлена образованием льда 0. Из-за большой разницы значений статической диэлектрической проницаемости на контакте льда 0 и диэлектрика (пылевой частицы) образуется слой с высокой проводимостью [14]. Ледяные частицы серебристых облаков благодаря этому слою приобретают свойства, близкие к металлическим. В современной теории рассеяния электромагнитного излучения известен необычный феномен резкого усиления поглощения и рассеяния малыми металлическими частицами (размеры которых много меньше длины волны), охватывающего область частот от ультрафиолета до радиочастот. Это связано с образованием поверхностных плазмонных мод в проводящих частицах, для которых действительная часть диэлектрической проницаемости имеет отрицательные значения [15]. При этом интенсивность рассеяния излучения существенно возрастает в случае анизотропии формы частиц, особенно на частотах значительно ниже плазменной частоты проводящего слоя [15]. Этим условиям (металлическая проводимость, анизотропия формы частиц) удовлетворяют частицы пыли, покрытые сегнетоэлектрическим льдом 0, образующихся в мезосфере.

В работе [65] рассматривались некоторые аспекты повышения эффективности наземных наблюдений за серебристыми облаками с использованием ближнего ИК диапазона. Наблюдения были выполнены на юго-восточной окраине Петропавловска (Казахстан). На рисунке 1.10 представлены фотографии, выполненные в видимом и ближнем ИК диапазоне. Авторы отмечают, что 10 июля удалось зарегистрировать серебристые облака в ближнем ИК диапазоне, хотя они не наблюдались в это время в видимом диапазоне. Авторы не касаются причин такой отражательной особенности. В свете гипотезы [64] это определяется уменьшением плазменной частоты носителей заряда в слое высокой

электропроводности ледяных частиц ниже частот видимого диапазона.

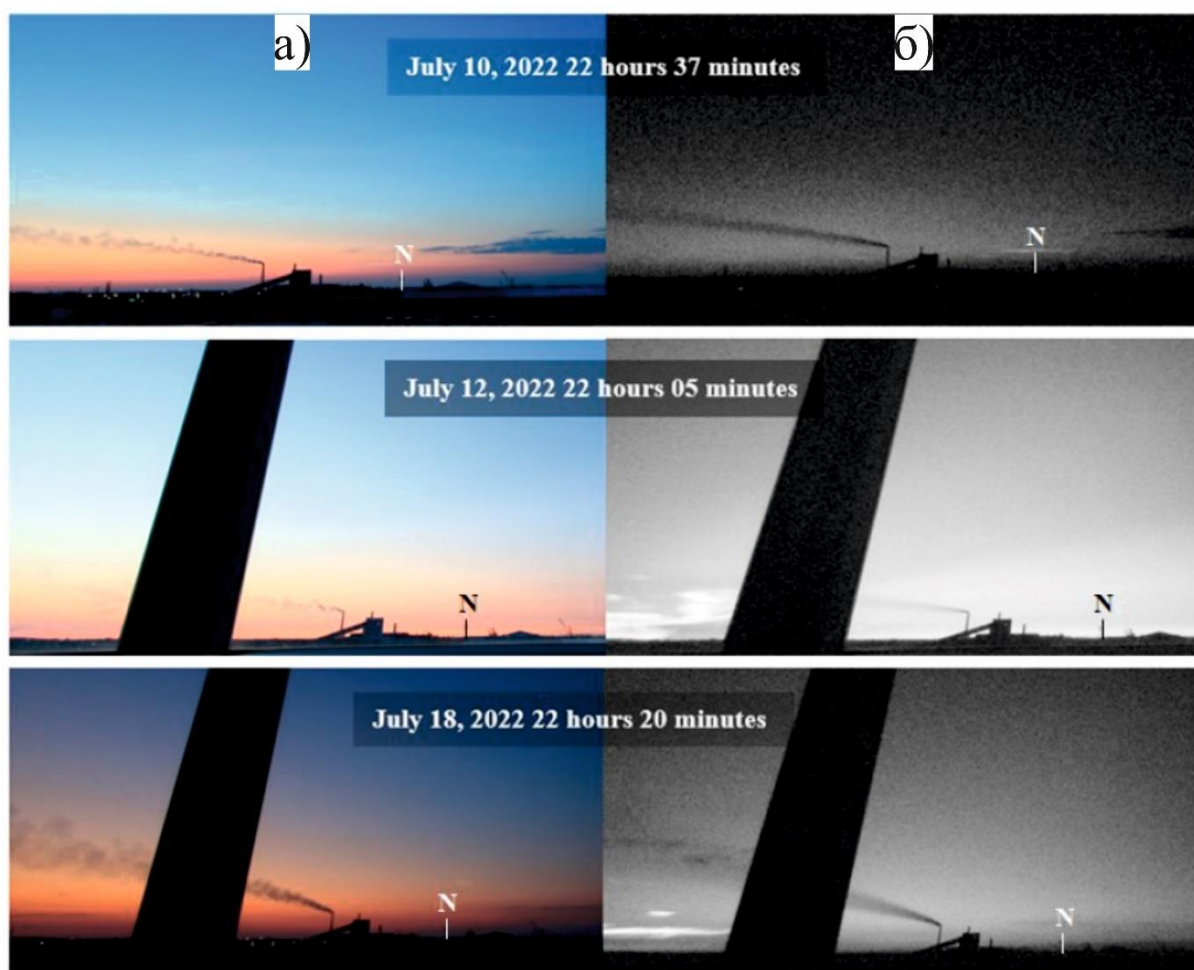


Рисунок 1.10 – Фрагменты изображений сумеречного сегмента в видимом свете (а) и в ближней инфракрасной области спектра (б). N – отмечено направление на север

Как видно из рисунка 1.7, условия образования льда 0 имеются в стратосфере и тропосфере. В нижнем слое атмосферы при быстром вертикальном подъеме воздуха, например, при набегании потоков на горные системы и адиабатическом расширении, происходит его охлаждение с возникновением конденсации пара. Это возможно и в протяженных по высоте грозовых облаках, где в их верхних слоях из-за конвективного подъема воздуха температура может достигать -30°C . В случае образования частиц, состоящих из льда 0, должен регистрироваться особый механизм электризации частей облаков. В работе [66] при самолетных измерениях показано, что электризация ледяных кристаллов в грозовых облаках не наблюдается при температурах ниже -22°C . Это значение совпадает с

температурой образования льда 0.

В работе [67] было определено, что лед 0 образуется в капиллярах древесины сосны при отрицательных температурах. Данный факт связывается с существованием в них пор малых размеров. В меньших порах (2–3 нм) переохлажденная вода может существовать до температуры порядка -45°C . В настоящее время считается, что данной температуре соответствует точка на особой линии, называемой линией Видома [68]. Линия Видома определяет аномальное состояние переохлажденной воды и исходит из второй ее критической точки в фазовом пространстве давление–температура. На этой линии резко возрастают флуктуации плотности и энтропии холодной воды, что является ее уникальной плохо исследованной аномалией.

Таким образом, вопрос о возможности образования льда 0 в природной среде требует дальнейших исследований.

1.5 Дистанционное зондирование ледяных покровов

Проблема изменения климата актуальна на сегодняшний день. Причина столь пристального внимания к этой проблеме вызвана, прежде всего, изменением температурного режима. Климат Земли возникает в результате взаимодействия пяти основных компонентов климатической системы: атмосферы, гидросферы, биосферы, литосферы и криосферы.

Криосфера играет ключевую роль в глобальной климатической системе, имея важные прямые связи и обратные связи с атмосферой и гидросферой через ее воздействие на поверхностные потоки энергии и влаги, выброс большого количества пресной воды в океаны и накопление воды в период замерзания [1]. Криосфера оказывает влияние на геофизические, экологические, биологические, химические и геологические процессы, и это лишь некоторые из них. Таким образом, криосферные образования требуют непрерывного мониторинга, ведь каждый из них вносит свой вклад в

изменение климата местности и региона в целом.

Возможность современных методов дистанционного зондирования основана на том, что все объекты в природе по-разному поглощают и отражают электромагнитное излучение в том или ином диапазоне длин волн [1]. Используя различные датчики, можно видеть горные породы, почву, воду или растения и выявлять их особенности. Благодаря дистанционному зондированию, имеется возможность решения огромного количества задач, в которых необходимо получение непрерывного мониторинга об облачном и снежно-ледяном покровах [69-71], полях температуры и влагосодержании атмосферы [72-74], крупномасштабных и опасных процессах в атмосфере и на поверхности Земли (циклоны, антициклоны, тропические штормы и ураганы, стихийные явления и др.) [75].

Основными диапазонами, которые используются для исследования в криосфере, являются инфракрасный диапазон, видимый диапазон и микроволновый диапазон [1]. Видимый и инфракрасный диапазоны используются для выявления областей залегания снежного покрова, картирования, определения динамики схода и установления снежного покрова, границ залегания и границ снеготаяния. Так, например, в работе [76] использовали видимый диапазон для определения площади горного ледника. Физической основой распознавания снежного покрова в этих диапазонах становится его высокая отражательная способность в видимом диапазоне и низкая — в инфракрасном (ИК) диапазоне.

В случае теплового инфракрасного излучения датчики будут регистрировать излучение, испускаемое поверхностью в результате солнечного нагрева. Так, например в работе [77] рассматривалась возможность построения карт ледовой обстановки по спутниковым данным видимого и инфракрасного диапазонов в режиме реального времени.

Микроволновый метод зондирования является одним из самых распространенных методов исследования, обеспечивающий получение

количественной информации о характеристиках и эволюции среды независимо от времени суток и облачности в атмосфере, на поверхности и под ней и в окружающем космическом пространстве на разных пространственно-временных масштабах [1].

В связи с этим, исследование различных природных сред, в частности криосферных образований, с помощью спутниковых снимков, является актуальной задачей. Основываясь на этом можно утверждать, что такие недавно открытые объекты исследования, как сегнетоэлектрический лед 0, необходимо изучать, так как он имеет особое свойство сильно рассеивать и поглощать электромагнитные излучения при температурах ниже -23°C .

1.6 Выводы и постановка задач

1. Выполненный обзор характеристик новой кристаллической модификации льда – лед 0, образующейся при температуре ниже -23°C , показывает появление научных работ в области теоретических и экспериментальных исследований по его изучению. Исследование электромагнитных характеристик льда 0 является актуальной задачей, прежде всего для развития дистанционного зондирования Земли при изучении криосферных образований, атмосферы, биосферы и гидросферы. Полученные знания будут полезны для усовершенствования моделей переноса излучения и для развития методов обработки спутниковых снимков земной поверхности и облачных образований.

2. Успехи компьютерного моделирования в области изучения полиморфизма льда весьма впечатляющие. Эти данные позволяют экспериментальным группам обратить внимание на новые модификации льда и их электромагнитные характеристики. При этом имеются определенные особенности в экспериментальных методах исследований, благодаря которым могут быть определены новые модификации льда и их

электромагнитные свойства. Особую значимость для таких исследований имеют микроволновые методы измерений ледяных структур, которые способствуют дальнейшему развитию теории радиофизических характеристик и развитию методов дистанционного зондирования. Это определяется относительно высокой проникающей способностью в лед микроволнового излучения.

Можно поставить следующие конкретные задачи исследования:

- проанализировать имеющуюся в современной литературе информацию о физических характеристиках льда 0 при температурах ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- исследовать возможные механизмы образования новой кристаллической модификации льда в природной среде, а также объектов, в которых лед 0 может образовываться;
- провести измерения радиофизическими методами различных природных объектов, в частности, туманов и льдов, для выявления возможных аномалий их электромагнитных характеристик при отрицательных температурах;
- показать влияние новой кристаллической модификации – льда 0 на результаты дистанционного зондирования криосферных образований при температурах ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- провести расчеты влияния тонкого слоя сегнетоэлектрического льда 0 на рассеяние излучения.

ГЛАВА 2. МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД

В данной главе приведены оценки влияния тонкой пленки льда 0 на экстинкцию электромагнитного излучения дисперсных сред.

2.1 Влияние тонкой пленки льда 0 на холодной поверхности на радиотепловое излучение

Сегнетоэлектрический лед 0 представляет особый интерес в области радиофизических исследований благодаря своим уникальным диэлектрическим характеристикам. Тонкие пленки такого льда, в отличие от льдов Ih и Ic, как показывают эксперименты, могут значительно влиять на характеристики электромагнитного излучения, что важно для разработки новых методов дистанционного зондирования и радиолокационных систем.

Сегнетоэлектрические свойства льда обусловлены наличием спонтанной поляризации внутри кристаллической решетки, что влияет на его статическую диэлектрическую проницаемость. В частности, наличие сегнетоэлектрической пленки льда 0 толщиной в несколько нанометров на любом диэлектрике может существенно изменять коэффициенты отражения и поглощения электромагнитных волн, что впервые было показано в работах [7,8]. Представляет особый интерес рассмотреть модель рассеяния излучения на малых частицах, покрытых льдом 0, которую чисто качественно использовали в отмеченных работах. Такие частицы возникают в слоях атмосферы при низких температурах и при перенасыщении их водяным паром. Однако в работах [7,8] теоретическое рассмотрение такого вопроса не было выполнено. Это связано со сложностью вычислений, определяемых как отсутствием экспериментальных данных о льде 0, так и решением задачи для частиц неправильной формы, для которых отсутствуют

аналитические решения проблемы. Кроме того, в некоторых случаях в системах с металлической проводимостью может возникать усиление электромагнитных полей, как, например, для эффекта гигантского комбинационного рассеяния [34-36]. В работе [12] использовалась высокочувствительная система детектирования, работающая при низких температурах, изменения плотности воды в реальном времени на основе плазмонного отклика. Данная система продемонстрировала отчетливый плазмонный отклик в диапазоне температур от 180 до 250 К. Этот отклик коррелирует с увеличением локальной плотности воды на наноуровне. При этих температурах образуется сегнетоэлектрическая модификация – лед 0, которая возможно способствовала возникновению поверхностного плазмонного резонанса в исследуемой системе.

В работе [14] рассматривали вопрос поверхностной проводимости на границе раздела между сегнетоэлектрической керамикой и трансформаторным маслом. Было установлено, что на границе раздела между сегнетоэлектриком и диэлектриком возникает слой порядка 1 нм с высокой электропроводностью со значением до шести порядков выше, чем у контактирующих сред. Такие частицы приобретают «металлическую» проводимость, и в том случае, если форма этих частиц анизотропная, они создают сильное рассеяние падающего излучения в широком интервале частот [15]. Одной из причин повышенной проводимости является усиленная диссоциация диэлектрика вблизи твердых тел с более высокой диэлектрической проницаемостью (сегнетоэлектрик).

2.2 Влияние рассеяния радиотеплового излучения в дисперсных средах, содержащих лед 0

Для разработки модели электромагнитных свойств диэлектрической частицы, покрытой льдом 0, необходимо ввести некоторые упрощения,

которые позволят оценить эффект экстинкции при двух ситуациях: экстинкция частиц чистого льда Ih и экстинкция частиц льда Ih (или любого диэлектрика с малыми потерями), покрытого льдом 0.

1. Важным моментом является то, что на границе диэлектрической частицы и сегнетоэлектрического льда возникает слой высокой электропроводности, что приводит к появлению отрицательной диэлектрической проницаемости $\varepsilon' < 0$. В соответствии с теорией Друде-Лоренца по формуле: $\varepsilon' = 1 - \frac{ne^2}{\varepsilon_0 m \omega^2}$. Такая частица может быть заменена чисто металлической частицей, так как в случае нанометрового слоя именно в нем концентрируются плазмоны и возникает резонанс поверхностных плазмонных мод.

2. При расчетах рассеяния частиц будет использоваться классическая теория Ми, которая дает хорошие результаты для частиц диаметром более десяти нанометров [15]. Для меньших частиц необходимо учитывать возникновение соударений носителей заряда со стенками.

Модель должна дать характеристики среды, для экспериментальной проверки возникновения льда 0 в земной атмосфере: широкополосность эффекта, высокие значения рассеяния по сравнению с другими диэлектрическими частицами, температурный интервал явления и ряд других особенностей (случай слоев в объеме образования из льда Ih и т.д.).

2.2.1 Описание используемой модели

Модель малой ледяной частицы из льдов Ih и 0 представлена на рисунке 2.1.

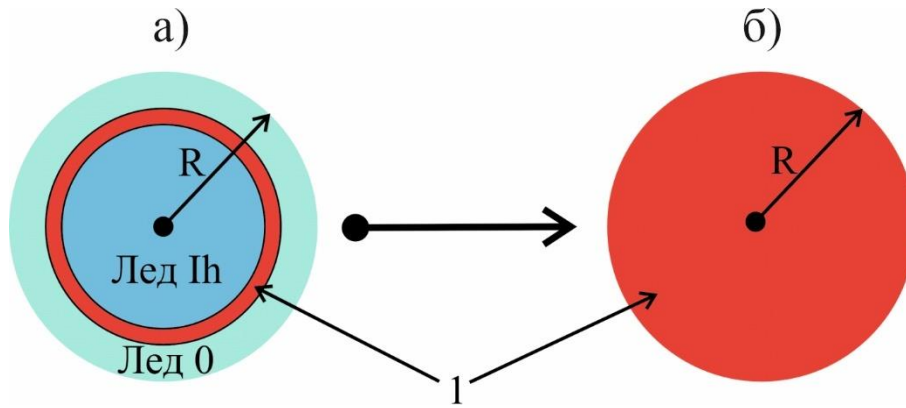


Рисунок 2.1 – а) Упрощенная модель малой частицы из льда Ih, покрытой льдом 0; б) эквивалентная проводящая частица. 1 – среда с высокой электропроводностью и $\varepsilon' < 0$

Здесь: а) сферическая ледяная частица, покрытая льдом 0, б) эквивалентная ей по рассеивающим характеристикам металлическая частица. Такая модель может использоваться из-за того, что высшие моды колебаний распространяются в области сферической оболочки частицы [15]. Слой льда 0 на поверхности – тонкий и, по всей видимости, носит островковый характер (механизм Фольмера-Вебера) [78].

Отрицательная ε' возникает на частотах, где $ne^2 > \varepsilon_0 m \omega^2$. Соответственно, плазменная частота объемного плазмона находится по формуле (2.1):

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\varepsilon_0 m}}, \quad (2.1)$$

где n – концентрация носителей, e – заряд носителя, m – его масса.

Плазменную частоту поверхностного плазмона можно определить по формуле (2.2):

$$\omega_{sp} = \sqrt{\frac{\omega_p}{1 + \varepsilon_d}}, \quad (2.2)$$

где ε_d – диэлектрическая проницаемость окружающей среды.

На контакте двух модификаций льдов основное влияние на высоких частотах (в оптическом диапазоне) оказывают свободные электроны, газ которых будет иметь высокую плазменную частоту. Газ протонов будет проявляться на более низких частотах.

Так как область отрицательных значений ε' металлов не ограничена узкой полосой, то область резонанса поверхностных плазмонных мод простирается от ω_p до нулевой частоты. Причем максимум поглощения будет иметь место при $\varepsilon' = -2$ (для частицы в вакууме) на частоте Фрелиха ω_f [15], соответствующем резонансу поля в частице. Для металлов частоту Фрелиха можно найти по формуле (2.3):

$$\omega_f = \frac{\omega_p}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

2.2.2 Расчеты рассеяния в модели

Оценки эффективностей при рассеянии сферическими частицами были выполнены для двух моделей: по теории Ми и Релея. Формулы для расчетов использованы из работы [15]. В случае микроволнового диапазона и наноразмерных частиц важно оценить параметр x , который определяется по формуле (2.4):

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda}, \quad (2.4)$$

где r – радиус частицы, λ – длина волны. Если $x \ll 1$, используется теория Релея для упрощенных расчетов. Если $x \sim 1$ или больше, теория Ми будет более точной, но и более сложной для вычислений.

Для расчета рассеяния по теории Ми необходимо определить функции Риккати-Бесселя и их производные, а также функции Риккати-Ханкеля. Для нахождения первой функции используется формула $\varphi_n(x) = x j_n(x)$ – функция Риккати-Бесселя первого рода (связана со сферической функцией Бесселя $j_n(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2x}} J_{n+\frac{1}{2}}(x)$). Для расчета второй функции используется формула $\xi_n(x) = x h_n^{(1)}(x)$ – функция Риккати-Ханкеля первого рода (связана со сферической функцией Ханкеля $h_n^{(1)} = \sqrt{\frac{\pi}{2x}} H_{n+\frac{1}{2}}^{(1)}(x)$). Далее находятся

коэффициенты a_n и b_n из граничных условий для электромагнитных полей на поверхности сферы из формул (2.5):

$$a_n = \frac{m\varphi_n(mx)\varphi'_n(x) - \varphi_n(x)\varphi'_n(mx)}{m\varphi_n(mx)\xi'_n(x) - \xi_n(x)\varphi'_n(mx)}; b_n = \frac{\varphi_n(mx)\varphi'_n(x) - m\varphi_n(x)\varphi'_n(mx)}{\varphi_n(mx)\xi'_n(x) - m\xi_n(x)\varphi'_n(mx)}, \quad (2.5)$$

где m – комплексный показатель преломления вещества сферической частицы.

В расчетах в исходных данных задавали значения диэлектрической проницаемости вещества, из которого состояла однородная сферическая частица. Связь между диэлектрической проницаемостью $\dot{\varepsilon}$ и показателем преломления m задаётся фундаментальным соотношением электродинамики (2.6):

$$m = \sqrt{\dot{\varepsilon}}, \quad (2.6)$$

где $\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - i\varepsilon''$ – комплексная диэлектрическая проницаемость.

Для нахождения действительной и мнимой частей относительной комплексной диэлектрической проницаемостей для воды при температуре -25°C использовались формулы (2.7–2.12) работы [79] для двухчастотной модели в случае химически чистой воды:

$$\dot{\varepsilon}(T) = \frac{\dot{\varepsilon}_s(T) - \varepsilon_1(T)}{1 + \frac{if}{f_1(T)}} + \frac{\varepsilon_1(T) - \varepsilon_\infty(T)}{1 + \frac{if}{f_2(T)}} + \varepsilon_\infty(T), \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_s(T) = \frac{3,70886 \times 10^4 - 8,2168 \times 10^1 T}{4,21854 \times 10^2 + T}, \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_1(T) = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2, \quad (2.9)$$

$$f_1(T) = \frac{A+T}{\alpha_3 + \alpha_4 T + \alpha_5 T^2}, \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_\infty(T) = \alpha_6 + \alpha_7 T, \quad (2.11)$$

$$f_2(T) = \frac{A+T}{\alpha_8 + \alpha_9 T + \alpha_{10} T^2}, \quad (2.12)$$

где T – температура в градусах Цельсия, f, f_1, f_2 – частота поля и две частоты релаксации в ГГц. Однако параметр A и коэффициенты $\alpha_0 \dots \alpha_{10}$ для низких температур были экспериментально определены в работе [80] и представлены в [81].

Для нахождения действительной и мнимой частей относительной комплексной диэлектрической проницаемостей меди и графита, взятых для сравнения, использовались формулы (2.13; 2.14) по классической модели Друде-Лоренца.

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \Upsilon^2}; \quad (2.13)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\omega_p^2 \Upsilon}{\omega(\omega^2 + \Upsilon^2)}, \quad (2.14)$$

где $\Upsilon = \frac{1}{\tau}$ – параметр затухания (частота столкновений) Друде, ω – частота падающего излучения, ω_p – плазменная частота свободных электронов; ε_{∞} – диэлектрическая проницаемость на бесконечно высокой частоте. Для нахождения Υ необходимо найти $\tau = \frac{\sigma m}{ne^2}$, где σ – проводимость вещества.

Найдя эти значения, вычисляем коэффициенты эффективности Ми по формулам 2.15–2.19 (Q_{ext} – экстинкции, Q_{sca} – рассеяния, Q_{back} – обратного рассеяния, Q_{abs} – поглощения) и параметр асимметрии (g) одной однородной частицы:

$$Q_{ext} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{n_{max}} (2n+1) \operatorname{Re}\{a_n + b_n\}; \quad (2.15)$$

$$Q_{sca} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{n_{max}} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2); \quad (2.16)$$

$$Q_{abs} = Q_{ext} - Q_{sca}; \quad (2.17)$$

$$Q_{back} = \frac{1}{x^2} \left| \sum_{n=1}^{n_{max}} (2n+1) (-1)^n (a_n - b_n) \right|^2; \quad (2.18)$$

$$g = \frac{4}{Q_{sca} x^2} \left[\sum_{n=1}^{n_{max}} \frac{n(n+2)}{n+1} \operatorname{Re}\{a_n a_{n+1}^* + b_n b_{n+1}^*\} + \sum_{n=1}^{n_{max}} \frac{2n+1}{n(n+1)} \operatorname{Re}\{a_n + b_n^*\} \right]; \quad (2.19)$$

Для расчета коэффициентов эффективности по теории Релея используются следующие формулы (2.20–2.23):

$$Q_{sca} = \frac{8x^4}{3} \left| \frac{m^2-1}{m^2+2} \right|^2; \quad (2.20)$$

$$Q_{abs} = 4x \operatorname{Im}\left\{ \frac{m^2-1}{m^2+2} \right\}; \quad (2.21)$$

$$Q_{ext} = Q_{sca} - Q_{abs}; \quad (2.22)$$

$$Q_{back} = \frac{3Q_{sca}}{2} \quad (2.23)$$

Рассеяние определяет отражение излучения и позволит оценить эффекты «свечения» облаков мезосферы и приземных туманов. Значения ε' и ε'' для отмеченных материалов приведены в таблице 1.

На рисунке 2.2 представлены зависимости рассчитанных коэффициентов эффективностей обратного рассеяния от размера частицы на пяти длинах волн: 1 мкм, 10 мкм, 0,3 см, 0,88 см и 2,3 см.

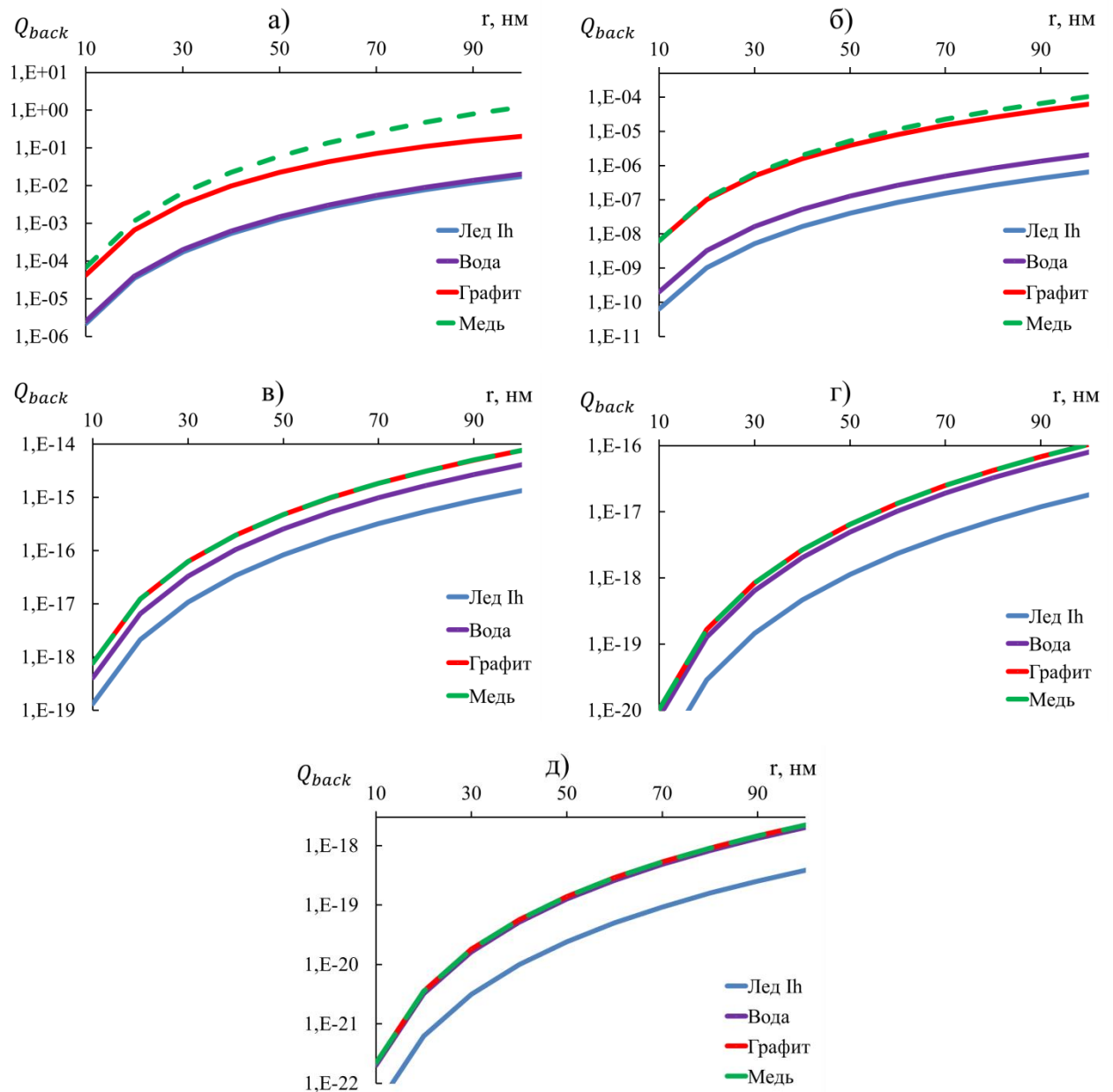


Рисунок 2.2 – Графики зависимости коэффициентов эффективности обратного рассеяния от размера однородной сферической частицы из разного материала на длинах волн: а) 1 мкм; б) 10 мкм; в) 0,3 см; г) 0,88 см; д) 2,3 см

Таблица 1 – Значения относительной комплексной диэлектрической проницаемости для различных материалов в зависимости от длины волны

	Значения относительной комплексной диэлектрической проницаемости при определенной длине волны				
	$\lambda = 1 \text{ мкм}$	$\lambda = 10 \text{ мкм}$	$\lambda = 0,3 \text{ см}$	$\lambda = 0,88 \text{ см}$	$\lambda = 2,3 \text{ см}$
Вода	$1,758 - 1,931 \cdot 10^{-5}i$	$1,543 - 0,35i$	$4,38 - 4,717i$	$5,914 - 10,126i$	$11,387 - 23,671i$
Лед Ih	$1,695 - 5,182 \cdot 10^{-6}i$	$1,325 - 0,095i$	$3,15 - 0,001i$	$3,15 - 0,001i$	$3,15 - 0,001i$
Медь	$-89,4 - 2,29i$	$-8500 - 2152i$	$-141087 - 11907474i$	$-141104 - 31523578i$	$-141107 - 82447690i$
Графит	$-0,319 - 0,788i$	$-3,88 - 29,15i$	$-4,02 - 9991i$	$-4,02 - 26445i$	$-4,02 - 69168i$

Общий вид рассеяния от шара для нанометровых радиусов показывает значение несколько большее для металлической частицы, чем для льда и воды. Так, например, на длине волны 0,3 см коэффициент эффективности обратного рассеяния на медной частице размером 50 нм равен $4,81 \times 10^{-16}$, а на частице из гексагонального льда (Ih) принимает значение $8,38 \times 10^{-17}$.

Однако в общем случае, такое рассеяние носит узкополосный характер, т.к. при расчетах используется идеальная сферическая частица. В случае металлических частиц неправильной формы рассеяние оказывается значимым, начиная от плазменной частоты до нулевой частоты. Иллюстрация из [15] приведена на рисунке 2.3. Именно фактор формы определяет неожиданные рассеивающие свойства диэлектрических частиц, покрытых тонким слоем льда 0.

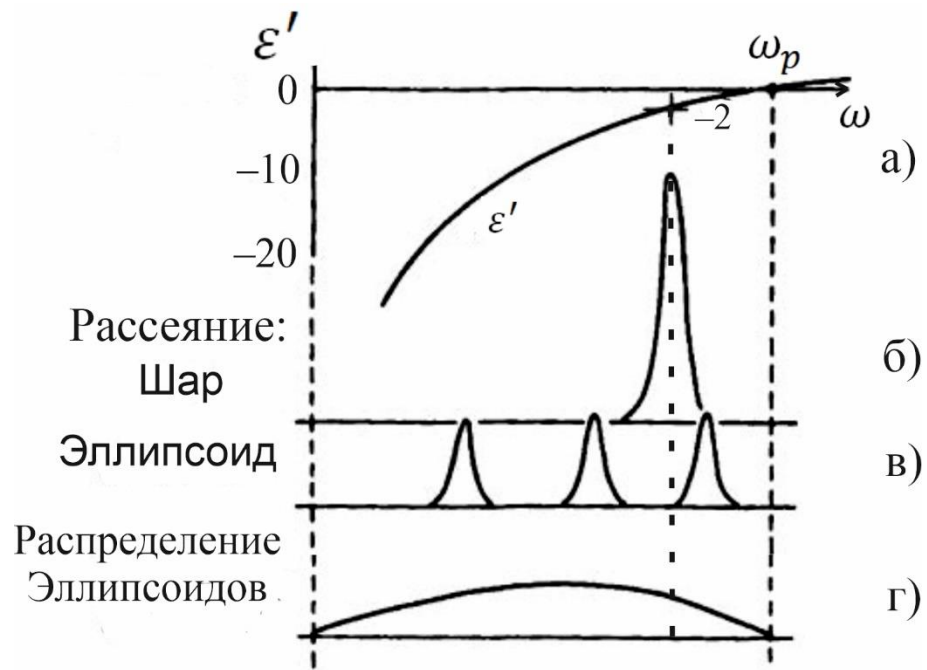


Рисунок 2.3 – Частоты поверхностных мод для диэлектрических и металлических частиц разной формы. а) ход ϵ' от частоты, б–г) частотные зависимости интенсивности поверхностных мод от формы частиц [15]

2.2.3 Оценка влияния фактора формы частиц

Оценим влияние формы частиц на величину возрастания рассеяния в микроволновом диапазоне по имеющимся экспериментальным данным. В работе [15] приведены в виде графиков данные разных работ для малых алюминиевых шаров и случая распределения частиц по форме в виде эллипсоидов – рисунок 2.4.

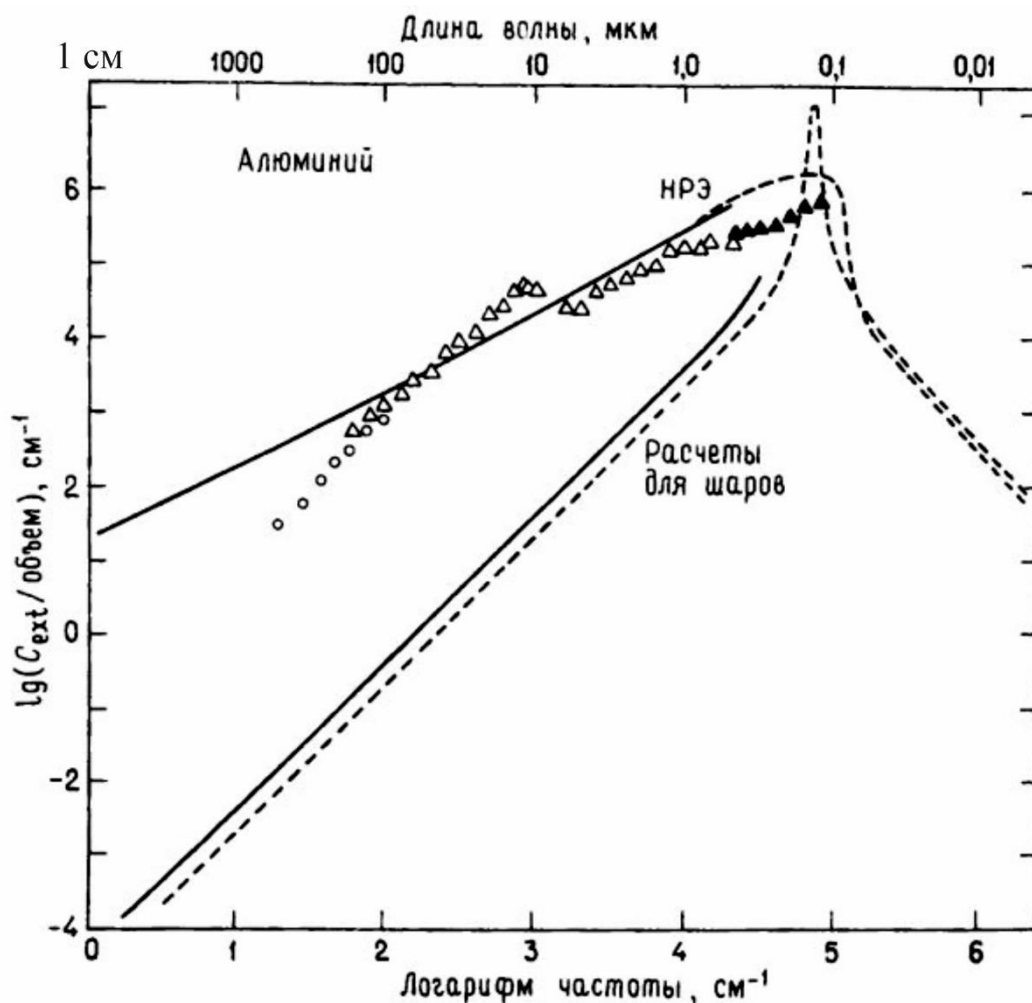


Рисунок 2.4 – Расчетные спектры экстинкции для малых алюминиевых шаров и для непрерывных распределений эллипсоидов (НРЭ) в воздухе (сплошная линия) и в среде с $\varepsilon' = 2,3$ (пунктирная линия). Кружками показаны данные из работы [82], треугольниками из работы [83]; темные треугольники отвечают частицам на подложке, а светлые – в матрице из полиэтилена [15]

Из представленных графиков на рисунках 2.3 и 2.4 следует, что для наночастиц неправильной формы в случае резонанса плазмонных мод возникает непрерывный спектр рассеяния, причем в области более длинных волн для частиц эллипсоидальной формы рассеяние, например, в миллиметровом диапазоне на 5 порядков величины выше, чем для сферических частиц. Следовательно, результаты, представленные на рисунке 2.2 для проводящих шаров необходимо увеличить на 5 порядков для реальных частиц неправильной формы в атмосфере.

2.2.4 Экспериментальное определение электропроводности льда 0

Таким образом, очевидно, что малые металлические частицы неправильной формы с размерами существенно ниже длины волны создают сильное широкополосное рассеяние излучения. Однако остается вопрос о значении проводимости контактного слоя между сегнетоэлектриком и диэлектриком. Для его уточнения выполнен эксперимент по измерению возникновения проводящего слоя при осаждении льда 0 на плоскую диэлектрическую пластину.

Для этой цели на пластину наносили плоские электроды из меди на расстоянии ~ 1 см друг от друга и измеряли электрическое сопротивление на постоянном токе 22 разрядной системой сбора данных фирмы «Agilent», которая позволяет определять сопротивление до 100 МОм. Осаждение пленки льда проводилось по методике, схема которой представлена на рисунке 2.5.

В этой методике сначала камера заполнялась холодными парами азота, и пластинка охлаждалась до температуры ~ -120 °С. Далее подача паров азота прекращалась, и камера с образцом нагревалась до 0 °С в лабораторном помещении. При этом на пластинке начиналась конденсация паров воды, диффундирующих от стенок камеры и из лабораторного пространства. Результаты измерений приведены на рисунке 2.6.

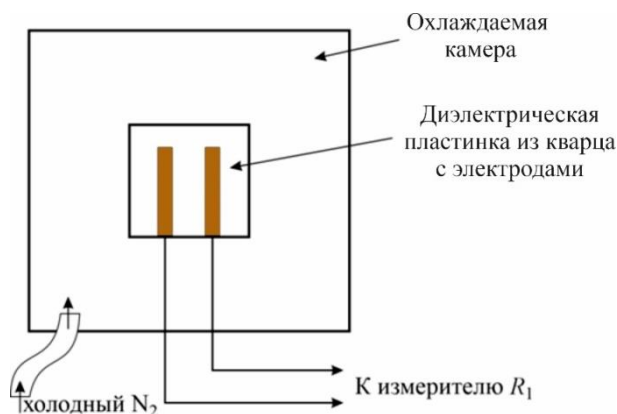


Рисунок 2.5 – Схема установки для определения осаждения льда 0 в виде островковых пленок. В качестве измерителя сопротивления использована система сбора информации «Agilent»

Для обнаружения образования островковых пленок предполагали появление перколяции, если на подложке будут расти множественные островки льда и если они будут проводящими. Для удобства рассмотрения эксперимента другие составляющие установки на рисунке 2.5 не показаны.

На рисунке 2.6 приведена зависимость электрического сопротивления от температуры диэлектрической пластинки. Температура в лабораторном помещении $\sim 20^\circ\text{C}$ и относительная влажность $\sim 20\ldots 30\%$.

Результаты измерений указывают на появление перколяции, которая носит чрезвычайно резкий характер, соответствующий теории, из-за множества возникающих областей протекания на мелких частицах [84]. Важно, что перколяция возникла из-за появления электропроводности в осаждаемых пленках воды, которая превращалась в лед. Вблизи температуры -23°C перколяция исчезла, что указывало на появление именно льда 0, так как он трансформировался в плохо проводящий лед Ih (в соответствии с температурой его фазового перехода).

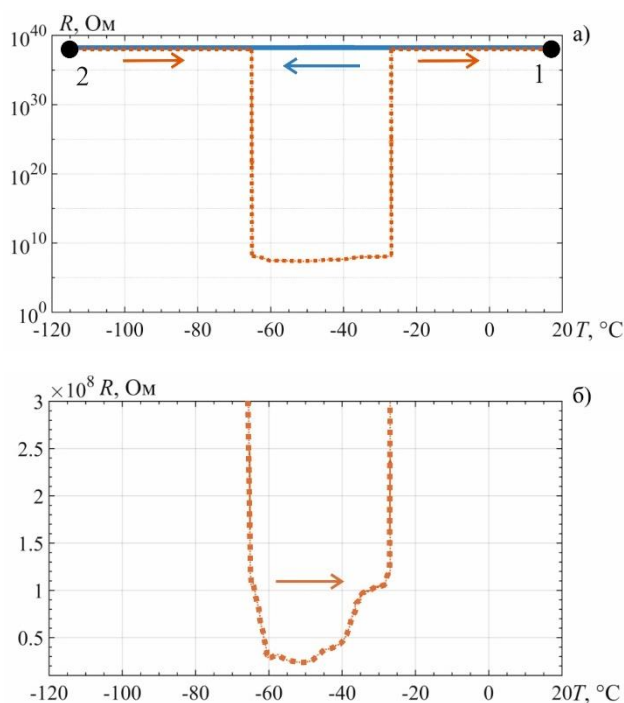


Рисунок 2.6 – График зависимости сопротивления пластинки между электродами в процессе осаждения водяного пара и его превращения в лед 0 (стрелки указывают направление изменения температуры) а) показания прибора; б) данные для меньших значений сопротивления; 1 – начальная и конечная точки измерений; 2 – точка начала нагревания пластинки

Из результатов измерения R при длине электрода (l) ~ 3 см и толщине проводящего слоя ~ 1 нм получаем значение удельного сопротивления (ρ) для исследуемой среды:

$$\rho_x = \frac{RS}{l} = \frac{0,1 \cdot 10^8 \text{ (Ом)} \cdot 1 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 10^{-2} \text{ (м)}} \sim 10^{-2} \text{ (Ом} \cdot \text{м)},$$

где l – расстояние между электродами.

Учитывая, что в точке перколяции удельное сопротивление на один-два порядка выше, следовательно, полученное ρ_x несколько меньше и приблизительно соответствует аналогичной величине для графита ($\rho_{\text{гр}} \sim 1,3 \cdot 10^{-5}$ (Ом $\cdot$ м) при температуре $+20$ °C). Следует отметить, что в природных условиях ρ наноразмерных островковых пленок может дополнительно уменьшаться при их облучении видимым или ультрафиолетовым излучениями [85].

Выводы по главе: 1. Теоретические оценки и непосредственное измерение проводимости контактного слоя на границе льда 0 и диэлектрического материала хорошо соответствуют наблюдаемым результатам для гипотезы свечения серебристых мезосферных облаков на основе образования сегнетоэлектрического льда 0 на диэлектрических наночастицах неправильной формы с проводящим слоем от видимого до радиочастотного диапазонов.

2. Возникновение резонанса поверхностных плазмонных волн усиливает интенсивность экстинкции частиц со льдом 0 (рассеяния и поглощения) в сравнении с частицами из чистого льда на 1–2 порядка от микроволнового до видимого диапазонов. Это усиление может быть высоким в узкой полосе на частоте Фрелиха, где диэлектрическая проницаемость слоя на границе диэлектрика со льдом 0 достигает значения -2 .

3. Проводящие частицы неправильной формы нанометровых размеров, образующихся в природной среде, рассеивают излучение в широком интервале частот, причем в микроволновом диапазоне на 5–6 порядков величины выше в отличие от сферических частиц.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной главе описаны методики экспериментального исследования электромагнитных характеристик мерзлых дисперсных сред, использованных в работе, для возможности регистрации их аномального поведения. Приведено описание измерительных установок, с помощью которых удалось зарегистрировать аномалии, связанные с образованием сегнетоэлектрической модификации льда, как в натуральных условиях, так и в лабораторных экспериментах.

3.1 Методика исследования льда 0, образованного в различных увлажненных нанопористых материалах

3.1.1 Поиск льда 0 по отражению от увлажненных сорбентов

Выбор методики экспериментального обнаружения образования льда 0 основывался на его особом свойстве – сегнетоэлектрическом. Обладая данным свойством, его регистрация возможна по аномально резкому изменению электрических параметров при фазовом переходе в гексагональный лед. Например, появление льда 0 можно определить из микроволновых измерений по коэффициенту отражения от границы воздух–среда, который изменяется в момент фазового перехода [7]. Такая особенность отличает лед 0 от других льдов низкого давления, и она положена в основу новой методики его обнаружения в настоящей работе.

Для проведения измерений использовались генератор электромагнитного излучения и радиометрический приемник на длину волны 0,88 см с постоянной времени 0,1 с. На рисунке 3.1 представлена схема экспериментальной установки. В кювету помещался увлажненный аморфный порошок диоксида кремния или диоксида титана. Для регистрации сигналов

с измерительной аппаратуры использовалась система сбора данных фирмы Agilent, у которой также имеется термopapa, используемая в данном эксперименте для определения изменения температуры порошка. Для достижения отрицательной температуры использовалась климатическая камера фирмы «ESPEC».

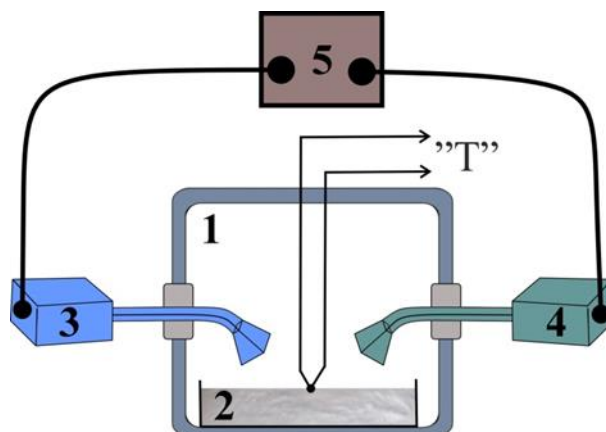


Рисунок 3.1 –Схема измерительной установки для поиска льда 0 по отраженной мощности микроволнового излучения от кюветы с образцом. 1 – климатическая камера, 2 – кювета с образцом, 3 – излучатель, 4 – детектор излучения, 5 – система сбора данных, «Т» – датчик температуры

Выбор порошков был основан на том, что один порошок является гидрофильным, другой гидрофобным. Предполагается, что слой льда 0 образуется островковыми пленками на контакте с диэлектриком. В связи с этим если предположить, что на контакте порошок – вода образуется тонкий слой льда 0, то его концентрация будет зависеть от свойств порошка. Считается, что с гидрофильным порошком образование льда 0 и его влияние на электромагнитные характеристики будут заметны сильнее, чем с гидрофобным порошком. Что касается размера их пор, то размер пор диоксида кремния составляет менее 100 нм, а диоксида титана 30-50 нм.

Охлаждение производилось до температуры $-60...-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ в изолированной камере с помощью подачи небольших количеств жидкого азота. Процесс охлаждения длился около 10 минут. Процесс нагревания осуществлялся естественным путем при комнатной температуре с длительностью приблизительно 120 минут. Запись данных осуществлялась

на систему сбора данных фирмы Agilent. Измерения температуры осуществлялось с использованием термопары типа «J».

3.1.2 Исследование низкочастотных шумов увлажненных сорбентов

В мае – сентябре 2025 г. проводились лабораторные низкочастотные измерения собственных флуктуаций по поиску аномалий при отрицательных температурах с использованием различных нанопористых сорбентов (МСМ-41, SBA-15, SiO₂, TiO₂) на частотах 1...70 Гц и 0,5...80 кГц. Низкочастотные шумы способны показать особенности среды при изменении сигнала в зависимости от температуры. Этот метод позволяет определить фазовые переходы или особые точки, например линию Видома. Важным аспектом данных измерений является возможность выявления сегнетоэлектрического состояния из-за появления шумов Баркгаузена и их температурного гистерезиса. В качестве электродов использовались медные пластины. В качестве резервуара для исследуемого образца использовался медицинский шприц, в объем которого помещались увлажненные порошки и контактные электроды. На рисунке 3.2 представлена схема экспериментальной установки для исследования амплитуды низкочастотных шумов в двух частотных интервалах (1...70 ГГц и 0,5...80 кГц) в различных увлажненных нанопористых порошках.

Охлаждение производилось до температуры –130 °С в изолированной камере с помощью подачи небольших количеств жидкого азота. Процесс охлаждения длился около 10 минут. Процесс нагревания осуществлялся естественным путем при комнатной температуре с длительностью приблизительно 45 минут. Запись данных с ячейки осуществлялась на систему сбора данных фирмы Agilent. Измерения температуры осуществлялось с использованием термопары типа «J». Исследования проводились с порошками, которые увлажнялись в эксикаторе чистой водой,

что представлено на рисунке 3.3. Масса образца определялась с помощью весов с точностью 0,001 г.

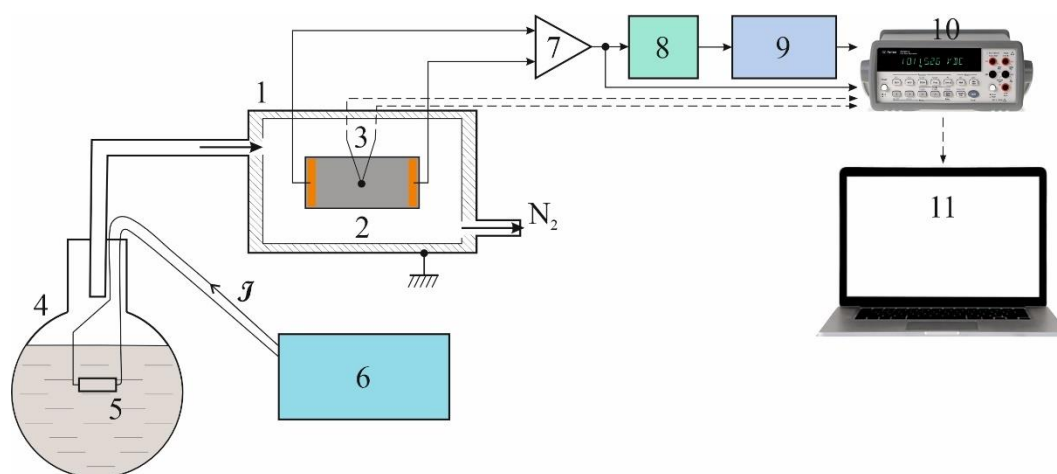


Рисунок 3.2 – Схема измерительной установки для низкочастотных измерений увлажненных нанопористых сорбентов. 1 — термокамера, 2 — измерительная ячейка с образцом, 3 — термопара, 4 — сосуд Дьюара с жидким азотом, 5 — резистор-испаритель, 6 — источник стабилизированного тока, 7 — усилитель, 8 — детектор амплитуды, 9 — фильтр низких частот, 10 — система сбора информации Agilent, 11 — компьютер



Рисунок 3.3 – Фотография процесса увлажнения и взвешивания образцов

3.2 Методика исследования льда 0 в резонаторе

3.2.1 Исследование атмосферного льда

Для решения вопроса по определению верхней температурной границы существования льда 0 был выполнен эксперимент по измерениям

комплексной диэлектрической проницаемости атмосферного льда, полученного из частиц града [86] по формуле 3.1.

$$(\epsilon = \epsilon' + i\epsilon'') \quad (3.1)$$

Измерения были выполнены с использованием микроволнового резонатора. Выпавший в летнее время град помещали в холодильник и хранили при температуре $\sim -10^\circ\text{C}$. После выдержки в течение нескольких часов, градины переносили в прямоугольный резонатор, который помещали в климатическую камеру для температурных измерений ϵ . Измерения проводились вблизи частоты 4,4 ГГц. Схема эксперимента приведена на рисунке 3.4.

Климатическая камера позволяла охлаждать прямоугольный резонатор с градом до температуры -60°C . При помощи векторного анализатора Р4М-18 регистрировали резонансную кривую резонатора со средой и по ней определяли ϵ' и ϵ'' материала града по стандартной методике резонансных измерений при полном заполнении резонатора, вариант которой представлен в [80].

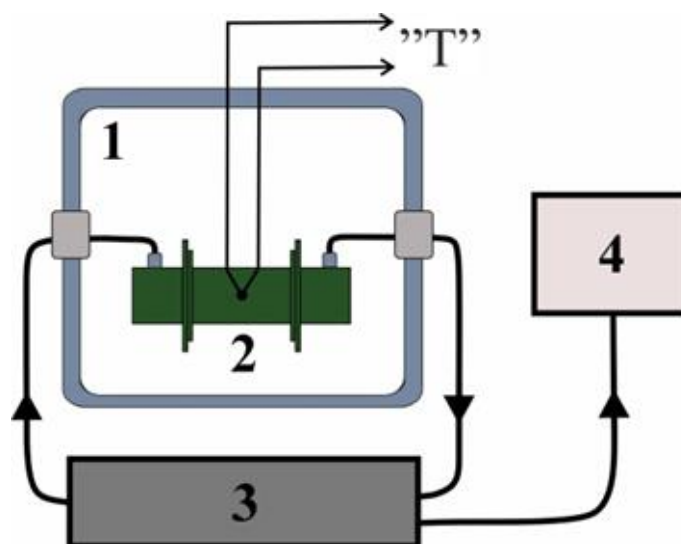


Рисунок 3.4 – Схема эксперимента по исследованию материала ледяного града в резонаторе для определения образования льда 0 в составе штабелированного льда.
1 – климатическая камера, 2 – резонатор, 3 – векторный анализатор, «Т» – датчик температуры

Температуру образца определяли при помощи термопары «Т». В процессе измерений находили изменение действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'')

частей относительной комплексной диэлектрической проницаемости в цикле охлаждение – нагревание резонатора.

Известно, что градины имеют сложную слоистую структуру при формировании частиц в сильно изменяющихся условиях из-за быстрого их прохождения через слои с высоким градиентом температуры и влажности [87]. Если в составе градины имеются области накопления льда 0, то при вариациях температуры среды этот лед может исчезать и снова образовываться. Такая ситуация известна для сегнетоэлектрического льда XI, который также существует при атмосферном давлении, но при значительно более низких температурах. Если кристаллы этого льда образовались, то в случае нагревания его зародыши остаются и при более высоких температурах [88]. Верхняя температурная граница существования льда XI при атмосферном давлении ~ -200 °C, но при нагревании до -162 °C, как оказалось, он снова может образовываться при охлаждении образца льда («эффект памяти»). Предполагалось, что лед XI и его домены электрического поля могут существовать до температуры -120 °C, но, возможно, из-за концентрации этого льда в образце ниже 1% они не регистрировались существующими методами анализа структуры.

В использованной методике из-за резонанса поверхностных плазмонных мод достаточны слои сегнетоэлектрического льда порядка 10 нм в островковых пленках при концентрациях 0,1% и ниже, что существенно повышает ее чувствительность. Следовательно, при циклическом изменении температуры образца градин можно наблюдать гистерезис ϵ' и ϵ'' с характерными температурными границами процесса. Гистерезис электрических величин является типичным для сегнетоэлектриков и будет являться доказательством наличия в среде сегнетоэлектрической модификации. Границы гистерезиса будут характеризовать температуру перехода льда 0 в лед Ih при охлаждении – нагревании материала града в резонаторе.

3.2.2 Исследование осажженного льда на кварцевом стекле

В эксперименте выполняли охлаждение прямоугольного резонатора с установленными в нем тонкими пластинками из кварцевого стекла [89]. Собственная частота резонатора – около 2,8 ГГц; его линейные размеры 72×34×77 мм; материал резонатора – медь (добротность пустого резонатора при комнатной температуре ~550). Толщина пластинок кварцевого стекла 0,19 мм, размеры 24×24 мм, их число составляло 13 шт. После охлаждения холодными парами азота до минимальной температуры резонатор, в некоторых случаях, прокачивали определенным объемом воздуха для введения в полость дополнительного количества водяных паров. Минимальная температура в холодильной камере составляла –140 °С. Схема установки для исследования представлена на рисунок 3.5.

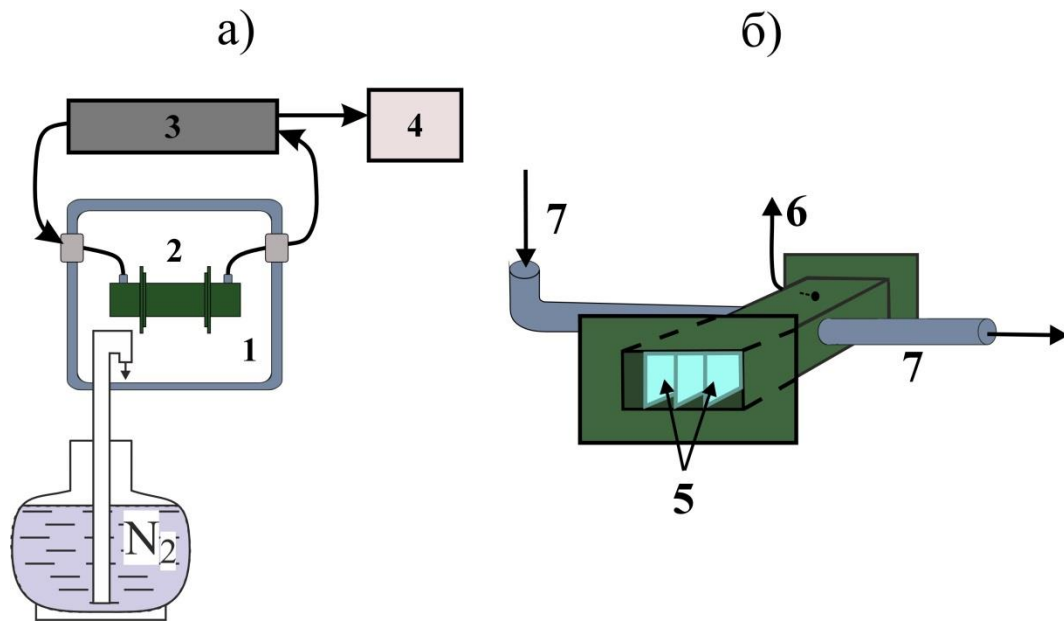


Рисунок 3.5 – а) Схема установки для поисков пленок льда 0 при его образовании в микроволновом резонаторе: 1 – холодильная камера, 2 – резонатор, 3 – скалярный анализатор радиочастотных цепей Р2М-18/2, 4 – система сбора данных; б) схема резонатора типа Н₁₀₁, где 5 – тонкие пластинки из кварцевого стекла, 6 – выход термопары, 7 – трубки для прокачки воздуха

Измерение характеристик резонатора: его добротность (Q) и значения резонансной частоты (f_p) выполняли при режиме медленного нагревания холодильной камеры. Нагревание осуществляли при остановке подачи

холодных паров азота и стабильной температуре в лабораторном помещении. При этом процессе происходила конденсация водяных паров, находящихся в воздухе, заполняющем резонатор, на поверхность кварцевых пластинок и стенках резонатора с образованием тонкого слоя льда. При отсутствии подачи воздуха в резонатор, его размере и числе пластинок, а также относительной влажности воздуха $\sim 15\%$ (при начальной температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$), максимально возможная рассчитанная толщина пленки льда составляет $\sim 100\text{ нм}$. Поскольку охлаждение пластинок осуществлялось через стенки резонатора, то именно на них конденсировалась наибольшая масса воды. Поэтому в экспериментах также использовали прокачивание некоторого объема воздуха через резонатор. Масса поступившего водяного пара и образовавшийся объем льда, а также известные значения диэлектрической проницаемости льда ϵ_h показывают, что их количество для случая гексагонального льда не может заметно изменить характеристики резонатора. Средняя скорость нагревания резонатора составляла $\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Из измерений резонансной характеристики резонатора находили f_p , ширину полосы частот его пропускания на уровне $0,5\text{ дБ}$ (Δf_p), мощность пропускания на резонансной частоте (P); расчетным путем определяли добротность по формуле 3.2.

$$Q = f_p / \Delta f_p \quad (3.2)$$

Одно измерение проводили за время $\sim 1\text{ с}$. Общее время измерений $\sim 3\text{ часа}$. Точность абсолютных измерений температуры воздуха в камере: $\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, амплитуды проходящей мощности $\sim 0,05\text{ дБ}$, добротности ~ 3 . Рассчитывали также производную измеряемых величин по температуре: dP/dT и dQ/dT .

3.3 Методика просвечивания тонких диэлектрических пластинок с конденсированными на них парами воды

Проведены измерения экстинкции лазерного и микроволнового излучений при просвечивании тонких диэлектрических пластинок с конденсированными на них парами воды и частицами льда Ih. Цель данных экспериментов связана с поиском сегнетоэлектрического льда 0, образованного на диэлектрической подложке при температурах ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рисунке 3.6 представлена фотография экспериментальной установки.



Рисунок 3.6 – Фотография экспериментальной установки для поиска льда 0

В проведенных экспериментах образцы помещались в климатическую камеру для достижения отрицательных температур парами жидкого азота. В начальный момент времени в камеру подавали холодные пары жидкого азота для вытеснения им водяного пара, присутствовавшего в камере. После достижения температуры внутри камеры $\sim -150\text{ }^{\circ}\text{C}$ подача азота прекращалась и образцы нагревались до температуры лабораторного помещения. При этом на подложке и пластине происходила конденсация паров воды, диффундирующих от стенок камеры и из внешнего пространства, в виде островковых пленок (механизм Фольмера-Вебера).

Данный механизм представляет собой процесс формирования на образцах отдельных, изолированных друг от друга трехмерных образований (островков) вместо сплошного слоя. Для контроля изменения температуры использовалась термопара типа J, интегрированная в систему сбора данных фирмы Agilent. Термопара устанавливалась вблизи исследуемого образца, что показано на рисунке 3.7.

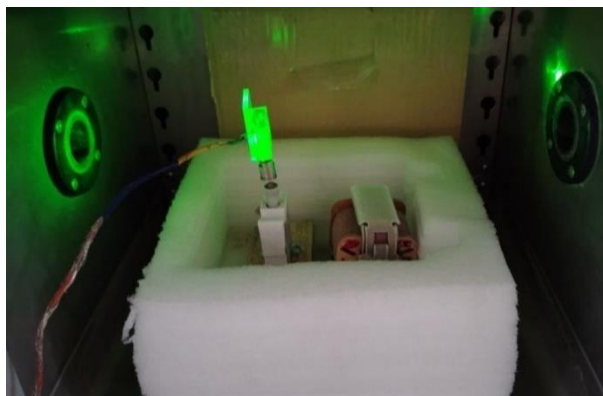


Рисунок 3.7 – Фотография места установки термопары

На рисунке 3.8 показана схема экспериментальной установки. Данные исследования проводились при различной относительной влажности для установления зависимости образования сегнетоэлектрического льда 0 от количества паров воды в исследуемой системе.

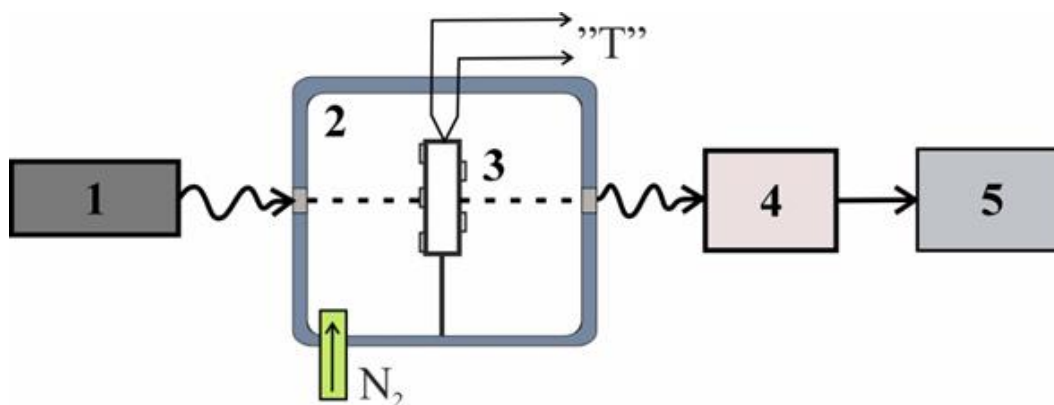


Рисунок 3.8 – Схема экспериментальной установки при измерении экстинкции лазерного излучения при просвечивании диэлектрической подложки. 1 – генератор излучения, 2 – климатическая камера, 3 – исследуемый образец, 4 – детектор излучения, 5 – устройство сбора информации, «Т» – термопара, N_2 – подача паров жидкого азота

3.4 Методика исследования переохлажденного водного аэрозоля

3.4.1 Лабораторные измерения и моделирование в натурных условиях

В декабре – феврале 2024-26 гг. на экспериментальной площадке Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН были проведены исследования искусственно созданного водного аэрозоля. Данные эксперименты проводились с целью выявления аномалий, связанных с возникновением новой модификации льда – лед 0, воздействующей на принимаемую собственную мощность электромагнитного излучения аэрозолей при отрицательных температурах. Для этого использовались радиометрические приемники на длинах волн 0,88 см, 0,3 см и в ИК диапазоне при постоянной времени 0,1 с. Радиометрические приемники были расположены на балконе здания и направлены вниз на бетонную плиту под углом $\sim 45^\circ$.

Распыление водяного пара осуществляли с использованием генератора тумана «Шторм», что показано на рисунке 3.9. Средний размер частиц аэрозоля составлял 5...50 мкм, а высота облака достигала ~ 8 м. Объем жидкости распыленного водяного аэрозоля равнялся 1 литру за ~ 5 минут. Эксперименты проводились в широком диапазоне температур воздуха от -40°C до -10°C . В качестве распыляемой жидкости использовалась дистиллированная вода с минерализацией около 1 мг/кг и температурой $+15...+25^\circ\text{C}$.

Данная методика эксперимента моделирует условия образования сегнетоэлектрического льда 0 в переохлажденном водном аэрозоле над открытой полыней крупных водоемов. На рисунке 3.10 представлена фотография радиометрического комплекса и образованного водного аэрозоля при проведении эксперимента.

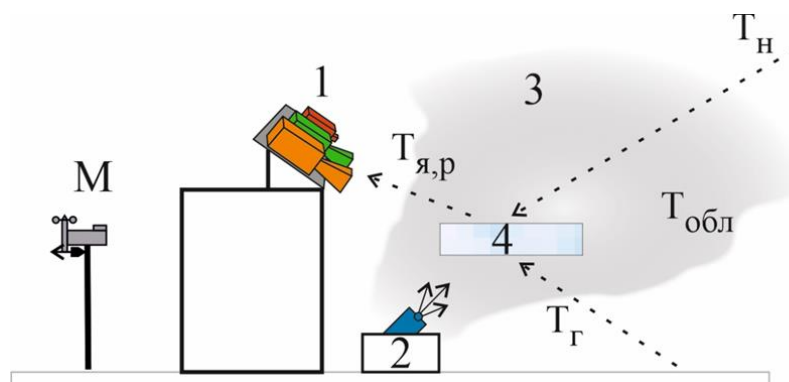


Рисунок 3.9 – Схема экспериментальной установки для исследования водного аэрозоля радиометрическим комплексом в лабораторных условиях. 1 – радиометрический комплекс, 2 – генератор тумана, 3 – облако водного аэрозоля, 4 – пример ожидаемого слоя частиц со льдом 0, $T_{я}$ – измеряемая радиояркостьная температура, T_p – измеряемая радиационная температура, T_n – температура излучения неба, T_r – яркостная температура излучения грунта, М – метеостанция



Рисунок 3.10 – Фотография исследуемого водного аэрозоля радиометрическим комплексом

Радиометрические приемники регистрировали сумму нескольких компонент. В соответствии с геометрией эксперимента радиояркостную ($T_{я}$) и радиационную (T_p) температуры можно представить в следующем виде:

$$T_{я,р} = T_r G + T_{обл} D + T_n S, \quad (3.3)$$

где T_r – яркостная температура излучения земной поверхности, G – коэффициент пропускания облаком тумана излучение земной поверхности, $T_{\text{обл}}$ – термодинамическая температура облака, D – коэффициент излучения, определяемый поглощением и рассеянием в облаке, T_h – яркостная температура фонового излучения из верхнего пространства (атмосферы), S – коэффициент отражения фонового излучения холодной атмосферы, определяемый рассеянием в облаке, в направлении радиометров.

В результате того, что лед 0 является сегнетоэлектриком, коэффициент отражения электромагнитного излучения от среды, содержащего данную модификацию льда, ожидался существенно выше, чем ото льда Ih, с резким его изменением при -23°C .

При увеличении объема образований изо льда 0 в облаке значение S будет повышаться, а значение G – уменьшаться, что, соответственно, должно привести к понижению значения $T_{\text{я}}$ и T_r , регистрируемых радиометрическими приемниками (из-за роста отражения (рассеяния) фонового излучения из верхнего пространства и понижения интенсивности излучения от земной поверхности).

Процесс кристаллизации частиц размером порядка 50 мкм при температурах ниже -20°C занимает менее секунды, не давая им испариться полностью [90]. Из-за очень низкой влажности капля может потерять часть массы (испариться) до и во время замерзания, что может уменьшить конечный размер ледяной частицы, а также она может находиться в переохлажденном состоянии при температурах около -40°C [91]. Поэтому точный расчет радиационных характеристик образования данной среды сложен. Однако регистрация появления льда 0 в тумане будет фиксироваться по особенностям поведения $T_{\text{я,р}}$ вблизи температуры -23°C . На основе данных представлений были выполнены эксперименты по поиску образования льда 0 при конденсации холодных туманов.

3.4.2 Измерения над открытой водной поверхностью оз. Кенон

Исследование теплового излучения тумана над открытой водной поверхностью озера Кенон вблизи сброса теплой воды ТЭЦ-1 в г. Чита было выполнено в зимний период времени 2024-26 гг., когда температура приземного воздуха опускалась до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже [92]. Принципиальная схема принимаемого теплового излучения от водного переохлажденного аэрозоля, в котором ожидали образование льда 0, показана на рисунке 3.11. В результате того, что лед 0 является сегнетоэлектриком, коэффициент отражения электромагнитного излучения от среды, содержащего данную модификацию льда, ожидался существенно выше, чем ото льда Ih.

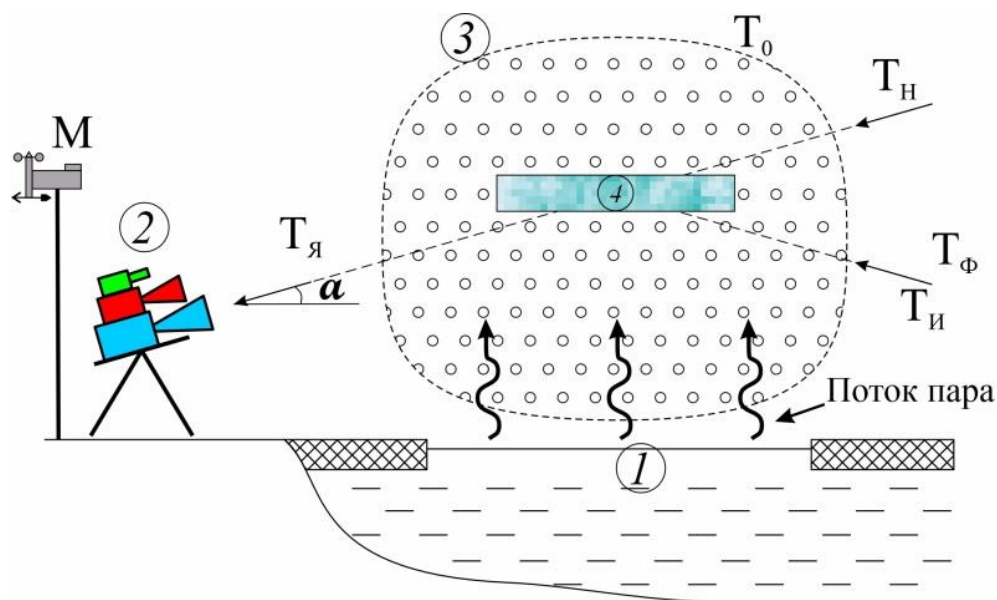


Рисунок 3.11 – Схема экспериментальной установки для поиска льда 0 в тумане. 1 – полынья в ледяном покрове, 2 – комплекс микроволновых и ИК радиометров, 3 – облако жидких частиц тумана, 4 – ожидаемый спорадический слой твердых частиц со льдом 0,

$T_{я}$ – измеряемая радиояркостная температура, T_H – температура излучения неба в направлении антенн радиометров, T_{Φ} – яркостная температура микроволнового фонового излучения из нижнего пространства, $T_{и}$ – радиационная температура в ИК диапазоне из нижнего пространства, М – метеостанция, T_0 – термодинамическая температура облака, α – угол зондирования

Радиометрические приемники регистрировали сумму нескольких компонент, например, для микроволнового излучения радиояркостную температуру можно представить в виде трех слагаемых

$$T_B = \alpha T_S + \varepsilon T_0 + \gamma T_f, \quad (3.4)$$

где α – коэффициент пропускания облака, ε – коэффициент излучения, γ – коэффициент отражения от облака фонового излучения.



Рисунок 3.12 – Фотография радиометрического комплекса в один из моментов проведения измерений собственного теплового излучения переохлажденного водного аэрозоля

При увеличении объема образований из льда 0 в воздушной среде значение γ будет повышаться, что, соответственно, должно привести к увеличению значения радиояркой температуры, принимаемого радиометрическими приемниками (из-за роста отражения фонового излучения).

Радиометрические измерения выполнялись на длинах волн теплового ИК, 3 мм, 8 мм 1,35 см и 2,3 см. Все измерения на вертикальной поляризации. Фотографии радиометрических приемников показаны на рисунке 3.12. Температура воздуха определялась с использованием термодатчика фирмы Agilent. Проводились калибровки радиометрической аппаратуры по небольшим эталонам черного тела, имеющего различные температуры (окружающего воздуха и температура в салоне автомобиля). Точность калибровки порядка градуса Кельвина.

Сложность регистрации льда 0 заключается в том, что он образуется при температурах (T_m) ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, т.е. из глубоко переохлажденной воды. При этом требуется либо быстрый отвод теплоты фазового перехода, либо температура воды должна быть существенно ниже, т.к. образец может

заметно нагреваться. Согласно данным работы [93], в случае существования метастабильных форм кристаллов при температурах ниже T_m , приближенное значение начала перехода переохлажденного расплава соответствует температуре T_x по формуле $(T_m - T_x) \geq (T_1 - T_m)$, где T_1 температура фазового перехода для основных состояний. Для образования льда 0 из представленного неравенства и значения $T_1 = 273$ К получаем: $T_x \leq (2T_m - T_1) = 227$ К или -46°C . Это значение близко к известной температуре на линии Видома, исходящей из второй критической точки воды, при атмосферном давлении. На этой линии имеют место сильные флуктуации энтропии и плотности воды, поэтому можно предположить, что фазовое превращение глубоко переохлажденной воды в лед 0 может возникать при более низкой температуре. Но как отмечалось выше, для этого необходим быстрый отвод теплоты (при фазовом переходе первого рода). С другой стороны такой переход возможен для капель жидкости малых размеров, для которых площадь поверхности по отношению к объему пропорциональна $1/r$, т.е. возрастает с уменьшением радиуса капли воды (r). В этом случае ускоряется процесс установления температуры частицы. Для взвешенных в холодном воздухе частиц и достаточной влажности имеет место благоприятная возможность превращения пара в лед 0 на частицах пыли или кристаллах льда Ih с размерами $\sim$ микрон и нанометров, что также определяется достаточным для проявления эффекта рассеяния толщиной слоя льда 0 порядка 1 нм.

На основе данных представлений были выполнены эксперименты по обнаружению образования льда при конденсации холодных пересыщенных паров воды в водных аэрозолях (туманах). Туманы нередко образуются в зимний период времени при низких температурах воздуха над незамерзающей поверхностью воды. Это могут быть крупные реки с быстрым течением, например, вблизи ГЭС г. Красноярск. Там в зимнее время года на р. Енисей ниже ГЭС река не замерзает. В морозы она начинает

парить, все затягивает туманом, а деревья покрываются толстым слоем инея. Еще одним примером могут служить водоемы, куда сбрасывают теплую воду, используемую на ТЭЦ, а также некоторые природные образования. Для последнего случая можно привести пример – Великая Сибирская полынья, изучение которой является актуальной задачей из-за ее связи с активным использованием Северного морского пути, а также из-за открытия новых месторождений нефти и газа в Арктике.

3.4.3 Измерения приземного ледяного тумана

В декабре-феврале 2023-24 гг. был проведен эксперимент по исследованию микроволновых характеристик атмосферы, а также измерения радиотеплового излучения свежеснегавшего снега [94]. На экспериментальной площадке Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН в г. Чита был установлен радиометрический комплекс, состоящий из микроволновых радиометров на длины волн 1,35 см, 0,88 см с шириной диаграммы направленности антенн $\sim 10^\circ$, а также радиометр теплового инфракрасного диапазона (8...14 мкм) с шириной диаграммы направленности объектива $\sim 6^\circ$. Исследование мощности собственного теплового излучения атмосферы проводилось с использованием вращающегося зеркала, методика использования которого представлена в работе [95].

Применение данного метода позволяет через заданный промежуток времени проводить калибровку радиометрических приемников по эталону абсолютно черного тела. На рисунке 3.13 представлена схема экспериментальной. В ходе проведения эксперимента калибровка проводилась два раза в сутки. В дальнейшем вращающееся зеркало останавливалось при значении угла 30° от вертикали, для того, чтобы радиометрические приемники регистрировали мощность собственного

теплового излучения атмосферы. Данная методика позволяет осуществлять непрерывные измерения в течение длительного промежутка времени и выявлять электрофизические аномалии, возникающие в атмосфере, в том числе во время выпадения осадков.

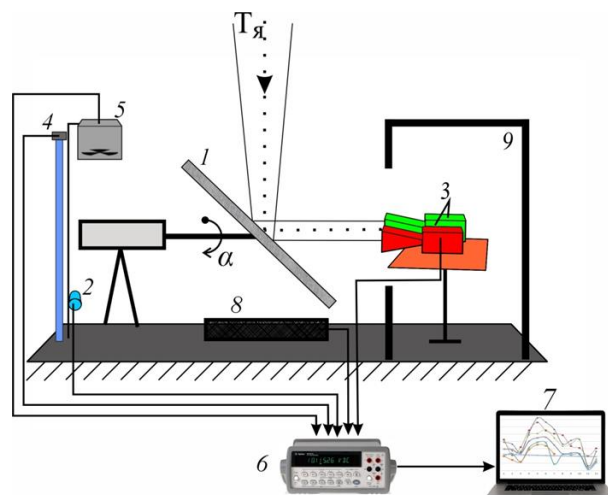


Рисунок 3.13 – Схема установки. 1 – вращающееся зеркало-отражатель, 2 – измеритель влажности, 3 – радиометрические приемники, 4 – термопарный измеритель, 5 – электростатический флюксметр, 6 – система сбора данных, 7 – персональный компьютер, 8 – эталон абсолютно черного тела, 9 – защищенное от атмосферных осадков помещение, $T_{я}$ в данной методике – температура теплового излучения атмосферы

В результате проведения эксперимента была определена радиояркостьная температура ($T_{я}$) атмосферы. Для полубесконечной среды значение $T_{я}$ определяется по формуле (3.4):

$$T_{я} = \varepsilon T, \quad (3.5)$$

где T – эффективная температура, ε – коэффициент излучения однородной по глубине среды.

Для атмосферы радиометр регистрирует относительно холодное реликтовое космическое излучение ($\sim 2,7$ K), а также собственное излучение атмосферы. В результате радиояркостьная температура будет зависеть от большего числа факторов, что представлено в формуле (3.6) [96]:

$$T_{я} = (1 - A)[T^{\uparrow}(\theta) + T_s \varepsilon_{v,h}(\theta) e^{-\tau_{\alpha}(\theta)} + T_m^{\downarrow}(\theta) R_{v,h}^*(\theta) e^{-\tau_{\alpha}(\theta)}], \quad (3.6)$$

где A – альбедо атмосферного слоя, $T^{\uparrow}(\theta)$ – яркостьная температура восходящего излучения атмосферы в направлении зенитного угла θ , $T_m^{\downarrow}(\theta)$ –

усредненная по углу, с учетом рассеяния на поверхности, яркостная температура переотраженного нисходящего излучения атмосферы, T_s – температура подстилающей поверхности, $\alpha_{v,h}(\theta)$ – коэффициент излучения поверхности, зависящий от частоты, зенитного угла, степени шероховатости и поляризации, $\tau_\alpha(\theta)$ – полное ослабление в слое атмосферы, $R_{v,h}^*(\theta)$ – эффективный коэффициент отражения поверхности.

Таким образом, на мощность радиотеплового излучения при безоблачной атмосфере влияние оказывает преимущественно ледяной туман (особенно при его появлении). В случае образования сегнетоэлектрического льда 0 в данной структуре, будет регистрироваться выросшее значение T_γ в результате отражения от аэрозоля (диэлектрических частиц, на поверхности которых образовался лед 0) излучения земной поверхности.

3.4.4 Измерения приземного замерзающего тумана

Были проведены измерения приземного замерзающего тумана [97]. Для этого на некоторой высоте от земной поверхности в центре г. Чита был установлен радиометрический комплекс, состоящий из микроволнового радиометра на частоту 34 ГГц, с флуктуационной чувствительностью при постоянной времени 1 с $\sim 0,2$ К, с ориентированной в зенит антенной и инфракрасного (ИК) радиометра, принимающего собственное вертикально падающее тепловое излучение в диапазоне длин волн 8...14 мкм. Чувствительность ИК-радиометра составляла 0,02 К при постоянной времени 1 с. Фотография радиометрического комплекса представлена на рисунке 3.14.

Для регистрации облачности проводились измерения освещенности с использованием люксметра, который состоял из фотоприемника на основе фотоэлемента Ф55С. Фотоприемник был установлен в тубус с черными поглощающими стенками с целью фиксации основного потока излучения в видимом диапазоне в ограниченном телесном угле. Также производилась

запись температуры воздуха в районе точки исследований. Все экспериментальные данные фиксировались через систему сбора данных фирмы «Agilent». Калибровку радиометров осуществляли с использованием двух эталонов черных тел, имеющих различную термодинамическую температуру.



Рисунок 3.14 – Фотография радиометрического комплекса при исследовании зимней атмосферы, установленной в центре города Чита

Параметры атмосферы по высоте использовались из доступных данных метеорологических зондов, которые в городе Чита запускаются два раза в сутки. Расстояние от места его запуска до точки измерений теплового излучения атмосферы составляет порядка 7 км. Также использовался архив данных метеопараметров атмосферы на метеорологической станции, расположенной на расстоянии около 10 км от места измерений в пос. Кадала (район аэропорта города Чита).

3.5 Методика исследования серебристых облаков

В работе [64] была высказана гипотеза об особых электромагнитных характеристиках ледяных частиц нанометровых размеров, составляющих серебристые мезосферные облака. Для подтверждения данной гипотезы с 2019 года в весенне-летний период проведены радиометрические измерения атмосферы по методике, предложенной в работе [63], в с. Преображенка на отрогах Яблонового хребта на высоте 940 м от уровня моря в 30 км от г. Чита (52° N, $113^{\circ}30'$ E, Россия, Забайкальский край), при ориентации антенн на

северо-запад (рис. 3.15). В различные годы использовали длины волн 7,5 см, 2,3 см, 1,5 см, 0,88 см, 0,3 см и 0,24 см. Ширина диаграмм направленности антенн $\sim 1...3^\circ$. Направления осей антенн радиометров совпадали в пределах 2 градусов. Флуктуационный порог чувствительности радиометров для длин волн 0,3-2,4 см не хуже 0,2 К, а для длины волны 0,24 см и 7,5 см – 0,5 К при времени интегрирования 4 с. Точность абсолютных измерений приращения радиояркой температуры 1 К.

Наблюдения проводили в дни с незначительной облачностью. Отличить появление серебристых облаков от облачных образований в тропосфере и стратосфере, как отмечено выше, можно по приблизительно одинаковым приращениям радиояркой температуры мезосферных облаков на различных длинах волн. Для облачных образований в тропосфере приращение радиояркой температуры для коротковолнового участка спектра, в сравнении с длинноволновым значительно больше. Такие случаи исключали из рассмотрения.

В 2024 году комплекс приборов включал в себя радиометр с параболической антенной и приемниками на длины волн 2,3 см, 1,5 см, 0,88 см, 0,3 см, а также радиометр с рупорной антенной на длину волны 0,3 см [98]. Радиометрические приемники были направлены практически на Север под углом $\sim 10^\circ$ к горизонту (рис. 3.16). Такое расположение позволило в случае появления на небе серебристых облаков зарегистрировать рассеянное излучение Солнца, находящегося ниже горизонта.

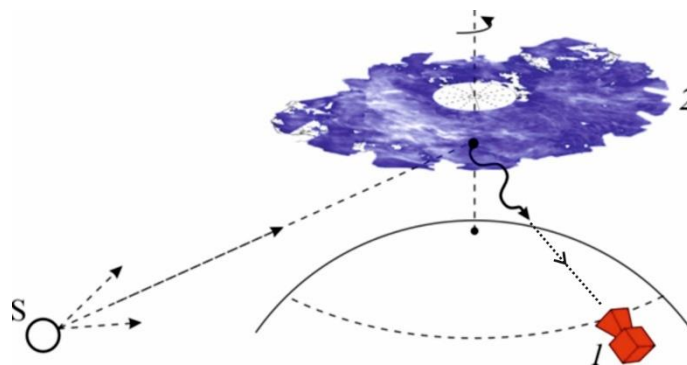


Рисунок 3.15 – Схема экспериментальной установки для наблюдения рассеяния теплового излучения Солнца (S) серебристыми облаками. 1 – микроволновые радиометры, 2 – серебристые облака. Метод наблюдения предложен в [63]



Рисунок 3.16 – Фотография экспериментальной установки для наблюдения за серебристыми облаками. Приборы смонтированы в с. Преображенка (Забайкальский край)

3.6 Методика исследования различных криосферных образований

3.6.1 Электромагнитные характеристики растительности

Для поиска сегнетоэлектрического льда 0 в различных природных средах, включая деревья и кустарники, были выполнены следующие натурные измерения.

А) На территории стационара ИПРЭК СО РАН в с. Преображенка были установлены радиометрические приемники на длину волны 2,3 см и 5,6 см под углом 45° к вертикали с постоянной времени 1 с. Они принимали собственное тепловое излучение трех близко расположенных елей на фоне холодного неба (рис. 3.17).

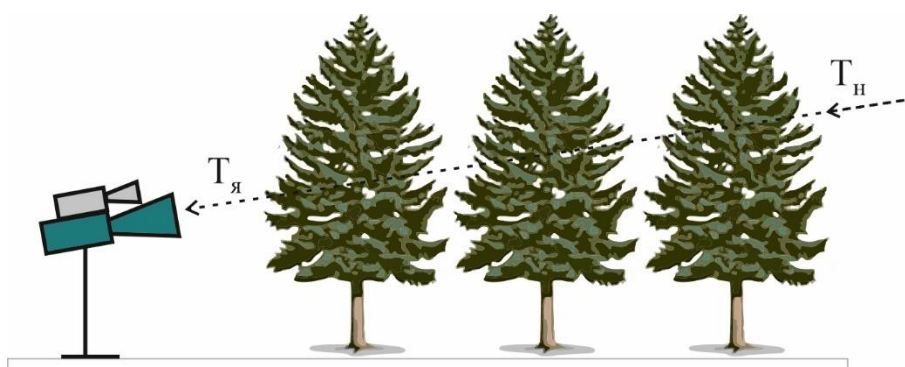


Рисунок 3.17 – Схема установки для исследования собственного теплового излучения елей с помощью радиометрических приемников на длины волн 2,3 см и 5,6 см

Измерения проводились на вертикальной поляризации. Расстояние между ближайшей елью и приборами составляло около 5 метров. На рисунке 3.18 представлена фотография установки для радиометрических измерений мощности собственного теплового излучения елей.



Рисунок 3.18 – Радиометрические приемники на длину волн 2,3 см и 5,6 см для исследования собственного теплового излучения елей

Б) Также на территории Института в черте города были проведены измерения электромагнитных характеристик кустарников при их просвечивании. Для этого были установлены генераторы электромагнитного излучения на длину волны 2,3 см и 0,88 см и радиометры на аналогичные длины волн.

Расстояние между приборами составляло 40 метров. Излучение и прием осуществлялся на вертикальной поляризации. На рисунке 3.19 представлены фотографии приборных комплексов в экспериментах по просвечиванию.

Между деревьями на высоте от земной поверхности 210 см была установлена метеостанция, которая осуществляла запись температуры, влажности, скорости ветра и атмосферного давления.

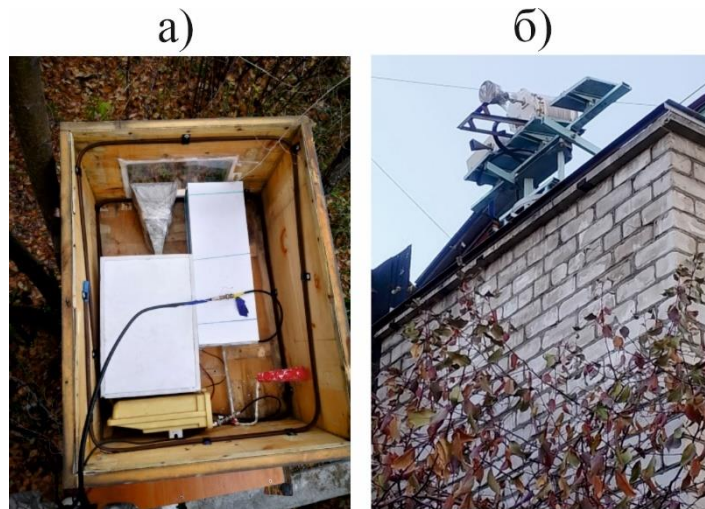


Рисунок 3.19 – а) Генераторы и б) радиометрические приемники, установленные для регистрации прохождения электромагнитного излучения сквозь кустарники

Данные методики позволяют наблюдать за изменением электромагнитных характеристик деревьев и кустарников. В работе [64] были выполнены лабораторные исследования для хвои и древесины веток отдельно. Было установлено, что аномалии гистерезиса потерь соответствуют древесине веток, а не хвое. Предполагается, что эта особенность связана с образованием в древесине сегнетоэлектрического льда 0, на границах которого с материалом тканей появляются слои с высокой проводимостью. Эти слои приводят к росту экстинкции ветвей кустарника.

3.6.2 Измерения града и снега

Для исследования атмосферных процессов в городе Чита, в частности, выпадения осадков в виде града, были выполнены измерения на установке, схема которой приведена на рисунке 3.20 [99,100]. Измеряли вертикальную составляющую атмосферного электрического поля приземного слоя, температуру и влажность воздуха и тепловое излучение снега на металлическом листе. Установка располагалась в центре города на территории ИПРЭК СО РАН.

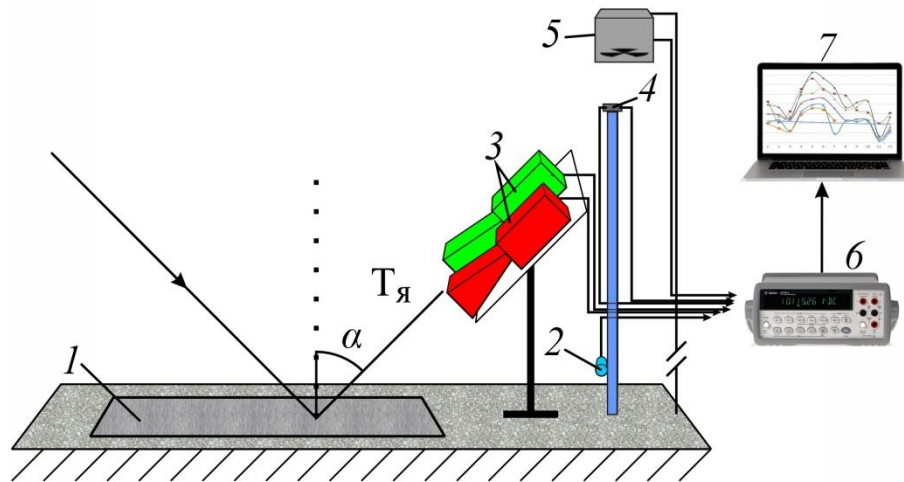


Рисунок 3.20 – Схема измерительной установки для исследований атмосферных явлений в г. Чита. 1 – лист металла, 2 – измеритель влажности, 3 – радиометрические приемники, 4 – термопарный измеритель, 5 – электростатический флюксометр, 6 – система сбора данных, 7 – персональный компьютер

Измерение вертикальной составляющей электрического поля атмосферного приземного слоя осуществлялось с использованием электростатического флюксометра, разработанного в ИПРЭК СО РАН [101]. Способ измерений и калибровка прибора описана более подробно в работе [102].

Измерение влажности воздуха осуществлялось с использованием датчика влажности НН-4000. Датчик устанавливался на высоте 10 см от земной поверхности. Температура воздуха измерялась на высоте 150 см от земной поверхности с использованием термопарного измерителя типа J.

Измерение собственного теплового излучения в микроволновом диапазоне на длинах волн 0,88 см и 1,35 см выполнялись с использованием радиометрических приемников. Калибровка радиометров осуществлялась по эталонам черного тела, имеющих различные термодинамические температуры. Во избежание попадания осадков в антенны радиометров исследовали отраженное излучение атмосферы от металлического листа расположенного на горизонтальной поверхности. Угол наблюдения составлял 45° . В результате получали значения радиоярких температур

атмосферы (T_H). Все показания от приборов фиксировались на систему сбора данных фирмы Agilent.

Для измерения радиотеплового излучения свежевывавшего снега использовалась измененная схема, приведенная на рисунке 3.20, но в ней убирался лист металла. В этом случае радиометрическими приемниками измеряли собственное тепловое излучение плиты из бетона, толщина которой составляла около 15 см. Ниже плиты расположена песчаная смесь. Калибровка радиометров в данном случае осуществлялась по эталону черного тела и отраженному тепловому излучению от металлического листа безоблачной атмосферы с низким содержанием паров воды.

Данные методики позволяют осуществлять непрерывные измерения в течение длительного промежутка времени и выявлять электрофизические аномалии, возникающие в атмосфере во время осадков. Особенностью климата в Забайкальском крае является тот факт, что в зимний период времени выпадает небольшое количество снежных осадков [103].

Выводы по главе.

1. Представлены новые методики исследования льда 0. Методики основаны на изменениях электромагнитных характеристик ледяных структур, образующихся в лабораторных и природных условиях, при возникновении в среде плазмонного резонанса. В этом случае в мерзлых средах усиливается экстинкция, что принципиально позволяет выявить малые концентрации льда 0, которые не обнаруживаются стандартными методами исследования вещества.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПОИСКУ ЛЬДА 0 И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В данной главе представлены полученные результаты по поиску сегнетоэлектрической модификации льда – лед 0 в различных криосферных образованиях при отрицательных температурах ниже -23°C . Данные показывают, что эта новая модификация влияет на радиотепловое излучение объектов, изменяя значение радиояркостной температуры в некоторых случаях на десятки Кельвинов.

4.1 Результаты исследования различных увлажненных нанопористых сорбентов

По результатам поиска сегнетоэлектрического льда 0 по методике, представленной на рисунке 3.1, в увлажненном аморфном диоксиде кремния были получены следующие результаты, которые показаны на рисунке 4.1. Было проведено несколько экспериментов с различной степенью увлажнения материала. Для эксперимента 21 апреля 2025 года весовая влажность диоксида кремния была равна 42%, а в эксперименте 24 апреля 2025 года использовали материал с влажностью 25%.

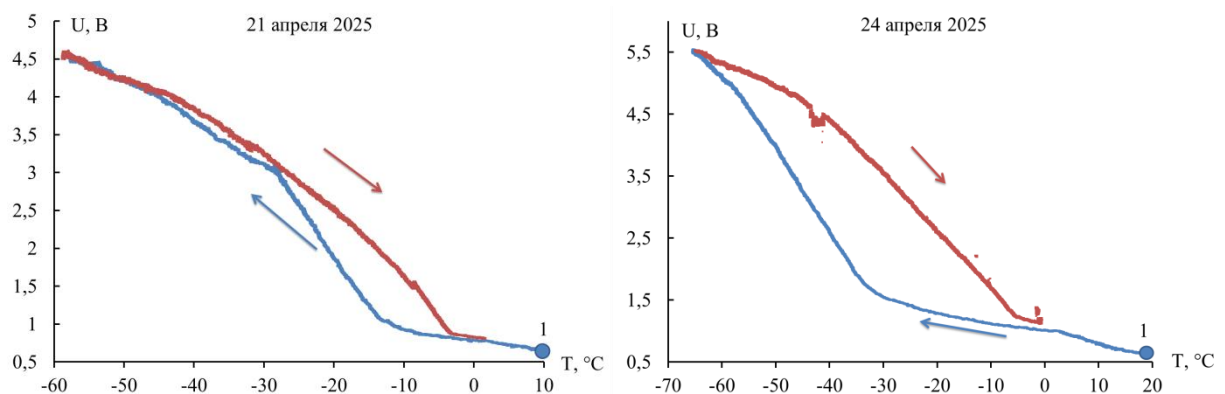


Рисунок 4.1 – Изменение отраженной мощности микроволнового излучения от кюветы со средой из увлажненного диоксида кремния в зависимости от температуры образца при ее циклическом изменении в единицах напряжения на выходе радиометра. Стрелками отмечено изменение температуры от времени. 1 – начало измерений

В представленных экспериментах наблюдается гистерезис отраженной мощности при циклическом охлаждении-нагревании образца в климатической камере, что нами связывается с образованием сегнетоэлектрического льда 0 при температурах ниже -23°C . Его образование приводит к росту ϵ и появлению неоднородности отраженного сигнала на участке кривых при одинаковой температуре среды.

По результатам проведенных экспериментов по измерению амплитуды низкочастотных шумов наблюдаются особые аномалии при температурах ниже -23°C в двух низкочастотных каналах, что связывается с образованием новой модификации льда – лед 0. Ниже приведены графики усредненных значений амплитуды напряжения шумов различных нанопористых увлажненных порошков в полосе частот $0,5...80$ кГц и в полосе частот $1...70$ Гц на выходе усилителя в зависимости от температуры в цикле охлаждение-нагревание среды.

28 мая 2025 года был исследован мезоструктурированный силикатный материал типа МСМ-41, который имеет цилиндрические поры с диаметром $3,5$ нм. Весовое увлажнение данного порошка составило значение 90% . В эксперименте наблюдается температурный гистерезис, что характерно для сегнетоэлектрических материалов (рис. 4.2). Данный гистерезис наблюдается в интервале температур $-20...-60^{\circ}\text{C}$.

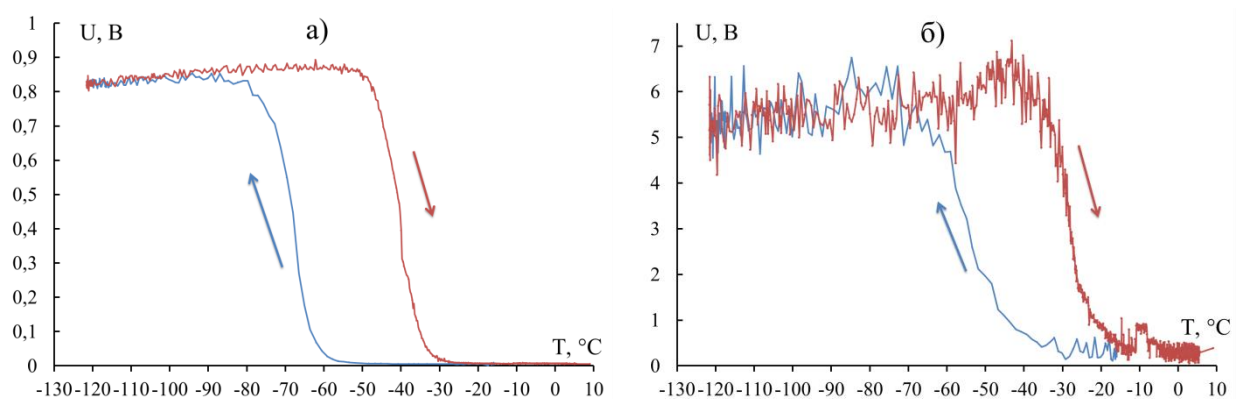


Рисунок 4.2 – Значение напряжения амплитуды низкочастотных шумов мезопористого мезоструктурированного силикатного материала МСМ–41 при весовой влажности 90% .

а) $1...70$ Гц б) $0,5...80$ кГц. Стрелки указывают направление процесса изменения температуры от времени

Данный результат нами связывается с образованием сегнетоэлектрического льда 0 при температурах ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ и его переходом в лед Ih выше этой температуры. Гистерезис наблюдался и в других экспериментах с изменением влажности образца, а также для других типов порошка.

Так, например, 01 июля 2025 года в качестве образца использовался аморфный диоксид титана (TiO_2). Весовая влажность порошка в данном эксперименте составляла 5%. В эксперименте в каналах $1\ldots 70\text{ Гц}$ и $0,5\ldots 80\text{ кГц}$ при нагревании образца температуре около $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается увеличение значения амплитуды напряжения низкочастотных шумов, что видно на рисунке 4.3. Такое поведение также связывается с образованием льда 0, ведь для него возможна скачкообразная перестройка электрической доменной структуры при изменении внешних параметров – давления, температуры, внешних полей.

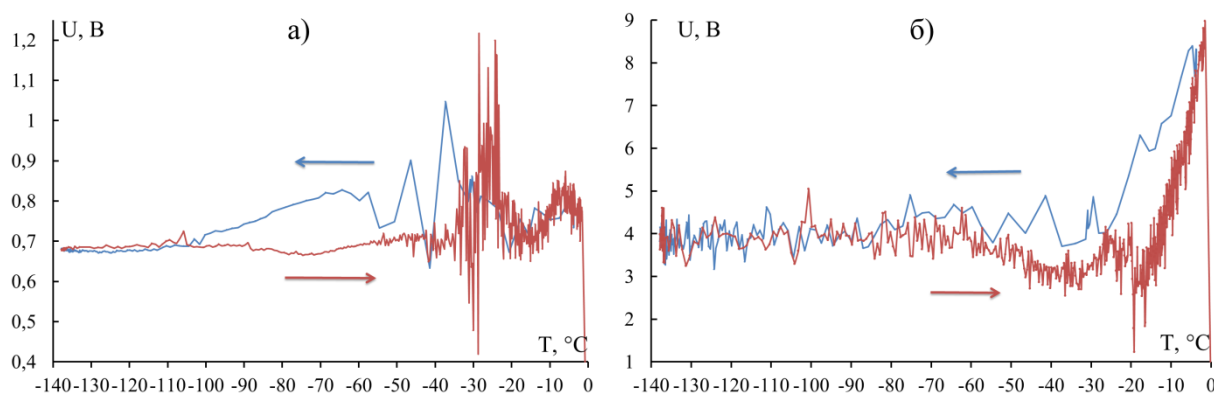


Рисунок 4.3 – Значение амплитуды напряжения низкочастотных шумов аморфного диоксида титана при весовой влажности 5%. а) $1\ldots 70\text{ Гц}$ б) $0,5\ldots 80\text{ кГц}$. Стрелки указывают направление изменения температуры во времени

При использовании мезопористого силикатного сорбента SBA-15, весовая влажность которого образца в эксперименте составила 145% были получены следующие графики. В эксперименте наблюдался гистерезис низкочастотных шумов с температурными границами, характерными для образования льда 0, а также увеличение значения их напряжения вблизи температуры $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.4).

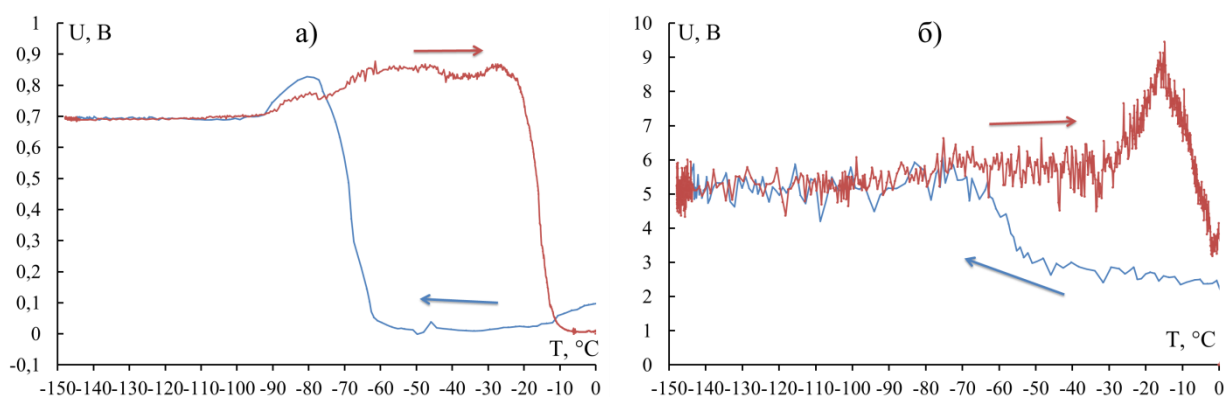


Рисунок 4.4 – Значение напряжения низкочастотных шумов упорядоченного мезопористого материала SBA-15 при весовой влажности 145%. а) 1...70 Гц б) 0,5...80 кГц. Стрелки указывают направление изменения температуры во времени

В другом эксперименте с SBA-15 увлажнение порошка достигало 352%. По результатам, которые представлены на рисунке 4.5 видно, что на частоте 1...70 Гц при нагревании при температуре -23°C наблюдается увеличение значения амплитуды шумов. На частотах 0,5...80 кГц в диапазоне $-40^{\circ}\text{C} \dots -18^{\circ}\text{C}$ также наблюдается увеличение значения амплитуды шумов. Более сложное поведение данной среды определяется тем, что в ней, кроме поровой воды имеется некоторое количество межзеренной воды. Тем не менее, появление сегнетоэлектрического льда хорошо просматривается на графиках зависимости низкочастотных шумов от температуры.

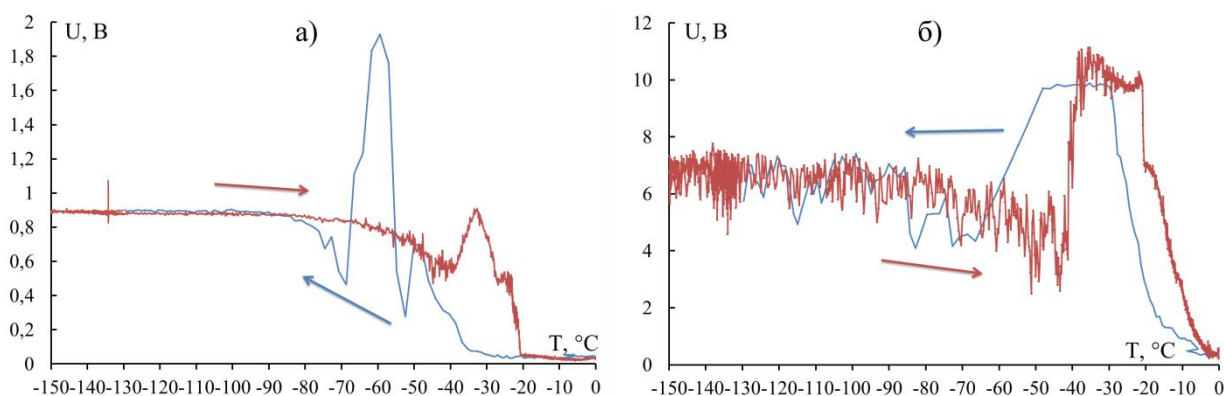


Рисунок 4.5 – Значение напряжения низкочастотных шумов упорядоченного мезопористого материала SBA-15 при весовой влажности 352%. а) 1...70 Гц б) 0,5...80 кГц. Стрелки указывают направление изменения температуры во времени

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. При циклическом охлаждении-нагревании увлажненного образца нанопористого сорбента наблюдается температурный гистерезис амплитуды низкочастотных шумов, что нами связывается с образованием сегнетоэлектрического льда 0 при температурах ниже -23°C .

2. Измерение собственных низкочастотных шумов различных увлажненных нанопористых порошков показывает возможность выявлять аномалии структуры холодной воды при отрицательных температурах. Полученные данные доказывают образование сегнетоэлектрической модификации льда.

4.2 Результаты измерений с использованием резонаторного метода

Результаты измерений ϵ града в микроволновом диапазоне в первые сутки его существования и через трое последующих суток приведены на рисунке 4.6, 4.7 [86]. Характерной особенностью графиков является гистерезис ϵ' и, особенно, ϵ'' . В наибольшей степени это заметно для града в первые сутки его существования. На четвертые сутки наблюдали существенно меньшее проявление гистерезиса. Следует отметить, что ϵ'' (фактор потерь) возрастал в зависимости от температуры при охлаждении образца. Высокое ϵ'' имело место и при последующем его нагревании (рисунок 4.6 б). Также наблюдали сильные флуктуации ϵ'' , при нагревании образца. Измерения выполнены вблизи частоты 4,4 ГГц.

Данное сложное поведение можно объяснить появлением льда 0 при охлаждении пленок переохлажденной воды в градинах и неустойчивостью электрической структуры модификации льда при ее дальнейшем нагревании.

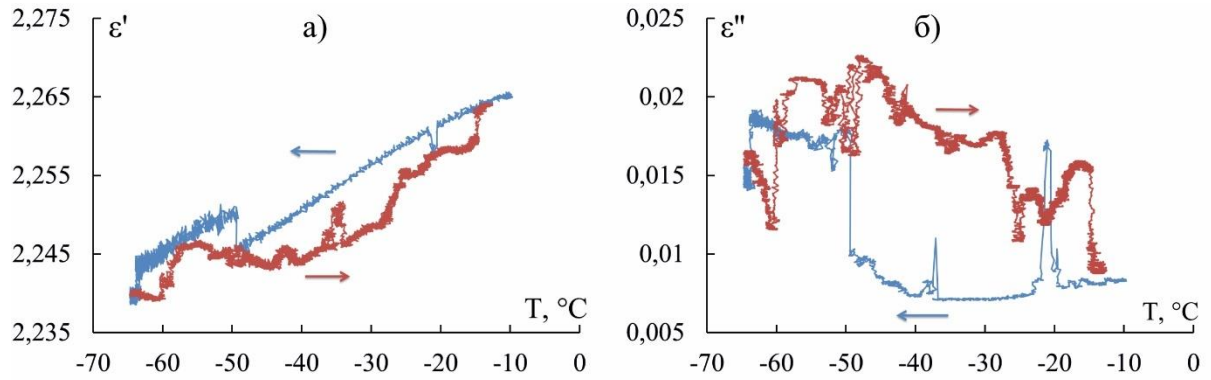


Рисунок 4.6 – Зависимости ϵ' (а) и ϵ'' (б) материала града от температуры при ее циклическом изменении. Измерение после 18 ч хранения града в холодильнике при температуре -15°C . Стрелки показывают направление изменения температуры

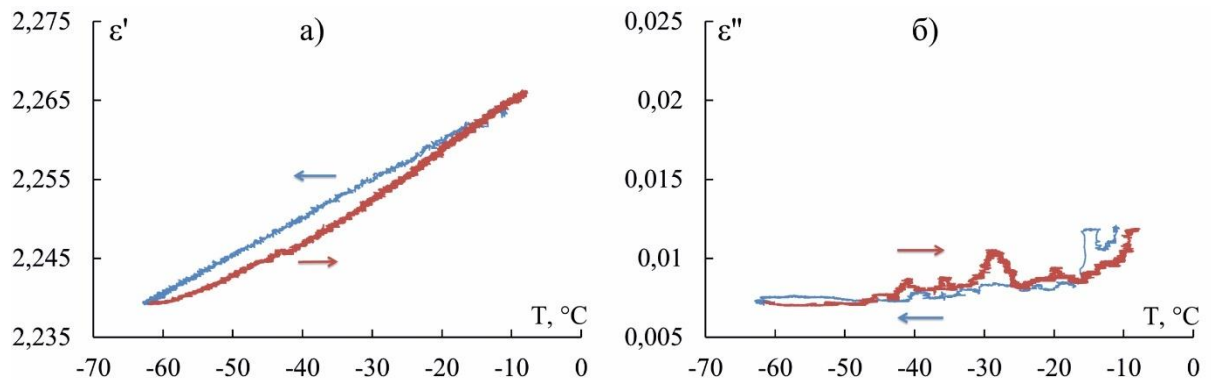


Рисунок 4.7 – а) Зависимость ϵ' от температуры, б) зависимость ϵ'' от температуры. Измерения после трех суток хранения образца града в резонаторе при температуре -15°C . Стрелки показывают направление изменения температуры

Для оценки объемной доли компонента, обладающей металлическими свойствами, можно использовать формулу (4.1) для ϵ' смеси диэлектрика и мелких металлических частиц [104]:

$$\epsilon'_{\text{см}} = \frac{\epsilon'_{\text{лед}}}{(1-y)^3}, \quad (4.1)$$

где $\epsilon'_{\text{см}}$ – диэлектрическая проницаемость смеси, y – объемная концентрация проводящих частиц, $\epsilon'_{\text{лед}}$ – диэлектрическая проницаемость чистого льда Ih. При температуре около -50°C ϵ' скачком возросла на 0,005. Этому приращению соответствуют $y = 1 - \sqrt[3]{\epsilon'_{\text{лед}}/\epsilon'_{\text{см}}} \approx 5 \cdot 10^{-5} \Rightarrow 5 \cdot 10^{-3}\%$, где

$$\epsilon'_{\text{см}} = 3,15 + 0,005, \text{ т.к., } \epsilon'_{\text{льда}} = 3,15.$$

Отсюда можно найти площадь поверхности наноразмерных пор на 1 г льда, полагая диаметр пор ~ 3 нм, что приблизительно соответствует температуре замерзания воды в них вблизи -50 °С [105]. Кроме того, считаем, что поры сферические и весь объем поры – лед 0 (т.к. в случае проводящей оболочки весь объем с точки зрения потерь, практически, эквивалентен проводящей частице) [15].

Относительный объем льда 0 в объеме образца льда в граде можно найти по формуле (4.2):

$$y = \frac{N(4/3)\pi r^3}{V}, \quad (4.2)$$

где V – полный объём; r – радиус включения; N – число включений из льда 0. Поскольку площадь поверхности включений в единице объема: $S = N4\pi r^2$, то и $y = \frac{Sr}{3V}$.

Отсюда $S = \frac{3yV}{r} = \left| \begin{matrix} r = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ м} \\ V = 1 \text{ м}^3 \end{matrix} \right| = \frac{3 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \text{ м}^3}{1,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}} = 10^5 \text{ м}^2/\text{тонну} = 0,1 \text{ м}^2/\text{г}$.

Полученное значение S в 1 грамме вещества градины невелико по сравнению с площадью поверхности пор сорбентов (например, для силикагеля КСКГ – $200 \text{ м}^2/\text{г}$), однако составляет достаточную величину для ее регистрации микроволновым методом.

В настоящее время стало общепринятым представление образования в атмосфере, а также в пористых средах штабелированного льда Isd [106]. Разнообразие структуры такого льда, состоящей из смеси льдов Ih и Ic, связано как с особенностями кристаллической структуры модификаций льда, так и с нарушением симметрии окружающей среды (принцип Кюри) [107].

На основе выполненного нами эксперимента можно предположить, что в состав льда Isd может входить недавно открытый лед 0. Такая возможность существенно расширяет круг допустимых физико-химических характеристик ледяных частиц в различных областях атмосферы. При медленном

замерзании переохлажденной воды температура образования льда 0 составляет $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ при атмосферном давлении. Однако характерные температуры появления льда 0 в составе льда Isd или при конденсации паров на пылевых частицах приблизительно составляют $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \dots -140\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Зная полученные экспериментальные диэлектрические проницаемости и средний размер свежеснежавшего града можно определить эффективность экстинкции от подобных ледяных частиц на частоте 4,4 ГГц. На рисунке 4.8 приведена зависимость эффективности экстинкции от размера частиц града, если бы они были сферическими. Расчеты показали: ледяные частицы с содержанием льда 0 поглощают и рассеивают излучение вдвое сильнее (по показателю экстинкции), чем частицы без льда 0.

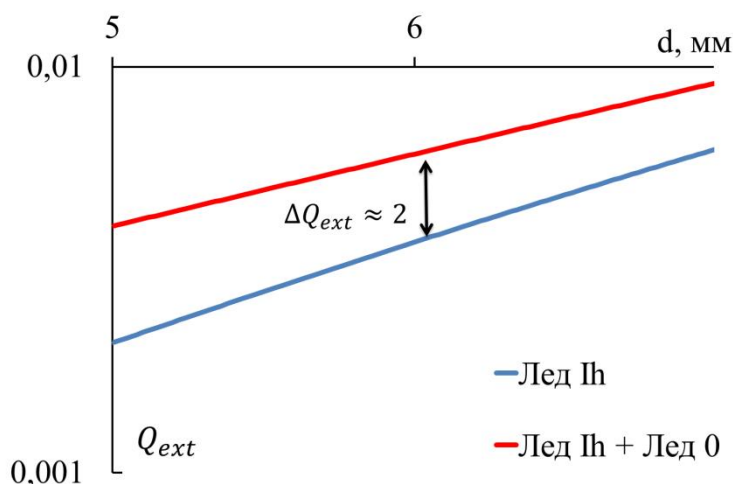


Рисунок 4.8 – Зависимость коэффициента эффективности экстинкции от размера частиц града

Теоретические предположения о появлении в составе льда Isd льда 0 было исследовано в недавней работе [108]. В ней было показано, что лед 0 предпочтительно образуется в небольших плоских кластерах с содержанием молекул менее 40. В более крупных кластерах предпочтительно образуются льды Ih и Ic. Поэтому, хотя концентрация льда 0 в ледяных структурах может быть невелика, однако, из-за его сегнетоэлектрических свойств, в среде Isd могут возникать слои с высокой электропроводностью. Наличие таких «металлических» слоев нанометрового размеров неправильной формы

приводит к появлению плазмонных эффектов, необычно сильно изменяющих электромагнитные характеристики атмосферного льда [10]. Эти эффекты могут проявляться при образовании льда 0 в общей массе ледяных образований в малых долях процента.

Влиянием льда 0 в атмосферных ледяных частицах можно объяснить известные оптические атмосферные и радиоволновые явления. Одно из них – яркое свечение мелких ледяных частиц, названных «алмазной» пылью. Известно также образование светящихся столбов от фонарей в арктическом регионе, отмеченное при температуре приземного воздуха ниже -20°C . Нарушение укладки (в штабелированном льде) обнаружено в кристаллах с трехкратной вращательной симметрией [109]. Многочисленные изображения атмосферных тригональных ледяных кристаллов встречаются в широком диапазоне атмосферных условий при температуре от -84°C до -5°C и наблюдаются в облаках по всему земному шару [109]. Они были представлены еще в коллекции фотографий [110], где приведено около 6 тысяч разнообразных ледяных кристаллов, обнаруженных Бентли в снеге в период между 1885 и 1931 годами.

Результаты измерений производных по температуре добротности и пропускаемой мощности dQ/dT и dP/dT в зависимости от температуры в процессе нагревания резонатора вблизи частоты 2,8 ГГц от -140°C до положительных температур приведены на рисунке 4.9 [89]. В данном эксперименте использовали осаждение газов из первично заполненного и изолированного от атмосферы объема полости резонатора. Начальное значение температуры равнялось 20°C и относительной влажности (W) в лабораторном помещении $\sim 15\%$. Производные были найдены для медленного процесса нагревания, которое осуществляли при отключении холодильного устройства. Это было сделано для получения плавных зависимостей от температуры и времени, так как при использованной методике охлаждения были возможны некоторые неравномерности

приращения температуры, ухудшающие точность измерений. Такая процедура позволяла также получить большее значение толщины осажденного слоя льда в интересующем диапазоне температур (ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Конденсация паров в начале эксперимента наступала примерно при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Точное значение давления насыщенных паров для льда 0 неизвестно, однако этот лед не мог образоваться при температурах выше $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$.

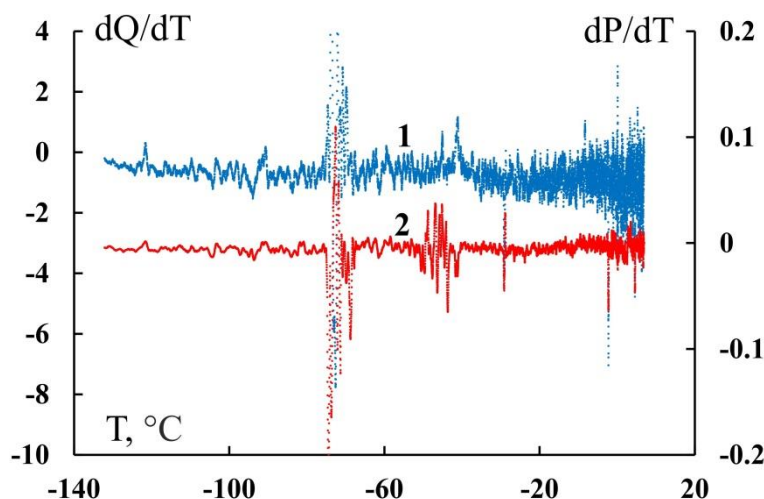


Рисунок 4.9 – Зависимость производных добротности (1) и мощности пропускания резонатора (2) на резонансной частоте от температуры при нагревании. Усреднение производной по 50 точкам. Общее число измеренных точек $\sim 10^4$. (dP/dT – в относительных единицах)

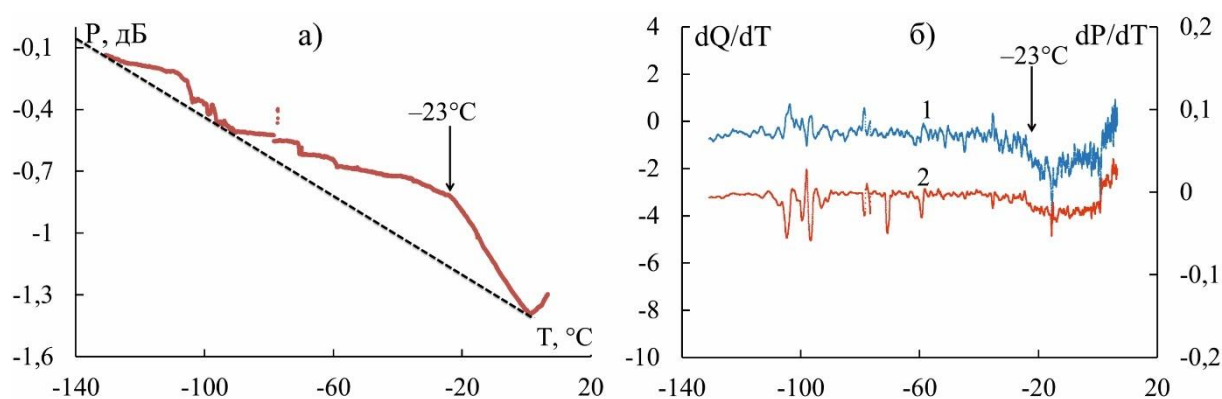


Рисунок 4.10 – а) Зависимость пропускания мощности через резонатор от температуры при его нагревании после продувки резонатора воздухом с исходной влажностью 15 % (при начальной температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Мощность в децибелах от условного уровня. Штриховая линия – то же самое для случая аппроксимации отсутствия газов в резонаторе; б) Зависимость производных добротности (1) и мощности (2) пропускания резонатора на резонансной частоте от температуры. Усреднение производной по 100 точкам. Общее число измеренных точек $\sim 10^4$. (dP/dT – в относительных единицах)

Общая площадь поверхности металла и 13 пластин из кварцевого стекла, использованных в эксперименте, позволяла получить максимальную возможную толщину льда при массе водяного пара $5,5 \times 10^{-4}$ г около десятков нанометров при его равномерном распределении по поверхности пластинок.

Поскольку, как отмечалось выше, ожидали, что на стеклянных пластинках осаждалась более тонкие пленки, чем на металле стенок резонатора, в экспериментах также осуществляли дополнительную подачу воздуха в полость. На рисунке 4.10 приведены данные для этого случая. При относительной влажности воздуха 15% (температура воздуха 20 °С) в полость ввели при помощи компрессора 3 литра воздуха за время 1,5 мин. Добавка паров воды составила 0,0083 г. Дополнительный водяной пар вводили при температуре в резонаторе около –150 °С. Максимальная расчетная толщина слоя льда на поверхности составляла 900 нм. Реальное значение этого слоя на пластинках существенно ниже, так как часть паров могло конденсироваться в подводящей трубке, а также выйти из полости волновода, не успев осадиться на пластинках.

Для сравнения данных при анализе выполнено измерение параметров резонатора с пластинками при его заполнении газообразным азотом. В этом случае наблюдали равномерное изменение мощности пропускания от температуры. Аппроксимация $P(T)$ для случая отсутствия газов в резонаторе приведена на рисунке 4.10 *а* штриховой линией.

При выполнении экспериментов предполагали, что образующийся слой льда 0 создает проводящий слой на границе с диэлектриком нанометровой толщины [8,9]. Это приведет к достаточно выраженному эффекту изменения добротности резонатора и, следовательно, мощности пропускания даже в низкочастотном участке микроволнового диапазона. После заполнения резонатора водяным паром проводимость поверхности резонатора возросла и принимала значение выше меди. При этом эффект поглощения связывается с возрастанием фактора потерь из-за резонанса поверхностных плазмонов в

островковых проводящих пленках. Для возникновения такого состояния пленок необходима толщина порядка 10 нм [15]. Поэтому для заметных изменений добротности достаточно осадить на поверхность кварцевых пленок слой льда Ih толщиной $\sim 10 \dots 100$ нм. Поскольку в эксперименте сложно получить лед Ih , то использовали методику с начальным охлаждением всей системы (пар и подложка), при которой возможно было некоторое первоначальное осаждение пара в виде льда Ih в интервале температур от -5°C и ниже. Однако лед Ih может также образовываться на поверхности льда Ih , что было показано в ранее выполненном эксперименте в работе [111]. Он может также образовываться в объеме льда Ih в виде отдельных кластеров, что было показано в [108].

Рассмотрение результатов на рисунке 4.8, которые соответствуют слою льда на кварцевых стеклах ~ 10 нм, выявляет две особенности в районе несколько ниже -78°C и в области -45°C . В этом эксперименте четких следов, связанных со льдом Ih , не отмечаются. На рисунке 4.10, где осаждали пленки толщиной порядка ста нанометров, напротив, четко выделяется температура -23°C , где наблюдали экстремум возрастания P по сравнению с калибровочным значением (штриховая линия для случая отсутствия водяного пара и углекислого газа в резонаторе). Кроме того, наблюдали скачок мощности при температуре -78°C и некоторое ее возрастание в области -110°C .

Отклонения графиков вблизи -78°C можно связать с процессом фазового перехода твердое тело – газ для двуокиси углерода, который также находится в воздухе и появляется в смеси со льдом. Фазовый переход твердой двуокиси углерода в газ и приводит к некоторым флуктуациям значений в небольшом интервале температур. Более резко эти значения температур проявляются на графиках производных dQ/dT и dP/dT – рисунок 4.10 б. На этом рисунке видно существенное изменение наклона графиков производных при возрастании температуры выше -23°C , что

соответствует переходу сегнетоэлектрического льда 0 в гексагональный лед Ih с исчезновением проводящих пленок нанометровой толщины на границах лед 0 с другими диэлектриками.

Интересно отметить появление отклика резонатора для случая, представленного на рисунке 4.10, при температуре $-105\text{ }^{\circ}\text{C}$ (приблизительно от $-95\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-115\text{ }^{\circ}\text{C}$). Такая особенность также наблюдалась на графиках экстинкции лазерного излучения при прохождении через пленки льда, осажденных на диэлектрике, ранее обнаруженная в [8,9], которая, однако, не была исследована.

Вместе с тем, выяснилось, что в последующей работе [112] при изучении флексоэлектрических явлений – образований зарядов в областях с анизотропией механических деформаций, у льда был обнаружен фазовый переход вблизи $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Был сделан вывод, что электрическая поляризация, вызванная анизотропией деформации, может быть эффективным методом обнаружения фазовых переходов в поверхностных слоях; особенно для сегнетоэлектриков. Наши результаты подтверждают этот вывод.

Следует отметить физические особенности, тонких слоев при конденсации газов, которые были определены в использованной методике выполненных измерений. Наиболее важная – возможность выявления сегнетоэлектрических фазовых переходов в тонких слоях. Фазовый переход вблизи $-105\text{ }^{\circ}\text{C}$ может быть связан с образованием льда XI. Этот лед образуется при температуре ниже $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, однако его зародыши остаются при нагревании образцов до температуры $\sim -120\text{ }^{\circ}\text{C}$, как было представлено в работе [88]. Поскольку концентрация льда XI невелика при высоких температурах, он ранее не был зарегистрирован стандартными методами измерений структуры вещества. Другая важная особенность, проявившаяся в используемом нами методе, – возрастание добротности резонатора, т.е. уменьшение его потерь, при образовании сегнетоэлектрических льдов. Это можно объяснить возникновением высоко проводящих контактных пленок.

Такие явления, связанные с возрастанием электромагнитных полей, изучаются в плазмонике и определяются резонансами плазмонных мод [15, 113, 114]. Примером является гигантское комбинационное рассеяние, когда усиление рассеянных полей группами молекул вблизи специально изготовленных структур может достигать 10^{10} раз [34-36, 115]. Детали этого явления требуют специального исследования. Например, в [116] исследовали влияние перколяционного перехода на сверхтонкие островковые металлические пленки и обнаружили существенные изменения резонанса поверхностных плазмон-поляритонов, а, следовательно, и их электрофизических свойств.

Таким образом, по результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Исследована возможность образования пленки сегнетоэлектрического льда 0 по возникновению проводящего слоя нанометровой толщины на границе льда 0 с диэлектриком. В этом случае ожидали возникновение резонанса плазмонных мод, который проявляется в широком интервале частот, от оптического до микроволнового, по значительному возрастанию поглощения (или рассеяния) излучения.

2. В выполненном эксперименте с микроволновым резонатором вблизи резонансной частоты 2,8 ГГц, в интервале температур $+5...-140$ °С, заполненным кварцевыми пластинками, наблюдали изменение пропускаемой мощности на резонансной частоте и его добротности. В результате измерений были обнаружены характерные изменения данных параметров при температуре -23 °С, что соответствует значению, при котором образуется лед 0.

3. Выполненные измерения подтвердили используемую модель возникновения проводимости в наноструктурах контактных слоев в случае образования осажденных пленок сегнетоэлектрического льда 0. Представляется, что используемая микроволновая методика измерений

применима для исследования особенностей структуры сверхтонких слоев на границах сред при различии их диэлектрической проницаемости, особенно, если одна из них является сегнетоэлектриком.

4. Показано, что лед 0 может образовываться в структуре атмосферного штабелированного льда Isd. Это следует из лабораторного эксперимента по осаждению паров воды на холодную подложку из льда Ih при температурах ниже $-80...-23^{\circ}\text{C}$. Зародыши кристаллов льда 0 могут длительное время (до суток) существовать в составе атмосферных образований из льда Ih при температурах до -10°C , что было показано при микроволновых диэлектрических исследованиях выпавшего града. Этот результат находится в согласии с теоретическими исследованиями, выполненными в работе [108].

5. Возникновение электрической проводимости в нанометровых контактных слоях между льдом 0 и другими модификациями льда приводит к изменению электромагнитных характеристик частиц. Уникальность этих характеристик позволит усовершенствовать методы дистанционного зондирования параметров атмосферы. Примером может быть задача уточнения радиационного баланса земной поверхности, в которой ранее не учитывались особые радиационные характеристики мезосферных серебристых облаков. Другой пример – разработка и уточнение переноса радиоволновых излучений в холодных облаках атмосферы.

6. Представляется, что разработка новой классификации природных ледяных структур на основе энтропийных характеристик мезо- и микроструктур даст количественное описание свойств льда Isd (состоящего из льдов Ih, Ic и льда 0) и лучшее понимание физико-химических явлений в криосфере и атмосфере.

4.3 Измерения экстинкции лазерного и микроволнового излучений в поверхностных пленках льда 0

В настоящем исследовании измерена экстинкция при пропускании видимого и микроволнового излучения через слои льда на диэлектрических пластинках. Экстинкция излучения при просвечивании тонких диэлектрических пластинок с конденсированными на них парами воды при циклическом изменении температур в интервале $-120...+10$ °C выполнялись по методике аналогичной [8]. Относительная влажность в лабораторном помещении при температуре $+20$ °C находилась ниже 20%.

Полученные результаты по измерению экстинкции в микроволновом диапазоне показаны на рисунке 4.11.

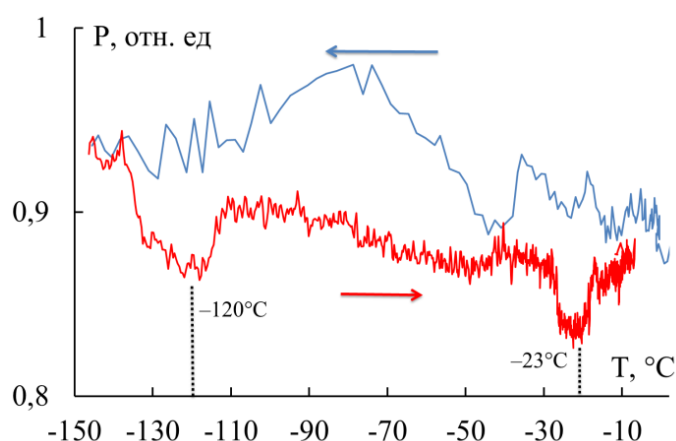


Рисунок 4.11 – Зависимость мощности проходящего излучения в микроволновом диапазоне (0,3 см) через диэлектрическую подложку с осажденным на нее водяным паром от температуры. Стрелки указывают направление изменения температуры

При нагревании на графике наблюдаются две области температур (вблизи -120 °C и -23 °C), в которых значения проходящей мощности отличаются от среднего значения. В [117] установлено, что при температуре около -125 °C лед демонстрирует чистую молекулярную ориентацию, которая приводит к возникновению спонтанной поляризации в пленках льда толщиной в десятки нанометров, сконденсированных на изолирующей диэлектрической подложке, т.е. возможно образуется сегнетоэлектрический лед XI. Вторая область температуры может быть объяснена образованием

сегнетоэлектрического льда 0 и его дальнейшим фазовым переходом в гексагональный лед Ih [5, 10].

При нагревании образцов после охлаждения, наблюдали уменьшение интенсивности излучения, проходящего через подложку с осаждающимся на ней льдом, что видно на рисунках 4.11, 4.12. Резкое падение мощности прошедшего через образец излучения наблюдали при температурах ниже -23°C .

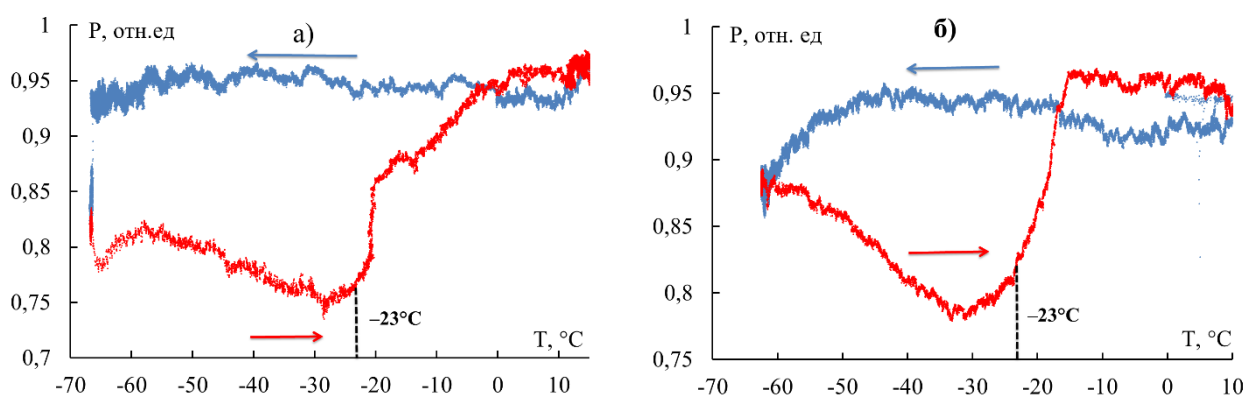


Рисунок 4.12 – Зависимость мощности проходящего излучения в видимом диапазоне (532 нм) через различные диэлектрические подложки с осажденным на них водяным паром от температуры: а) кварцевое стекло; б) оргстекло. Стрелки указывают направление изменения температуры

На рисунке 4.12 наблюдается выраженный гистерезис проходящей мощности, что характерно при образовании сегнетоэлектрического льда 0 при отрицательных температурах. В данных экспериментах в климатической камере находился водяной пар, который осаждался на диэлектрическую подложку, что в свою очередь влияло на характер прохождения лазерного излучения. В данном случае оказалось, что значение мощности принимаемого излучения при нагревании возвратилось к исходному вблизи -23°C . Данное поведение изменения проходящей мощности через диэлектрическую подложку с осажденным на ней водяным паром может быть объяснено возникновением сегнетоэлектрического льда 0 при температурах ниже -23°C и его переходом в гексагональный лед при нагревании в данной области температур.

Полученный результат может представлять интерес для исследования особенностей поведения новой кристаллической модификации льда и определения ее физических свойств. Обнаружение поведения затухания, вызванного льдом 0, который осадился на диэлектрическую подложку, представляет интерес для изучения особенностей распространения электромагнитного излучения в атмосфере.

В работе [118] исследовали процесс девитрификации (переход из аморфного состояния в кристаллическое) и плавления аморфного льда, полученного методом парового осаждения, в сравнении с обычным закаленным аморфным льдом при нагревании от 160 до 300 К. Было обнаружено, что закаленный аморфный лед при повышении температуры плавится в объеме. Во льду, полученным методом парового осаждения, плавление преимущественно начинается у свободной поверхности. Другой особенностью этого льда является тот факт, что вблизи свободной поверхности наблюдается избыток пятичленных колец, что согласуется с его склонностью к зарождению кристаллической модификации в этой области. Пятичленные кольца характерны для сегнетоэлектрического льда 0 [5,6], который образуется из переохлажденной воды при температурах ниже -23°C при низких давлениях. В работе [119] при изучении спектроскопических свойств водяного льда в ближнем инфракрасном диапазоне (1–2,5 мкм) при температурах 80...180 К было установлено, что при температуре около 140 К происходит девитрификация, однако в работе [118] этот процесс происходил при температуре около 190 К.

4.4 Эксперименты с переохлажденным водным аэрозолем

Измерения искусственных туманов были выполнены в зимнее время 2024-26 гг. при температурах воздуха в интервале $-40\ldots-15^{\circ}\text{C}$. Например, в конце декабря 2025 года было проведено два эксперимента по измерению

собственного теплового излучения тумана в инфракрасном диапазоне. Схема эксперимента приведена на рисунке 3.9. Во время проведения первого эксперимента температура воздуха равнялась $\sim -29^\circ\text{C}$. По его результатам во время распыления водного аэрозоля регистрируется уменьшение радиационной температуры на 3–4 К, что видно на графике (рис. 4.13а). Во втором эксперименте (рис. 4.13б) при температуре воздуха -19°C уменьшение значения не регистрируется, а, наоборот, фиксируется его увеличение на ~ 1 К.

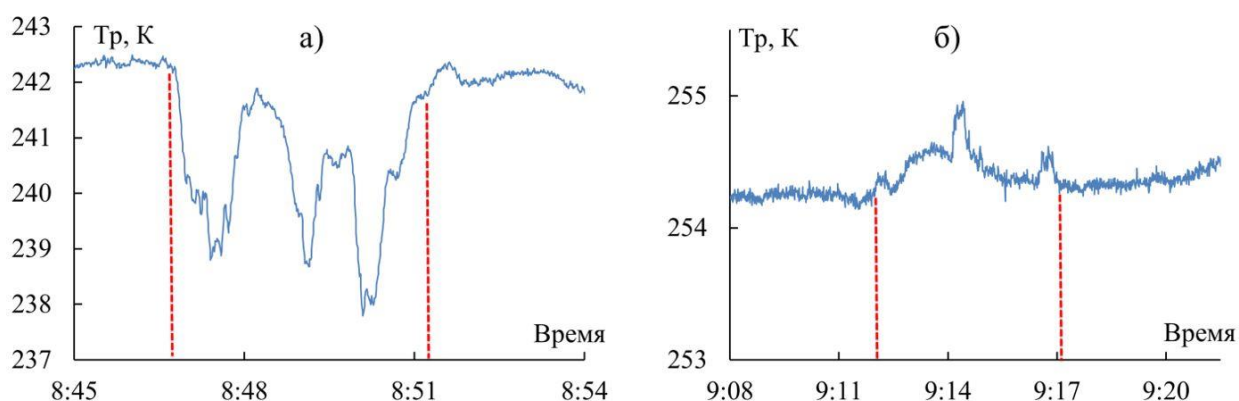


Рисунок 4.13 – Вариации радиационной температуры в тепловом инфракрасном диапазоне искусственного водного аэрозоля: а) при температуре воздуха -29°C ; б) при температуре воздуха -19°C . Пунктирной линией отмечены начало и конец распыления во времени

По результатам проведенных экспериментов на рисунке 4.14 представлены полученные приращения радиационной температуры в зависимости от температуры окружающего воздуха. Приращение ΔT_p определялась разностью среднего значения радиационной температуры во время распыления холодного тумана и среднего значения данной температуры до распыления. На графике видно, что при измерении собственного теплового излучения холодного тумана в инфракрасном диапазоне при температурах воздуха ниже -23°C регистрировалось уменьшение радиационной температуры, а при температурах воздуха выше этого значения фиксировалось ее увеличение.

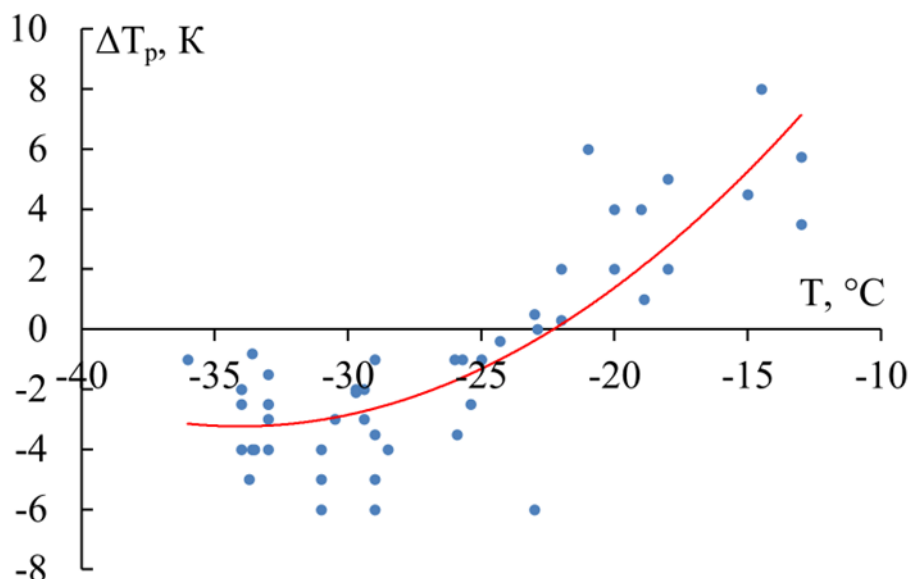


Рисунок 4.14 – Зависимость приращения радиационной температуры в тепловом инфракрасном диапазоне (8...14 мкм) от температуры воздуха. Точками обозначены экспериментальные данные, красной линией – линия тренда

Полученную аппроксимированную линию тренда можно описать в виде следующего квадратичного выражения:

$$T = 0,0234 * \Delta T_p^2 + 1,5938 * \Delta T_p + 23,898 \quad (4.3)$$

где T – температура воздуха в градусах Цельсия, ΔT_p – в градусах Кельвина.

Коэффициент детерминации полученной зависимости равен 0,7.

Такое поведение может быть объяснено образованием областей сегнетоэлектрического льда 0 в тумане, отражающего (рассеивающего) излучение холодного неба, при температурах ниже -23 °C.

Результаты измерений по описанной методике вблизи ТЭЦ–1 г. Читы, где возникла большая полынья, образованная в ледяном покрове оз. Кенон из-за повышенного сброса теплой воды 19 января 2024 г., приведены на рисунке 4.15. Схема эксперимента представлена на рисунке 3.11.

В этом эксперименте получены убедительные данные об образовании в облаке тумана сильно отражающего слоя, особенно проявившегося, в микроволновом диапазоне. Во время наблюдения в утренние часы температура воздуха поднималась от значения ~ -30 °C до $-23,5$ °C по данным метеостанции Levenhuk Wezzer Pro LP300. Можно было ожидать,

что в самом облаке температура несколько повышалась из-за разогрева солнечным излучением, так как событие происходило при безоблачной атмосфере. Облако тумана располагалось на высоте от десятков метров до трехсот метров, что было видно из его сравнения с высотой труб ТЭЦ-1. При достижении в некотором слое облака температуры фазового перехода льда 0 в лед Ih происходило резкое уменьшение рассеяния (и поглощения), что привело к значительному уменьшению яркости объекта, который наблюдали на фоне холодного неба. Факт резкого изменения яркости указывает на фазовый переход в облаке. На рисунке 4.15б дополнительно представлен увеличенный фрагмент рисунка для графика на длине волны 0,88 см.

В соответствии с геометрией эксперимента радиояркостную и радиационную температуры можно приближенно представить в следующем виде (4.4):

$$T_{\text{я}} = T_{\text{н}} * L + T_{\text{обл}} * D + T_{\text{ф}} * M, \quad (4.4)$$

где $T_{\text{н}}$ – яркостная температура неба, L – коэффициент пропускания облака для излучения неба, $T_{\text{обл}}$ – термодинамическая температура облака, $T_{\text{ф}}$ – яркостная температура фонового излучения из нижнего пространства, M – коэффициент рассеяния фонового излучения земной поверхности в направлении радиометров, D – коэффициент излучения, определяемый поглощением и рассеянием в облаке.

В этой формуле не учитывается рассеяние и поглощение излучения вне облака. Это приближение используется для оценки эффекта изменения $T_{\text{я}}$.

При анализе полученного результата на графиках рисунка 4.15а, можно отметить резкое падение радиояркостной температуры после 11h22m, особенно в миллиметровом диапазоне, где $\Delta T_{\text{я}}$ составляло значение ~ 60 К. Наименьший скачок интенсивности излучения наблюдали в ИК диапазоне ~ 7 К. Причем эффект наблюдали вблизи температуры приземного воздуха -26 °С в процессе ее возрастания в утренние часы от -30 °С в начале измерений в 10h00m.

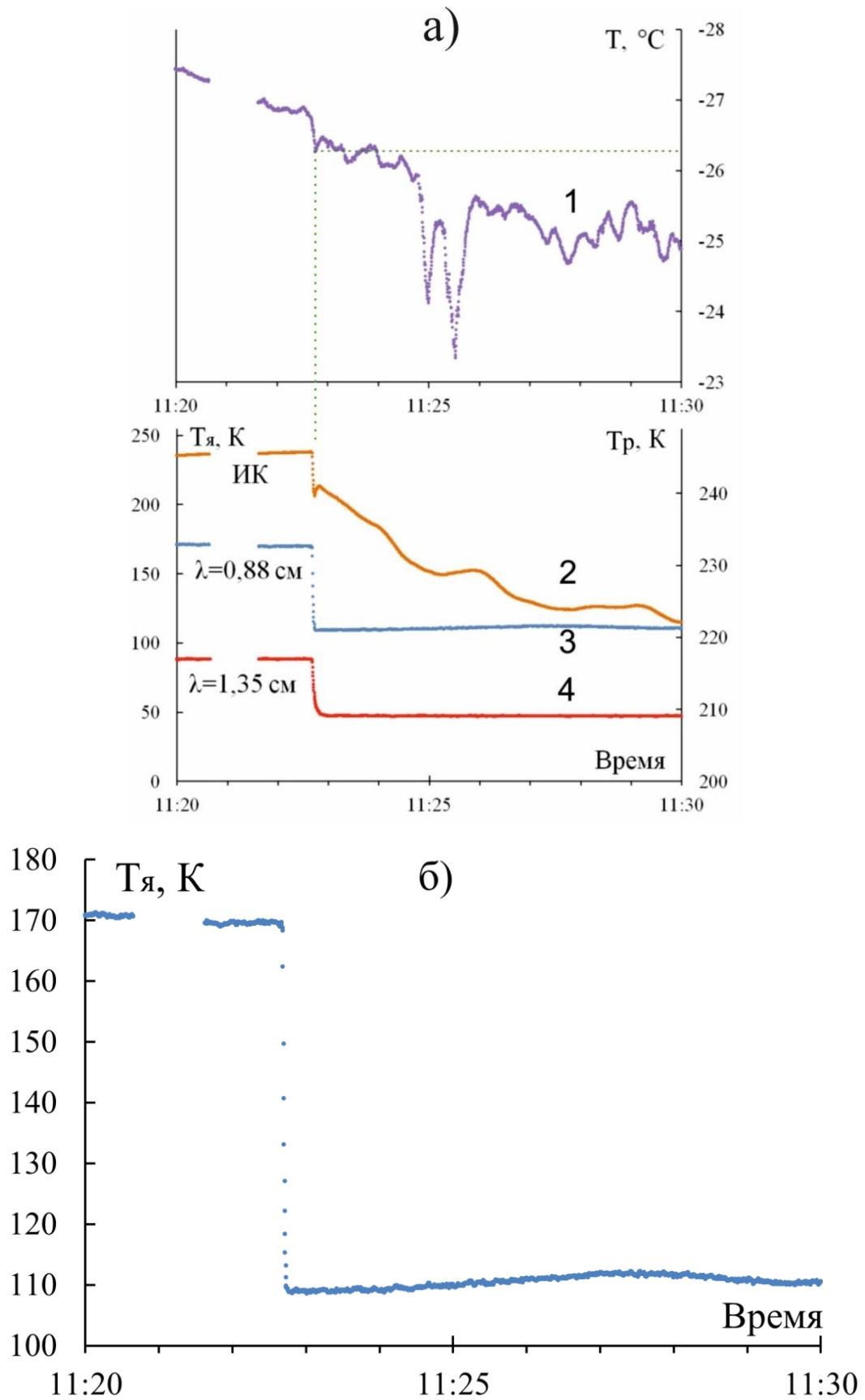


Рисунок 4.15 – а) Зависимости температуры (1) и радиационной температуры воздуха в ИК диапазоне ($T_{\text{р}}$) [87] (2), а также радиояростной температуры для двух длин волн (3,4); б) данные для длины волны 0,88 см (увеличенное изображение)

Причина такой аномалии может быть связана с резким изменением M . Слагаемое $T_n \cdot L$, мало, так как для безоблачной зимней атмосферы и $T_n \sim 10$ К, даже достижение $L \sim 0$ не может объяснить наблюдаемый эффект. Резкость перехода и близость температуры к -23°C указывают на возникновение в облаке фазового превращения льда 0 в лед Ih. Сам лед 0 образовался в частицах тумана в ночное время, когда на частицах пыли (или кристалликах льда Ih) при температурах ниже $-23\dots-30^\circ\text{C}$ конденсировался водяной пар. Какие-либо другие известные явления с фазовыми превращениями воды в туманах при температурах ниже -20°C в настоящее время не известны. Температура в тумане может быть несколько отлична от измеренной вблизи пункта наблюдения, что вполне возможно. То же по отношению к значению температуры фазового превращения, которое может отличаться на несколько градусов в зависимости от условий образования и химических особенностей частиц, на которых осаждался лед 0. Допустим также некоторый гистерезис температур таяния и замерзания из-за сегнетоэлектрических свойств льда 0.

Другой эксперимент по исследованию водного аэрозоля был выполнен по методике, описанной в разделе 3.4.3 [94]. В период проведения эксперимента нами наблюдались несколько моментов с образованием в приземном слое атмосферы ледяного тумана, который начинает возникать при температурах ниже -10°C . Существование ледяного тумана было зафиксировано на метеостанции (№ 30758), которая расположена в черте г. Чита в 4 км от места проведения эксперимента. На рисунке 4.16 представлены графики изменения температуры воздуха, взятые на сайте расписания погоды gr5.ru.

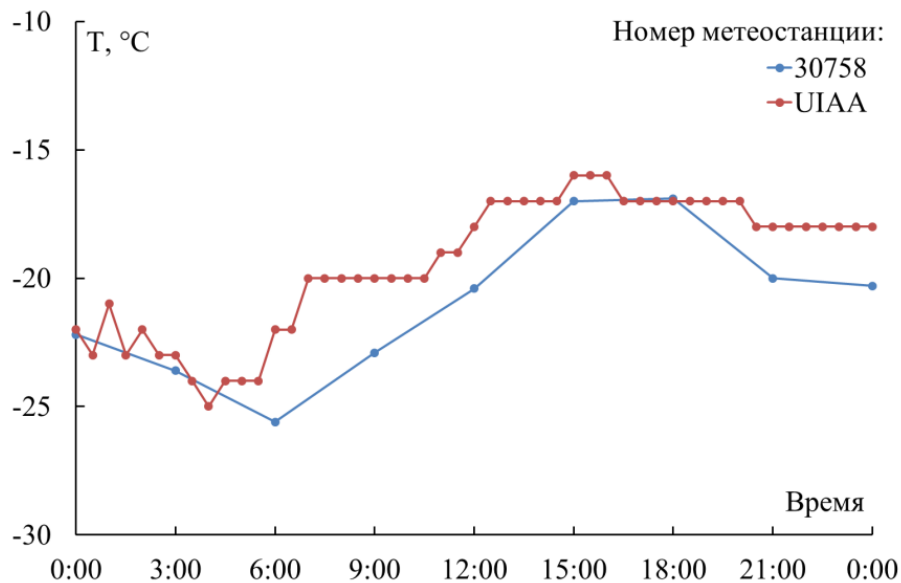


Рисунок 4.16 – Изменения температуры воздуха атмосферы, полученные с метеостанций в г. Чита (№ 30758) и международного аэропорта Чита (UIAA)

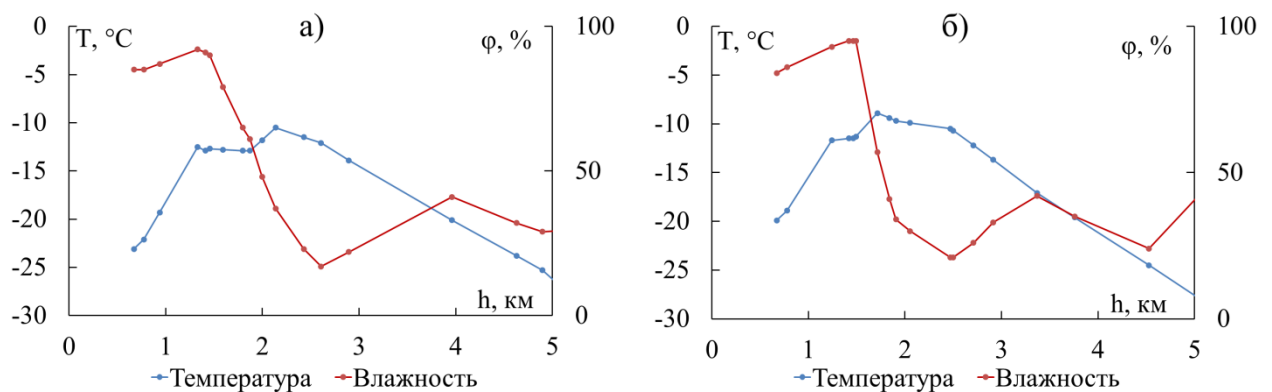


Рисунок 4.17 – Зависимость температуры и относительной влажности воздуха атмосферы от высоты, полученные с радиозонда, запущенного с метеостанции (№30758) в г. Чита. а) запуск в утренние часы 08:30; б) запуск в вечернее время 20:30 по местному времени

По данным метеостанции (№ 30758) 29 декабря 2023 г., начиная с 06:00 утра наблюдался ледяной туман. Температура воздуха в период становления ледяного тумана составляла значение около -26°C , что видно из рисунка 4.16. Восход Солнца в этот день был в 09:34 по местному времени.

На рисунке 4.17 представлены зависимости температуры и относительной влажности воздуха в нижних слоях атмосферы от высоты, полученные с помощью радиозонда, запущенного в 08:30 и 20:30 по местному времени с метеостанции (№ 30758).

Ниже представлены результаты проведенного эксперимента по дистанционным измерениям в отмеченный день. На рисунке 4.18 приведена зависимость радиояркостной и радиационной (T_p) (в ИК диапазоне) температур от времени на длинах волн: а) 8...14 мкм; б) 0,88 см; в) 1,35 см, которые были получены 29 декабря 2023 г. Серой областью отмечено время существования ледяного тумана. Из графика видно, что имеется скачок T_p до 20 К и сильные вариации T_y на длине волны 0,88 см до 5 К и на длине волны 1,35 см до 2 К после 06:00.

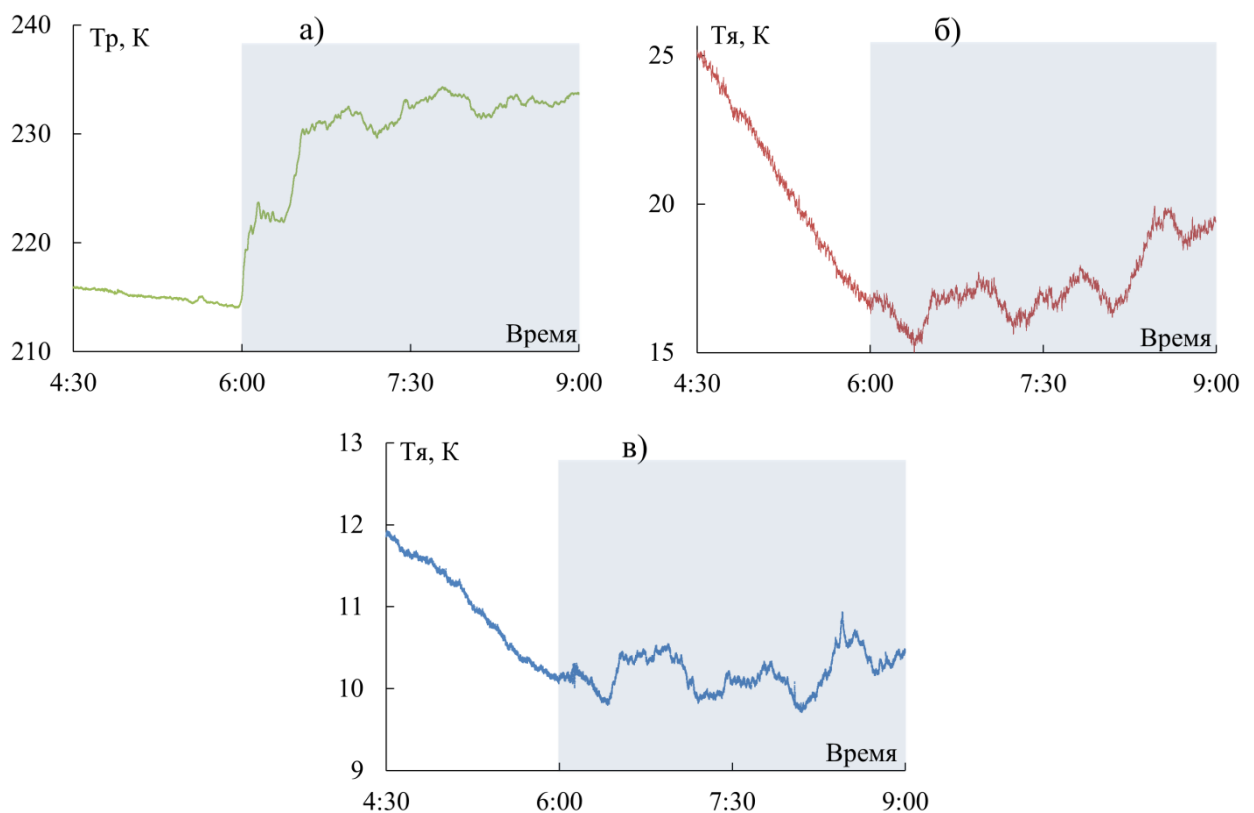


Рисунок 4.18 – Вариации радиояркостной и радиационной температур в зависимости от времени на разных длинах волн: а) 8...14 мкм, б) 0,88 см, в) 1,35 см. Дата: 29 декабря 2023 год. Серым фоном отмечена область существования ледяного тумана

Разное поведение мощности теплового излучения может быть объяснено тем, что ввиду резкого перепада температуры воздуха, образовался ледяной туман с большой концентрацией ледяных частиц. При этом в атмосфере на частицах льда образовался лед 0, на контакте с которым в малых диэлектрических частицах возникают высоко проводящие слои с сильным рассеянием микроволнового излучения. В связи с этим наблюдается

увеличение значения мощности теплового излучения и его повышенные вариации. Этот эффект связан с тем, что радиометрические приемники, кроме собственного теплового излучения атмосферы, зарегистрировали излучение земной поверхности, рассеянного от ледяного тумана, в котором существует лед 0, осевший на диэлектрические частицы. Данная среда, вследствие этого, обладает более высокой отражательной способностью.

По методике, описанной в разделе 3.4.4. были получены следующие результаты. Зарегистрированы вариации мощности собственного теплового излучения атмосферы, которые могут быть объяснены ее различными характеристиками. Так, например, при прохождении облачности над пунктом наблюдения наблюдалось повышение мощности радиотеплового излучения, что связывается с наличием в них влаги и снега. Инфракрасный диапазон при этом регистрирует, как правило, температуру нижнего слоя облачности. В результате проведенных радиометрических измерений в зимний период в начале 2022 года на частоте 34 ГГц изменения радиоярких температур наблюдали в диапазоне 5...35 К, а в инфракрасном диапазоне 160...250 К.

Также ввиду наличия сажевого аэрозоля в г. Чита в зимний период времени в определенные дни, за счет частного сектора, и сложившихся метеоусловий (безветренная погода), наблюдалось увеличение мощности теплового излучения. Причем, было замечено, что в утреннее время, когда излучение Солнца начинает воздействовать на аэрозоль, наступает временное повышение радиояркой и радиационной температур, что связывается с нагреванием аэрозоля.

23 января 2022 года в Чите наблюдалось такое природное явление как замерзающий туман. При этом температура воздуха принимала значение около -25°C . Данное явление наблюдали утром между 5:00 и 6:00, когда происходило понижение температуры аэрозоля. В этот момент радиометры зарегистрировали резкий выброс температуры излучения, что показано на

рисунке 4.19а,б. На рисунке 4.19в приведены данные по изменению температуры приземного слоя атмосферы.

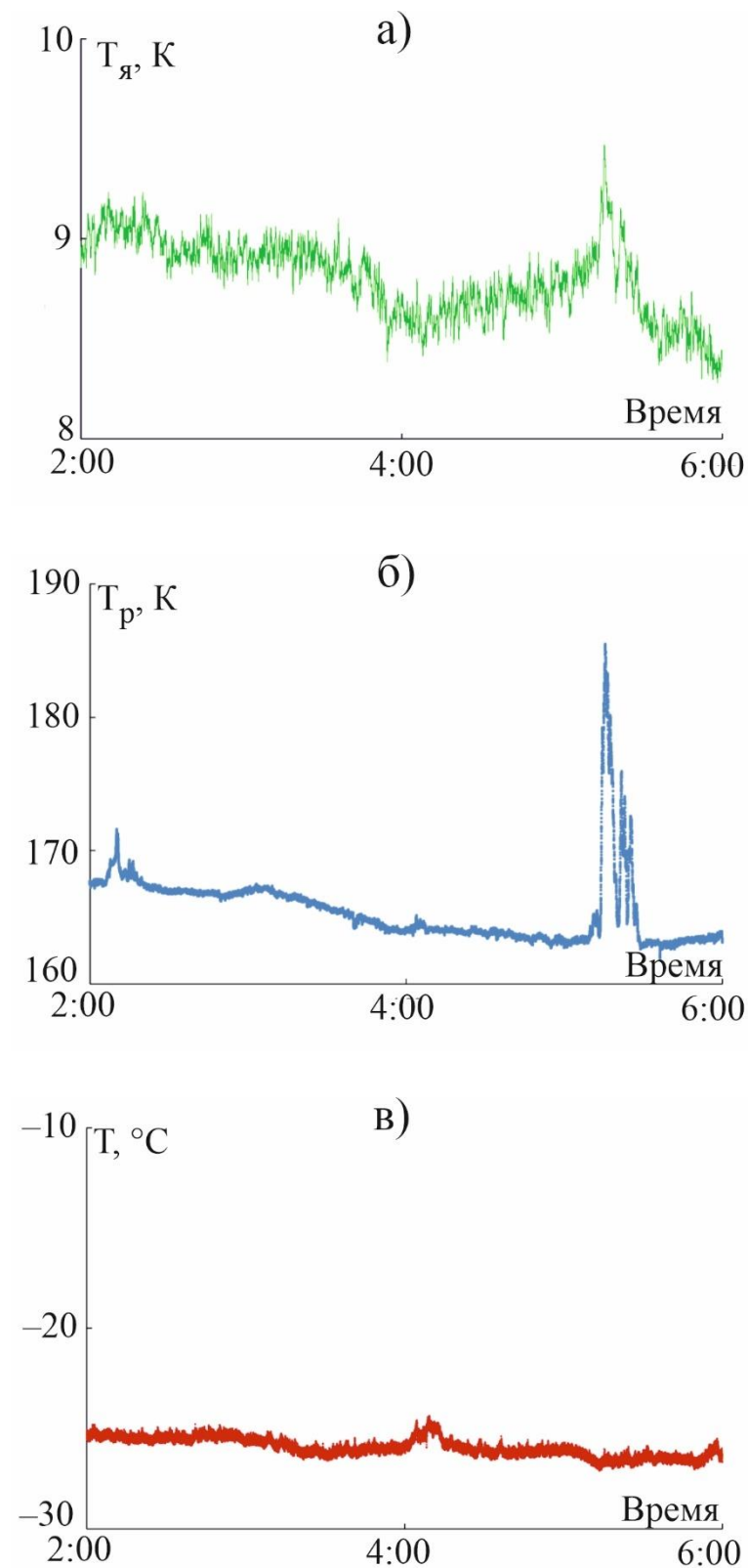


Рисунок 4.19 – а) Радиояркая температура атмосферы в г. Чита на частоте 34 ГГц; б) яркая температура атмосферы в ИК-диапазоне; в) температура приземного слоя атмосферы. Дата: 23 января 2022 г. [97]

На частоте 34 ГГц данное приращение составило порядка 1 К, а в инфракрасном диапазоне оно достигало 20 К. Этот эффект связывается с фазовым переходом, который произошел в замерзающем тумане. Однако у льда I_h значение действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости значительно ниже, чем у воды, поэтому повышение радиояркостной температуры в атмосфере можно объяснить только возникновением слоев сегнетоэлектрического льда 0 с высоким значением диэлектрической проницаемости. Отражение теплового излучения земного покрова от данной структуры и привело к увеличению яркостной температуры.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. Впервые показана возможность регистрации существования льда 0 при нагревании холодных туманов в утренние часы для холодных зимних дней выше температуры $-26...-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ по резкому изменению их радиационных характеристик в микроволновом и тепловом ИК диапазонах. Лед 0 может образовываться на поверхности микронных и наноразмерных диэлектрических частиц пыли и льда, в том числе в объеме льдов с нарушением укладки (типа I_{sd}). То же может наблюдаться при охлаждении тумана или воздуха, где он образуется и имеется перенасыщенный водяной пар.

2. Радиометрическими методами исследования в ходе наблюдения за мощностью собственного теплового излучения атмосферы удалось зафиксировать его увеличение в приземном ледяном тумане, где температура воздуха понижалась ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Получены экспериментальные подтверждения о возникновении сегнетоэлектрического льда 0 в ледяном тумане. Данное явление требует дальнейшего исследования для нахождения связи метеорологических и радиофизических характеристик атмосферы.

3. Дистанционные радиометрические методы измерений тропосферы с земной поверхности в зимний период времени позволяют регистрировать

уникальные процессы, проходящие в ней. Их основой является образование новой сегнетоэлектрической модификации – льда 0, которая может образовываться в земных условиях при отрицательной температуре.

4.5 Результаты исследования серебристых облаков

В середине июля 2024 года, в ночное время, при безоблачной атмосфере наблюдали появление серебристых облаков (рис. 4.20). Приращения радиояркостной температуры, вызванные рассеянием солнечного излучения серебристыми облаками, составили 5...15 К в зависимости от длины волны [96], что представлено на рисунке 4.21. Вариации безоблачной атмосферы при отсутствии серебристых облаков (в другие сутки) за аналогичный временной промежуток составили 1–2 К.

Эффект возрастания рассеяния электромагнитного излучения в мезосферных облаках в широком интервале длин волн можно объяснить в рамках предложенной гипотезы о возникновении поверхностных плазмонов в проводящих ледяных наночастицах [64]. Их колебания и резонансы на частицах неправильной формы приводят к сильному рассеянию падающих излучений в широком интервале длин волн, в том числе к заметному эффекту при радарных измерениях в мегагерцовом диапазоне [58].

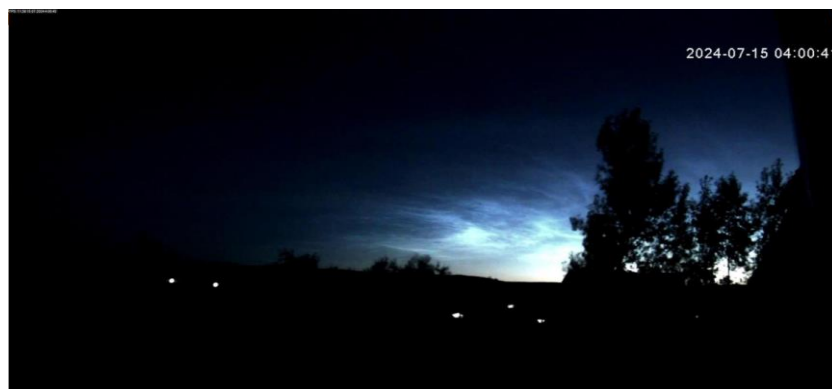


Рисунок 4.20 – Фото серебристых облаков на станции наблюдения с. Преображенка. Дата съемки: 15 июля 2024 года, 04:00

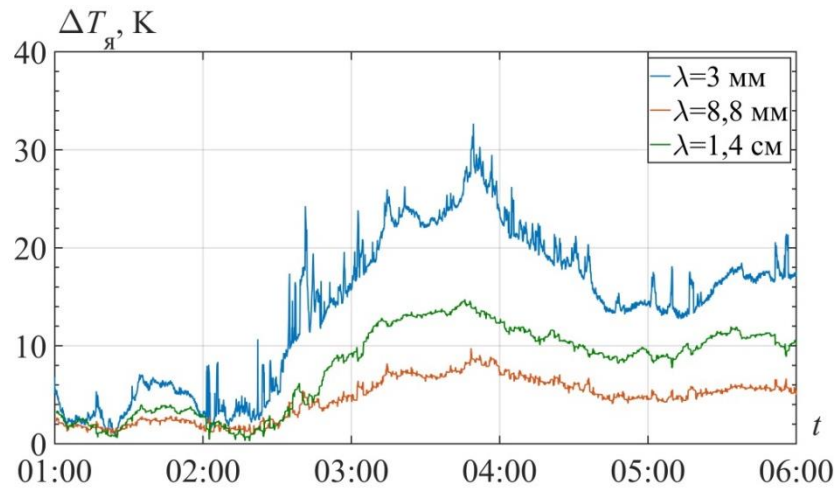


Рисунок 4.21 – Зависимости приращений радиояростной температуры, вызванных рассеянием излучения Солнца серебристыми облаками, на трех длинах волн.
Дата: 15 июля 2024 г.

Из данных экспериментов можно сделать предварительный вывод о том, что исследование подтвердило гипотезу, предложенную в работе [64], о значительном усилении рассеяния электромагнитных излучений при конденсации на диэлектрические пылевые наночастицы неправильной формы недавно открытого сегнетоэлектрического льда 0. Если это явление будет детально исследовано с использованием усовершенствованных методик, то появится дополнительный метод изучения физических характеристик холодных облаков в атмосфере. Представляется интересным использование микроволновых радаров для определения слоев облачности со льдом 0.

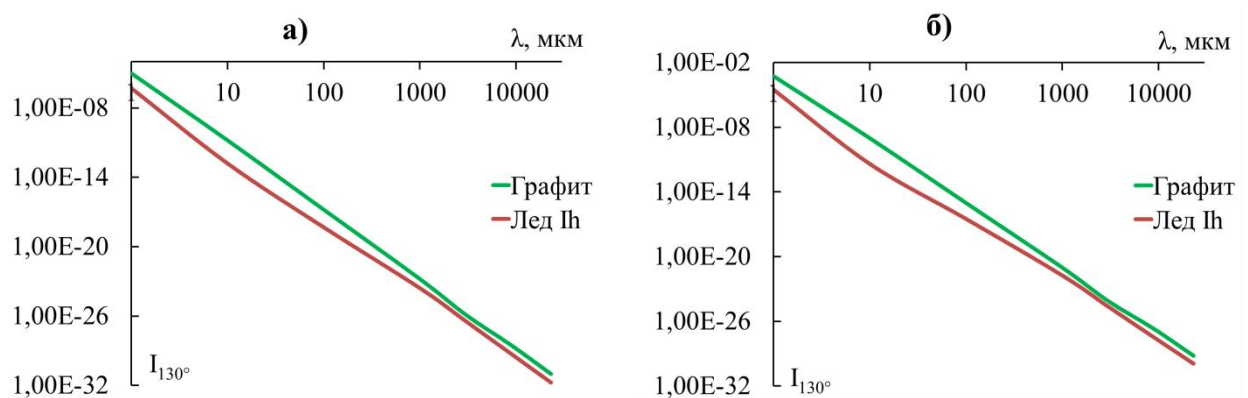


Рисунок 4.22 – Зависимость интенсивности рассеяния солнечного излучения от длины волны на разных сферических частицах: а) диаметр частицы 50 нм; б) диаметр частицы 100 нм

По расчетам, используя классическую теорию рассеяния Ми, интенсивность рассеяния солнечного излучения под углом 130° от металлических частиц сферической формы выше, чем от ледяных: в микроволновом диапазоне отличается на 1 порядок величины, а в инфракрасном диапазоне на 2-3 порядка, что показано на рисунке 4.22.

Расчеты приращения радиояркостной температуры на частоте 90 ГГц, выполненные в предположении сферичности частиц серебристых мезосферных облаков, выявили существенное влияние состава облаков. Так, замена ледяных частиц на графитовые приводит к шестикратному росту радиояркостной температуры. Однако этот рост невелик. Если же учесть возможную анизотропию частиц, эффект усиливается на несколько порядков. Это доказывает, что аномальное свечение облаков, наблюдаемое в широком частотном диапазоне, вызвано возникновением высокопроводящего слоя на границе сегнетоэлектрического льда и обычных ледяных частиц неправильной формы.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. Проведены измерения по ранее предложенному методу наблюдения за серебристыми облаками по рассеянию солнечного излучения в микроволновом диапазоне на частотах от 13 до 90 ГГц, подтвердившие эффект в широком диапазоне частот.

2. Приращения радиояркостной температуры, вызванные рассеянием солнечного излучения от серебристых облаков перед восходом Солнца, достигали 5...15 К в зависимости от длины волны, что близко к расчетным результатам.

3. Данный результат также подтверждает предположение о появлении у частиц серебристых облаков свойств, близких к металлическим, что объясняется конденсацией на наночастицы мезосферы сегнетоэлектрического льда 0.

4. Полученный результат представляет интерес для изучения динамики серебристых мезосферных облаков, а также для изучения особенностей распространения электромагнитного излучения в оптическом и микроволновом диапазонах в атмосфере.

4.6 Результаты поисков льда 0 в различных криосферных образованиях

А) Исследование древесной растительности.

В результате исследований на стационаре в с. Преображенка (Забайкальский край) было установлено образование сегнетоэлектрического льда 0 в древесине елей. Измерения проводились в зимнее время года 2024-25 гг. 02 декабря 2024 года около 11 часов по местному времени; температура воздуха в приземном слое атмосферы колебалась в интервале $-21 \dots -24^\circ\text{C}$, что соответствует температуре образования льда 0 (рис. 4.23). Также в это время значение относительной влажности воздуха уменьшилось на 15%, что может быть связано с фазовым переходом вода-лед 0 переохлажденного водного аэрозоля в приземном слое.

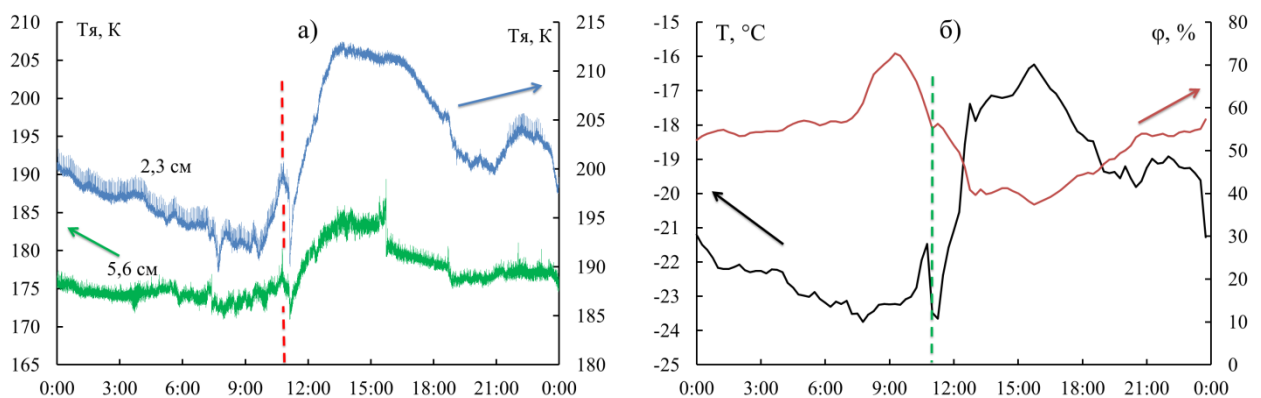


Рисунок 4.23 – а) Радиояркостная температура радиометров на двух длинах волн 2,3 см и 5,6 см; б) метеорологические параметры приземного слоя атмосферы (температура (T) и относительная влажность (φ)). Пунктирной линией отмечено время образования льда 0

Радиометрические приемники в этот момент зарегистрировали возрастание радиояркостной температуры елей, что может быть связано с образованием в древесине тонкого слоя сегнетоэлектрического льда 0, на

границах которого с материалом тканей появляются слои с высокой проводимостью, который в результате усиливает рассеяние излучения.

Б) Исследование электрических атмосферных явлений.

По методике, представленной в разделе 3.6.2, было зарегистрировано выпадение осадков в виде града и ливня 07 июля 2023 года в 15:32 по местному времени [99]. Размер градин в диаметре не превышал 5 мм и исследовать их физические свойства не представилось возможным по причине быстрой деградации льда. Выпадение града по времени не превышало 3 минут. Однако имеется работа [86], в которой проводили диэлектрические измерения материала атмосферного льда из выпавшего града. По ее результатам можно сказать, что домены сегнетоэлектрического льда 0 могут существовать несколько суток. Также образование сегнетоэлектрического льда 0 может быть связано с воздействием ультрафиолетового излучения на диэлектрические частицы, что можно предположить из рассмотрения результатов работы [120].

На рисунке 4.24 представлено изменение температуры и влажности во время выпадения осадков. Как видно из графиков, в это время температура воздуха понизилась на 10 °С, что связано с быстрым движением слоев воздуха и выпадением частиц льда на земную поверхность. Относительная влажность воздуха, соответственно, повышалась до 95 % ввиду обильного выпадения осадков. Также следует отметить существенные вариации относительной влажности (до 20 %) и температуры воздуха (до 5 °С) перед выпадением осадков.

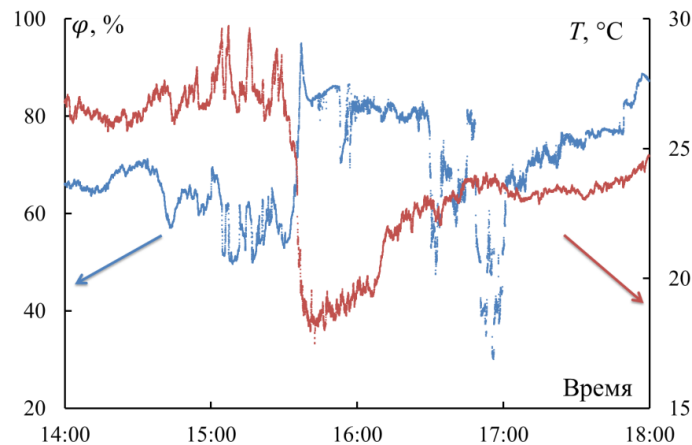


Рисунок 4.24 – Временная зависимость температуры и относительной влажности воздуха 7 июля 2023 года в г. Чита

Радиояркая температура определяется содержанием влаги и рядом других причин (аэрозольные частицы) в структуре атмосферы, но основную роль в ее приращении играет концентрация воды, как в виде капель, так и пара. На рисунке 4.25 приведены результаты измерений собственного теплового излучения на длинах волн 0,88 см и 1,35 см.

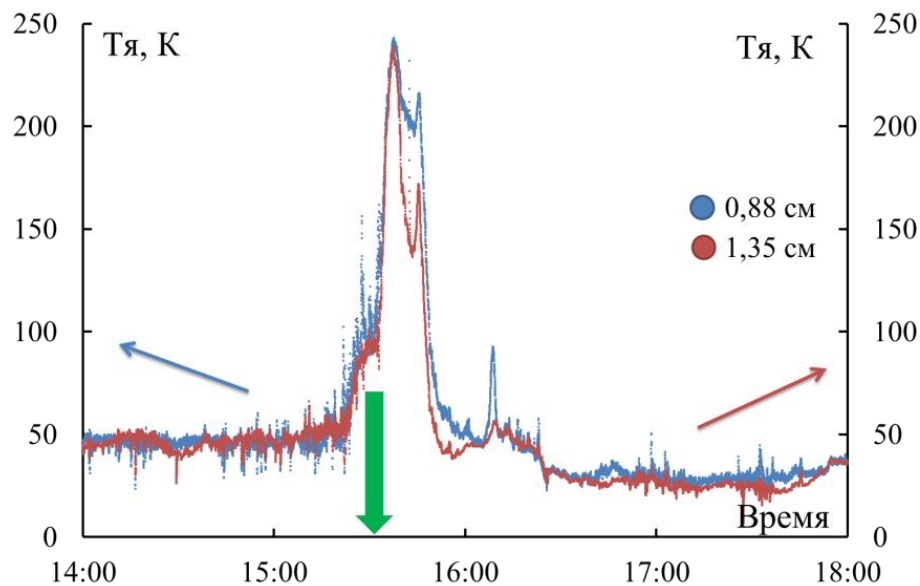


Рисунок 4.25 – Временная зависимость радиояркой температуры на длинах волн 0,88 см и 1,35 см. Дата: 7 июля 2023 года в г. Чита. Жирной стрелкой отмечен интервал выпадения града

Как видно из графиков (рис. 4.25), регистрируется приход облачного фронта после 15:20. Также в момент выпадения града зафиксировано

кратковременное понижение радиояркостных температур почти на 10 К от наблюдавшейся тенденции ее возрастания (на графике образуется плато).

Особенно следует отметить изменение значений вертикальной составляющей земного электрического поля (рис. 4.26). Как видно из приведенного графика, за 25 минут до выпадения града начали наблюдаться сильные колебания электрического атмосферного поля с резким изменением его направления. Если сравнивать поведение электрического поля при прохождении облачности над пунктом наблюдения при дожде, то данного типа вариации не наблюдаются. Это может быть связано с образованием в граде льда 0, который является сегнетоэлектриком. При возникновении сегнетоэлектрических свойств градовые частицы могут изменить процесс электризации в атмосфере из-за возрастания их восприимчивости к электрическому полю в облаке.

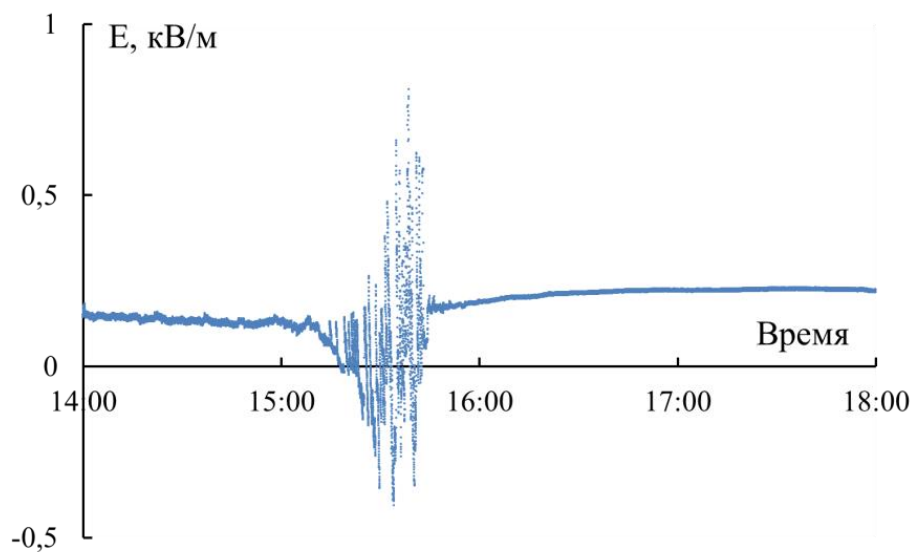


Рисунок 4.26 – Временная зависимость напряженности вертикальной составляющей атмосферного электрического поля 7 июля 2023 года в г. Чита

Следует обратить внимание, что после осадков наблюдали увеличение значений электрического поля приблизительно на 80 В/м. Данное увеличение сохранялось в течение пяти часов.

Для рассмотрения влияния выпадения осадков в виде снега на радиотепловое излучение поверхности и на значения напряженности

атмосферного электрического поля по методике, описанной в разделе 3.3.2, были выбраны два промежутка времени: с 13 по 14 марта и с 21 по 22 марта 2023 года [100]. В эти промежутки времени происходило выпадение снега при температурах -5°C и 0°C , соответственно. На рисунке 4.27 представлены полученные результаты влияния выпадения снега на радиояркостную температуру объекта и на вертикальную составляющую напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы.

При выпадении снега с 13 по 14 марта значения напряженности электрического поля уменьшались на $10\ldots 20\text{ В/м}$ (рис. 4.27а). На графиках значений радиояркостной температуры ($T_{\text{я}}$) на длинах волн $0,88\text{ см}$ и $1,35\text{ см}$ (рис. 4.27в,д) наблюдаются вариации радиояркостной температуры, характеризующей мощность радиотеплового излучения, что связано с начальным периодом времени выпадения осадков. При увеличении тонкого слоя снега, лежащего на бетонной плите, наблюдается интерференция в результате переотражения электромагнитных волн от границ верхнего слоя снега и раздела сред (снег – бетон). Интенсивность выпадения осадков в этот день была низкой и за весь выбранный промежуток времени наблюдения толщина снега достигла значения около 1 см . После полуночи наблюдался резкий скачок напряженности электрического поля, до 100 В/м . В данный период времени произошло увеличение интенсивности выпадения снега. Скорость возрастания толщины слоя снега характеризуется изменением частоты интерференционной картины от времени. При этом следует отметить, что значение электрического поля в среднем уменьшалось из-за увеличения абсолютной влажности воздуха.

При выпадении снега с 21 по 22 марта величина напряженности электрического поля существенно возросла и достигла значений порядка 700 В/м (рис. 4.27б), что объясняется высокой интенсивностью выпадения осадков. На рисунках 4.27г и 4.27е приведены значения радиояркостной температуры на длинах волн $0,88\text{ см}$ и $1,35\text{ см}$. В момент начала выпадения

снега происходит резкое понижение $T_{я}$, что связано с появлением относительно тонкого слоя воды, образовавшегося в результате таяния выпадающего снега на поверхность бетона. О высокой интенсивности осадков можно судить по интерференционной картине радиотеплового излучения с быстрым увеличением значений $T_{я}$.

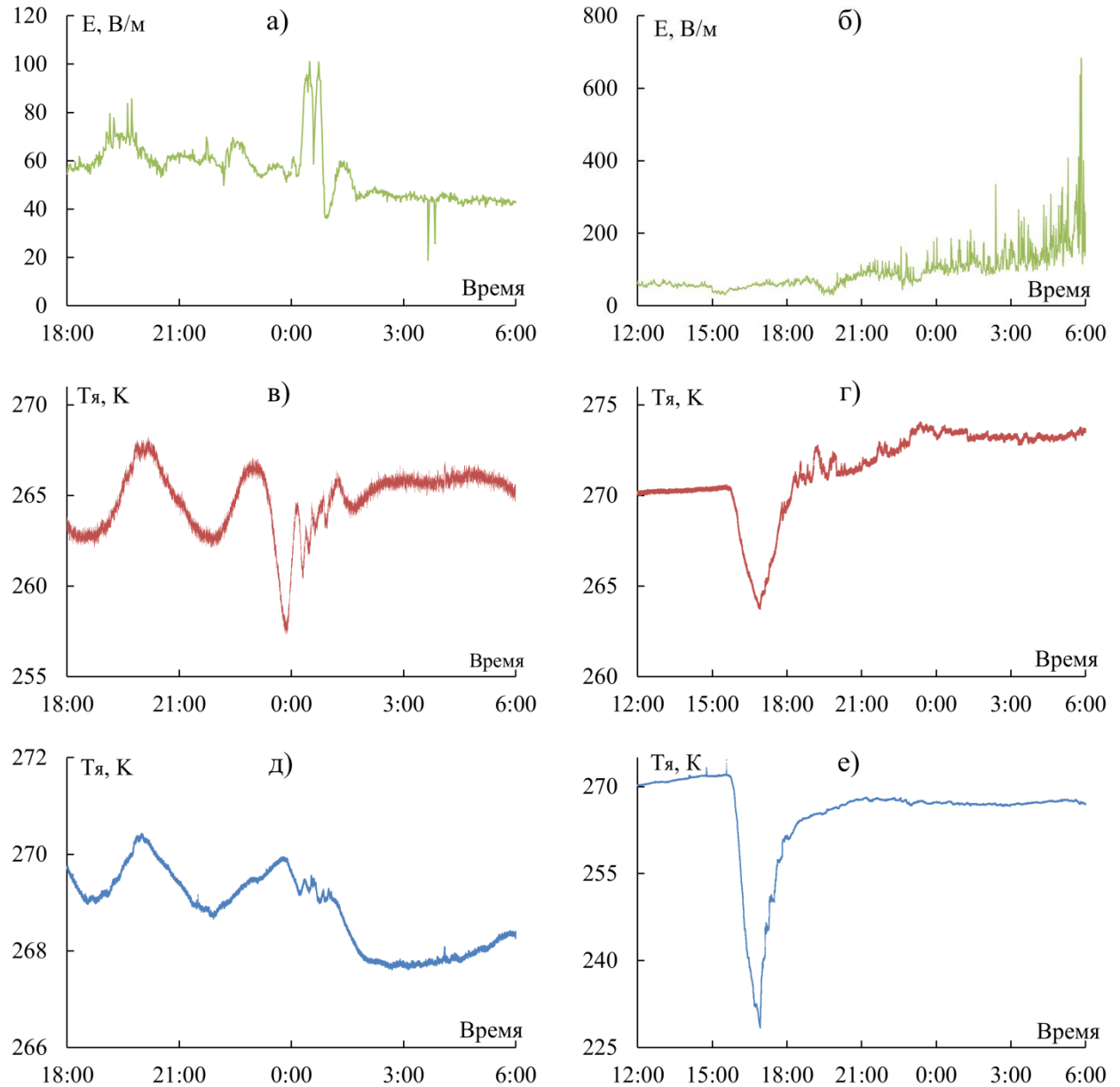


Рисунок 4.27 – Графики напряженности атмосферного электрического поля приземного слоя (а, б) и радиояростной температуры ($T_{я}$) на длине волны: 0,88 см (в, д); 1,35 см (г, е)

Разница поведения напряженности электрического поля объясняется различием интенсивности выпадения снега и температурой окружающего воздуха. В целом атмосферное электрическое поле зависит от проводимости

атмосферы. С ростом влажности, увеличением концентрации частиц, пыли, туманов электрическая проводимость атмосферы увеличивается. Под влиянием техногенного воздействия на атмосферу городов проводимость атмосферы в целом уменьшается.

Повышение влажности атмосферы приводит к уменьшению концентрации аэрозольных частиц. В результате, под действием водяных паров в атмосфере может происходить не только повышение значения атмосферного электрического поля, но и ее понижение. При этом наблюдается усложнение процессов электризации из-за фазового перехода переохлажденной воды в сегнетоэлектрический лед 0.

В настоящее время мало работ по исследованию процессов, связанных с атмосферным электричеством при отрицательных температурах ниже -15°C , особенно во время выпадения осадков в виде снега. В работе [121] был рассмотрен вопрос измерения градиента потенциала атмосферного электрического поля в зависимости от температуры. Авторы зарегистрировали, что при понижении температуры до -20°C вертикальная составляющая приземной напряженности атмосферного электрического поля уменьшается, а при дальнейшем понижении температуры ее значение увеличивается. Авторами было выдвинуто предположение, что данный эффект при продолжительных морозах может быть обусловлен изменениями агрегатного состояния частиц тумана и формы ледяных кристаллов при температуре ниже -16°C . Вместе с тем, при отмеченных температурах в настоящее время стало известно о фазовом переходе, связанном со льдом 0.

По методике, представленной на рисунке 3.13, 26 ноября 2023 г. над пунктом наблюдения за состоянием атмосферы регистрировались осадки в ночное время суток. Толщина образовавшегося снежного покрова составила ~ 15 мм. На рисунке 4.28 представлены полученные значения радиоярких температур на длинах волн 0,8 см и 1,35 см и вертикальной компоненты напряженности атмосферного электрического поля.

При радиометрических измерениях наблюдаются возрастания значений радиояркостных температур, что связано со слабым снегопадом. Следует обратить внимание на выброс радиояркостной температуры на ~ 1 K в районе 03:00, что отмечено на рисунках 4.28б,в стрелкой и выделено на вставках. Данный факт может быть связан с образованием сегнетоэлектрической модификации льда 0 в приземном слое атмосферы.

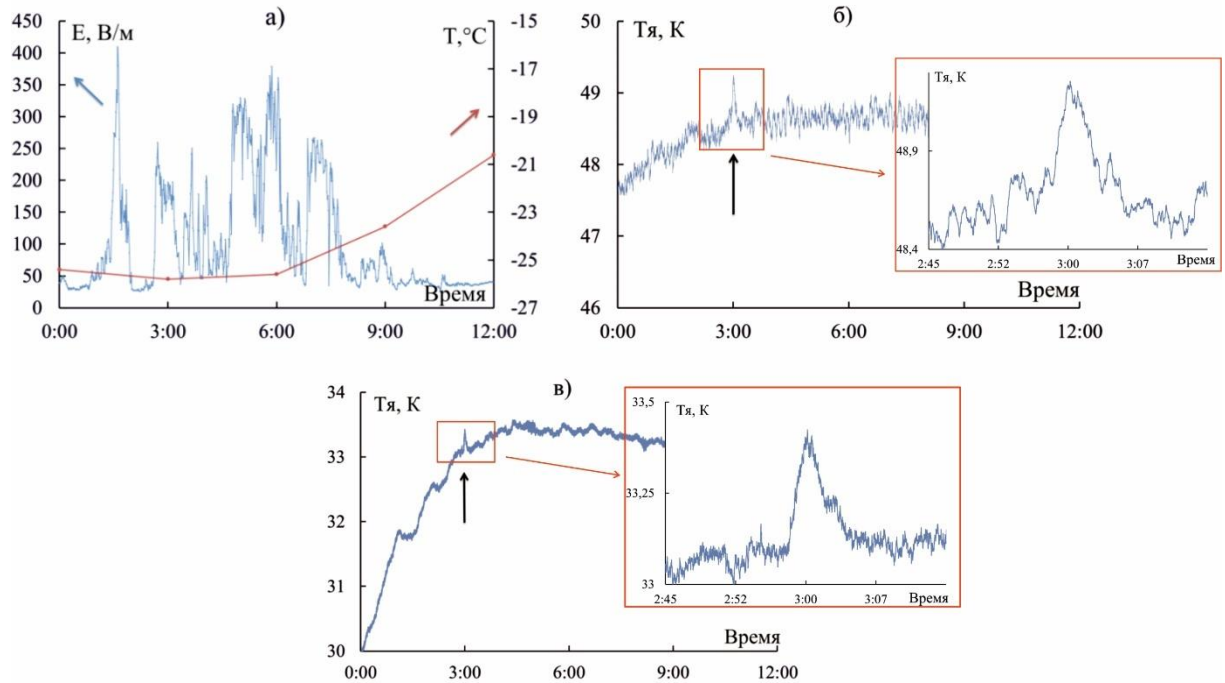


Рисунок 4.28 – Зависимость напряженности вертикальной компоненты приземного электрического поля, термодинамической температуры (а) и радиояркостной температуры на двух длинах волн от времени: 0,8 см (б), 1,35 см (в). Дата: 26 ноября 2023 года

В это время температура приземного слоя воздуха составляла ~ -26 °C. При осадении сегнетоэлектрического слоя льда 0 на диэлектрическую подложку, например, из льда Ih или пылевых частиц, образуется слой с высокой электропроводностью [9,10]. Таким образом, при образовании льда 0 в слоях атмосферы значения радиояркостной температуры атмосферы могут увеличиться, т.к. от образованного слоя с сегнетоэлектрическим льдом будет происходить отражение излучения земной поверхности. В результате регистрируемые значения радиояркостных температур атмосферы увеличатся.

Что касается напряженности атмосферного электрического поля, то при температуре ниже -23°C были зарегистрированы сильные вариации его значения достигающие 300 В/м , что может быть связано с электризацией облачности над пунктом наблюдения. После прекращения осадков (с 09:00 рис. 4.28а) выраженные вариации вертикальной компоненты электрического поля прекратились.

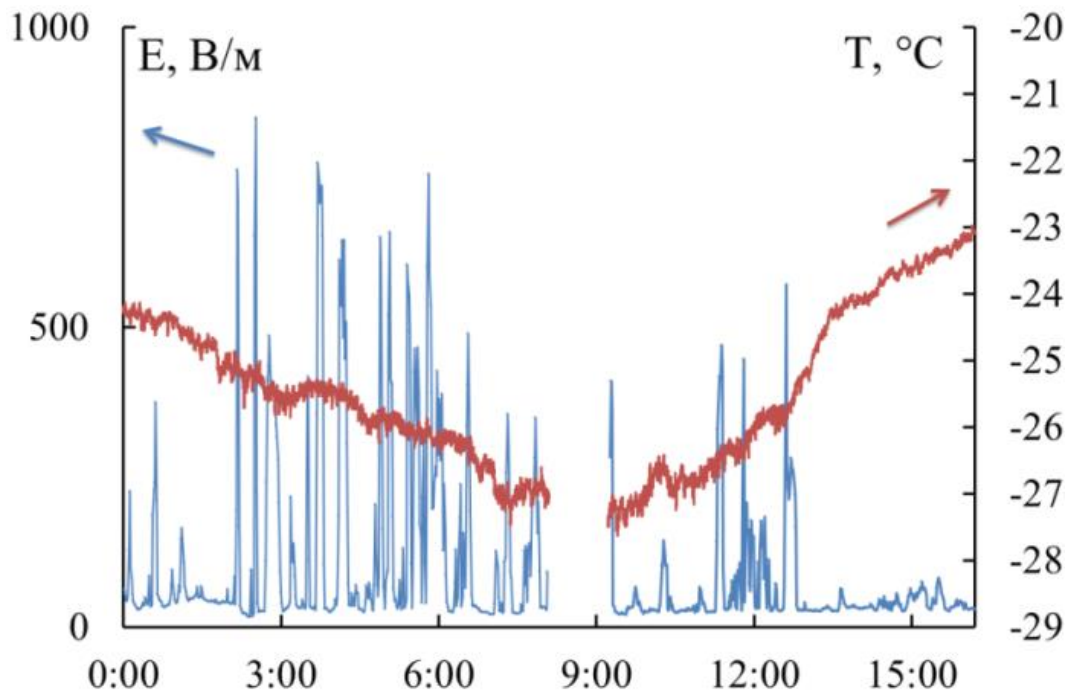


Рисунок 4.29 – Значения напряженности атмосферного электрического поля в «хорошую» погоду и низкой температуры приземного воздуха. Дата: 10 января 2025 года

Однако такое поведение наблюдалось и в некоторые дни с отсутствием осадков, но при низкой температуре воздуха, что показано на рисунке 4.29. В «хорошую» погоду, которая характеризуется визуальным отсутствием облачности, ветра, высоким значением горизонтальной видимости, 10 января 2025 г. наблюдались вариации значений вертикальной компоненты атмосферного электрического поля до 700 В/м . Это можно связать с образованием из переохлажденной воды в атмосфере на малых диэлектрических частицах пыли и льда слоя сегнетоэлектрического льда 0, с образованием тонких слоев. Данный эффект и привел к вариациям электрического поля. Малые диэлектрические частицы, на которых

образовались сегнетоэлектрические слои, могут быть слабо заметны в видимом диапазоне, но проявляться в процессах электризации атмосферы. Это следует из того, что при повышении приземной температуры окружающего воздуха вариации квазистатического электрического поля не наблюдаются, например, после 13:00 исходного дня (рис. 4.29).

Объяснение повышенного значения электрического поля при наличии в атмосфере льда 0 связано с доменной структурой кристаллов из льда 0 со строго упорядоченной ориентацией спонтанной поляризации и ее вариациями в макрообластях атмосферы. Также в работе [122] показана возможность образования пространственно упорядоченных структур заряженными каплями воды как в грозовых облаках, так и в туманах. Согласно последним представлениям об атмосферном электрическом поле, его можно отобразить в виде схемы Глобальной электрической цепи [123,124], изображенной на рисунке 4.30а. Все, что находится в толще данной структуры, влияет на вариации атмосферного электричества. В работе [125] предложен механизм электризации воды и льда при испарении (конденсации). Установлено, что при испарении носители заряда воды - протоны и гидроксид-ионы накапливаются на фазовом фронте, а при конденсации истощаются. Соответственно, возникающие домены льда 0 в малых частицах, обладающие упорядоченным электрическим дипольным моментом под влиянием внешнего поля, будут вносить существенный вклад в увеличение значений напряженности атмосферного электрического поля (рис. 4.30б). Например, при поляризации частиц со льдом 0 в облаках и возникновении поляризационных зарядов на их нижней и верхней границе будет возникать более сильное электрическое поле, чем от зарядов, распределенных в объеме облака, предполагаемых в существующей теории электризации.

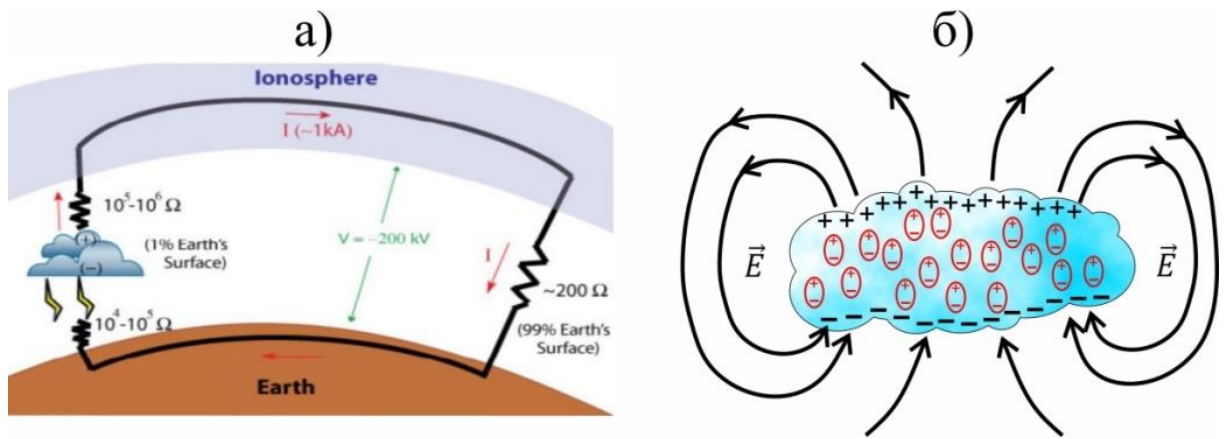


Рисунок 4.30 – а) Схема Глобальной электрической цепи [126]; б) схема влияния доменов льда 0 на усиление напряженности атмосферного электрического поля вне объема облака из-за поляризационных зарядов, создаваемых сегнетоэлектрической структурой частиц

Следует отметить, что в научной литературе практически не рассмотрен вопрос о поведении атмосферного электрического поля при температурах ниже -20°C . По этой причине данный вопрос требует исследования, особенно при изучении атмосферы Арктических регионов.

Изучение различных криосферных образований (снег, град, наледь и т.п.) радиофизическими методами в микроволновом диапазоне при отрицательных температурах позволяет получить количественные данные об их физических свойствах [127]. По причине образования сегнетоэлектрического льда 0 в криосферных образованиях при дистанционном исследовании при достаточно низких температурах следует учитывать тот факт, что в данной среде может образовываться сегнетоэлектрический лед 0.

По полученным в главе результатам можно сделать следующие **выводы**:

1. Наиболее важный результат, полученный в работе, заключается в том, что впервые в приземном холодном тумане был зарегистрирован слой аэрозоля, содержащий частицы со льдом 0 при радиометрических наземных микроволновых и ИК измерениях. Измеренная радиояркостьная температура в одном из экспериментов при исчезновении льда 0 в слое аэрозоля уменьшилась на 60 K на волне 0,88 см.

2. При уменьшении температуры ниже -23°C в различных дисперсных объектах, увлажненных водой и ее растворами, возможно образование сегнетоэлектрического льда 0, как было показано на древесине елей. Данный процесс возникает вблизи земной поверхности, поэтому лед 0 может образовываться как в холодных слоях атмосферы (например, в мезосфере), так и в ее приземных слоях (например, в грозовой атмосфере), а также в приповерхностных увлажненных слоях земной коры в Арктике, Субарктике и районах с резко континентальным климатом.

3. В результате натурных измерений квазистатического атмосферного электрического поля и радиотеплового излучения атмосферы при осадках в виде града было установлено, что существует возможность предсказания выпадения града за 20 минут до этого события по характеру изменения атмосферного электрического поля. Электрическое поле спадало до нулевого значения, а радиояркость температура возрастала с образованием небольшого «плато» при начале выпадения града. Эту особенность можно объяснить образованием среды с высоким значением ε' из-за образования при конвекции слоев в облаке с низкой температурой и появления сегнетоэлектрического льда 0.

4. При выпадении осадков в виде снега происходят сильные вариации напряженности вертикальной компоненты электрического поля в приземном слое. Вариации зависят от многих факторов, в частности, от интенсивности снежных осадков и температуры окружающей среды. Что касается мощности радиотеплового излучения образующегося снежного покрова относительно небольшой толщины на бетонной плите, то наблюдается интерференция радиотеплового излучения, в зависимости от значения толщины слоя снега. При температуре фазового перехода вода-лед значения радиояркости температуры снежного покрова резко понижаются из-за образования тонкого слоя воды. Также исчезает интерференция при изменении толщины слоя выпавшего снега.

5. Из выполненных исследований можно сделать вывод о нередком образовании льда 0 при процессах понижения температуры среды в атмосфере, биосфере и приповерхностных слоях земной коры, что указывает на необходимость исследования данной кристаллической модификации льда и открывает новые возможности дистанционного зондирования природной среды и понимании процессов, происходящих в земных оболочках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе впервые экспериментально показано существование сегнетоэлектрического льда 0 вблизи земной поверхности при температурах ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ и атмосферном давлении. Лед 0 является переходной формой между переохлажденной водой и льдами Ih и Ic. Длительное существование этой модификации также подтверждено измерениями диэлектрических характеристик атмосферного льда, выпавшего в виде града с использованием резонаторного метода. Измерения показали, что слои льда 0 на поверхности диэлектрических частиц или в объеме могут существовать в атмосферном льду до суток при температуре среды $\sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Представленная теоретическая модель формирования плазмонного резонанса на малых диэлектрических частицах, состоящих из льда Ih, выявила влияние тонкого поверхностного слоя сегнетоэлектрического льда 0 на рассеяние и радиотепловое излучение атмосферных образований. Результаты настоящей работы показали, что изучение свойств данной модификации льда является актуальной задачей для развития электрофизических методов исследования различных природных сред. Полученные знания будут полезны для задач изучения переноса излучения, например, усовершенствования моделей изменения климата, так как до настоящего времени не была известна значительная экстинкция слоев атмосферы при образовании в ней частиц, покрытых льдом 0.

Новые электромагнитные характеристики поверхностных ледяных структур, определяющие перенос излучения в природных средах, помогут повысить достоверность интерпретации спутниковых данных о криосферных образованиях и других объектах земных оболочек при измерениях в широком диапазоне частот.

Основные выводы:

1. Установлено, что регистрация в природной среде сегнетоэлектрического льда 0, который образуется из переохлажденной воды при температуре ниже -23°C вблизи атмосферного давления, по аномалиям экстинкции электромагнитного излучения в микроволновом и оптическом диапазонах обусловлена возникновением поверхностного плазмонного резонанса.

2. Экспериментально подтверждено, что лед 0 обладает сегнетоэлектрическими свойствами. На границе раздела льда 0 и диэлектриков возникает слой с проводимостью близкой к металлической, что впервые показано по обнаружению перколяции проводимости при конденсации водяного пара на диэлектрические подложки.

3. В структуре атмосферного льда (град, снег) образуется сегнетоэлектрический лед 0, время существования которого достигает одних суток при температуре -10°C , что приводит к росту экстинкции электромагнитного излучения на ледяных частицах атмосферных осадков.

4. Подтверждена гипотеза свечения мезосферных серебристых облаков, которая основана на аномальном рассеянии излучения Солнца малыми ледяными частицами неправильной формы, содержащими в своей структуре лед 0. Особенность свечения в определенном частотном интервале определяется плазменной частотой носителей заряда в слое высокой электропроводности на контакте диэлектрика, в том числе льда Ih, и сегнетоэлектрического льда и геометрическими факторами рассеивающих излучение частиц.

5. Экспериментально показано широкое распространение сегнетоэлектрического льда 0 при процессах образования мерзлых структур в земных оболочках (мезосферных облаках, приземных туманах, осадках в виде града и ледяных частиц, конденсате водяных паров на диэлектриках) при температуре ниже -23°C .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tedesco M. Remote Sensing of the Cryosphere / M. Tedesco. – Oxford: John Wiley and Sons, 2015. – 404 p.
2. Liu Y. Nanoporous ices: an emerging class in the water/ice family / Y. Liu, Y. Pu, X. C. Zeng // *Nanoscale*. – 2023. – Vol. 15. – P. 92-100.
3. Multiple freezing–melting pathways of high-density ice through ice XXI phase at room temperature / Y.-H. Lee et al. // *Nature Materials*. – 2026. – Vol. 25. – P. 302-309.
4. Deep potential-driven structure exploration of ice polymorphs / Y. Lei et al. // *The Innovation*. – 2025. – Vol. 6, № 5. – P. 100881.
5. Russo J. New metastable form of ice and its role in the homogenous crystallization of water / J. Russo, F. Romano, Y. Tanaka // *Nature Materials*. – 2014. – Vol. 13, № 7. – P. 733-739.
6. Quigley D. On the stability of ice 0, ice i, and I-h / D. Quigley, D. Alfè, B. Slater // *The Journal of Chemical Physics*. – 2014. – Vol. 141. – P. 161102.
7. Бордонский Г. С. Признаки возникновения льда 0 в увлажненных нанопористых средах при электромагнитных измерениях / Г. С. Бордонский, А. О. Орлов // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2017. – Т. 105, № 8. – С. 483-488.
8. Бордонский Г. С. Лед 0 в природной среде. Экспериментальные данные и предполагаемые области его существования / Г. С. Бордонский, С. Д. Крылов, А. А. Гурулев // *Лед и снег*. – 2020. – Т. 60, № 2. – С. 263-273.
9. Бордонский Г. С. Поиски сегнетоэлектрических льдов в пористых средах в земных условиях измерениях / Г. С. Бордонский, А. О. Орлов // *Криосфера Земли*. – 2017. – Т. 21, № 6. – С. 45-54.
10. Bordonskiy G. S. Transmittance of Electromagnetic Radiation of the Visible Range by a Thin Film of Ice 0 Condensed on a Dielectric Substrate / G. S.

Bordonskiy, A. A. Gurulev, A. O. Orlov // JETP Letters. – 2020. – Vol. 111, № 5. – P. 278-281.

11. Sun G. Surface-induced water crystallisation driven by precursors formed in negative pressure regions / G. Sun, H. Tanaka // Nature Communications. – 2024. – Vol. 15, № 1. – P. 6083.

12. Plasmonic Observation of High-Density Nanoclustering in Low-Temperature H₂O / N. Park et al. // Small Science. – 2024. – Vol. 4. – P. 2400427.

13. Competing hydrogen-bond orders drive water's anomalous surface tension / J. Yuan et al. // Nature Communication. – 2026. – Vol. 17. – P. 1498.

14. Surface conductivity at the interface between ceramics and transformer oil / S. M. Korobeynikov et al. // Journ. of Physics. D: Applied Physics. – 2005. – Vol. 38, № 6. – P. 915.

15. Борен К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафмен. – М.: Мир, 1986. – 660 с.

16. Гец К. В. Теоретическое исследование амплитудных свойств коллективных колебаний аморфных льдов / К. В. Гец, О. С. Субботин // Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2013. – Т. 8, № 2. – С. 102-108.

17. Структурная неоднородность аморфного льда высокой плотности / В. П. Волошин и др. // Журнал структурной химии. – 2002. – Т. 43, № 5.

18. Medium-density amorphous ice / A. Rosu-Finsen et al. // Science. – 2023. – Vol. 379. – P. 474-478.

19. Аморфный лед средней плотности, полученный разложением водно-гелиевого геля / В. В. Синицын и др. // Физика твердого тела. – 2023. – Т. 65, №. 8. – С. 1307-1313.

20. Субботин О. С. Области стабильности аморфных льдов LDA, HDA и VHDA / О. С. Субботин, В. Р. Белослудов // Журнал структурной химии. – 2006. – Т. 47, № S7. – С. 65-69.

21. Кочетков А. В. Фазовая диаграмма воды / А. В. Кочетков, П. В. Федотов // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016. – Т. 8, №4. – С. 120-125.

22. Whalley E. Scheiner's Halo: Evidence for Ice Ic in the Atmosphere / E. Whalley // Science. – 1981. – Vol. 211, № 4480. – P. 389-90.
23. Mayer E. Cubic ice from liquid water / E. Mayer, A. Hallbrucker // Nature. – 1987. – Vol. 325. – P. 601-602.
24. Murray B. J. Formation and stability of cubic ice in water droplets / B. J. Murray, A. K. Bertram // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2006. – Vol. 8. – P. 186-192.
25. Cubic Ice Ic without Stacking Defects Obtained from Ice XVII / L. del Rosso et al. // Nat. Mater. – 2020. – Vol. 19, № 6. – P. 663-668.
26. Ice I_c without stacking disorder by evacuating hydrogen from hydrogen hydrate / K. Komatsu et al. // Nat. Commun. – 2020. – Vol. 11, № 1. – P. 464.
27. Compressed Baryonic Matter / S. Chattopadhyay // Proceedings of Science. – 2017. – P. 006.
28. Extent and Relevance of Stacking Disorder in "Ice I(C)" / W. F. Kuhs et al. // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. – 2012. – Vol. 109, № 52. – P. 21259-64.
29. Ultrafast XRay Probing of Water Structure Below the Homogeneous Ice Nucleation Temperature / J. A. Sellberg et al. // Nature. – 2014. Vol. 510, № 7505. – P. 381-384.
30. How Cubic Can Ice Be? / A. J. Amaya et al. // J. Phys. Chem. Lett. – 2017. – Vol. 8, № 14. – P. 3216-3222
31. Phase Transition between Crystalline Variants of Ordinary Ice / M. Li et al. // J. Phys. Chem. Lett. – 2022. – Vol. 13, № 36. – P. 8601-8606.
32. Mapping uncharted territory in ice from zeolite networks to ice structures / E. A. Engel et al. // Nat Commun. – 2018. – Vol. 9. – P. 2173.
33. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов / Е. Б. Чабина и др. // Труды ВИАМ. – 2013. – № 5. – С. 6.

34. Бояринцев С. О. Компьютерное моделирование гигантского комбинационного рассеяния в наноструктурированных метаматериалах / С. О. Бояринцев, А. К. Сарычев // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2011. – Т. 140, №. 6. – С. 1103-1112.
35. Компьютерное моделирование гигантского комбинационного излучения молекул в сферической металлической оболочке / А. В. Иванов и др. // Современная электродинамика. – 2023. – № 3 (5). – С. 30-37.
36. Ferroelectric thin films: performance modulation and application / S. Li et al. // Mater. Adv. – 2022. – Vol. 3. – P. 5735-5752
37. Widespread Supercooled Water Underneath the Arctic Sea Ice in the Freezing Season / Y. Tang et al. // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2025. – Vol. 130, №10. – P. e2025JC022819.
38. Бровка А. Г. Установка и методика для определения температуры начала замерзания воды в грунтах, горных породах и поровых растворах / А. Г. Бровка, И. В. Дедюля // Природопользование. – 2024. – Т. 2. – С. 131-136.
39. Cervený S. Dynamics of supercooled water in a biological model system of the amino acid l-lysine / S. Cervený, J. Swenson // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2014. – Vol. 16. – P. 22382-22390
40. Maciel F. V. Partition between supercooled liquid droplets and ice crystals in mixed-phase clouds based on airborne in situ observations / F. V. Maciel, M. Diao, C. A. Yang // Atmospheric Measurement Techniques. – 2024. – Vol. 17, № 16. – P. 4843-4861.
41. Vali G. The physics of supercooled water droplets in clouds / G. Vali, T. Sheu // Reviews of Geophysics. – 1989. – Vol. 27, № 4. – P. 439-464.
42. Homogeneous freezing of water droplets for different volumes and cooling rates / N. Shardt et al. // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2022. – Vol. 24. – P. 28213-28221.

43. Shrinking of Rapidly Evaporating Water Microdroplets Reveals their Extreme Supercooling / C. Goy et al. // *Physical Review Letters*. – 2018. – Vol. 120. – P. 015501.
44. Reversible structural transformations in supercooled liquid water from 135 to 245 K / L. Kringle et al. // *Science*. – 2020. – Vol. 369. – P. 1490-1492.
45. Колосов Г. Д. Калориметрические исследования квазижидкого слоя на поверхности гранул льда / Г. Д. Колосов, А. В. Тягунин // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2011. – Т. 94, № 5. – С. 406-409.
46. Structure and energetics of thin film water / S. R. Castrillón et al. // *Journal of Physical Chemistry C*. – 2011. – Vol. 115, № 11. – P. 4624-4635.
47. Melting and crystallization of ice in partially filled nanopores / E. G. Solveyra et al. // *Journ. of Physical Chemistry. B*. – 2011. – Vol. 115. – P. 14196-14204.
48. Колосовская Е. А. Физические основы взаимодействия древесины с водой / Е. А. Колосовская, С. Р. Лоскутов, Б. С. Чудинов. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1986. – 216 с.
49. Меньшиков Л. И. Феноменологическая модель гидрофобных и гидрофильных взаимодействий / Л. И. Меньшиков, П. Л. Меньшиков, П. О. Федичев // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2017. – Т. 152, №6 (12). – С. 1374-1392.
50. Possible anomaly in the surface tension of supercooled water: new experiments at extreme supercooling down to $-31,4^{\circ}\text{C}$ / V. Vins et al. // *J. Phys. Chem. Lett.* – 2020. Vol. 11. – P. 4443-4447.
51. Iridescence Reveals the Formation and Growth of Ice Aerosols in Martian Noctilucent Clouds / M. T. Lemmon et al. // *Geophysical Research Letters*. – 2024. – Vol. 51, № 23. – P. e111183.
52. Бронштэн В. А. Серебристые облака и их наблюдение / В. А. Бронштэн. – М.: Наука, 1984. – 128 с.

53. Далин П. А. Серебристым облакам 120 лет? / П. А. Далин, Н. Н. Перцев, В. А. Ромейко // Природа. – 2005. – № 6. – С. 12-21.
54. Ugolnikov O. S. Altitude and particle size measurements of noctilucent clouds by RGB photometry radiative transfer and correlation analysis / O. S. Ugolnikov // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2023. – Vol. 296. – P. 108433.
55. Ugolnikov O. S. Noctilucent clouds altitude and particle size mapping based on spread observations by ground-based all-sky cameras / O. S. Ugolnikov // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2024. – Vol. 259. – P. 106242.
56. Studies of noctilucent clouds from the stratosphere during the SONC balloon-borne experiment in 2021 / P. Dalin et al. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2022. – Vol. 240. – P. 105959.
57. Rapp M. Comment on “Ice iron/sodium film as cause for high noctilucent cloud radar reflectivity” by P. M. Bellan / M. Rapp, F. J. Lübken // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2009. Vol. 114. – P. D11.
58. Вариации полярных летних мезосферных отражений во время появления неоднородностей серебристых облаков / В. К. Ролдугин и др. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2018. – Т. 58, № 3. – С. 343-349.
59. Власков В. А. Наблюдение полярных летних мезосферных отражений с помощью радара частичных отражений / В. А. Власков, А. А. Боголюбов // Вестник МГТУ. – 1998. – Т. 1, №2. – С. 3-22.
60. Bellan P. M. Ice iron/sodium film as cause for high noctilucent cloud radar reflectivity / P. M. Bellan // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2008. – Vol. 113. – P. D16215.
61. Bellan P. M. Comment on comment by Markus Rapp and Franz-Josef Lübken on “Ice iron/sodium film as cause for high noctilucent cloud radar reflectivity” / P. M. Bellan // Journal of Geophysical Research. – 2010. – Vol. 115. – P. D13206.

62. Cloud formation from a localized water release in the upper mesosphere: Indication of rapid cooling / R. L. Collins et al. // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2021. – Vol. 126. – P. e2019JA027285.
63. Bordonskiy G. S. The possibility of observing noctilucent clouds in microwave radiometric measurements / G. S. Bordonskiy, A. A. Gurulev, A. O. Orlov // *25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Proc. SPIE*. – 2019. – Vol. 11208. – P. 270-274.
64. Предполагаемый механизм свечения мезосферных облаков / Г. С. Бордонский и др. // *Радиотехника и электроника*. – 2024. – Т. 69, № 4. – С. 307-315.
65. Experience of noctilucent clouds registering in the near infrared spectrum region / A. A. Solodovnik et al. // *Physical Sciences and Technology*. – 2024. – Vol. 11, № 1-2. – P. 85-93.
66. Электризация конвективных облаков в естественном цикле развития и при воздействиях (Самолетные исследования) : труды или тематический сборник «Вопросы атмосферного электричества», изданный при участии Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) и Академии наук СССР. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1990. – С. 76-102.
67. Вариации микроволновых потерь в ветках сосны при отрицательных температурах / Г. С. Бордонский и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2018. – Т. 15, № 5. – С. 120-129.
68. Mishima O. Volume of supercooled water under pressure and the liquid-liquid critical point / O. Mishima // *Journal of Chemical Physics*. – 2010. – Vol. 133, № 14. – P. 144503-6.
69. Copernicus Land Monitoring Service High Resolution Water, Snow and Ice products from Sentinel-1 and Sentinel-2 observations : Materials Conference: Winter Satellite Workshop - Remote Sensing Days. – 2024. – P. 1.

70. Булыгина О. Н. Мониторинг снежного покрова на территории Российской Федерации / О. Н. Булыгина, Н. Н. Коршунова, В. Н. Разуваев // Труды Гидрометцентра России. – 2017. – Т. 366. – С. 87-96.
71. Асмус В. Космический мониторинг ледяного покрова Арктики / В. Асмус, В. А. Кровотынцев, В. П. Пяткин // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2009. – Т. 4, № 1. – С. 101-107.
72. Караваев Д. М. Исследование вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков методом микроволновой радиометрии / Д. М. Караваев, Г. Г. Щукин // Оптика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 32, № 11. – С. 930-935.
73. Косторная А. А. Определение влагосодержания в безоблачной атмосфере над океаном по измерениям микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ / А. А. Косторная, А. Н. Рублев, В. В. Голомолзин // Вычислительные технологии. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 83-98.
74. Ермаков Д. М. Разработка нового алгоритма восстановления интегрального влагосодержания атмосферы над сушей по данным спутникового радиотеплового мониторинга / Д. М. Ермаков, В. Д. Поляков, Е. В. Полякова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17, № 1. – С. 31-41.
75. Насырьянова Р. Б. Мониторинг чрезвычайных ситуаций в Арктическом поясе средствами дистанционного зондирования Земли / Р. Б. Насырьянова // Современные научные исследования и инновации. – 2023. – № 5. – С. 100300.
76. Макаров В. З. Использование данных дистанционного зондирования Земли при изучении горных ледников (на примере ледника Алибек в Карачаево-Черкессии) / В. З. Макаров, Д. В. Тюков, П. А. Шлапак // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 13-20.

77. Коротких А. А. Использование данных дистанционного зондирования в гляциологических исследованиях на территории Северного Кавказа / А. А. Коротких // Живые и биокосные системы. – 2013. – № 5. – С. 16
78. Кинетические модели роста наноструктур по механизмам Франка– ван дер Мерве, Фольмера–Вебера и Странского–Крастанова // Тезисы докладов XIV Российской конференции по физике полупроводников "полупроводники-19" Новосибирск, 09–13 сент. 2019 г. – Новосибирск: Изд-во Перо, 2019. – С. 111.
79. Meissner T. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations / T. Meissner, F. J. Wentz // IEEE Trans. – 2004. – Vol. 42, № 9. – P. 1836-1849.
80. Бордонский Г. С. Диэлектрическая проницаемость глубоко переохлажденной воды по данным измерений на частотах 7.6 и 9.7 ГГц / Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев, А. О. Орлов // Радиотехника и электроника. – 2022. – Т. 67, № 3. – С. 259-267.
81. Бордонский Г. С. Коэффициент поглощения холодного облачного аэрозоля на частотах 100–300 ГГц / Г. С. Бордонский, А. О. Орлов // Исследование Земли из космоса. – 2022. – № 2. – С. 63-71.
82. Far-infrared absorption in ultrafine Al particles / C. G. Granquist et al. // Phys. Rev. Lett. – 1976. – Vol. 37. – P. 625-629.
83. Rathmann J. E. The extinction by small aluminum particles from the far infrared to the vacuum ultraviolet : Ph. D. Dissertation. / Janice Elaine Rathmann – University of Arizona, Tucson. – 1981. – 108 p.
84. Тарасевич Ю. Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы / Ю. Ю. Тарасевич. – М.: ЛИБРОКОМ, 2012. – 112 с.
85. Грузинцев А. Н. Модификация электрических и оптических свойств пленок ZnO под действием ультрафиолетового излучения / А. Н.

Грузинцев, В. Т. Волков // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45, №. 11. – С. 1470-1476.

86. Бордонский Г. С. Поиски льда 0 в земной атмосфере / Г. С. Бордонский, В. А. Казанцев, А. К. Козлов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2024. – Т. 60, № 6. – С. 968-976.

87. Understanding hail in the Earth system / J. T. Allen et al. // Reviews of Geophysics. – 2020. – Vol. 58. – P. e2019RG000665.

88. The existence of memory effect on hydrogen ordering in ice: The effect makes ice attractive / M. Arakawa et al. // Geophysical Research Letters. – 2011. – Vol. 38, № 16. – P. L16101.

89. Бордонский Г. С. Исследование возможности образования пленки льда 0 на поверхности диэлектрика в микроволновом резонаторе / Г. С. Бордонский, В. А. Казанцев, А. К. Козлов // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 211-216.

90. Kinematic and thermodynamic studies on water micro-droplets supercooled in a vacuum / T. Handa et al. // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2025. – Vol. 27. – P. 22187-22195.

91. Experimental study on the freezing process of water droplets for ice air jet technology / H. Jingru et al. // Sci. Rep. – 2024. – Vol. 14, № 1. – P. 3259.

92. Аномалии теплового излучения переохлаждённого водного аэрозоля над открытым участком водной поверхности / Г. С. Бордонский и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2025. – Т. 22, № 4. – С. 364-371.

93. Харлак Д. Метастабильные материалы из переохлажденных расплавов / Д. Харлак, П. Галенко, Д. Холланд-Мориц. – М.-Ижевск: R&C Dynamics, 2010. – 482 с.

94. Козлов А. К. О возможности обнаружения льда новой модификации в ледяном тумане по радиометрическим данным / А. К. Козлов, В. А. Казанцев // Техника радиосвязи. – 2025. – №3 (66). – С. 82-88.

95. Венславский В. Б. Методика измерения радиотеплового излучения атмосферы с использованием сканирующего устройства / В. Б. Венславский, А. К. Козлов, Д. В. Середин // Успехи современного естествознания. – 2024. – № 10. – С. 96-101.
96. Кутуза Б. Г. Спутниковый мониторинг Земли: микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности / Б. Г. Кутуза, О. И. Яковлев, М. В. Данилычев. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 336 с.
97. Gurulev A. A. Radiometric research of the winter atmosphere in the city of Chita in the infrared and microwave ranges / A. A. Gurulev, V. A. Kazantsev, A. K. Kozlov // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2023. – Vol. 12780. – P.12780.
98. Наблюдение полярных мезосферных облаков в утренние часы перед восходом Солнца в Забайкалье летом 2024 года : материалы 22-й Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, 11–15 нояб. 2024 г. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2024. – С. 402.
99. Дистанционное изучение опасного атмосферного явления (выпадение града) в г. Чита / А. А. Гурулев и др. // Естественные и технические науки. – 2023. – Т. 184, № 9. – С. 30-34.
100. Kozlov A. Relationship of precipitation intensity in the form of snow with atmospheric electricity and radiothermal radiation of the snow cover / A. Kozlov, V. Kazantsev // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 525. – P. 02013.
101. Бордонский Г. С. Измеритель квазистатического электрического поля / Г. С. Бордонский, С. Д. Крылов // Приборы и техника эксперимента. – 2003. – Т. 46, № 6. – С. 115-116.
102. Козлов А. К. Измерение вариаций атмосферного электрического поля в г. Чите / А. К. Козлов, В. А. Казанцев, В. Б. Венславский // Естественные и технические науки. – 2022. – Т. 173, № 10. – С. 124-127.

103. Швер Ц. А. Климат Читы / Ц. А. Швер, И. А. Зильберштейна. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. – 248 с.
104. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов / Б. М. Тареев. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.
105. Melting and crystallization of ice in partially filled nanopores / E. G. Solveyra et al. // J. Phys. Chem. B. – 2011. – Vol. 115. – P. 14196-14204.
106. Salzmann C. G. Advances in the experimental exploration of water's phase diagram / C. G. Salzmann // The Journal of Chemical Physics. – 2019. – Vol. 150, № 6. – P. 060901.
107. Современная кристаллография: Т. 4. Физические свойства кристаллов / Л. А. Шувалов и др. – М.: Наука, 1981. – 495 с.
108. Crystalline clusters in mW water: Stability, growth, and grain boundaries / F. Leoni et al. // J. Chem. Phys. – 2019. – Vol. 151, № 4. – P. 044505.
109. Trigonal ice crystals in Earth's atmosphere / B. J. Murray et al. // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2014. – Vol. 96, № 9. – P. 1519–1531.
110. Libbrecht K. G. The physics of snow crystals / K. G. Libbrecht // Reports on Progress in Physics. – 2005. – Vol. 68. – P. 855–895.
111. Bordonskiy G. S. Electromagnetic features of structures made of Ih ice covered with ice 0 / G. S. Bordonskiy, A. A. Gurulev, A. O. Orlov // Proc. SPIE. 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2023. – P. 127800D.
112. Flexoelectricity and surface phase transition in natural ice / X. Wen et al. // arXiv. – 2022. – Vol. 2212. – P. 00323v1: 1/14.
113. Гайдук А. Е. Мультирезонансные поляризационные системы на основе метаповерхностей : физическое исслед. : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук : 01.04.07 «Физика конденсированного состояния» / Алексей Евгеньевич Гайдук – Новосибирск, 2021. – 229 с.

114. Климов В. В. Наноплазмоника / В. В. Климов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 480 с.
115. Майер С. А. Плазмоника: теория и приложения / С. А. Майер. – М.-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2011. – 278 с.
116. Томилина О. А. Влияние перколяционного перехода на электропроводящие и оптические свойства сверхтонких металлических пленок / О. А. Томилина, В. Н. Бержанский, С. В. Томилин // Физика твердого тела. – 2020. – Т. 62, № 4. – С. 614-620.
117. Spontaneously polarised crystalline water ice / R. L. James et al. // *Nanoscale*. – 2026. – Vol. 18. – P. 6916-6922.
118. Leoni F. Devitrification and melting in vapordeposited ice / F. Leoni, F. Martelli, J. Russo // *J. Chem. Phys.* – 2025. – Vol. 163. – P. 104501.
119. Near-infrared Spectroscopy for Remote Sensing of Porosity, Density, and Cubicity of Crystalline and Amorphous H₂O Ices in Astrophysical Environments / C. M. Tonauer et al. // *The Astrophysical Journal*. – 2024. – Vol. 970, № 1. – P. 82.
120. UV-Induced Formation of Ice XI Observed Using an Ultra-High Vacuum Cryogenic Transmission Electron Microscope and its Implications for Planetary Science / A. Kouchi et al. // *Frontiers in Chemistry*. – 2021. – Vol. 9. – P. 799851.
121. Основные сценарии развития вариаций атмосферно-электрических величин в приземной атмосфере во время сильных морозов на территории Сибири / В. И. Козлов и др. // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. – 2019. – Т. 29, № 4. – С. 135-148.
122. Shavlov A. V. Spatially ordered structures in storm clouds and fogs / A. V. Shavlov, V. A. Dzhumandzhi // *Physics Letters A*. – 2010. – Vol. 374, № 25. – P. 2561-2565.

123. Анисимов С. В. Геофизические исследования глобальной электрической сети / С. В. Анисимов, Е. А. Мареев // Физика Земли. – 2008. – № 10. – С. 8-18.

124. An overview of Earth's global electric circuit and atmospheric conductivity / M. J. Rycroft et al. // Space Science Reviews. – 2008. – Vol. 137, № 1. – P. 83-105.

125. Шавлов А. В. Заряд капель воды при испарении и конденсации / А. В. Шавлов, В. А. Джуманджи, А. А. Яковенко // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2017. – № 587. – С. 56-78.

126. Design and fabrication of an electrometer for the measurement of atmospheric potential / S. Manu et al. // ESAIJ. – 2013. – Vol. 8, № 11. – P. 442-452.

127. Козлов А. К. Особенности радиотеплового изучения наледей в микроволновом диапазоне / А. К. Козлов, А. А. Гурулев // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 3. – С. 73-85.