

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

На правах рукописи



Казанцев Вячеслав Андреевич

**ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЬДА И МЕРЗЛЫХ
ДИСПЕРСНЫХ СРЕД ВБЛИЗИ ТЕМПЕРАТУРЫ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА**

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, профессор
Бордонский Георгий Степанович

Чита – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	17
1.1 Диэлектрические характеристики льдов, встречающихся в земных условиях	17
1.2 Электромагнитные свойства воды в интервале температур $+4...-70\text{ }^{\circ}\text{C}$...	26
1.3 Дистанционное зондирование тающих льдов в микроволновом диапазоне .	32
1.4 Обоснование выбранной темы. Постановка задачи	40
ГЛАВА 2. ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА	44
2.1 Лабораторные исследования относительной диэлектрической проницаемости льда.....	44
а) Резонаторные методы исследования диэлектрических характеристик криосферных образований	44
б) Эксперименты по просвечиванию блоков льда в микроволновом диапазоне	46
в) Радиометрические исследования микроволновых характеристик льда вблизи температуры фазового перехода	48
г) Эксперименты по просвечиванию блоков льда в инфракрасной области спектра.....	49
д) Эксперименты по просвечиванию блоков льда в видимой и УФ областях спектра на длинах волн 535 нм и 370 нм.....	52
2.2 Натурные измерения микроволновых характеристик ледяных структур вблизи $0\text{ }^{\circ}\text{C}$	54
а) Эксперименты по исследованию микроволновых характеристик ледяных образований на фоне излучения холодного неба	54
б) Эксперименты по радиопросвечиванию пресного ледяного покрова и увлажненной дисперсной среды на примере растительного покрова.....	56
2.3 Оценка погрешности измерений	57
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	60

3.1 Результаты измерений действительной и мнимой частей относительной комплексной диэлектрической проницаемости льда и снега, полученные резонаторным методом.....	60
3.2 Результаты радиометрических исследований образцов льда на фоне холодного неба	63
3.3 Результаты радиометрических исследований ледяных покровов	65
3.4 Результаты экспериментов по просвечиванию образцов льда в микроволновом диапазоне	67
3.5 Результаты экспериментов по просвечиванию образцов льда в оптическом диапазоне.....	69
3.6 Результаты экспериментов по просвечиванию образцов льда в инфракрасном диапазоне.....	74
3.7 Существование эффекта «просветления» в дисперсных средах.....	77
3.8 Исследование эффекта «просветления» в ледяном покрове пресного озера	79
3.9 Зависимость эффекта «просветления» от минерализации льда.....	80
3.10 Зависимость эффекта «просветления» от деформации.....	83
ГЛАВА 4. РАСЧЕТ РАДИОЯРКОСНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КРИОГЕННЫХ ПЛОСКОСЛОИСТЫХ СРЕД ПРИ ЭФФЕКТЕ «ПРОСВЕТЛЕНИЯ»	87
4.1 Модель для расчета радиояркой температуры.....	87
4.2 Результаты расчета радиояркой температуры плоскостойких сред при эффекте «просветления»	88
4.3 Обсуждение результатов моделирования.....	91
ГЛАВА 5. ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ЭФФЕКТА. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	93
5.1 Возможный механизм эффекта «просветления»	93
5.2 Теоретические оценки интенсивности проходящего излучения через слой льда	103
5.3 Частотная зависимость эффекта «просветления»	104
5.4 Использование эффекта «просветления» при дистанционном зондировании ледяных и снежных образований	106

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	110
СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	113

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Исследования по физике льда и воды представляют интерес для различных научных дисциплин, в частности, химии, гляциологии, биологии, геофизики, космофизики и других. Лед, как фаза твердого состояния воды, имеет достаточно широкое распространение на нашей планете. Например, на декабрь 2025 г. 99% территории России было покрыто снежно-ледяным покровом. Мониторинг снежных и ледяных покровов (состояние ледников, ледовых переправ, выбор оптимальных транспортных маршрутов следования и т.д.) востребован как со стороны транспортной безопасности, так и со стороны экономики. Ледяной покров является индикатором состояния окружающей среды [1]. По площади ледяного покрова в Северном Ледовитом океане делаются прогнозы климатических изменений [2]. Одним из методов оценки площади льдов являются активные и пассивные методы аэрокосмического дистанционного зондирования в широком диапазоне частот. Данные методы основываются на особенностях диэлектрических характеристик льда и воды. В настоящее время дистанционное зондирование Земли активно развивается, что подтверждается большим количеством (более 13 тысяч) искусственных спутников Земли для ее мониторинга. Таким образом, знание электромагнитных свойств криосферных образований и их компонентов: льда и воды, является актуальной задачей.

Электрофизические характеристики льда и мерзлых дисперсных сред обладают некоторыми особенностями вблизи фазового перехода при температуре 0 °С. В работах [3,4] были представлены экспериментальные данные по обнаружению эффекта понижения диэлектрических потерь при просвечивании льда в микроволновом диапазоне вблизи 0 °С. Эффект был назван «просветлением», ввиду того, что среда меньше поглощает проходящее излучения. Эта аномалия была выявлена на различных частотах микроволнового диапазона. При просвечивании небольших образцов льда с линейными размерами

~10 см при их нагревании происходило приращение мощности проходящего сигнала на ~20% вблизи температуры фазового перехода.

Степень разработанности темы исследования. К исследованию эффекта «просветления» льда можно отнести работу [5], где упоминается о сильных уменьшениях погонного затухания электромагнитного излучения в пресном льду. Авторами было обнаружено, что погонное затухание на длине волны 0,8 см в кернах льда изменялось от 13 дБ/м до 0 дБ/м, однако температура льда не приводилась. Позднее, в работах [3,4] эффект «просветления» был зарегистрирован в микроволновом диапазоне, была определена его зависимость от температуры и связь с пространственным расположением базисных плоскостей кристаллов льда и плоскости поляризации излучения. В работе [6] предложен качественный механизм возникновения данного эффекта, который связывается с возникновением плазмон-поляритонов. Однако имеется ряд нерешенных вопросов физики данного явления, в частности, зависимость от частоты, концентрации включений, температуры, внутренних механических напряжений, особенностей кристаллической структуры.

Основная цель исследования заключалась в изучении эффекта «просветления» льда – уменьшения затухания электромагнитного излучения вблизи температуры фазового перехода лед-вода в более широком интервале частот от микроволнового до ультрафиолетового.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Усовершенствовать методики исследования диэлектрических характеристик пресного льда вблизи температуры фазового перехода лед Ih – вода в широком интервале частот: от единиц гигагерц до УФ-диапазона.

2. Выполнить измерения электромагнитных характеристик образцов льда и снега вблизи температуры фазового перехода лед-вода в широком интервале частот. Эксперименты заключались: 1) в измерении собственного теплового излучения образцов льда и мерзлых дисперсных сред на частотах 5,2 ГГц, 13,4 ГГц, 34 ГГц; 2) в проведении резонаторных исследований криосферных

образований (лед, снег, грунт, биологические ткани) в сантиметровом диапазоне; 3) в исследовании мощности проходящего излучения через лед, содержащий различные концентрации солей и различное пространственное расположение главной оптической оси кристаллов относительно вектора напряженности электрического поля в широком диапазоне частот (от единиц гигагерц до УФ-диапазона); 4) в измерениях затухания проходящего микроволнового излучения через кустарник в осенне-зимнее время.

3. Выявить возможные ошибки определения излучательных характеристик снежных, ледяных покровов и других криосферных образований вблизи температуры фазового перехода лед–вода при их микроволновых радиометрических измерениях, на примере анализа мощности собственного теплового излучения ледяного покрова пресного водоема.

4. Установить зависимости уменьшения затухания электромагнитного излучения льда от температуры, минерализации, пространственного расположения базисных плоскостей кристаллов относительно вектора напряженности электрического поля и влияния на него пластической деформации среды.

5. Развить теоретические представления о физическом механизме эффекта «просветления» и представить его возможное использование в физике конденсированного состояния водных объектов и дистанционного зондирования гидросферы и криосферы.

Научная новизна. Впервые экспериментально установлено, что в области температур $-0,5 \dots -0,1$ °C регистрируется уменьшение диэлектрических характеристик (эффект «просветления») льда в ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном диапазонах, а также получены новые данные в микроволновом диапазоне. Установлены зависимости эффекта от частоты, степени минерализации ледяных структур и пространственного расположения базисных плоскостей кристаллов льда по новым экспериментальным данным. Представлено уточнение физических особенностей эффекта «просветления» льда на основе теории плазмонного резонанса, заключающиеся в наличии электрической

проводимости по базисным плоскостям кристаллов льда. На основе экспериментальных данных впервые выполнены теоретические оценки влияния эффекта «просветления» для плоскостойкой структуры воздух-лед-вода на собственное тепловое излучение в микроволновом диапазоне.

Теоретическая и практическая значимость

Основные теоретические и практические результаты диссертации были получены в рамках выполнения государственных заданий с 2021 г. по настоящее время по теме Министерства науки и высшего образования РФ и включены в пять годовых научно-технических отчетов лаборатории геофизики криогенеза ИПРЭК СО РАН по проекту FURF-2021-0003 «Электромагнитные характеристики холодной воды, мерзлых сред и совершенствование микроволновых методов зондирования вод суши».

Результаты исследования позволили установить новые электромагнитные свойства поликристаллического гексагонального льда вблизи температуры фазового перехода, которые способствуют усовершенствованию моделей излучающих ледяных структур (лед, снег, мерзлые дисперсные среды). Данные результаты представляют практический интерес для развития методов и средств спектроскопии льда, в том числе при аэрокосмическом дистанционном зондировании Земли и космических объектов.

Методы исследования: электрофизические эксперименты с использованием скалярных и векторных анализаторов цепей, микроволновых и ИК радиометров; эксперименты по исследованию электропроводности льда; эксперименты по исследованию электромагнитных свойств различных сред на специальных установках при использовании климатической камеры фирмы ESPEC; методы численного моделирования для расчета радиояркостной температуры многослойных неизотермических плоскостойких сред и погонного затухания во льду; натурные исследования излучательных и поглощающих характеристик льда природных водоемов Забайкалья.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Уменьшение погонного затухания электромагнитного излучения в поликристаллическом гексагональном льду, наблюдающееся в области температур $-0,5...-0,1$ °С на частотах микроволнового, инфракрасного, видимого и ультрафиолетового диапазонов, экспоненциально зависит от механического напряжения.
2. Изменение мощности электромагнитного излучения, проходящего через гексагональный поликристаллический лед при температурах $-0,5...-0,1$ °С, связано с количеством солевых включений на единицу объёма, а также с пространственным расположением вектора напряжённости электрического поля относительно базисных плоскостей кристаллов льда. Данные факты служат обоснованием новых аэрокосмических методик определения параметров ледяных структур вблизи температуры фазового перехода.
3. Физический механизм эффекта уменьшения диэлектрических характеристик гексагонального льда вблизи температуры фазового перехода определяется возникновением плазмонного усиления электромагнитного поля, обусловленного повышением электропроводности квазижидких слоев, образующихся при ползучести частей кристаллов льда по базисным плоскостям.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях и симпозиумах: International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics/Atmospheric Physics (2023); Международная открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2022, 2023, 2024, 2025); Международная научно-практическая конференция «Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов» (Чита, 2022, 2023); Всероссийская конференция с международным участием «Эволюция биосферы и техногенез» (Чита, 2024). XVI Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Современные проблемы радиоэлектроники и связи» (Иркутск, 2024). III

Российская научная конференция «Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества» (Омск, 2024), IV Международная конференция по геотехнологии, недропользованию и рациональному использованию природных ресурсов (Узбекистан: Навои, 2023, 2024), Всероссийские открытые Арmandовские чтения (Муром 2025).

Публикации

Основные результаты диссертации представлены в 30 работах, проиндексированных в РИНЦ. На момент завершения диссертационного исследования в изданиях из перечня ВАК – 14 статей. Десять публикаций с индексированием в «Белом списке». В системе Web of Science (WoS) и Scopus проиндексированы 11 статей. Результаты диссертации были представлены на тринадцати Международных и Всероссийских научных конференциях.

Список основных публикаций:

1. Бордонский Г. С. Широкополосные измерения диэлектрических характеристик льда вблизи температуры 0 °С / Г. С. Бордонский, В. А. Казанцев // Журнал технической физики. – 2025. – Т. 95, № 7. – С. 1427-1433.
2. Казанцев В. А. Оценка влияния «просветления» льда вблизи 0 °С на радиояркостную температуру снежных и ледяных покровов в длинноволновой части сантиметрового диапазона / В. А. Казанцев, Г. С. Бордонский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2025. – Т. 22, № 1. – С. 259-267.
3. Экспериментальное обнаружение просветления пресного льда в оптическом диапазоне вблизи 0 °С / Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев, В. А. Казанцев, Д. В. Середин // Оптика и спектроскопия. – 2023. – Т. 131, № 10. – С. 1374-1379.
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. Казанцев В. А. Существование эффекта "просветления" льда в инфракрасном диапазоне / В. А. Казанцев, Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев // Оптика и спектроскопия. – 2026. – Т. 134, № 4. – С. 423-426.
6. Выявление областей торошения пресного ледяного покрова по собственному тепловому излучению / А. А. Гурулев, А. О. Орлов, С. В. Цыренжапов, В. А. Казанцев, А. К. Козлов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20, № 1. – С. 219-228.
7. Выявление термальных источников с использованием космических методов исследований / А. А. Гурулев, Л. В. Замана, А. П. Куклин, В. А. Казанцев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21, № 2. – С. 131-140.
8. Gurulev A. A. Detection of thermal pollution of urban reservoirs using the method of IR-radiometry based on the example of the Lake Kenon, Zabaykalsky Krai / A. A. Gurulev, V. A. Kazantsev // Nexa Revista Científica. – 2022. – Vol. 35, №. 02. – P. 527-532.
9. Особенности распространения микроволнового излучения в пресном ледяном покрове / А. А. Гурулев, С. В. Цыренжапов, Ю. В. Харин, В. А. Казанцев // Ученые записки Забайкальского государственного университета. – 2021. – Т. 16, № 3. – С. 59-68.
10. Gurulev A. A. The specific features of the thermal radiation of lake Kenon during freeze-up in the infrared band / A. A. Gurulev, V. A. Kazantsev // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2022. – Vol. 962, № 1. – P. 012016.
11. 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. – P.12780.
12. Обнаружение выхода газа в озере Шакшинское (Забайкальский край) дистанционными методами / А. А. Гурулев, А. О. Орлов, В. А. Казанцев, А. К.

Козлов, С. В. Цыренжапов, Д. В. Середин // Российская Арктика. – 2023. – Т. 5, № 4 (23). – С. 27-36.

13. Methods of research of radiothermal radiation of cryospheric objects in the microwave range / A. Gurulev, G. Bordonskiy, V. Kazantsev, A. Kozlov // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 525. – P. 02009.

14. Особенности методики микроволновых радиометрических измерений с борта БПЛА на волне 0,8 см / Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев, В. А. Казанцев, А. К. Козлов // Техника радиосвязи. – 2025. – № 1(64). – С. 102-111.

Личный вклад автора

Автором диссертации проанализировано современное состояние решения задач распространения микроволнового излучения в ледяных образованиях вблизи температуры фазового перехода лед–вода. Автором модернизированы методики исследования диэлектрических характеристик льда вблизи температуры 0 °С и выполнены экспериментальные исследования (как в лабораторных, так и в натуральных условиях) с обработкой полученных данных для широкого диапазона электромагнитного излучения: от микроволнового до ультрафиолетового. На основе полученных расчетных и экспериментальных результатов показаны возможные ошибки в интерпретации данных дистанционного зондирования при радиометрии ледяных и снежных покровов, находящихся при температуре около 0 °С. Рассмотрен теоретический аспект объяснения эффекта «просветления» и предложена электродинамическая модель плазмонной структуры. У автора нет конфликта интересов с другими коллегами, принимавшими участие в исследованиях, отраженных в диссертации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, вывода, списка литературы. Работа изложена на 128 страницах машинописного текста, включает 54 рисунка, список литературы из 150 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю, профессору Г.С. Бордонскому, который привлек мое внимание к тематике исследования электромагнитных свойств льда вблизи температуры фазового перехода лед-вода, в результате чего была представлена к

защите настоящая диссертация. Автор благодарит коллектив лаборатории геофизики криогенеза ИПРЭК СО РАН, который активно помогал в осуществлении полевых исследований в зимний период времени.

Краткое содержание работы

Во **Введении** сформулирована цель работы и показана ее актуальность, поставлены задачи исследования, сформулированы положения, которые выносятся на защиту, показана достоверность и практическая значимость результатов. Представлены сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

В первой главе дан обзор литературных источников по известным физическим свойствам льда и воды, прежде всего по диэлектрической проницаемости. Показаны основные зависимости вышеуказанной величины для льда и воды от частоты, температуры, минерализации. Представлены температурные точки, в которых имеются аномалии физических характеристик ($-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ – линия Видома при нормальном атмосферном давлении; $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ фазовый переход переохлажденной воды в метастабильную модификацию льда – лед 0; максимум плотности воды вблизи $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$; кристаллизация при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Также в данной главе показаны особенности дистанционного мониторинга льдов находящихся вблизи температуры $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в микроволновом диапазоне. Представлены некоторые несогласованности теоретических и экспериментальных результатов дистанционного зондирования льдов Гренландии: увеличения обратного рассеяния в период перед началом деструкции. При радиометрическом мониторинге водоемов северной Канады: нехарактерное понижение в радиояркостной температуре в микроволновом диапазоне перед началом таяния ледяного покрова.

Дано обоснование темы исследования и поставлены задачи. Приведены результаты исследования электрофизических свойств льда вблизи температуры фазового перехода, где наблюдается исследуемый в настоящей работе эффект «просветления» льда.

Во **второй главе** представлено описание техники и методики экспериментального исследования. К лабораторным исследованиям эффекта «просветления» относятся: резонаторные методы, в которых использовались прямоугольные резонаторы с различными линейными размерами, что характеризуется различной частотой исследования (собственные частоты резонаторов 2,8 ГГц, 6,1 ГГц, 13 ГГц). В данных экспериментах для установки скорости нагревания образцов применялась климатическая камера. Эксперименты по просвечиванию блоков льда основывались на регистрации приемником сигнала определенной частоты от генератора. При помощи скалярного анализатора цепей был зафиксирован эффект «просветления» в диапазоне частот – от 7 до 13 ГГц. При радиометрических исследованиях микроволновых характеристик льда использовались радиометрические приёмники на частоту 34 ГГц. Измерения теплового излучения плоско-слоистой структуры воздух-лед-вода позволили установить понижение радиояркостной температуры при эффекте «просветления». При исследованиях в инфракрасной области электромагнитного спектра использовался радиометрический приемник с полосой от 2 до 25 мкм, и фотодиод с полосой от 3,8–4,2 мкм. В видимом диапазоне исследование понижение диэлектрических потерь осуществлялось при помощи фотодиодов на длину волны 370 нм и 535 нм.

При натурных исследованиях электромагнитных характеристик льда использовались радиометры микроволнового диапазона. Регистрировалась мощность теплового излучения на фоне холодного неба на различных поляризациях. При радиопросвечивании ледяного покрова приемник и генератор излучения устанавливались в углубления на расстоянии 40 м друг от друга. По аналогичной методике осуществлялось исследование вариаций мощности излучения через кустарники. Представлена информация об ошибках в измерениях.

В **третьей главе** даны результаты измерений электрофизических характеристик льда, снега и других природных сред вблизи температуры фазового перехода. Резонаторными методами показано, что уменьшение мнимой части

относительной комплексной диэлектрической проницаемости льда при эффекте «просветления» может достигать в 5 раз. Это в случае пространственного совпадения вектора электрического поля с базисными плоскостями кристалла льда. При их перпендикулярном расположении эта величина достигает 2,5 раз. Показано существование эффекта «просветления» для снега. Также в данной главе представлено различие в уменьшении радиояркой температуры на различных поляризациях для блока льда с выделенным направлением базисных плоскостей кристаллов льда, и отсутствие разницы для блока, где не наблюдается строго выраженное пространственное направление базисных плоскостей. При радиометрических исследованиях микроволновых характеристик льда на частоте 34 ГГц выявлено уменьшение радиояркой температуры плоскостистой среды на 15 К. При просвечивании блоков льда эффект «просветления» был одновременно зафиксирован в диапазоне частот от 7 до 13 ГГц. Также было показано существование эффекта в оптике при длинах волн 370 нм, 535 нм, 3,8–4,2 мкм, 10–16 мкм. Представлены данные о существовании эффекта в дисперсных средах (деревья, кустарники). Была исследована зависимость «просветления» льда от содержания солей. При концентрации более 200 мг/кг эффект практически не наблюдается. Имеется зависимость эффекта от деформации – при увеличении механических напряжений обнаруживается сдвиг эффекта по температуре в более холодную область.

В **четвертой главе** приведен расчет радиояркой температуры криогенных плоскостистых сред при эффекте «просветления». Используя модель, которая заключается в суммировании интенсивностей излучения каждого слоя, на основе экспериментальных данных, было показано, что уменьшение радиояркой температуры слоя льда толщиной 1,5 м, лежащего на воде, может составить 30 К. А для снежного покрова такое уменьшение составляет около 5 К.

В **пятой главе** описан возможный механизм протекания эффекта «просветления». Он основывается на возникновении плазмонного резонанса на высокопроводящих слоях, которые располагаются по базисным плоскостям кристаллов льда. Такие слои толщиной около 1 нм были экспериментально

обнаружены нобелевским лауреатом Геймом с соавторами. В этой главе предложена качественная модель образования проводящих слоев по базисным плоскостям кристаллов льда. Экспериментально показана разница в сопротивлении на постоянном токе по базисным плоскостям кристалла льда и по направлению главной оптической оси. Сопротивление отличается приблизительно в 3 раза для природного льда, а для искусственно выращенного образца такое значительное отличие не наблюдается. Также показано отсутствие связи эффекта «просветления» с интерференцией в образце льда в виде плоской пластины. На основе экспериментальных данных построен график интенсивности эффекта «просветления» в зависимости от частоты. Наибольшая интенсивность наблюдается вблизи длины волны 1 см. Показано возможное использование полученных в настоящей работе данных при дистанционном зондировании ледяных и снежных структур.

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

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В главе представлен анализ современного состояния знаний об электромагнитных свойствах льда и воды. Показаны зависимости диэлектрических характеристик воды и льда от температуры, частоты, наличия примесей. Представлены некоторые отличия экспериментальных результатов дистанционного мониторинга снежных и ледяных покровов, находящихся вблизи температуры таяния, в микроволновом диапазоне. Обоснована тема исследования и поставлены задачи.

1.1 Диэлектрические характеристики льдов, встречающихся в земных условиях

Исследование Земли при помощи методов дистанционного зондирования занимает отдельное место в геофизике, физике атмосферы, метеорологии и т.д. [7,8]. В случае пассивного (радиометрического) метода важными характеристиками для определения интенсивности теплового излучения ледяных образований Земли со льдом I_h в микроволновом диапазоне являются температура поверхности, угол зондирования, поляризация, диэлектрические характеристики подстилающей поверхности и ее геометрия [9].

Магнитная проницаемость льда (μ') составляет 0,9997 [11]. Это значение практически равно единице, поэтому магнитные свойства льда не рассматриваются.

На частотах 100 МГц – 10 ГГц электромагнитные характеристики льда I_h описываются теорией Дебая [7,8,12]. Относительная комплексная диэлектрическая проницаемость состоит из действительной части и мнимой части и задается как [13]:

$$\hat{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (1.1)$$

где, ϵ – комплексная диэлектрическая проницаемость, ϵ' – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости, ϵ'' – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости, i – мнимая единица.

При повышении частот до 0,1 ТГц действительная часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости также описывается теорией Дебая, а мнимая часть монотонно возрастает [13; 14]:

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^2}; \quad (1.2)$$

$$\epsilon'' = \frac{\lambda_s}{\lambda} \cdot \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^2}, \quad (1.3)$$

где ϵ_{∞} – высокочастотный предел диэлектрической проницаемости, ϵ_s – значение статической диэлектрической проницаемости, $\lambda_s = \frac{c}{f_s}$ – критическая длина волны, f_s – критическая частота (или частота релаксации). Для определения критической длины волны используется взаимосвязь времени релаксации с частотой

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_s}, \quad (1.4)$$

где время релаксации определяется формулой

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{E}{R_g T}}, \quad (1.5)$$

где E – энергия активации, T – термодинамическая температура, R_g – универсальная газовая постоянная.

Поэтому ϵ'' в [13] выражается как

$$\epsilon'' = \frac{A}{f} + B f^C, \quad (1.6)$$

где f – частота сигнала, A, B, C – константы, зависящие от температуры и солености. Второй член в данном уравнении определяется поглощением в ИК диапазоне. В работе [22] получено полуэмпирическое выражение для мнимой части относительной комплексной диэлектрической проницаемости для любой температуры и частоты в диапазоне 0,1 – 200 ГГц:

$$\epsilon'' = \frac{712 \cdot e^{-\frac{3742}{T}}}{f} + 256 \cdot f^D \cdot e^{-\frac{4070}{T}}, \quad (1.7)$$

Где $D = 1 + 0,0133(273 - T)$ и f – частота в ГГц, T – термодинамическая температура в градусах Кельвина.

Лед, как объект исследования, представляет большой практический интерес, ввиду его распространения как на Земле, так и на других планетах и их спутниках. Работы по изучению диэлектрической проницаемости льда представлены в широком диапазоне частот [13–22]. В данном исследовании будем уделять особое внимание микроволновому диапазону.

Стоит обратить внимание на тот факт, что в настоящий момент известно о 21 различных полиморфных формах, а также аморфных формах низкой и высокой плотности льда [23,36]. В работе [24] было показано отличие диэлектрических параметров гексагонального (Ih) льда от кубического (Ic). Здесь мы будем говорить о гексагональном льде, ввиду его широкого распространения в природных земных средах, по сравнению с другими модификациями льдов.

При исследовании микроволновых свойств льда особое место уделяется зависимости от температуры. Это объясняется необходимостью знаний вышеуказанных параметров для корректного восстановления электромагнитных характеристик подстилающей поверхности. Например, в [13] представлены результаты исследования действительной и мнимой частей относительной комплексной диэлектрической проницаемости чистого льда на разных частотах, в зависимости от температуры, что проиллюстрировано на рисунке 1.1.1 [13]. Из графика следует, что ε'' зависит от температуры. Уменьшение потерь с понижением температуры образца льда объясняется вымерзанием кластеров воды. Стоит обратить внимание, что результаты на рисунке 1.1.1 представлены для льда, в котором содержание примесей меньше 1 мг/кг. Как было отмечено в [25], захваченные льдом примеси, в виде солевых включений, оказывают влияние на диэлектрические характеристики из-за образования микрокапель раствора. Более подробно это будет представлено далее.

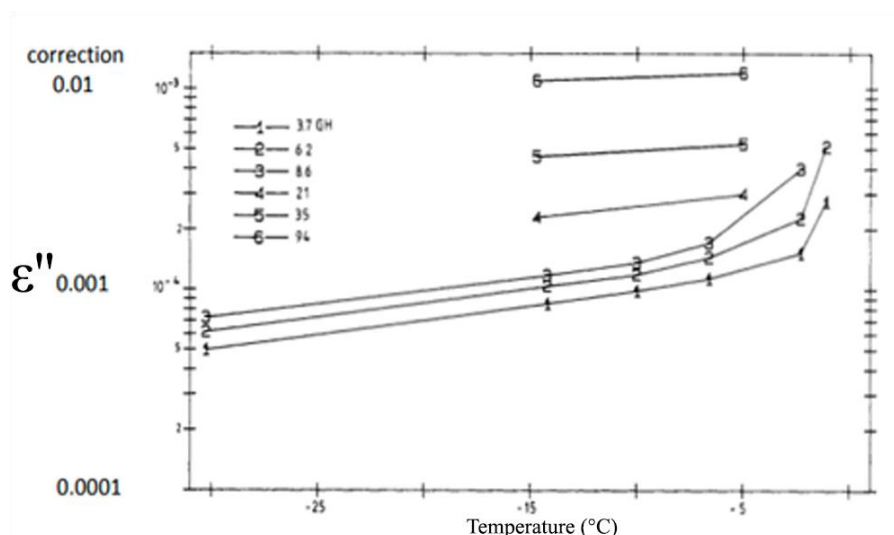


Рисунок 1.1.1 – Температурная зависимость ε'' чистого льда на различных частотах. Оценочные погрешности составляют 5% на частотах ниже 10 ГГц, 15% на частотах 21 и 35 ГГц и 5% на частоте 94 ГГц [13]

Температурная зависимость наблюдается и для действительной части относительной комплексной диэлектрической проницаемости льда. Эта зависимость слабая. В работе [13] представлена линейная зависимость: $\varepsilon' = 3,1884 + 0,00091 \times T$, где T – термодинамическая температура. Данное выражение приближённо описывает ε' . Так в работе [26] были продемонстрированы изменения мнимой и действительной части относительной комплексной диэлектрической проницаемости льда от температуры, взятого с глубины 350 м Купола Фудзи на частоте 33 ГГц. Измерения проводились в интервале температур $-10 \dots -60$ °C. Изменения $\Delta \varepsilon'$ составляли $\sim 3\%$. Также интересной особенностью полученных данных является то, что ε' имеет некоторый гистерезис. Это может быть связано с тем, что образец в эксперименте содержал неоднородности в виде пузырьков воздуха, с объемным содержанием меньше 0,5% [26].

Указанная особенность, а именно, зависимость диэлектрических характеристик от температуры, играет одну из ключевых ролей в восстановлении некоторых параметров дистанционного зондирования мерзлых объектов в микроволновом диапазоне. Дело в том, что необходимо знать точную

температуру льда в момент зондирования, так как природные системы достаточно динамичны, что может приводить к некоторым ошибкам в восстановлении их характеристик.

Другим примером исследования зависимости диэлектрических характеристик льда от температуры является работа [27]. При помощи радиометрических приемников на частотах 37,5 ГГц и 13,5 ГГц были проведены длительные измерения диэлектрических потерь пресного природного льда без его извлечения из ледяного покрова. Полученные результаты выявили гистерезис ϵ'' от температуры среды. Это связано с тем, что однозначная температурная зависимость в представленных графиках не наблюдается. Имеется зависимость от времени существования льда, при том, что концентрация включений в виде солей остаются постоянными. Поэтому, в проводимых исследованиях с криосферными образованиями, необходимо учитывать время существования объекта исследования, так как это может приводить к структурным его изменениям.

Из рисунка 1.1.1 видно, что диэлектрические потери имеют не только температурные зависимости, но и частотные. Общий вид частотных зависимостей ϵ' и ϵ'' показан на рисунке 1.1.2 для льда и воды при температуре 0 °C [28].

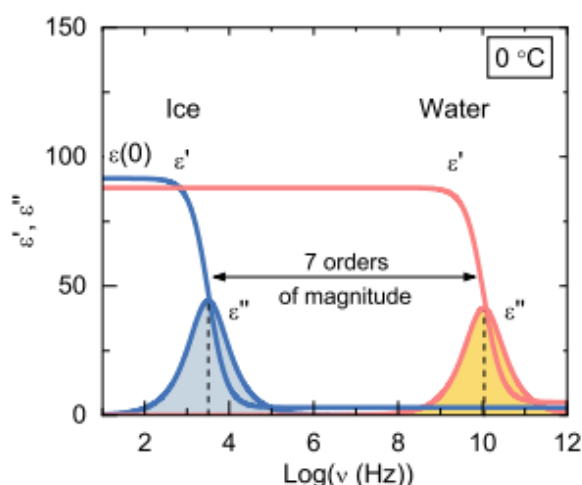


Рисунок 1.1.2 – Диэлектрические спектры воды (красный) и льда (синий) при 0 °C в терминах действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости. Спектры выглядят одинаково с относительным сдвигом на семь порядков величины частоты [28]

В микроволновой области, диэлектрические характеристики воды и льда существенно отличаются друг от друга. На этом отличии строится функционал некоторых датчиков и систем [29].

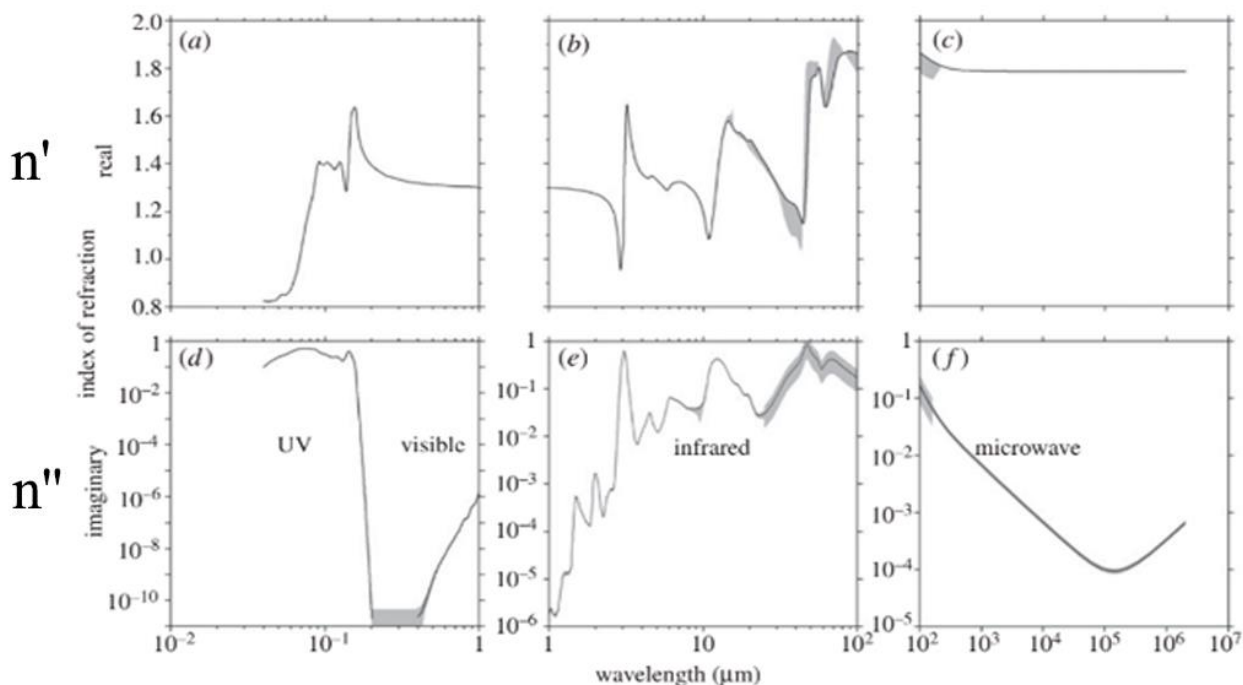


Рисунок 1.1.3 – Расчетные значения действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления льда Ih при температуре 266 К. Штриховка указывает на неопределенность [21]

На рисунке 1.1.3 показаны расчетные значения действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления льда Ih при температуре 266 К. Из них видно, что в видимом диапазоне поглощение минимальное, что говорит о том, что лед в этой области спектра практически прозрачен.

Другой особенностью, влияющей на мнимую и действительную части относительной комплексной диэлектрической проницаемости, является пространственное расположение главной оптической оси кристалла «с». В работе [30] было проведено исследование влияния оси «с» на действительную часть относительной диэлектрической проницаемости на частоте 9,7 ГГц. Обнаружено, что при параллельной установке главной оптической оси кристаллов льда по отношению к вектору напряженности электрического поля и ортогональному их расположению $\Delta\epsilon' \sim 4\%$, где $\Delta\epsilon' = \epsilon'_{\parallel} - \epsilon'_{\perp}$.

В работе [26] также проводилось исследование анизотропии диэлектрических характеристик антарктического льда. Исследование льда проводилось с помощью открытого резонатора, в диапазоне частот 26,5-40 ГГц. На рисунке 1.1.4 представлены результаты измерений. Из графика видно, что лед при изменении направления вектора напряженности электрического поля (параллельно или перпендикулярно относительно главной оптической оси) имеет $\Delta\epsilon' \sim 1\%$. Подобное также установлено в работах [31, 32].

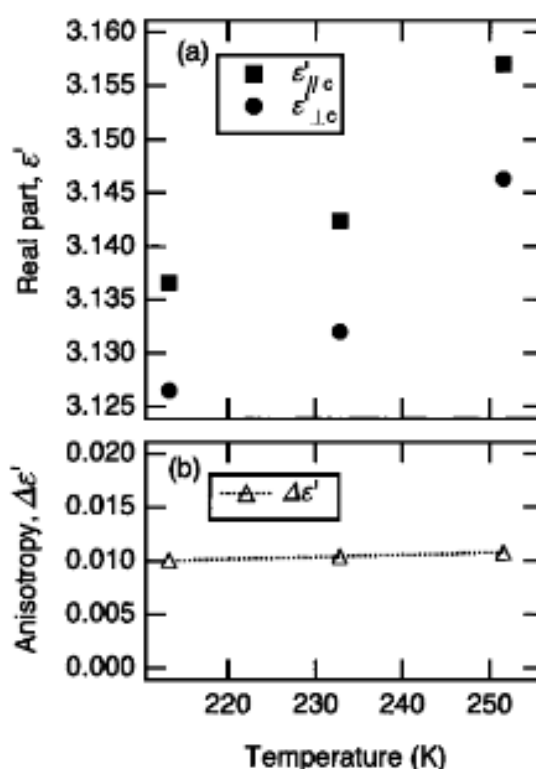


Рисунок 1.1.4 – Температурная зависимость действительных частей диэлектрических проницаемостей, параллельных и перпендикулярных оси с (а), и анизотропии (b) [26]

Анизотропия диэлектрической проницаемости во льду может также приводить к некоторым особенностям в дистанционном зондировании, например, в радиолокации ледяного покрова. Как показано в исследовании [33] необходим учет эффектов анизотропного рассеяния для корректного восстановления картины из радиолокационных данных. В работе [34], полученные на радарограммах периодические волнообразные структуры по амплитуде как раз связывают с анизотропией микроволновых свойств и двулучепреломлением льда.

Другой особенностью, как уже отмечали ранее, является влияние примесей, захваченных льдом, на микроволновые характеристики. Так, в работе [35] было показано влияние концентрации солей на радиояркостную температуру ледяного покрова различных озер. При измерении содержания солей в пределах 2–100 мг/кг возникает приращение радиояркостной температуры ($T_{\text{я}}$) до нескольких десятков К. В работе [36] исследована зависимость действительной части относительной комплексной диэлектрической проницаемости льда при различной минерализации. Было выявлено, что ϵ' аппроксимируется двумя прямыми с перегибом около $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Стоит отметить, что в содовых озерах микроволновые свойства льда отличаются от морских льдов. Так в работе [38], исследовано содовое озеро Доронинское (Забайкальский край). Озеро меромиктическое, его минерализация в верхнем слое до глубины 3,5 м составляет приблизительно 20 г/л, и в нижнем слое 28–35,5 г/л. Вода озера хлоридно-карбонатная натриевая. Среднее значение рН воды 10. Химический состав основных компонентов воды озера: Na^+ – 36%; CO_3^{2-} – 23%; HCO_3^- – 22%; Cl^- – 17%. [39]. Установлено, что действительная часть относительной диэлектрической проницаемости льда содовых озер отличается от морского льда в температурных пределах от 0 до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Она выше для льда из содовых озер и изменяется от 4,1 до 3,4 [38]. Для морского льда это изменение составляет от 3,45 до 3,25 [40] при концентрации солей во льду около 3 г/кг.

Другим примером измерения влияния минерализации может служить работа [41]. Радиометрическими методами исследования на участке $15 \times 15\text{ м}^2$ были обнаружены промерзшие проруби рыбаков, которые было невозможно обнаружить визуально из-за снежного покрова. Разница в радиояркостной температуре в местах прорубей по сравнению с «нетронутым» льдом, составила 8 К для радиометра на длину волны 2,3 см, и 5 К для радиометра на длину волны 3 см. А разница в минерализации вышеуказанных пространственных участках ледяного покрова составила $\sim 2,5\text{ мг/кг}$.

Стоит отметить, что в задачах дистанционного зондирования ледяных покровов соленых озер, необходимо учитывать эффект миграции солевых

включений. Так в [42] установлено, что в верхних слоях ледяного покрова содового озера общая концентрация соли возрастает от 1 г/кг в начале зимы до 5 г/кг перед деструкцией льда.

К изменению диэлектрических характеристик льда также приводит содержащиеся в нем твердые примеси. Например, в [43] исследовано влияние кварцевого песка на мнимую и действительную части относительной комплексной диэлектрической проницаемости льда. Так, на частоте 9,8 ГГц при концентрации 5 % по массе, лед, содержащий примесь в виде песка имеет меньшее значение ϵ' . Это объясняется тем, что ϵ' песка меньше, чем у чистого льда. Изменение ϵ' от температуры загрязненного льда имеет нелинейный характер.

Примеси, в виде газовых включений в природном льду, также приводят к изменению диэлектрической проницаемости. В [44] исследовалась толщина ледяного покрова с помощью георадара, на частоте 200 МГц. Объемное содержание газа во льду составило от 7 до 13 %, при плотности льда ~ 890 кг/м³. Также исследовали речной лед с содержанием наносов в виде песка и различными гранулометрическими показателями. Расхождения между расчетными значениями ϵ' и экспериментальными результатами достигает 40 %. В работе [45] исследовался речной лед с помощью георадара, установленного на БПЛА. Центральная частота георадара составляла 400 МГц. Выявлено, что среднее значение ϵ' льда составляло 3,231 в январе; 3,249 – 16 февраля и 3,317 – 25 февраля. Как указывают авторы, на данный факт влияют температурные изменения, содержание газа во льду, количество примесей, а также содержание воды.

В морском льду, диэлектрические свойства зависят в основном от объемного содержания рассола во льду. В работе [46] использовались эмпирические выражения для вычисления: $\epsilon' = 3,05 + 7,2V_b$, $\epsilon'' = 0,024 + 3,29V_b$, где V_b – объемное содержание рассола. Данные выражения были получены для частот от 3 до 5 ГГц [47].

Исследование микроволновых свойств пресного природного льда, как речного, так и озерного, имеет ряд особенностей. Уже было отмечено, что существование в нем примеси в виде солей и других частиц, вариаций температуры, содержания воды и газовых включений приводят к значительным изменениям характеристик среды. Также следует обратить внимание на гранулометрический состав ледяных частиц. Так в работе [1] обращено внимание, что области с торосами имеют пониженную радиояркостную температуру на частоте 34 ГГц. Позже данный факт подтвержден в [48], а также было установлено, что области торошения пресного ледяного покрова имеют повышенное значение радиационной температуры в инфракрасной (ИК) области, примерно на 1–2 К. Низкое значение радиояркостной температуры оказалось связанным с наличием кристаллов сублимационного льда, которые соизмеримы с длиной волны, регистрируемой радиометром. Это как раз и приводит к увеличению рассеяния на исследуемой частоте. Увеличение радиационной температуры в ИК области связано с тем, что при термических изменениях в ледяном покрове водоема происходит разгрузка механических напряжений в области его торошения. При этом в трещины происходит выделение водяного пара, его миграция и конденсация, что и является причиной подогрева тороса, а также появления сублимационного льда. В цитируемом исследовании не говорится об отличительных особенностях диэлектрических характеристик сублимационного льда. Этот вопрос требует дополнительных исследований.

1.2 Электромагнитные свойства воды в интервале температур +4...–70 °С

В настоящей работе рассматривается объемная вода, содержащаяся в порах дисперсных сред, которая может не замерзать до температуры –70 °С. Термины как «слабосвязанная», «рыхлосвязанная», «пленочная» и другие в настоящее время считаются устаревшими, ввиду того, что они не отражают физический смысл состояния воды [49, 50]. В данном обзоре будет рассмотрена только

переохлажденная объемная вода. Такая вода в порах при определенных их размерах имеет характеристики, близкие к характеристикам объемной воды.

Необходимость знания диэлектрической проницаемости воды обусловлена использованием в решении ряда задач. Диэлектрические характеристики воды имеют зависимость от частоты, температуры и растворенных веществ. Поэтому для восстановления метеорологических, океанологических и т.п. параметров природных образований необходимо учитывать вышеуказанные зависимости. В настоящем параграфе представлен обзор зависимостей диэлектрических характеристик воды от частоты и температуры для интервала $+4\ldots-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, названной в [55] «холодной» водой.

Исследование диэлектрических характеристик воды проводится в достаточно широком интервале частот. На относительно низких частотах, исследования диэлектрических характеристик образований из воды проводятся такими методами как электротомография и геолокация. Например, в [51] проводилось исследование наледей при помощи георадара с центральной частотой 250 МГц, были выявлены некоторые особенности разгрузки наледных вод. Данная работа является хорошим примером, необходимости учета электромагнитных характеристик не только льда, но и воды.

Диэлектрические характеристики холодной воды и льда в зависимости от частоты имеют некоторые особенности. На рисунке 1.2.1 представлен график зависимости мнимой и действительной части относительной комплексной диэлектрической проницаемости в зависимости от частоты [52]. Как видно из графика, значение ϵ' около частоты 10 ГГц начинает уменьшаться. Величина ϵ'' примерно в этой же области спектра имеет наибольшее значение.

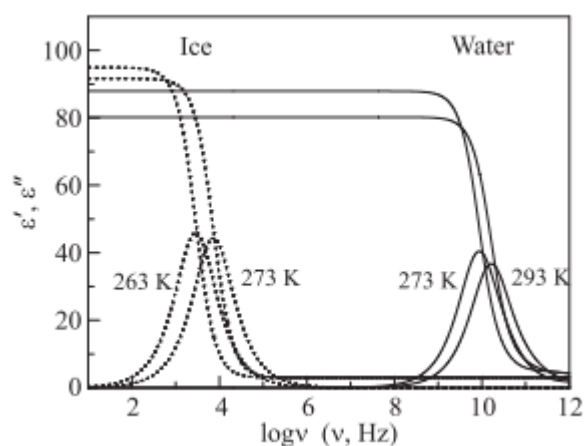


Рисунок 1.2.1 – Диэлектрические спектры воды (сплошные линии) и льда (пунктирные линии) [52]

В области высоких частот выше 1 ТГц, зависимость диэлектрической проницаемости воды от частоты имеет интересные особенности. На рисунке 1.2.2 представлен график экспериментальных данных в диапазоне 1-150 ТГц [53]. С увеличением частоты имеются сильные вариации значений мнимой и действительной части относительной комплексной диэлектрической проницаемости.

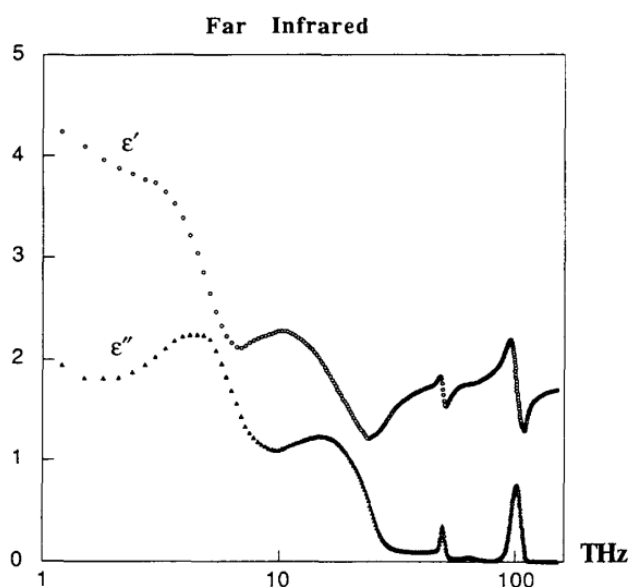


Рисунок 1.2.2 – Экспериментальные данные о частотной зависимости диэлектрической проницаемости воды при температуре 25 °С в диапазоне 1–150 ТГц [53]

В работе [54] были исследованы зависимость ϵ' и ϵ'' от температуры выше $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в широком интервале частот: от 50 МГц до 1 ТГц. Результаты представлены на рисунке 1.2.3.

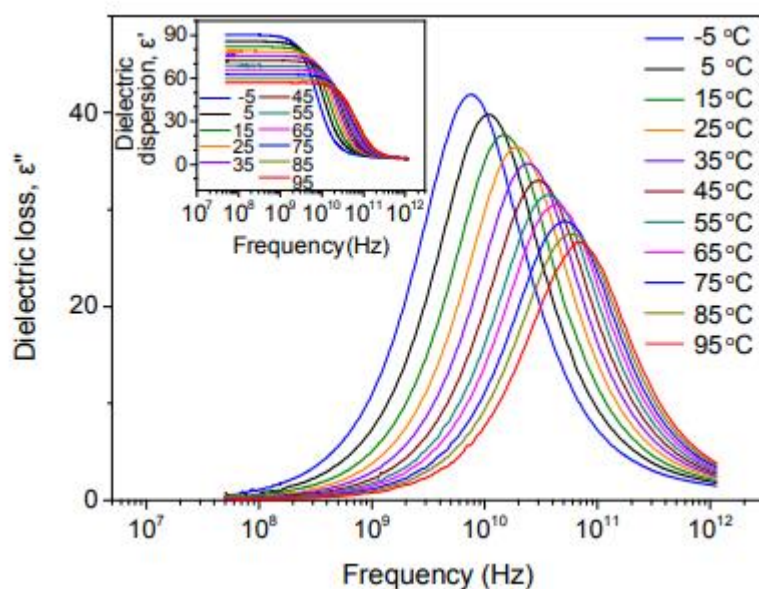


Рисунок 1.2.3 – Комплексный диэлектрический отклик, включающий спектры диэлектрических потерь и диэлектрической дисперсии воды при различных температурах, был получен из спектров поглощения и показателя преломления [54]

Из представленного рисунка видно, что с увеличением температуры пик диэлектрических потерь уменьшается и сдвигается в терагерцовую область спектра. То же самое происходит и с ϵ' .

Интересной температурной областью исследования диэлектрических характеристик воды является температура ниже $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$. При данных температурах она широко распространена в жидкой фазе в Арктической зоне нашей планеты, включая криосферные образования, где вода находится в поровом состоянии. В ряде работ [50, 56, 57] было показано, что вода, находящаяся в поровом пространстве, при определенных условиях обладает свойствами объемной воды. Также в указанных работах, были приведены экспериментальные и теоретические данные по диэлектрическим характеристикам воды для частот 10...180 ГГц в температурном интервале 0... $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В вышеуказанной температурной области имеется ряд интересных аномальных свойств воды. К аномалиям можно отнести максимум плотности вблизи $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ее уменьшение при охлаждении до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, кристаллизация при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при давлении $0,1\text{ МПа}$), падение прочности на разрыв ниже $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$, особенности вязкости [58]. Также в указанной температурной области имеется несколько аномальных точек, где электромагнитные свойства воды имеют особенности.

Одним из примеров аномальных свойств является существование особой точки при температуре $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ (и давлении $0,1\text{ МПа}$), где наблюдаются аномалии теплоемкости, коэффициента объемного расширения, скорости звука и адиабатической сжимаемости. На рисунке 1.2.4 представлена фазовая диаграмма холодной воды. Особым состоянием воды является линия Видома (на ней находится особая точка, отмеченная выше), характеризующая ее необычное состояние, при котором резко возрастают флуктуации плотности и энтропии [59]. Эта линия исходит из аномальной точки в фазовом пространстве – второй ее критической точки (C_2) – фазового перехода двух жидкостей LDL (низкой) и HDL (высокой) плотности. По разным оценкам температура в C_2 : $\sim -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давление $\sim 100\text{ МПа}$ [59,61]. При атмосферном давлении точка на линии Видома имеет температуру около $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$. В работе [60] при использовании радиофизических лабораторных экспериментов было показано, что вода, находящаяся в поровом пространстве, при температуре $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ может способствовать ускорению химических реакций. Это может быть актуально не только для нашей планеты, но и для других холодных космических объектов: спутников, комет, планет.

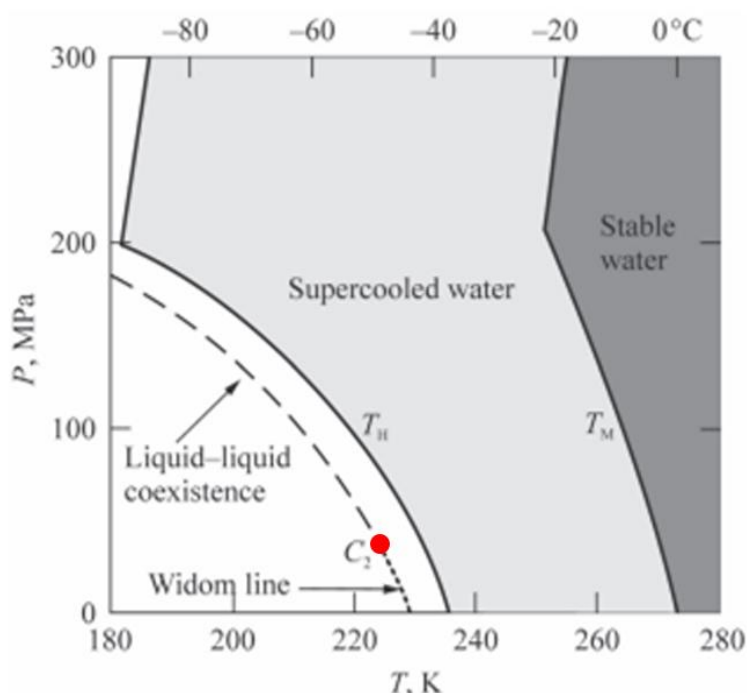


Рисунок 1.2.4 – Фазовая диаграмма холодной воды, C_2 – ориентировочное положение второй критической точки [61]

В работе [62] показано, что линия Видома может сдвигаться в зависимости от геометрии пор силикатных сорбентов. В случае достижения в поровой воде отрицательного давления ~ -100 МПа, будет возможен сдвиг линии Видома в область положительных температур. Это было выявлено для случая среды с цилиндрическими порами при помощи измерений температурных зависимостей низкочастотного импеданса емкостной ячейки с увлажнённым образцом силикатного сорбента и измерений теплового отклика на импульсное нагревание среды.

Другим примером исследования воды в низкочастотной области спектра является работа [63], где проводилось исследование фазовых переходов при помощи регистрации электрических шумов в интервале частот 1...100 Гц, проводились также относительные калориметрические измерения. По изменению теплоемкости и электроемкости были выявлены области фазовых переходов вода-сегнетоэлектрический лед.

Стоит отметить, что переохлаждённая вода имеет фазовый переход вблизи температуры -23°C . Это переход воды в особую метастабильную модификацию

льда – лед 0, обнаруженный при компьютерном моделировании в ряде работ, например в [64]. Лед 0 – одна из модификаций льда, которая проявляет сегнетоэлектрические свойства, благодаря которым имеется возможность отследить процесс фазового перехода по изменению микроволновых характеристик. В работах [65,66] были впервые представлены экспериментальные данные по обнаружению и исследованию льда 0. Переохлаждение объемной воды до подобных температур удалось осуществить с помощью силикатных нанопористых сорбентов.

Другой интересной точкой в интервале температур $0...-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ является точка фазового перехода вода – лед. Вблизи температуры $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеется ряд интересных особенностей, которые проявляются, в частности, в усилении электромагнитного излучения в микроволновом диапазоне [3,4], прошедшего через лед. Для детального рассмотрения подобных явлений необходимо учитывать диэлектрические характеристики не только льда, но и воды, а также особое их взаимодействие.

1.3 Дистанционное зондирование тающих льдов в микроволновом диапазоне

Лед, как фаза твердого состояния воды, имеет достаточно широкое распространение на нашей планете. Например, на декабрь 2024 г. 99% территории России было покрыто снежным покровом. Мониторинг ледяных покровов востребован, как со стороны безопасности, так и со стороны экономики, например, состояние ледников, ледовые переправы, выбор оптимальных транспортных маршрутов следования и т.д. Также стоит отметить, что ледяной покров является индикатором состояния окружающей среды [1]. Например, по площади ледяного покрова в Северном Ледовитом океане делаются прогнозы климатических изменений [2]. Одним из методов оценки площади льдов является микроволновый радиометрический метод. Данный метод основывается на отличительных особенностях диэлектрических характеристик льда и воды, это отмечалось в предыдущих параграфах.

Одним из преимуществ микроволнового диапазона по сравнению с видимым и инфракрасным диапазоном является всепогодность. Например, вклад слоя чистой атмосферы в радиояркостную температуру на частоте 1,4 ГГц составляет ~ 1 К, ввиду низкого коэффициента поглощения атмосферного слоя на указанной частоте. К преимуществам этого диапазона можно отнести и глубину слоя формирования излучения. На рисунке 1.3.1. представлен график расчетных значений глубины слоя формирования излучения для различных сред в зависимости от частоты [67].

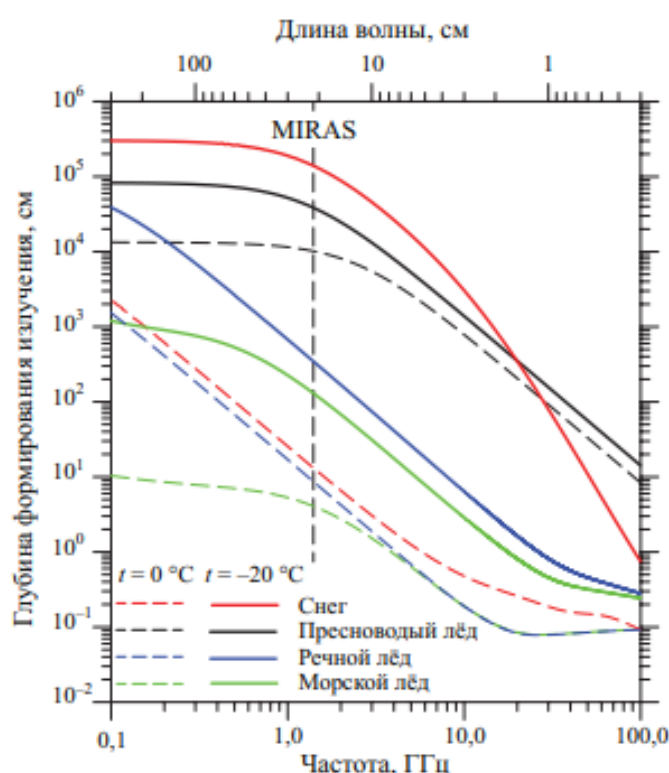


Рисунок 1.3.1 – Глубина слоя формирования радиотеплового излучения [67, 142]

На основе различной глубины слоя формирования излучения в зависимости от частоты решается ряд практических задач, например, восстановление снегозапаса снежного покрова [68–71], определение температуры почвы в зависимости от глубины [72, 73], толщины промерзания и оттаивания почвы [74, 75]. Стоит отметить, что в вышеуказанных работах применяются не только различные частотные диапазоны, но и учитываются поляризационные особенности радиотеплового излучения, а также его угловые зависимости.

На основе различной глубины слоя формирования излучения в зависимости от частоты возможно решить задачу об определении толщины ледяного покрова. Здесь, стоит отметить, что необходимо учитывать вид ледяного покрова (морской, пресноводный), ввиду возможных существенных отличий диэлектрических характеристик. Соответственно будет отличаться и толщина слоя формирования излучения – рисунок 1.3.1. Примером является работа [76], где была разработана модель для определения толщины морского льда при частоте зондирования 1,4 ГГц с искусственного спутника Земли. Данная модель имеет ряд ограничений, во-первых, возможно определять толщину только многолетних льдов, ввиду низкого содержания включений в виде солей. Во-вторых, возможность определения толщины ограничивается 1,5 м. Относительная погрешность данного метода составляет 20%. В ряде работ встречается алгоритмы по определению толщины морского льда, не превышающего 0,5 м. Основа подобных методов – комбинирование различных частотных диапазонов, например, 36 и 89 ГГц [77]. В указанной работе ошибка определения толщины достигала 8 см. Модель, представленная в работе [78], является более точной. Как заявляют авторы исследования, средняя абсолютная погрешность определения толщины льда составляет от 2 до 5 см. Максимальная определяемая толщина ледяного покрова составляет не более 0,3 м. Решение вышеуказанной задачи для пресных водоемов может быть сделано с использованием более высокой частоты, ввиду меньшей минерализации льда.

Другим методом определения толщины ледяного покрова является активная радиолокация. Примером может служить работа [44], где определялась толщина речного льда на частоте 200 МГц с использованием переносного радара, который передвигался в ручном режиме. Другим примером является работа [79], где уже радар устанавливался на беспилотный летательный аппарат. Данная модификация методики, может упростить решение задачи в аспектах безопасности, потраченного времени и т.д. Следующим примером использования активной радиолокации является работа [80], где при использовании данных радара с синтезированной апертурой искусственных спутников Земли были определены

глубины промерзания мелководных озер в субарктической тундрово-лесной местности.

Также интересной задачей, которую возможно решать при помощи радиометрических методов исследования, является поиск газифицируемых месторождений на акваториях. При включениях пузырей газов в ледяной покров будет наблюдаться отклик на радиояркостной температуре в виде ее изменения. Такой метод был предложен в работах [81–83]. Ввиду низкого пространственного разрешения пассивных радиолокационных систем на бортах искусственных спутников, данная методика затруднена в практическом использовании. Позднее, в работе [84] была предложена методика комбинирования активной и пассивной радиолокации для решения вышеуказанной задачи.

Применение активной радиолокации для исследования состояния ледяного покрова в период температурных колебаний является актуальным. Это связано с регистрацией периодов замерзания и таяния ледяного покрова. Так в работе [85] были зафиксированы несколько подобных случаев на озерах Центрального Онтарио (Канада). Стоит отметить, что подобные случаи не всегда достоверно фиксируются. Как отмечают авторы, сложность состоит в ограниченности радарных данных, а также локальными особенностями состояния ледяного покрова в период начала таяния.

В работе [86] исследовали состояние пресноводных озер. На рисунке 1.3.2 представлен график обратного рассеяния (σ_0) радара с синтезированной апертурой (SAR) Sentinel-1 от времени наблюдения. Характерной особенностью графиков является то, что первые значительные снижения σ_0 в течение года (например, в мае–июне) указывают на начало процессов таяния на поверхности ледяного покрова озера. Авторы в своем исследовании указывают следующее «Гладкая влажная поверхность льда уменьшает интенсивность обратного рассеяния из-за зеркального отражения радиолокационного луча в направлении от спутника. Прогрессирующее таяние на поверхности озера, приводящее к более шероховатой и влажной поверхности, объясняет восстановление σ_0 перед значительным

снижением обратного рассеяния летом, что указывает на разрушение ледяного покрова» [86, стр. 2038].

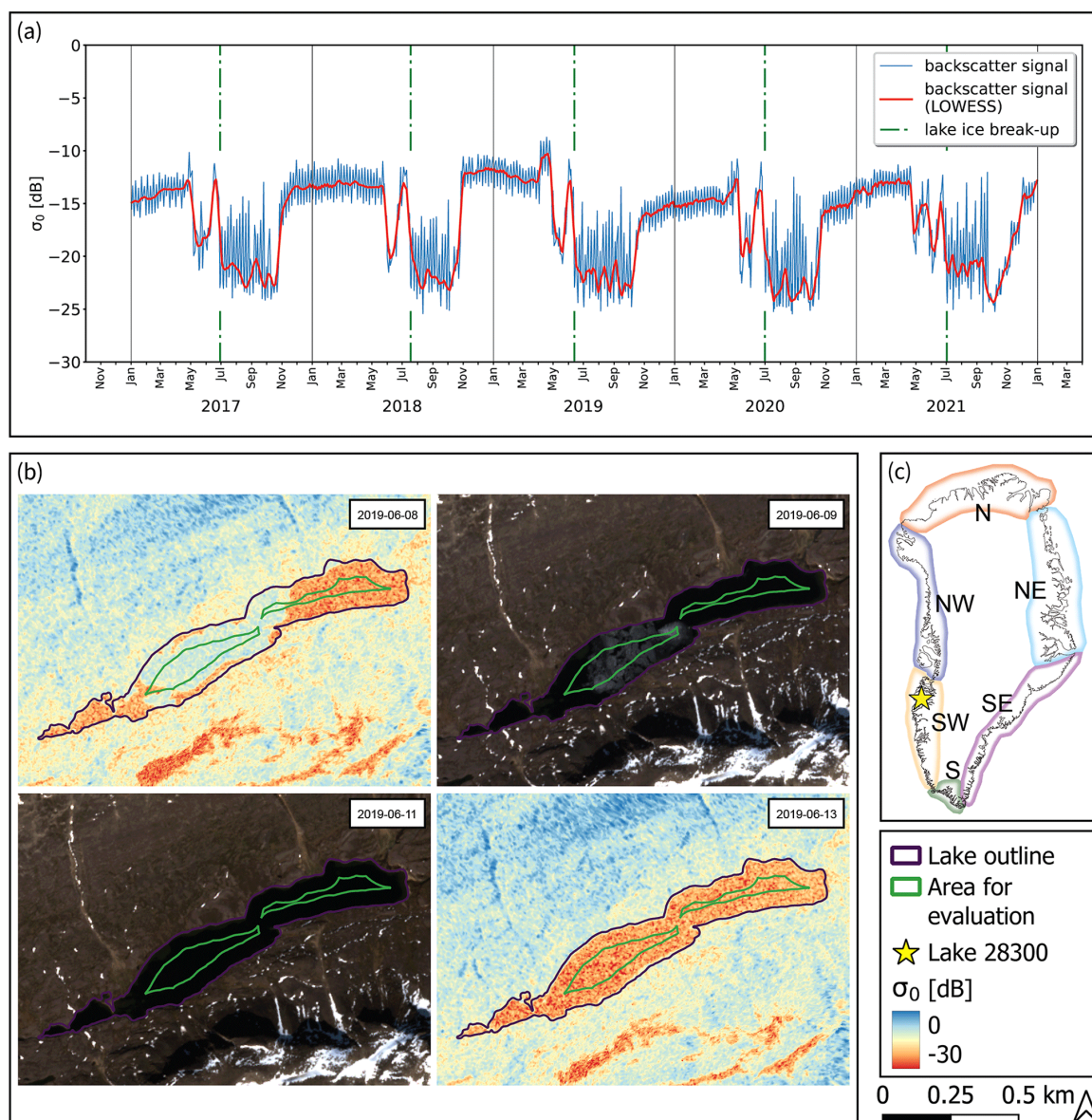


Рисунок 1.3.2 – (а) Обратное рассеяние, измеренное радаром с синтезированной апертурой (SAR) Sentinel-1 (S1) (σ_0), и сроки разрушения озерного льда для озера 28300, определенные с помощью динамического числового порога, оценивающего σ_0 при переходе от состояния, покрытого льдом, к открытой воде. (б) Снимки озера 28300 со спутников S1 и Sentinel-2 (S2) во время разрушения ледяного покрова в 2019 году. На снимке S2 11 июня 2019 года видна свободная от льда вода, а разрушение ледяного покрова на снимке S1 зафиксировано 13 июня 2019 года. (с) Регионы Гренландии для пространственно-временного анализа [86]

Стоит отметить, что в некоторые годы наблюдаются эффекты, которые приводят к увеличению мощности обратного рассеяния перед началом таяния.

Например, в 2018 г. и 2019 г. Подобное явления наблюдается и для морского льда в Канадском Арктическом архипелаге [87]. В периоды начала таяния льдов происходит увеличение мощности обратного рассеяния радарных сигналов.

Неясным остается вопрос, связанный с радиометрическими данными тающих льдов. Например, в [88] представлено исследование фенологии льда крупных пресных водоемов северной Канады: Большом Медвежьем озере и Большом Невольничьем. В работе использовался усовершенствованный микроволновый сканирующий радиометр-система наблюдения Земли (AMSR-E). Измерения T_y осуществлялось на частотах 18,7; 23,8; 36,5 и 89,0 ГГц на двух ортогональных поляризациях (ГП и ВП). Результаты измерений T_y для ледяного покрова Большого Медвежьего озера представлены на рисунке 1.3.3.

а

б

в

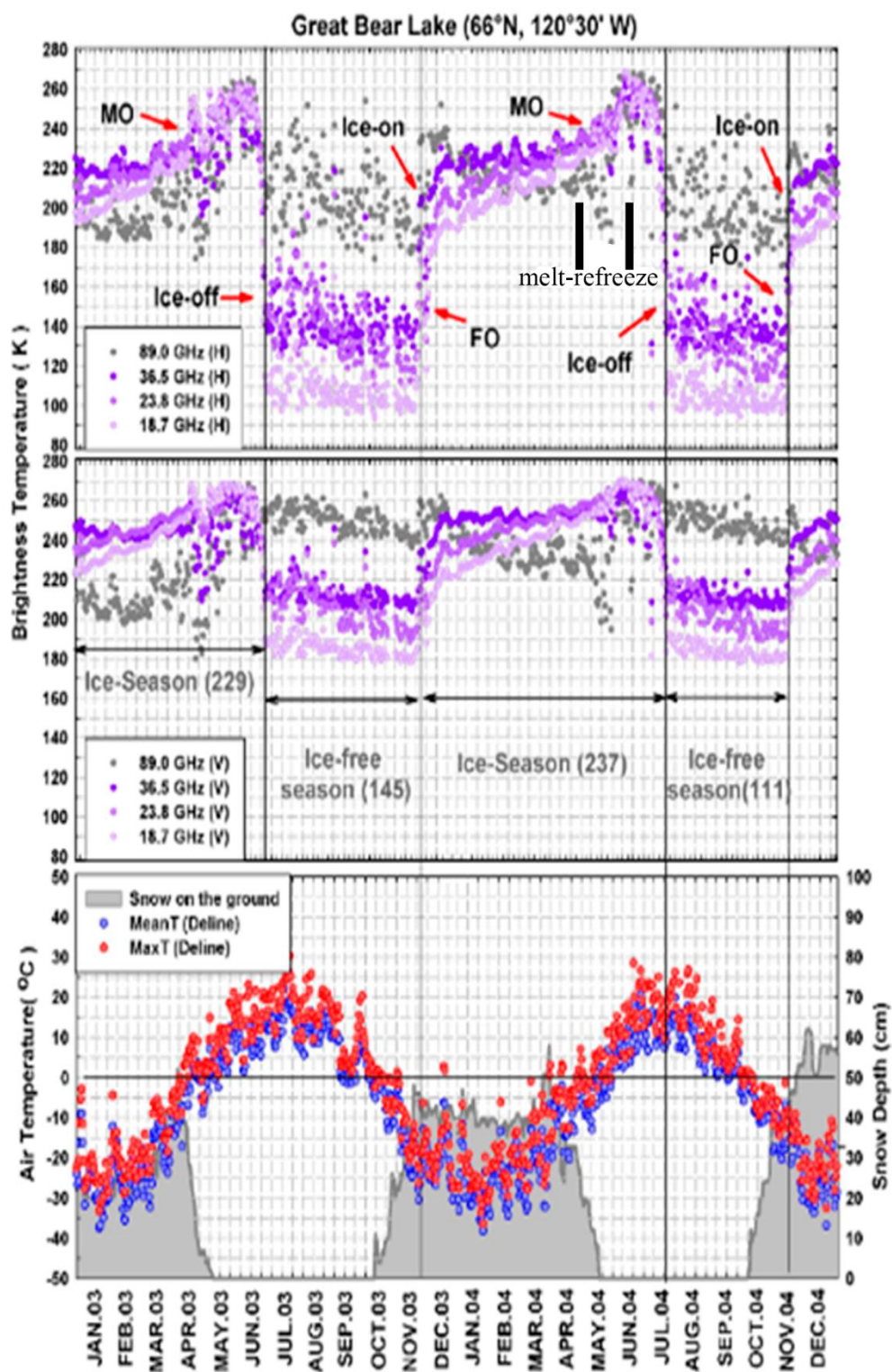


Рисунок 1.3.3 – Временная эволюция радиояркостной температуры с горизонтальной (а) и вертикальной (б) поляризациями: 18,7 (светло-фиолетовый), 23,8 (средне-фиолетовый), 36,5 (темно-фиолетовый), 89,0 (темно-серый) ГГц (2003-2004). Временные ряды максимальных (Max T, красный) и средних (Mean T, синий) температур воздуха (в), полученных на определенной метеорологической станции, а глубина снега обозначена серым цветом [88]

Достаточно интересной остается область вариаций T_y перед началом деструкции ледяного покрова, когда наблюдается рост термодинамической температуры. На рисунке 1.3.3 (а) эта область обозначена как «melt-refreeze» (таяния-замораживания). Особый интерес связан с тем, что T_y в данных вариациях достигает значений, как у открытой водной поверхности, хотя согласно представленным данным, лед еще не растаял, а также еще имеется снежный покров. Подобные эффекты на более низких частотах, а именно на 1,4 ГГц не наблюдаются [89]. Стоит отметить, что представлены данные за один год.

Решаемые задачи, как в активном, так и пассивном режиме радиолокации, имеет свои особенности в зависимости от подстилающей поверхности, для которой в свою очередь, характерны вариации физических параметров (температура, влажность, шероховатость, наличие и тип примесей и т.д.). Изменения некоторых из вышеуказанных характеристик могут приводить к некоторым ошибкам в дешифрировании данных дистанционного зондирования подстилающей поверхности. Поэтому, для более корректного восстановления картины зондируемой поверхности необходимо учитывать больше входных параметров. Например, проводить исследование на нескольких длинах волн, как показано в работе [90].

Стоит отметить, что в указанных данных дистанционного зондирования ледяных покровов наблюдаются некоторые аномальные эффекты, которые связываются с физическими особенностями льдов в период фазовых превращений. Ввиду данных особенностей, необходимо уточнение диэлектрических характеристик льда в различных частотных диапазонах, особенно в температурной области вблизи фазового перехода. Также стоит добавить, что подобные уточнения необходимы для различных типов льдов: из сверхчистой воды, пресных льдов, соленых (морских) льдов.

1.4 Обоснование выбранной темы. Постановка задачи

Знание диэлектрических характеристик льда в области фазового перехода лед–вода являются необходимыми, ввиду их использования в дистанционном зондировании. В работах [3, 4, 91] были представлены экспериментальные данные, в которых обнаружен эффект понижение диэлектрических потерь при просвечивании льда в микроволновом диапазоне. Он был назван «просветлением», ввиду того, что среда меньше препятствует прохождению излучения. Аномалия была выявлена на различных частотах, а именно в сантиметровом и миллиметровом диапазоне. На рисунке 1.4.1 представлена зависимость проходящей мощности излучения через блок льда при его нагревании. При достижении температуры образца $\sim 0^{\circ}\text{C}$ происходит приращение мощности сигнала около 20 %. Далее происходит его уменьшение, что связано с появлением воды.

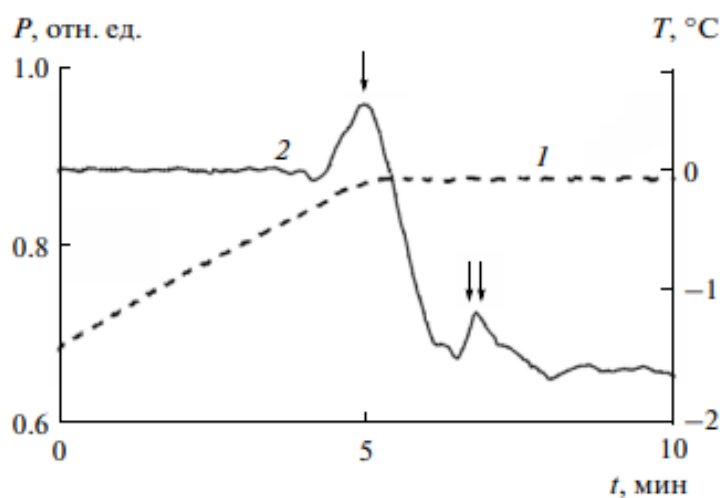


Рисунок 1.4.1 – Временные зависимости изменения температуры блока льда (кривая 1) и проходящей мощности излучения (кривая 2 в относительных единицах) при его нагревании.

Частота измерений 90 ГГц, толщина блока 15 см [4]

Проявление данного эффекта замечено в работе [67] при исследовании радиояркостной температуры льдов Антарктиды. Было выявлено, что при достижении льдом термодинамической температуры, близкой к 0°C , возникает понижение радиояркостной температуры. Также в работе [93] были приведены

графики радиояркостной температуры ледяного покрова Обской губы. На этих графиках, перед деструкцией ледяного покрова, в некоторые годы, наблюдаются кратковременные понижения $T_{\text{я}}$. Необычность наблюдения в том, что при повышении температуры окружающей среды и появлении начальных признаков таяния ледяного покрова, должно быть некоторое повышение $T_{\text{я}}$ из-за начала перехода льда в воду и начала роста ϵ'' .

Также данный эффект наблюдался, например, при конструировании датчика, на основе микроволнового резонатора [29]. Основная его функция – обнаружение обледенения на промышленных предприятиях и транспорте. Рабочий диапазон датчика 3,5-5 ГГц. В эксперименте, при прохождении температуры области фазового перехода лед-вода, на факторе добротности (Q) видны небольшие флуктуации, которые можно связать с эффектом «просветления».

На рисунке 1.4.2 приведен график зависимости мощности излучения и температуры от времени нагревания образца в резонаторе [148]. На графике видно, что при приближении образца льда к фазовому переходу происходит повышения мощности проходящего излучения на 13 дБ, хотя при появлении воды, должно проявляться увеличения затуханий. Это связано с тем, что потери в воде выше, чем потери во льду.

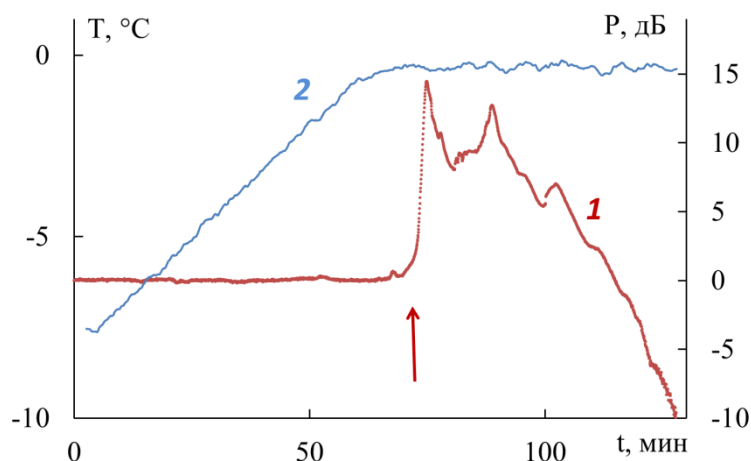


Рисунок 1.4.2 – Результаты измерения пропускания резонатором со льдом мощности излучения (1) на частоте 3,4 ГГц (в децибелах от условного уровня 0 дБ) и температуры (2) в зависимости от времени нагревания; стрелочкой отмечено начало «просветления» [148]

Еще одним примером является работа [45], где исследовалось обратное рассеяние от поверхности ледников Гренландии на частоте 5,5 ГГц. В период повышения температуры воздуха $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$, появляются флуктуации в интенсивности обратного рассеяния. Если происходит локальное уменьшение мнимой части относительной диэлектрической проницаемости льда, в отдельных кристаллах, то интенсивность отраженного сигнала от некоторых участков будет уменьшаться. В работе [94] при исследовании излучательных и отражательных характеристик ледяного покрова Антарктики в период начала таяния было обнаружено понижение радиояркостной температуры и величины обратного рассеяния. Таким образом, данные вариации могут быть связаны с эффектом «просветления» поверхностного слоя льда и могут использоваться при расшифровке рассеянных сигналов от «теплого» льда.

Исходя из вышесказанного, можно выделить ряд моментов, которые предполагается прояснить в данном исследовании. Частотный диапазон, а также точное определение температуры появления эффекта «просветления» в настоящее время не установлено. Также не известны зависимости явления от объема материала и площади поверхности, значения затухания от анизотропии микроволновых характеристик льда и концентрации солевых включений. Отсутствует электродинамическая модель изменений ϵ'' при температурах вблизи $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Итак, выделим задачи, которые необходимо решить для понимания процесса изменения диэлектрических характеристик льда вблизи температуры фазового перехода лед-вода.

1. Усовершенствовать методики исследования диэлектрических характеристик льда вблизи температуры фазового перехода лед Ih – вода в широком интервале частот: от единиц гигагерц до УФ-диапазона.

2. Провести измерения электромагнитных характеристик образцов льда и снега вблизи температуры фазового перехода лед-вода в широком интервале частот. Эксперименты заключались: 1) в измерении собственного теплового излучения образцов льда и мерзлых дисперсных сред на частотах 5,2 ГГц,

13,4 ГГц, 34 ГГц; 2) в проведении резонаторных исследований криосферных образований (лед, снег, грунт, биологические ткани) в сантиметровом диапазоне; 3) в исследовании мощности проходящего излучения через лед, содержащий различные концентрации солей и различное пространственное расположение главной оптической оси кристаллов относительно вектора напряженности электрического поля в широком диапазоне частот (от единиц гигагерц до УФ-диапазона); 4) в измерениях мощности проходящего микроволнового излучения через кустарник в осенне-зимнее время.

3. Выявить возможные ошибки определения излучательных характеристик снежных, ледяных покровов и других криосферных образований вблизи температуры фазового перехода лед–вода, особенно при их микроволновых радиометрических измерениях, на примере анализа мощности радиотеплового излучения ледяного покрова пресного водоема.

4. Установить зависимости эффекта «просветления» льда от температуры, минерализации, пространственного расположения базисных плоскостей кристаллов относительно вектора напряженности электрического поля и влияния на него пластической деформации среды.

5. Развить теоретические представления о физическом механизме эффекта «просветления» и представить его возможное использование в физике конденсированного состояния водных объектов и дистанционного зондирования гидросферы и криосферы.

ГЛАВА 2. ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной главе представлены техника и методика экспериментального исследования диэлектрических характеристик льда вблизи температуры фазового перехода. В лабораторных исследованиях использовались резонаторы, скалярный анализатор цепей, радиометрические приемники, генераторы и приемники излучения в микроволновом, инфракрасном, видимом, ультрафиолетовом диапазонах. Натурные эксперименты проводились на ледяном покрове пресных озер при помощи микроволновых радиометров.

2.1 Лабораторные исследования относительной диэлектрической проницаемости льда

а) Резонаторные методы исследования диэлектрических характеристик криосферных образований

Целью настоящего эксперимента являлась количественная оценка понижения диэлектрических характеристик льда при эффекте «просветления». Для этого осуществлялось измерение диэлектрической проницаемости с помощью прямоугольного резонатора типа Н₁₀₁ при полном его заполнении. При измерении изъятые образцы помещали в полость резонатора таким образом, чтобы базисные плоскости кристаллов льда были перпендикулярны или параллельны вектору напряженности электрического поля. Это связано с тем, что эффект «просветления» существенно зависит от направления вектора напряженности электрического поля в резонаторе относительно базисных плоскостей кристаллов льда, что отмечалось в работах [3,4].

Образцы специально выпиливали из ультрапресного озерного льда, в котором формировалось преимущественное направление оси «с» кристаллов. На рисунке 2.1.1 приведена схема экспериментальной установки. Резонатор с образцом помещался в климатическую камеру фирмы Esres, в которой изменяли температуру со скоростью нагревания порядка нескольких градусов в час.

Измерение температуры осуществлялось при помощи термопарного датчика с абсолютной точностью 0,2 К. Резонатор подключался к скалярному анализатору цепей Р2М–18/2 фирмы «Микран».

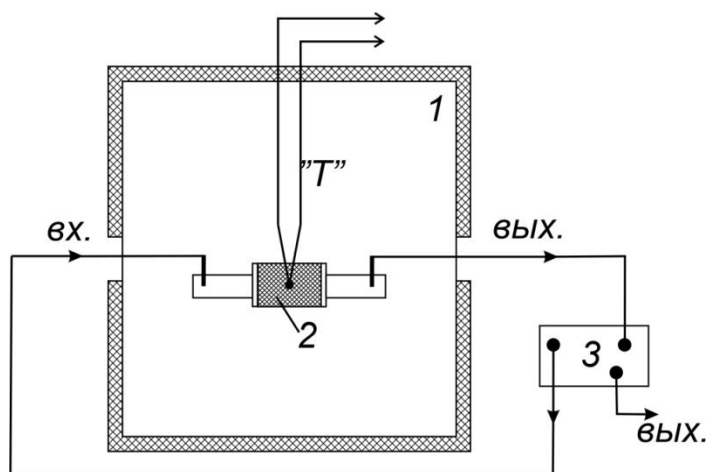


Рисунок 2.1.1 – Схема эксперимента по исследованию диэлектрических характеристик льда и снега в резонаторе. 1 – климатическая камера, 2 – резонатор, 3 – скалярный анализатор, «Т» – датчик температуры

По полученным данным, находились полоса пропускания на уровне -3 дБ (Δf), резонансная частота заполненного резонатора (f_{101}), резонансная частота пустого резонатора (f_0), исходя из которых вычислялись действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости льда:

$$\varepsilon' = \left(\frac{f_0}{f_{101}} \right)^2 \quad (2.1)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \left(\frac{f_{101}}{\Delta f} \right)^2 \quad (2.2)$$

Указанные формулы 2.1. и 2.2 справедливы для данного исследования ввиду использования полного заполнения полости резонатора. Особое внимание в экспериментах уделялось области температур от 0 до -2 °С. Это объясняется задачами текущего исследования. Измерения осуществлялись от температур ниже -10 °С.

Добротность (Q) резонатора определялась как [95]:

$$Q_0 = \frac{f_0}{2\Delta f} \quad (2.3)$$

В данную величину вкладывалась величина потерь в стенках резонатора и потери на связь с подводящими волноводами. Учитывая добротность заполненного резонатора и пустого, можно оценить ошибку измерений. Точность определения $\varepsilon'' \sim 1\%$, $\varepsilon' \sim 0,1\%$. В данных исследованиях использовались:

- Резонатор с линейными размерами $72 \times 34 \times 77 \text{ мм}^3$; материал резонатора – медь (добротность пустого резонатора при комнатной температуре ~ 1096). Собственная частота резонатора 2,8 ГГц.

- Резонатор с линейными размерами $58 \times 26 \times 25 \text{ мм}^3$; материал резонатора – медь и дюраль (добротность пустого резонатора при комнатной температуре ~ 237). Собственная частота резонатора 6,1 ГГц.

- Резонатор с линейными размерами $23 \times 10 \times 13 \text{ мм}^3$; материал резонатора – сталь (добротность пустого резонатора при комнатной температуре ~ 253). Собственная частота резонатора 13 ГГц.

Эксперимент проводился для количественной оценки уменьшения диэлектрической проницаемости во время эффекта «просветления» для пресного озёрного льда, искусственного льда (полученного путем замораживания воды в полости резонатора), свежевypавшего снега, «старого» снега, а также искусственного снега, полученного путем распыления воды при температуре воздуха около -30°C .

б) Эксперименты по просвечиванию блоков льда в микроволновом диапазоне

В данной методике излучение проходило через образец в виде параллелепипеда. Для формирования сигнала использовался генератор монохроматического излучения, а для приема прошедшего излучения использовался детекторный приемник. Такими измерениями в работе [3] впервые был зафиксирован эффект «просветления». По аналогичной методике были выполнены одновременные измерения мощности проходящего излучения в диапазоне частот от 7 до 13 ГГц с использованием скалярного анализатора цепей P2M-18/2 фирмы «Микран». На рисунке 2.1.2 представлена схема экспериментальной установки.

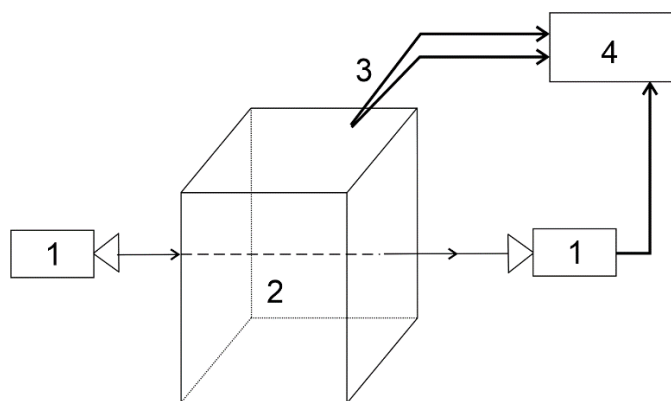


Рисунок 2.1.2 – Схема установки для измерения приращений мощности проходящего излучения в микроволновом диапазоне через лед вблизи температуры фазового перехода. 1 – скалярный анализатор цепей, 2 – образец – блок льда, 3 – термопара, 4 - система сбора и записи данных

Образцы льда извлекались из ледяного покрова пресного мезотрофного озера Арахлей (Забайкальский край) в феврале-марте с глубины, где образовывались кристаллы с выделенным направлением оси «с» (главной оптической оси) кристаллов льда. Образец во время эксперимента располагали так, чтобы вектор электрического поля электромагнитных волн был направлен либо параллельно, либо перпендикулярно базисной плоскости кристаллов льда. (Базисная плоскость перпендикулярна главной оптической оси кристаллов льда Ih). Минерализация льда ~ 1 мг/кг.

В ряде других работ использовался подобный метод, с небольшими изменениями. Для этого дополнительно устанавливался приемник отраженного и рассеянного сигнала. На рисунке 2.1.3 представлена схема измерительной установки.

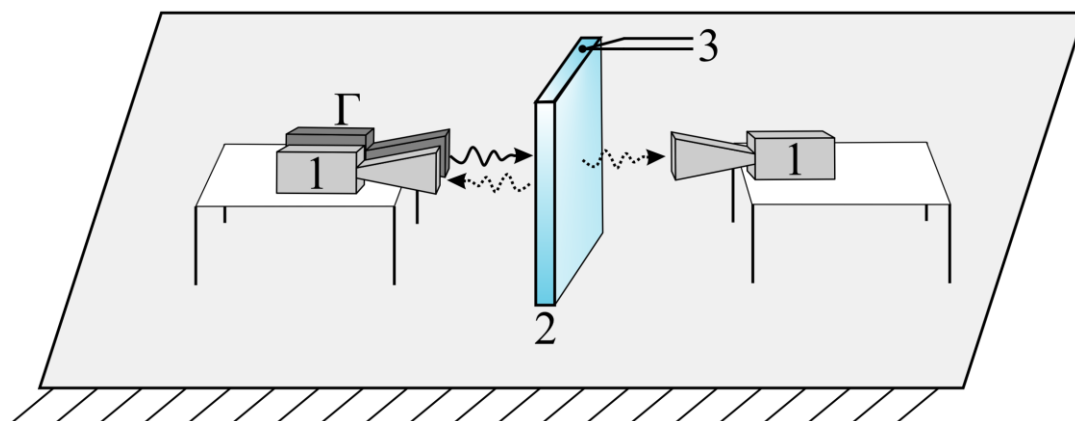


Рисунок 2.1.3 – Схема установки для измерения мощности проходящего и отраженного излучения в микроволновом диапазоне вблизи температуры фазового перехода. 1 – приемники излучения, 2 – образец – блок льда, «3» – термопара, «Г» – генератор

в) Радиометрические исследования микроволновых характеристик льда вблизи температуры фазового перехода

Цель данных экспериментов заключалась в радиометрических измерениях влияния эффекта «просветления» на радиояркостную температуру ледяного покрова. Под углом наблюдения $\alpha=38^\circ$ устанавливался радиометрический приемник с центральной частотой 34 ГГц. Подобная методика использовалась в работах [96]. Чувствительность радиометра составляла 0,1 К при постоянной времени 1 с. Радиометр был направлен на кювету с водой, с минерализацией около 1 мг/кг. Толщина слоя воды составляла 6 см. В ходе суточных температурных колебаний, когда ночные температуры опускались до отметки в -5°C , возникал фазовый переход вода-лед. При повышении температуры в дневное время, образовавшийся лед испытывал фазовое превращение в воду. На рисунке 2.1.5 представлена схема эксперимента. Толщина образовавшегося льда варьировалась от 0,5 см до 5 см в различных экспериментах. Минерализация льда составляла менее 1 мг/кг.

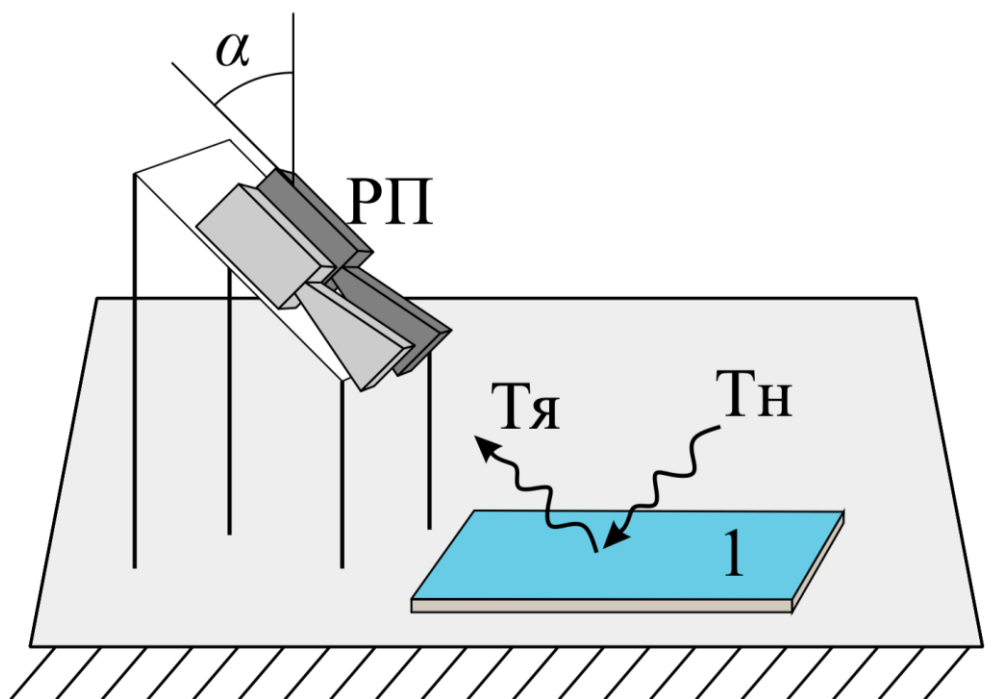


Рисунок 2.1.5 – Схема экспериментальной установки для исследования теплового излучения трехслойной среды: воздух, лед, вода. РП – микроволновые радиометры, 1 – кювета со льдом на воде, $T_{\text{я}}$ – радиояркая температура исследуемого объекта; $T_{\text{н}}$ – радиояркая температура неба, α – угол наблюдения

Измерения осуществлялись на вертикальной поляризации, ввиду большей чувствительности данного расположения вектора электрического поля излучения к вариациям диэлектрических характеристик в объекте исследования. Запись сигналов осуществлялась на систему сбора данных с частотой ~ 3 Гц. Калибровка радиометра осуществлялась по двум эталонам черного тела, металлического листа, отражающего излучение холодного неба и воды в кювете. Измерения выполнялись на частотах 34 ГГц и 13 ГГц. Микроволновые радиометры разработаны и изготовлены в ИПРЭК СО РАН в лаборатории геофизики криогенеза.

г) Эксперименты по просвечиванию блоков льда в инфракрасной области спектра

Для исследования эффекта «просветления» в инфракрасном диапазоне использовалась лабораторная экспериментальная установка, схема которой

представлена на рисунке 2.1.6. Дополнительно одновременно регистрировали излучение в видимой области спектра.

В роли генератора излучения выступала галогеновая лампа (модель HRS51), которая на схеме обозначена (1). Лампу нагревали током значительно меньшим номинального для создания слабого потока излучения и исключения быстрого нагревания образца льда (3). Генерация потока излучения была стабильной, вариации по мощности в течение длительного времени не превышали 0,1%. Для увеличения чувствительности радиометрического приемника использовали синхронный детектор. Сигнал в установке модулировался с использованием вращающегося лепесткового диска (2). Далее, модулированное излучение проходило через образец льда (3) и регистрировалось радиометрическим приемником (4) с полосой от 2 до 25 мкм на пироэлектрическом модуле ПМ-4 и фотодетектором (5) с полосой от 380 нм до 1 мкм. Фотодетектор (5) имел значительно меньшую апертуру, чем объектив приемника (4), поэтому устанавливался прямо на объектив. В некоторых экспериментах вместо фотодетектора видимого диапазона устанавливался фотодиод Lms43PD-03CG с полосой 3,8-4,2 мкм на уровне 80% от максимальной чувствительности. Имелась возможность размещения узкополосных фильтров ИК диапазона для сужения полосы в радиометрическом приемнике на модуле ПМ-4. Для измерения температуры использовалась термopара (6) с точностью 0,2° С. Для уменьшения скорости нагревания образца льда использовался термостат (7), на дно которого помещался предварительно охлажденный металлический радиатор (Р). Для записи выходных сигналов от измерительных приборов использовалась система сбора данных (8) фирмы Agilent.

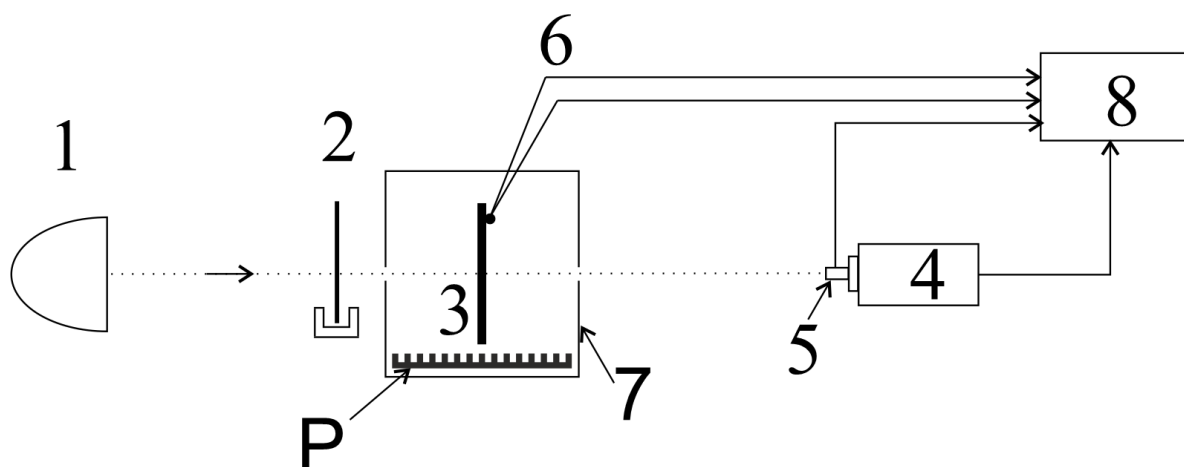


Рисунок 2.1.6 – Схема экспериментальной установки для исследования эффекта «просветления» в ИК диапазоне. 1 – галогеновая лампа, 2 – модулятор, 3 – образец льда, 4 – ИК радиометр на 2...25 мкм (радиометр разработан в ИПРЭК СО РАН), 5 – фотодиод видимого диапазона, 6 – термопара, 7 – термостат, 8 – система сбора данных, P – металлический радиатор

В ходе экспериментов исследовались пластины из выращенного льда размерами $5 \times 5 \text{ см}^2$ и толщинами от 0,1 до 3 мм. Они изготавливались следующим образом: в кювету наливалась вода с различной степенью минерализации. Кювета помещалась в морозильную камеру с постоянной температурой $\sim -15^\circ \text{C}$. При образовании льда на поверхности воды получалась пластина льда необходимой толщины. Минерализацию исходной воды с NaCl варьировали в пределах от 1 до 400 мг/л. Содержание солей, захваченных льдом, находилось в интервале 1...26 мг/кг, что соответствует льдам пресных природных водоемов.

Изготовленные образцы находились в морозильной камере при температуре $\sim -15^\circ \text{C}$. Далее образец помещался в экспериментальную установку, где к нему присоединялась термопара. Температура воздуха в помещении составляла около 20°C , поэтому нагревание образца льда до 0°C происходило за 5–10 мин. Эксперимент завершался после явных признаков таяния образца по визуальному обнаружению воды на поверхности образца льда. Один и тот же образец мог использоваться повторно (после завершения эксперимента образец снова помещался в морозильную камеру). Результаты, полученные при использовании данной методике опубликованы в работе [150].

д) Эксперименты по просвечиванию блоков льда в видимой и УФ областях спектра на длинах волн 535 нм и 370 нм

Целью экспериментов по просвечиванию блоков льда на длинах волн 535 нм и 370 нм являлось изучение эффекта «просветления» в указанных диапазонах. В эксперименте также исследовали влияние пространственного расположения базисных плоскостей кристаллов льда относительно вектора напряженности электрического поля на мощность проходящего излучения.

В настоящей работе выполнены исследования пропускания оптического излучения через блок пресного льда. Измерения были выполнены в видимом и ультрафиолетовом диапазонах. В видимом диапазоне использовали полупроводниковый лазер на длину волны (λ) 535 нм с линейной поляризацией. В ультрафиолетовом диапазоне использовали неполяризованный свет от светодиодного излучателя на длину волны 370 нм. На рисунке 2.1.7 представлена схема установки для измерения мощности проходящего излучения (P) от времени (t). Измерительную термопару помещали в блок на глубину 1 см.

В используемой методике излучение пропускали через образец в виде параллелепипеда и предполагали, что коэффициент отражения (R) слабо изменяется в процессе эксперимента. Это следует из того, что на используемых длинах волн действительная часть коэффициента преломления льда (n) при 0 °C составляет значение: 1,311 ($\lambda=535$ нм), 1,334 ($\lambda=370$ нм) [14, 21, 97]. Отсюда следует значение коэффициента отражения $R \sim 0,018-0,02$, найденное из формулы $R = [(n - 1)/(n + 1)]^2$. Если n по какой-либо причине изменится на 0,001, то приращение ΔR составит 0,0001 или $\sim 0,5\%$. Такое изменение возможно, если на границе возникают слои жидкой воды. В случае слоя толщиной порядка длины волны, необходимо учитывать изменение коэффициента пропускания такой трехслойной среды. Для воды $n=1,333$ ($\lambda=535$ нм), 1,334 ($\lambda=370$ нм). Эти значения выше, чем для льда, поэтому появление пленок воды в начальной стадии таяния образца и возникновении интерференции, что должно приводить к уменьшению коэффициента прохождения (т.е. возрастанию затухания излучения) [98]. Данная особенность может использоваться для определения начала появления жидкости

на поверхности льда при анализе влияния граничного слоя на перенос излучения. Мнимой частью коэффициента преломления воды и льда можно пренебречь, так как она составляет значение на много порядков величины ниже, чем действительная часть.

Образцы льда для выполнения исследования извлекались из ледяного покрова пресного озера Арахлей (Забайкальский край) в феврале-марте. В это время концентрация солей во льду в средней части ледяного покрова по его высоте составляет значение порядка 1 мг/кг [4].

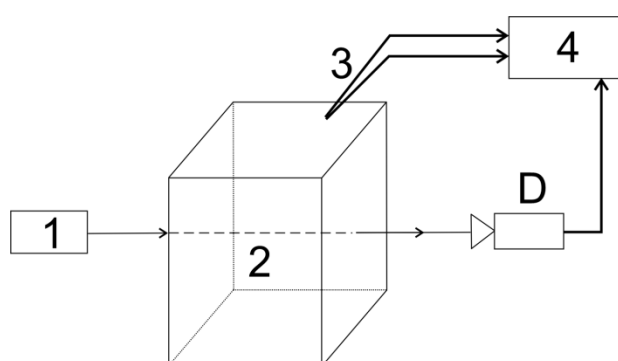


Рисунок 2.1.7 – Схема установки для измерения мощности проходящего излучения в оптическом диапазоне через лед вблизи температуры фазового перехода. 1 – излучатель, 2 – образец – блок льда, 3 – термопара, 4 - система сбора и записи данных, D – фотодетектор

Образец во время эксперимента располагали так, чтобы вектор электрического поля электромагнитных волн был направлен либо параллельно, либо перпендикулярно базисной плоскости кристаллов льда. Как было установлено в ряде работ, при формировании озерного льда 90-100% кристаллов в ледяном покрове после начальной стадии формирования покрова, когда исчезают подледные течения, ориентируются главной оптической осью «с» перпендикулярно к поверхности раздела лед-вода и могут отклоняться от нормали в пределах нескольких градусов. В соответствии с классификацией, данной Н.В. Черепановым, это соответствует льду типа А1, который образуется в небольших озерах при градиентах температур 1-4 град/м в приледном слое воды [40].

Ранее в [3] было отмечено, что в микроволновом диапазоне наблюдали эффект «просветления» образцов из льда в зависимости от расположения базисных плоскости кристаллов по отношению к вектору электрического поля волн. Поэтому в настоящем исследовании также было обращено внимание на эту особенность.

Образцы льда хранились в морозильной камере при температуре $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Толщина образцов составляла 10 см. Далее их помещали в установку и они нагревались при комнатной температуре до достижения $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. После увлажнения поверхности льда, то есть появления признаков таяния эксперимент завершался. Приемник и источник излучения находились при постоянной температуре.

Запись сигналов от термопары и фотодетектора осуществлялась на систему сбора информации. Регистрацию сигналов производили с интервалом $\sim 0,3\text{ с}$.

2.2 Натурные измерения микроволновых характеристик ледяных структур вблизи $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

а) Эксперименты по исследованию микроволновых характеристик ледяных образований на фоне излучения холодного неба

В случае использования относительно широкополосных излучений при измерениях можно избежать интерференционных явлений, искажающих результаты, для выявления закономерностей изменения ϵ вблизи $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В случае поляризационных измерений появляется возможность определения пространственного упорядочения кристаллов льда Ih в образцах за счет эффекта «просветления». Ранее считалось, что это невозможно, из-за слабой анизотропии ϵ'' в кристаллах льда Ih.

Схема измерений по предлагаемой методике представлена на рисунке 2.2.1. Методика эксперимента заключалась в следующем: устанавливался радиометрический приёмник с линейной поляризацией с направлением оси антенны под углом 45° к горизонту. Подобная методика использовалась в работе

[99]. Перпендикулярно оси антенны помещался образец льда (1), в виде плоскопараллельной пластины толщиной d . На горизонтальную поверхность накладывался лист металла (2), с целью отражения излучения холодного неба. В данной методике измерялось собственное радиотепловое излучение образца и ослабленное образцом излучение неба. Интерференция этого излучения уменьшается до приемлемых значений при $h > \frac{c}{\Delta f}$, где h – длина пути излучения в образце, Δf – ширина полосы приемника излучения, c – скорость света в вакууме. Для частоты 30 ГГц и полосы частот 3 ГГц h составляет значение 0,1 м. При выполнении измерений использовали поляризационный радиометр с 4-я переключаемыми линейными поляризациями на частоту 34 ГГц с полосой ~ 3 ГГц. Измерения собственного теплового излучения образца льда (его радиояркостной температуры) осуществлялось на четырех линейных поляризациях, а, именно, горизонтальной (ГП), вертикальной (ВП) и под углом $+45^\circ$ и -45° . Чувствительность радиометра составляла 0,1 К, при постоянной времени 1 с. Измерения проводили в дневное время, при безоблачной атмосфере, когда температура воздуха возрастала выше 0°C .

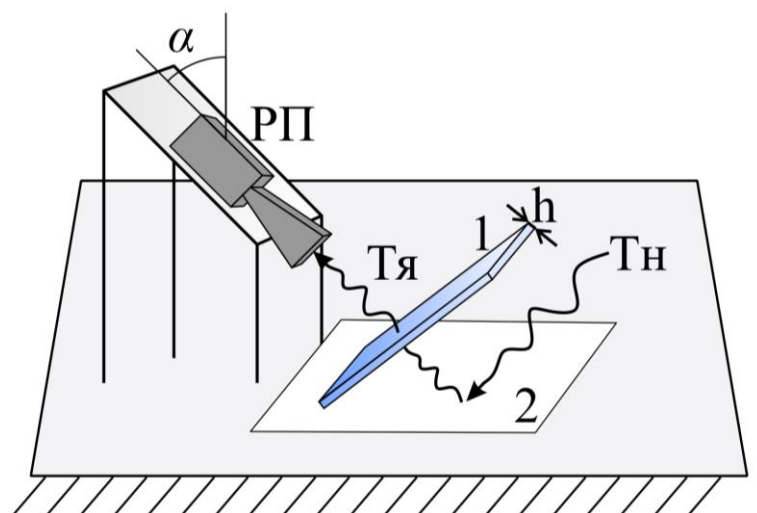


Рисунок 2.2.1 – Схема экспериментальной установки для исследования радиотеплового излучения образцов льда на фоне холодного неба. РП – поляризационный микроволновый радиометр, 1 – плоскопараллельная пластина льда размерами $1000 \times 400 \times 100$ мм³, 2 – металлический лист, T_n – радиояркостная температура неба, T_y – радиояркостная температура исследуемого объекта, α – угол наблюдения, h – толщина образца льда

Особо обращено внимание на расположение базисных осей кристаллов льда. В различных экспериментах базисные плоскости кристаллов льда устанавливали либо перпендикулярно, либо параллельно относительно плоскости вертикальной поляризации. Это связано с тем, что исследуемый эффект «просветления» имеет зависимость расположения базисной оси кристаллов относительно вектора напряженности электрического поля электромагнитной волны.

Калибровка радиометрического приемника осуществлялась по излучению открытой водной поверхности и по излучению холодного неба. Значение радиояркой температуры образца льда вычислялась по формуле:

$$T_{\text{л}} = \frac{T_{\text{в}} - T_{\text{н}}}{U_{\text{в}} - U_{\text{н}}} \cdot (U_{\text{л}} - U_{\text{н}}) + T_{\text{н}} \quad (2.4)$$

где $U_{\text{н}}$, $U_{\text{л}}$, $U_{\text{в}}$ - показания СВЧ-радиометра при измерении неба, образца льда, кюветы с открытой водной поверхности; $T_{\text{в}}$ - расчетное значение радиояркой температуры открытой водной поверхности. Расчеты осуществлялись по модели плоскостной структуры.

б) Эксперименты по радиопросвечиванию пресного ледяного покрова и увлажненной дисперсной среды на примере растительного покрова

Целью настоящего эксперимента была оценка изменений диэлектрических потерь в ледяном покрове при приближении к температуре фазового перехода. Радиопросвечивание пресного ледяного покрова осуществляли на озере Арахлей (Забайкальский край). Из анализа предыдущих исследований [100, 101], оптимальным временем исследования, динамики вариаций излучения в ледяном покрове, является февраль–март. В это время рост льда прекращается, а также температура льда поднималась к 0 °С, где и может наблюдаться эффект его «просветления».

Методика эксперимента состояла в следующем, на глубину порядка 40 см в ледяной покров помещался генератор электромагнитного излучения на частоту 13 ГГц. Излучение осуществлялось на вертикальной поляризации. На такой же глубине в ледяном покрове на расстоянии 40 м устанавливался приемник излучения, который регистрировал мощность излучения генератора. Прием

сигнала осуществлялся на двух поляризациях. На рисунке 2.2.2 представлена схема эксперимента.

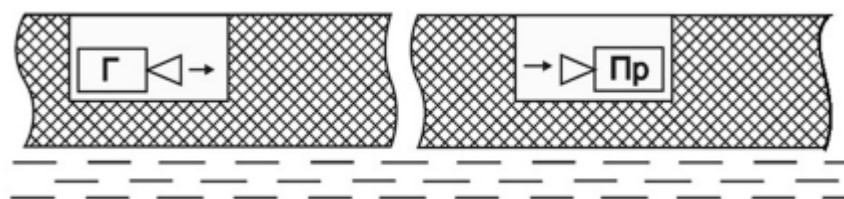


Рисунок 2.2.2 – Схема эксперимента по радиопросвечиванию ледяного покрова в момент деструкции льда на частоте 13 ГГц. Г и Пр - генератор и приемник электромагнитного излучения

Также на глубинах 10 см, 20 см, 30 см, 40 см регистрировалась температура льда. Толщина ледяного покрова составляла 120–140 см, а снежного покрова ~10 см. Минерализация льда ~1 мг/кг. Запись сигналов осуществлялась на систему сбора данных фирмы Agilent.

По аналогичной методике выполнялось исследование кустарников с целью обнаружения эффекта понижения значений диэлектрических потерь исследуемой дисперсной системы в период суточных изменений температур воздуха от отрицательных к положительным.

2.3 Оценка погрешности измерений

Погрешность в проводимых измерениях при исследовании эффекта «просветления» в образцах льда, снега и других дисперсных средах в первую очередь будет связана с неточностью знания размеров образца, его минерализации, полосы частот зондирующего излучения и погрешностями измерительных приборов.

В различных экспериментах относительная погрешность будет определяться по-разному. Например, для резонаторных измерений относительная погрешность в определении ε' находится как $\frac{\Delta\varepsilon'}{\varepsilon'} = \frac{\Delta f_0}{f_0} + \frac{\Delta f_{101}}{f_{101}}$, а для ε'' : $\frac{\Delta\varepsilon''}{\varepsilon''} = \frac{\Delta\varepsilon'}{\varepsilon'} + \frac{\Delta f_{101}}{f_{101}} + \frac{\Delta(\Delta f)}{\Delta f}$.

Точность определения $\varepsilon'' \sim 1\%$, $\varepsilon' \sim 0,1\%$. Данная оценка проводилась для резонатора с линейными размерами $58 \times 26 \times 25 \text{ мм}^3$ с добротностью пустого резонатора при комнатной температуре ~ 237 . Как уже было отмечено, использовались три резонатора сантиметрового диапазона. Значение добротности двух других выше, чем у резонатора с $Q=237$. Чем выше Q , тем меньше ошибка в измерениях. В экспериментах, при использовании других резонаторов (с $Q=253$ и $Q=1096$), точность определения диэлектрической проницаемости будет следующей: $\varepsilon'' < 1\%$, $\varepsilon' < 0,1\%$.

Инструментальная ошибка при просвечивании блоков льда в микроволновом диапазоне будет определяться суммой погрешности в определении ширины полосы излучения и погрешности в определении мощности (интенсивности) принимаемого сигнала. При использовании скалярного анализатора цепей P2M-18/2 относительная погрешность установки частоты составляет 10^{-6} , а относительная погрешность измерения мощности 0,03 (согласно описанию средства измерений).

Для оценки погрешности при исследовании эффекта «просветления» радиометрическими методами или при использовании радиометров в отдельных установках можно использовать формулу квадратичного суммирования отдельных составляющих погрешности, ввиду их независимости друг от друга. Общая погрешность будет следующей: $\beta = \sqrt{\beta_k^2 + \beta_m^2 + \beta_c^2}$, где β_k – калибровочная погрешность, β_m – методическая погрешность, которая включает в себя погрешность связанную с позиционирование установки, влиянием атмосферы измерением толщины образца, минерализации и других внешних объектов, β_c – случайная погрешность, она включает в себя нестабильность внутренних условий радиометрического прибора (температурный дрейф). Если принять, что $\beta_k = \pm 0,1 \text{ К}$, $\beta_m = \pm 0,1 \text{ К}$, $\beta_c = \pm 0,05 \text{ К}$, тогда $\beta = 0,15 \text{ К}$.

При использовании методик исследования с генераторами излучения можно использовать вышеуказанную формулу: $\beta = \sqrt{\beta_{\pi}^2 + \beta_m^2 + \beta_c^2}$, где β_{π} – погрешность чувствительности приемника, β_m – методическая погрешность, которая включает в

себя погрешность связанную с позиционирование установки, апертурой антенн, измерением толщины образца, минерализации и т.д., β_c – случайная погрешность, она включает в себя нестабильность внутренних условий генератора и приемника (температурный дрейф). Если принять, что $\beta_n=0,1\%$, $\beta_m=1\%$, $\beta_c=1\%$, тогда $\beta=1,4\%$.

Выводы по главе:

1. Предложены методики исследования диэлектрических характеристик льда вблизи температуры фазового перехода лед Ih – вода в широком интервале частот: от единиц гигагерц до ультрафиолетового диапазона, при их температурной деформации при нагревании образцов, что позволило создать их медленную пластическую деформацию.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В главе представлены основные результаты экспериментов. Различными методами исследования показано существование эффекта «просветления» в широком интервале частот вблизи температуры фазового перехода лед-вода для образцов льда и снега. Выявлена зависимость понижения диэлектрических потерь при увеличении концентрации солей в образцах льда. Показано возможное проявление эффекта «просветления» для дисперсных сред.

3.1 Результаты измерений действительной и мнимой частей относительной комплексной диэлектрической проницаемости льда и снега, полученные резонаторным методом

В данном параграфе представлены результаты измерения действительной и мнимой частей относительной комплексной диэлектрической проницаемости льда и снега на различных частотах при приближении температуры объекта к 0 °С.

Резонаторные методы исследования имеют разнообразное применение. Это не только исследование диэлектрических характеристик материалов [25], но и исследование фазовых переходов [102]. Данный метод, в зависимости от добротности резонатора, является достаточно чувствительным к процессам, происходящим в исследуемом материале. Применение резонаторного метода исследования в настоящей работе позволило эффективно решать поставленные задачи.

Как уже было отмечено в главе 2, для исследования диэлектрических характеристик использовался природный озерный лед, который был изъят из пресного ледяного покрова оз. Кенон и оз. Арахлей (Забайкальский край). В исследовании обращено внимание на содержание во льду солей, так как их включения влияют на диэлектрические характеристики. Минерализация воды, полученной из льда, не превышала 1 мг/кг. Данная величина, согласно [13, 22, 25] будет вносить несущественный вклад в диэлектрические характеристики льда.

На рисунке 3.1.1 представлен график зависимости действительной и мнимой частей относительной комплексной диэлектрической проницаемости льда от времени нагревания образца. Измерения проводились при использовании резонатора с линейными размерами $58 \times 26 \times 25$ мм³. Собственная резонансная частота резонатора 6,1 ГГц. Частота измерений с образцом льда около 3,4 ГГц. Скорость нагревания изменялась линейно и составляла около 8 град/час. Начальная температура образца равнялась -30°C . Стоит отметить, что в данном эксперименте, базисные плоскости кристаллов льда были направлены перпендикулярно вектору электрического поля электромагнитных волн – рисунок 3.1.1 а и параллельно – рисунок 3.1.1 б.

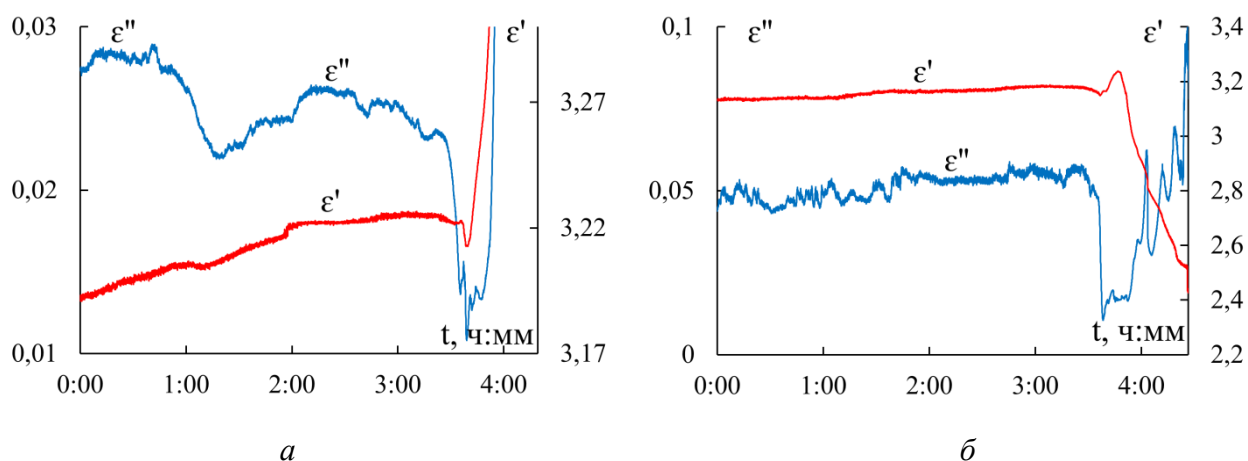


Рисунок 3.1.1 – Действительная и мнимая части относительной комплексной диэлектрической проницаемости льда на частоте 3,4 ГГц. а) при перпендикулярном расположении базисных плоскостей кристаллов льда относительно вектора напряженности электрического поля, б) при параллельном их расположении. Отсчет времени от начала экспериментов

При приближении температуры образца льда к 0°C , происходит более выраженное изменение его диэлектрических характеристик (рисунок 3.1.1). При перпендикулярном расположении базисных плоскостей кристаллов льда относительно вектора напряженности электрического поля наблюдали уменьшение ϵ'' в $\sim 2,5$ раза. При параллельном расположении вектора электрического поля уменьшение ϵ'' происходит примерно в 5 раз. Если бы

эффект «просветления» отсутствовал, то при появлении воды реакция резонаторной системы должна была быть обратная, то есть ожидалось бы повышение его потерь в данном диапазоне частот. Это связано с тем, что ϵ'' воды при частоте 3,4 ГГц равняется ~ 27 . Также осуществлялись измерения и мощности проходящего излучения в резонаторе. Изменения составили следующие значения: для перпендикулярного расположения базисных плоскостей кристаллов льда относительно вектора напряженности электрического поля возрастание мощности в момент «просветления» $\Delta P_{\perp} = 7$ дБ, а для параллельного – $\Delta P_{\parallel} = 12$ дБ. В выполненных измерениях просветление изменялось в широких пределах. Уменьшение ϵ'' для различных образцов льда составляло от 5 до 1,8 раз, что можно связать с различием их структуры: с особенностями расположения главных оптических осей и геометрией кристаллов и влиянием примесей, которые располагаются по поверхностям кристаллов. В эксперименте ϵ' изменялось незначительно – в области «просветления» $\sim 1\%$.

На рисунке 3.1.2 представлены графики изменения диэлектрических характеристик свежесвыпавшего снега в зависимости от времени нагревания. Скорость изменения температуры была линейной и составила ~ 6 град/час, при начальной температуре -5°C . Плотность снега составила $\sim 0,156$ г/см³, а минерализация ~ 1 мг/кг.

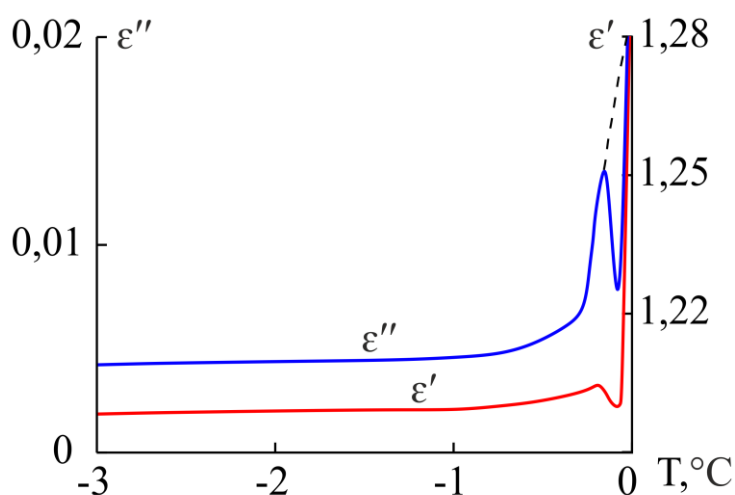


Рисунок 3.1.2 – Действительная и мнимая части относительной комплексной диэлектрической проницаемости снега на частоте $\sim 5,5$ ГГц. Штриховая линия – ожидаемая зависимость при отсутствии эффекта «просветления»

На графике наблюдается уменьшение ε'' примерно в $\sim 1,8$ раза. Для свежеснегавывпавшего снега проводился ряд измерений. Плотность измеряемых образцов снега варьировалась от $0,140 \text{ г/см}^3$ до $0,180 \text{ г/см}^3$. Уменьшение ε'' при эффекте «просветления», как и на рисунке 3.1.2, для различных образцов варьировалось в пределах от 1,8 до 1,2 раз. Характерной особенностью поведения диэлектрических характеристик снега, в отличие от льда, является то, что ε'' , как и ε' со временем при нагревании начинают увеличиваться, а уже после происходит «просветление». У льда же это наблюдается относительно редко, с вероятностью около 20%.

Изменения ε'' снега в указанных пределах, меньшем, чем у льда, объясняется хаотическим распределением пространственной ориентацией базисных плоскостей в снежинках.

3.2 Результаты радиометрических исследований образцов льда на фоне холодного неба

При исследованиях методом радиометрических измерений использовались несколько радиометрических приемников. Методика измерений приведена в главе 2.

На рисунке 3.2.1 представлены результаты измерения радиояркостной температуры блока льда, на фоне излучения холодного неба. В данном эксперименте, базисные плоскости кристаллов льда ориентированы параллельно направлению горизонтальной поляризации. Результаты измерений показывают наличие анизотропии диэлектрических потерь льда относительно базисных плоскостей кристаллов. Это обнаруживается потому, что радиояркостная температура на различных поляризациях различается между собой.

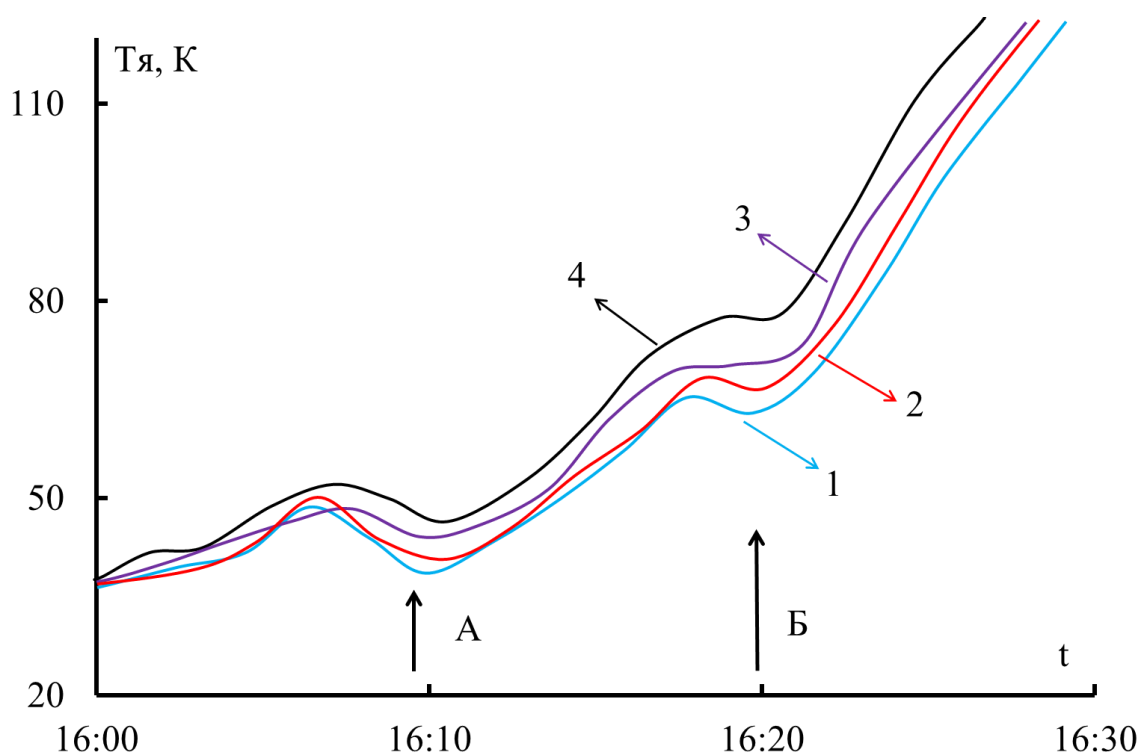


Рисунок 3.2.1 – Результаты изменения радиояростной температуры образца льда со временем. Толщина образца 10 см, минерализация ~1 мг/кг. Цифрой обозначена поляризация: 1 – горизонтальная, 2 – «+45°», 3 – «-45°», 4 – вертикальная поляризация. Стрелками отмечены области «просветления» льда

Результаты эксперимента (рисунок 3.2.1) показывают наличие заметного «просветления» образца на четырех поляризациях. Несколько областей понижения радиояростной температуры (А, Б) объясняются пространственной и временной неоднородностью нагрева образца. Отклик микроволнового излучения при эффекте «просветление» при первом понижении $T_{я}$, отмеченный стрелкой «А» на горизонтальной поляризации, имеет большее значение и составляет $\Delta T_{ГП}=12$ К, по сравнению с $\Delta T_{ВП}=10$ К, где разность между радиояростными температурами для одной поляризации определялась между максимумом перед эффектом «просветления» и минимумом $T_{я}$. Эти значения относятся ко льду, который был образован за 3 месяца до эксперимента. Для «свежеобразованного» льда, где не наблюдается строго выраженное пространственное направление базисных плоскостей, эффект «просветления» также имеет место. На рисунке

3.2.2 представлен график изменения радиояркостной температуры на двух ортогональных поляризациях образца льда от времени его нагревания.

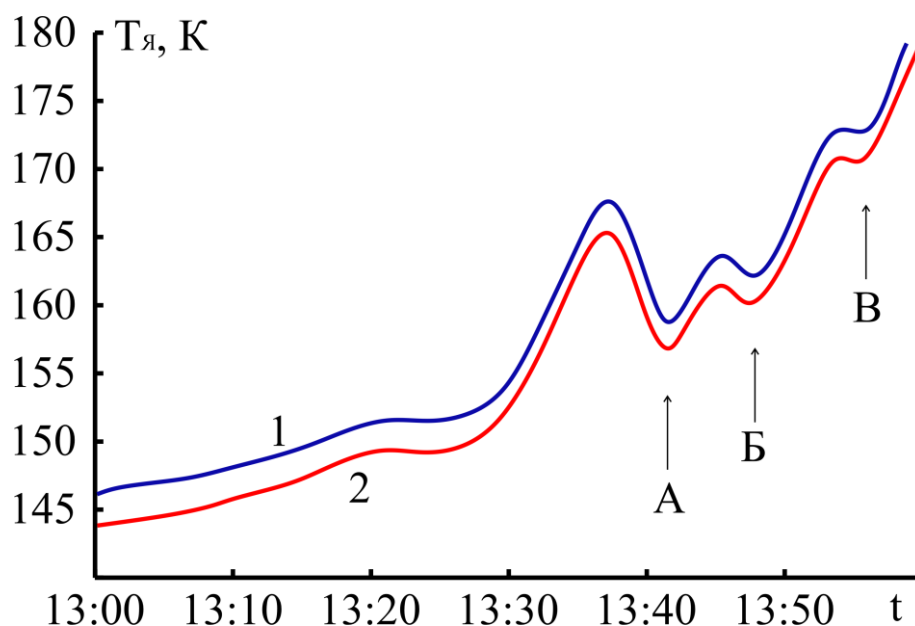


Рисунок 3.2.2 – Результаты изменения радиояркостной температуры образца льда со временем. Толщина образца 15 см, минерализация ~10 мг/кг. Цифрой обозначена поляризация: 1 – горизонтальная, 2 – вертикальная поляризация. Стрелками отмечены области «просветления» льда

Для данного образца характерно то, что изменения $T_{я}$ для различных поляризаций имеют одинаковое значение, а также тот факт, как и для образца на рисунке 3.2.1, наблюдается несколько областей (А, Б, В) понижения $T_{я}$, что также свидетельствует о пространственной и временной неоднородности нагрева образца. В области «А» максимальное понижение радиояркостной температуры составило около 10 К.

3.3 Результаты радиометрических исследований ледяных покровов

Методика эксперимента описана в главе 2. Радиометр на частоту 34 ГГц устанавливался под углом наблюдения 38° к кювете, которая была заполнена дистиллированной водой, с общей минерализацией 1 мг/кг. В результате охлаждения воздуха в ночное время суток вода замерзала. При дневных,

положительных температурах, происходил обратный процесс. На рисунке 3.3.1 представлены результаты эксперимента.

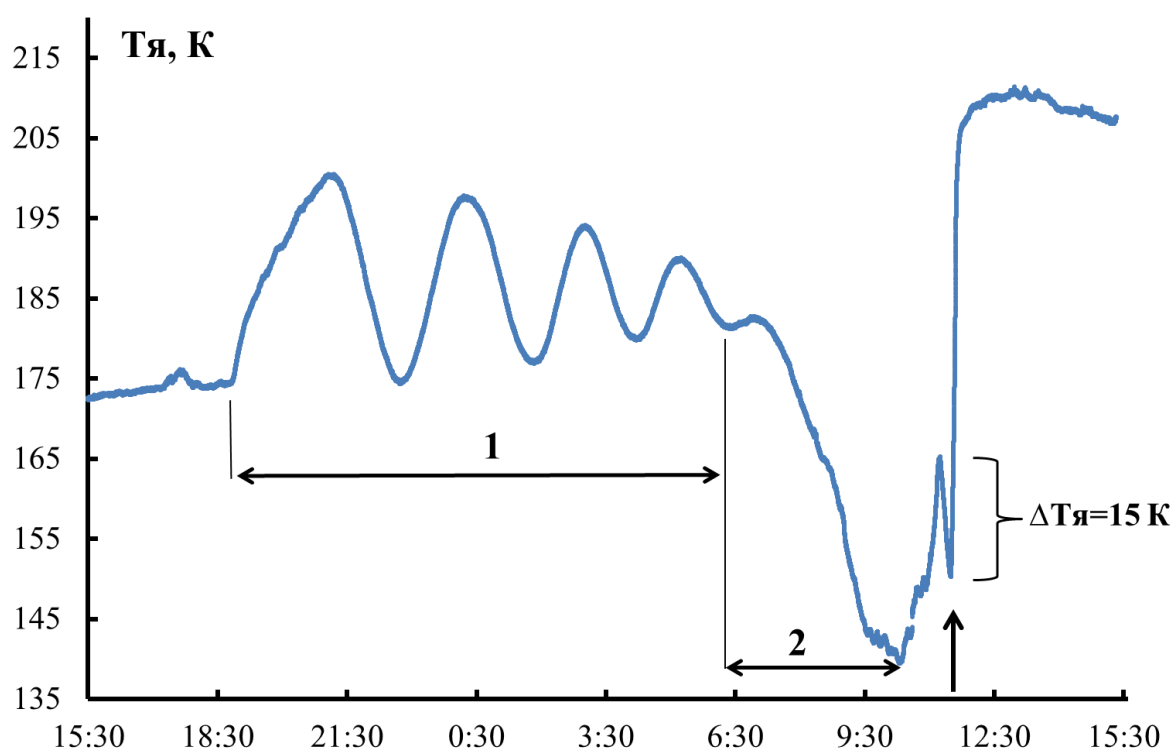


Рисунок 3.3.1 – Результаты изменения радиояростной температуры плоскостойкой структуры воздух-лед-вода. Стрелкой обозначен эффект «просветления». 1 – область роста толщины льда, 2 – полное замерзание воды, далее образование тонкого слоя воды на нижней поверхности

На рисунке видна интерференция, которая обозначена областью 1. Она связывается с ростом толщины льда, соответственно, с уменьшением слоя воды. Понижение радиоярости в области 2 соответствует уменьшению слоя воды и его полному исчезновению. Так как кювета металлическая, далее происходит переотражение излучения холодного неба со вкладом излучения льда. Стрелкой отмечен эффект «просветление» (рисунок 3.3.1). В это время уменьшаются потери в образце льда, что проявляется в виде кратковременного уменьшения радиояростной температуры. На полученном графике понижение $T_{я}$ достигает ~ 15 К. Такие проявления в радиоярости, в свою очередь, могут быть неверно интерпретированы при дешифровке данных дистанционного зондирования Земли.

Рост радиояростной температуры после эффекта «просветления» связывается с началом таяния образца в кювете при повышении дневной температуры воздуха.

3.4 Результаты экспериментов по просвечиванию образцов льда в микроволновом диапазоне

При пропускании монохроматического излучения через образец льда в виде параллелепипеда было обнаружено, что просветление на различных частотах происходит практически одновременно, в то время как вариации сигнала, определяемые интерференцией, сдвинуты относительно друг друга. Результаты измерений мощности проходящего излучения представлены на рисунке 3.4.1.

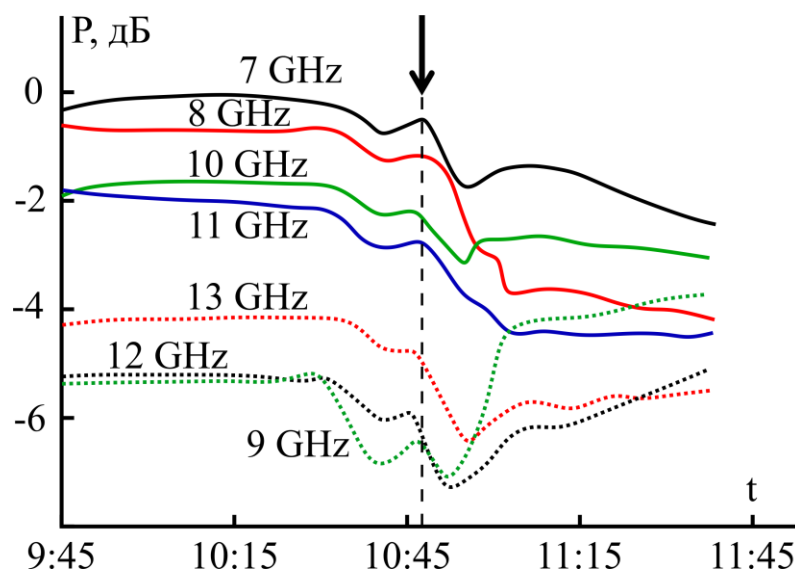


Рисунок 3.4.1 – Зависимость мощности прошедшего излучения через блок льда на различных частотах от времени при относительных измерениях. Стрелочкой отмечен эффект «просветления». Использован скалярный анализатор цепей P2M–18/2 фирмы «Микран»

На рисунке приведены результаты выполненных измерений для случая, когда базисная плоскость параллельна вектору электрического поля. На графике стрелочкой отмечен эффект «просветления», когда мощность проходящего излучения возрастает. Для удобства сравнения графики сдвинуты относительно друг друга по вертикальной оси. Изменение мощности при «просветлении» составило приблизительно 1 дБ для толщины блока $\sim 0,15$ м. При таянии образца

происходит изменение его линейных размеров, в результате чего, может иметь место изменение уровней сигналов, определяемых интерференцией. На представленном рисунке интерференция наблюдается в виде увеличения и уменьшения проходящей мощности на различных частотах. Эффект «просветления», отмеченный на рисунке, не связан с интерференцией и происходит одновременное увеличение мощности проходящего излучения на всех частотах от 7 до 13 ГГц.

Также интересен вопрос об отражательных характеристиках среды при эффекте «просветления». Для исследования этого вопроса использовалась методика, представленная во второй главе. Генератор монохроматического излучения с длиной волны 1,4 см устанавливался перед образцом льда в виде параллелепипеда с линейными размерами $270 \times 100 \times 260$ мм³. Также устанавливались два приемника, один из которых использован для регистрации проходящей мощности излучения, а второй для регистрации отраженного сигнала. На рисунке 3.4.2 даны графики зависимости мощности проходящего и отраженного излучения в относительных единицах.

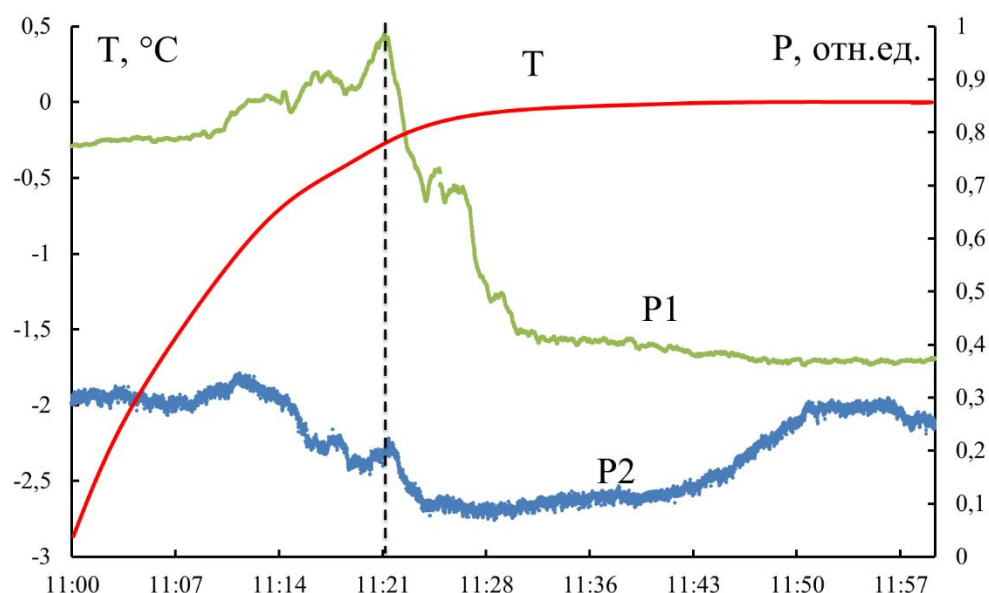


Рисунок 3.4.2 – Мощность проходящего (P1) и отраженного (P2) сигнала через образец льда в относительных единицах. Пунктирной линией обозначен момент максимума «просветления» при температуре $-0,3^\circ\text{C}$

При повышении температуры образца наблюдается некоторое возрастание мощности проходящего излучения. В момент пика «просветления» наблюдается также и повышение мощности обратного рассеяния. Относительные приращения мощности прошедшего и отраженного сигнала приблизительно одинаковы (~25%).

3.5 Результаты экспериментов по просвечиванию образцов льда в оптическом диапазоне

Представленные результаты в данном разделе опубликованы в работе [92].

При исследовании мощности проходящего сигнала в оптическом диапазоне использовалась методика, представленная во второй главе. На рисунке 3.5.1 а приведены результаты измерения мощности пропускания лазерного излучения в видимом диапазоне ($\lambda=535$ нм) в зависимости от времени. В данном эксперименте вектор электрического поля волны находился в базисной плоскости кристаллов льда: рисунок 3.5.1 б.

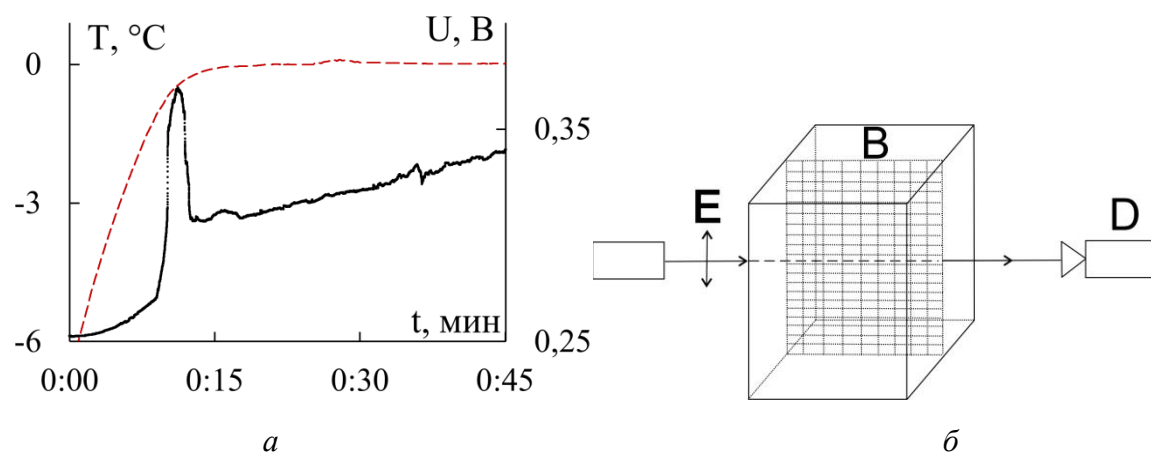


Рисунок 3.5.1 – а) температура льда (штриховая линия) и мощность проходящего линейно поляризованного видимого излучения через образец в зависимости от времени на длине волны 535 нм. Регистрируемая мощность представлена в единицах напряжения фотодетектора (U). б) схема расположения базисной плоскости (B)(заштриховано сеткой) и ориентации вектора электрического поля (E)

Особенность результатов заключается в том, что при приближении льда к температуре фазового перехода происходило заметное кратковременное увеличение мощности регистрируемого сигнала приблизительно на 25 %.

На рисунке 3.5.2 приведены результаты аналогичных измерений для случая, когда вектор электрического поля волн перпендикулярен базисной плоскости кристаллов льда. Здесь приращение достигает 5 %, но оно наблюдалось в процессе таяния и носило сложный характер от времени. В момент достижения температуры $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ обнаружилось кратковременное уменьшение сигнала.

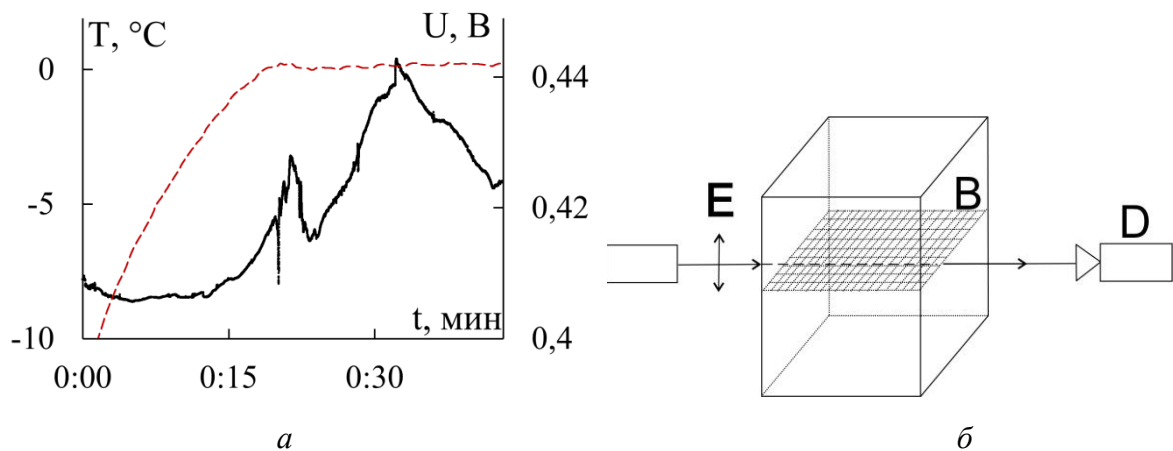


Рисунок 3.5.2 – а) результаты измерения мощности проходящего видимого излучения; б) схема расположения блока льда; обозначения аналогичны рисунку 3.5.1

На рисунке 3.5.3 представлены результаты измерений прохождения излучения в ультрафиолетовом диапазоне для неполяризованного излучения, но с вектором E в базисной плоскости. На рисунке 3.5.3 а – графики температуры льда и проходящей мощности излучения, 3.5.3 б – расположение блока с выделенной преимущественной ориентацией базисной плоскости кристаллов пресного льда. Особенность графика для регистрируемой мощности: плавное его изменение в области температур $-12\text{ }^{\circ}\text{C} \dots -8\text{ }^{\circ}\text{C}$ и резким приращением вблизи $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ на 23 %.

Для сравнения на рисунке 3.5.4 представлены результаты измерений, для случая, когда вектор электрического поля был хаотически расположен в пространстве по отношению к базисным плоскостям кристаллов льда. График для пропускаемой мощности на рисунке 3.5.4 отличается от графика на рисунке 3.5.3

возникновением осцилляций мощности сигнала, которая начинается с уменьшения ее значения. Амплитуда осцилляций $\sim 3\%$.

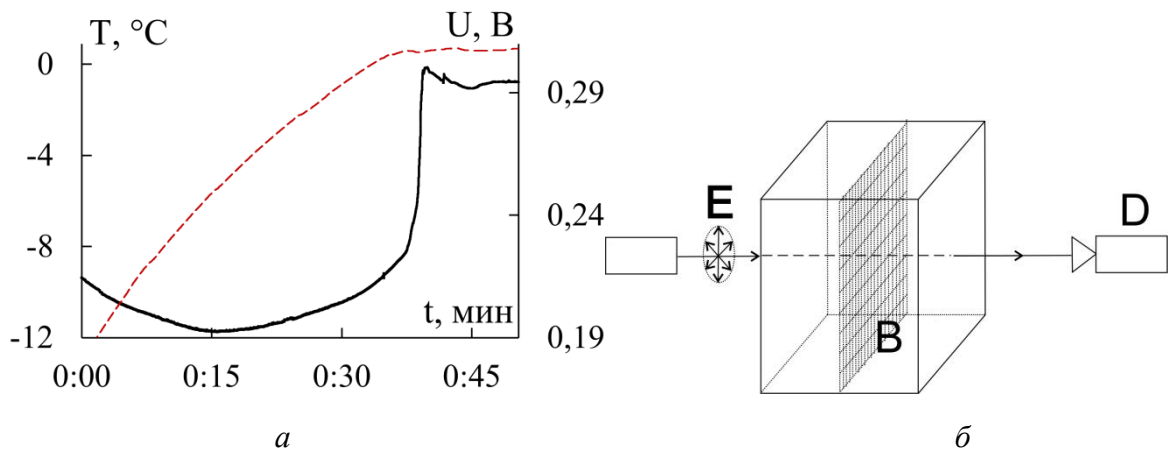


Рисунок 3.5.3 – а) график проходящей мощности УФ неполяризованного излучения (в единицах напряжения на выходе детектора) от времени (сплошная линия) и температуры (штриховая линия); б) расположение блока льда, отмечена базисная плоскость кристаллов в образце; обозначения аналогичны рисунку 3.5.1

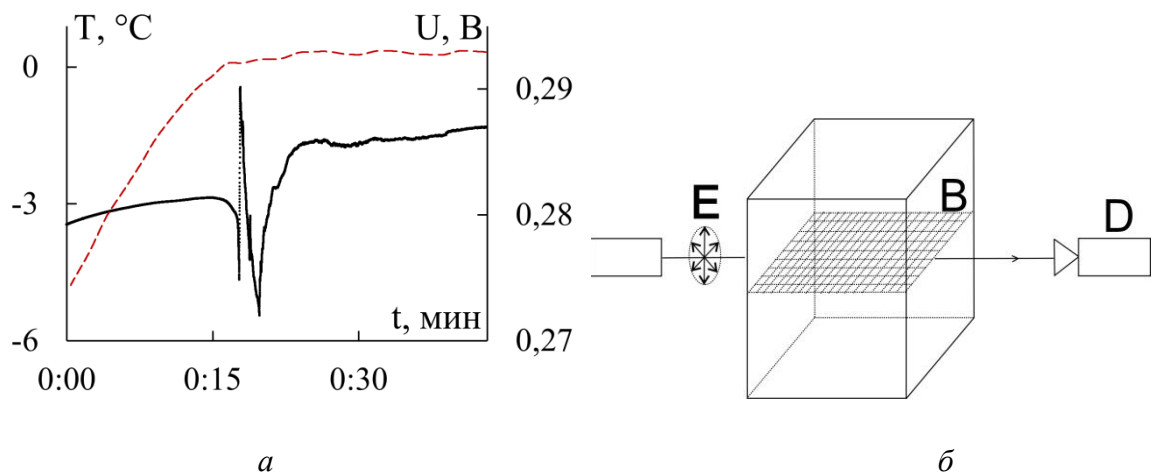


Рисунок 3.5.4 – а) график проходящей мощности на длине волн 370 нм (в единицах напряжения на выходе детектора сплошная линия), график температуры (штриховая линия) от времени; б) расположение блока льда; обозначения аналогичны рисунку 3.5.1

Таким образом, в результате экспериментов по измерению затухания излучения в оптическом диапазоне на длинах волн 535 нм и 370 нм обнаружены особенности в виде существенных изменений мощности проходящего излучения перед началом таяния образца, структура которого включает кристаллы с выделенной пространственной ориентацией главной оптической оси.

Максимальный эффект наблюдали для случая расположения вектора $\mathbf{E}$ в базисной плоскости. Выделенная ориентация кристаллов характерна для льда, образовавшегося в природных условиях. В соответствии с принципом Кюри, растущий лед повторяет симметрию окружающего пространства [103, 104]. В случае ледяного покрова, из которого был изъят образец, это симметрия конуса, при которой ось «с» ориентирована перпендикулярно поверхности раздела лед-вода.

Приращение мощности излучения в эксперименте достигало 25 %. В некоторых экспериментах обнаруженный эффект напоминает «просветление» среды при нанесении на поверхность, например, четвертьволнового слоя с промежуточным значением действительной части относительной диэлектрической проницаемости. Однако в данном случае физический механизм «просветления» представляется иным. Во-первых, известно, что при деформации сдвига в кристалле льда возникает нелинейная зависимость напряжения и деформации. Причем в области пластического течения возникает отрицательная дифференциальная вязкость [15]. Можно из общих соображений предположить, что в этом случае из-за наличия дипольных электрических моментов у молекул воды в слое, где происходит течение, может проявиться электрическая неустойчивость и возникнуть усиление электромагнитного излучения. Такие слои имеют нанометровую толщину и они разделены плоскими кристаллическими пластинками толщиной порядка десятков нанометров [40].

Более конкретный механизм возрастания напряженности электрического поля был связан с появлением поверхностных плазмонов на плоской проводящей пленке или островковых пленках [105]. Проводимость на границе слоя, по которому происходит течение плоского кристаллического слоя, может возникать из-за сегнетоэлектрического упорядочения диполей среды. Можно предположить, что разорванные водородные связи приведут к ориентации диполей молекул воды в плоскости контакта сред. В свою очередь, на контакте сегнетоэлектрика и диэлектрика возникает, как показано в [106], повышенная проводимость (на много порядков величины). В подтверждение такого механизма усиления поля

можно указать на открытие гигантского комбинационного рассеяния излучения в присутствии металлических периодических или перколяционных наноструктур [107].

Кроме того, другая особенность вариаций мощности проходящего излучения проявилась в виде немонотонного изменения затухания при отрицательных температурах льда, когда блок начинали нагревать при помещении его в установку (например, это видно на рисунке 3.5.3 а при температурах от -15°C до 0°C). Данная особенность может быть также объяснена начинающейся пластической деформацией, вызванной градиентом температуры в образце.

Как отмечалось выше, эффект «просветления» ранее наблюдали в микроволновом диапазоне [3]. При этом в [3,4] было установлено особое состояние поверхностных слоев льда. Его исследовали как при просвечивании образца, так и в резонаторе. Было найдено, что на стадии возрастания проходящей мощности излучения жидкая вода в образце отсутствовала, так как резонансная частота резонатора заметно не изменялась. В случае появления жидкой воды наблюдалось бы существенное уменьшение резонансной частоты и рост потерь резонатора. В [3,4] было высказано предположение, что обнаруженная особенность льда вблизи начала таяния связана с образованием проводящих перколяционных пленок или изменением свойств чистого льда при начале разрушения кристаллов в точке фазового перехода.

На рисунке 3.5.4, в случае, когда вектор электрического поля не имел выделенного направления по отношению к базисной плоскости, интенсивность проходящего излучения имела осциллирующий характер от времени. Однако в этом эксперименте в начальный момент деструкции льда наблюдали уменьшение проходящей мощности, что можно сопоставить с влиянием появившегося жидкого слоя на поверхности образца. Следует отметить, что из-за малого интервала температуры, когда проявляется эффект «просветления», трудно определить момент начала таяния. Тем не менее, по совокупности экспериментальных данных можно выделить эффект взаимодействия поля волны

со слоями на базисных плоскостях («просветление») и эффект жидких пленок на поверхности образца (рост поглощения).

3.6 Результаты экспериментов по просвечиванию образцов льда в инфракрасном диапазоне

Представленные результаты в данном разделе опубликованы в работе [150].

Исследования коэффициента поглощения льда в инфракрасной области спектра в настоящей работе, объясняется актуальностью исследований криогенных образований в указанном диапазоне как подспутниковыми измерениями [108], так и дистанционными методами [109-111].

При измерениях интенсивности проходящего излучения в инфракрасном диапазоне через образцы льда по методике, представленной в главе 2, находился коэффициент поглощения α (без учета рассеяния в среде), который равен

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (3.1),$$

где d – толщина образца, I_0 – интенсивность излучения без образца, I – интенсивность излучения с образцом. На рисунке 3.6.1 представлены результаты одного из экспериментов.

Особенности данного эксперимента отражаются на графике (рисунок 3.6.1 а). На нем выделяется область, где коэффициент поглощения уменьшается на ~10%. На рисунке 3.6.1 б представлена фотография, сделанная в поляризационном микроскопе при скрещенных поляризаторах. На снимке фиксируются отдельные кристаллы льда, оптическая ось которых направлена под некоторым углом к плоскости съемки. В случае если отдельные кристаллы имеют интерференционную окраску, как на рисунке 3.6.1 б, то их главная оптическая ось направлена под некоторым углом к плоскости съемки. В случае, когда отдельные кристаллы имеют затемнение, как на рисунке 3.6.1 б и 3.6.2. б, то их главная оптическая ось параллельна оптической оси микроскопа [112].

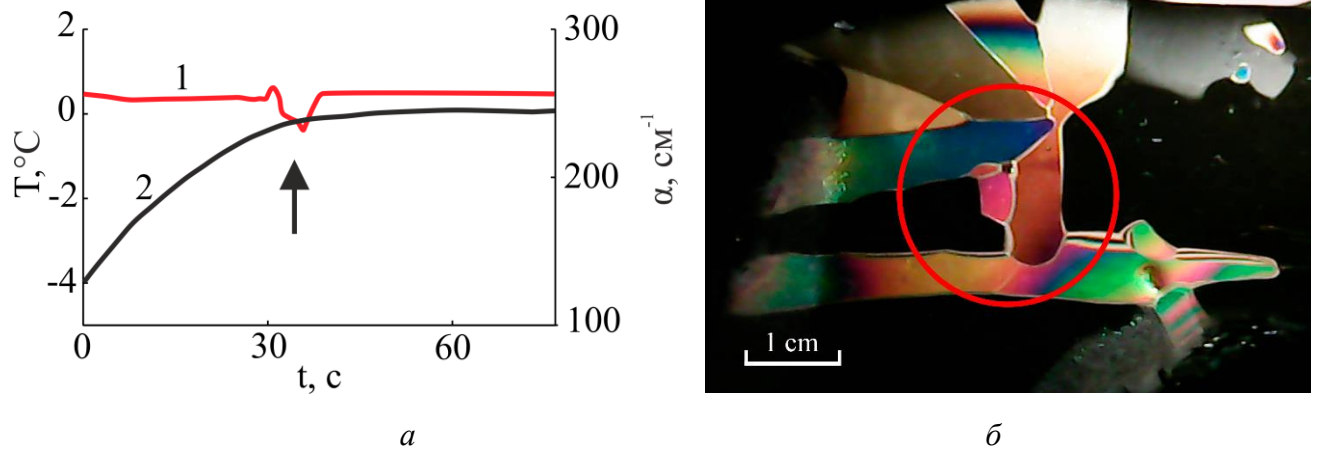


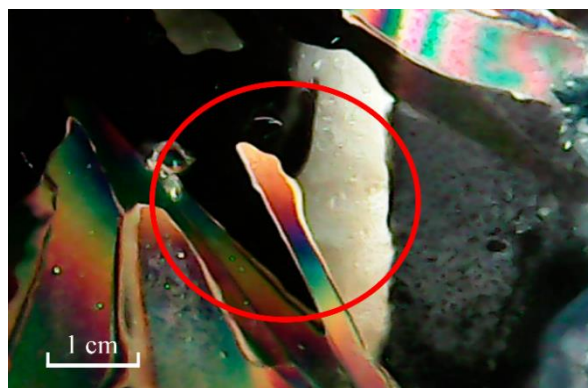
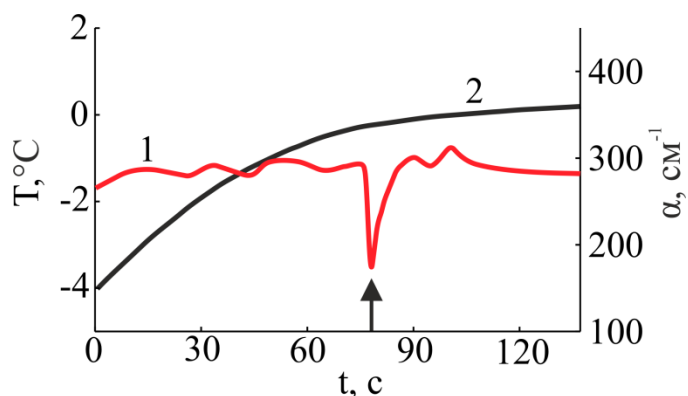
Рисунок 3.6.1 – а) результаты измерения коэффициента поглощения в диапазоне 3,8–4,2 мкм (1) и температуры (2) в образце льда толщиной 0,1 мм в зависимости от времени нагревания; стрелочкой отмечен эффект «просветления»; б) фотография образца льда в микроскопе при скрещенных поляризаторе и анализаторе. Окружностью отмечена область просвечивания

По поляризационным картинам на рисунке 3.6.1 б и 3.6.2 б можно сделать вывод о том, что базисные плоскости кристаллов более чем в 50% площади совпадают с направлением вектора электрического поля, проходящего излучения.

После экспериментов для области просвечивания производилась фотофиксация кристаллов льда на предмет их пространственной и временной изменчивости вследствие деструкции внешних слоев исследуемых образцов и повторного замораживания. Было выявлено, что отдельные кристаллы в образцах сохраняют свое положение и размеры, что подтверждается многочисленными поляризационными снимками льда в течение продолжительного периода времени.

В экспериментах, результаты которых представлены на рисунке 3.6.2 а и 3.6.3 а, при нагревании образцов происходит уменьшение коэффициента поглощения как в инфракрасной области спектра, так и в видимом диапазоне. В данных экспериментах коэффициент поглощения отличается от значений, полученных ранее, например, в работах [113-115]. Это связано с тем, что радиометрический приемник, который использовался в эксперименте, имел достаточно широкую полосу, в которой поглощающие характеристики льда отличаются на порядок величины, в зависимости от длины волны. Например, при

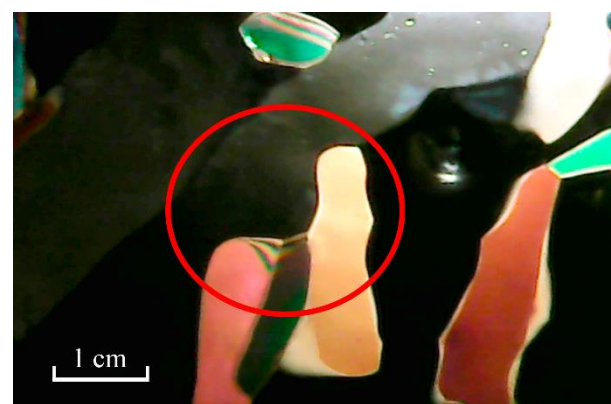
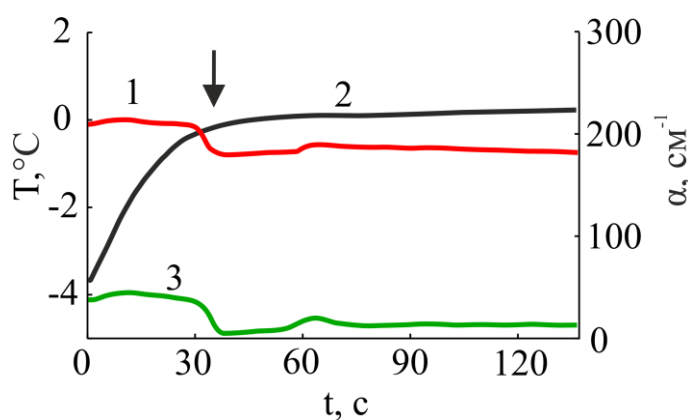
$\lambda=11$ мкм $\alpha=1090$ см⁻¹, а при $\lambda=13$ мкм $\alpha=104$ см⁻¹ [113]. На приведенном графике коэффициент поглощения имеет усреднённый характер.



а

б

Рисунок 3.6.2 – а) результаты измерения коэффициента поглощения в диапазоне 10–16 мкм (1) и температура (2) в образце льда толщиной 0,1 мм в зависимости от времени нагревания; стрелочкой отмечен эффект «просветления»; б) фотография образца льда в микроскопе при скрещенных поляризаторе и анализаторе. Окружностью отмечена область просвечивания



а

б

Рисунок 3.6.3 – а) результаты измерения коэффициента поглощения на длине волны 10–16 мкм (1) и в видимом (3) диапазоне в образце льда в зависимости от времени; 2– температура образца льда толщиной 0,1 мм б) фотография образца льда в поляризационном микроскопе при скрещенных поляризаторе и анализаторе. Окружностью отмечена область просвечивания

Проведенные эксперименты показывают, что при расположении базисных плоскостей кристаллов льда параллельно вектору напряженности электрического поля (рисунок 3.6.2 б и 3.6.3 б) наблюдается увеличение проходящей мощности

излучения. На данную особенность было обращено внимание и ранее, например, в работах [3, 4, 6, 92]. Стоит отметить, что в вышеуказанных работах не проводилось специальных петрографических исследований.

3.7 Существование эффекта «просветления» в дисперсных средах

Эффект «просветления» наблюдается и для дисперсных сред. Например, возможное правление было зафиксировано при исследовании диэлектрических характеристик кустарника и хвойных деревьев в период суточных колебаний температур. В эксперименте по изучению изменения радиотеплового излучения использовался радиометр на длину волны 5,6 см, который устанавливался под углом 45° от горизонтали и был направлен на хвойные деревья в направлении холодного неба – рисунок 3.7.1 б. Результаты измерения радиояркостной температуры представлены на рисунке 3.7.1 а.

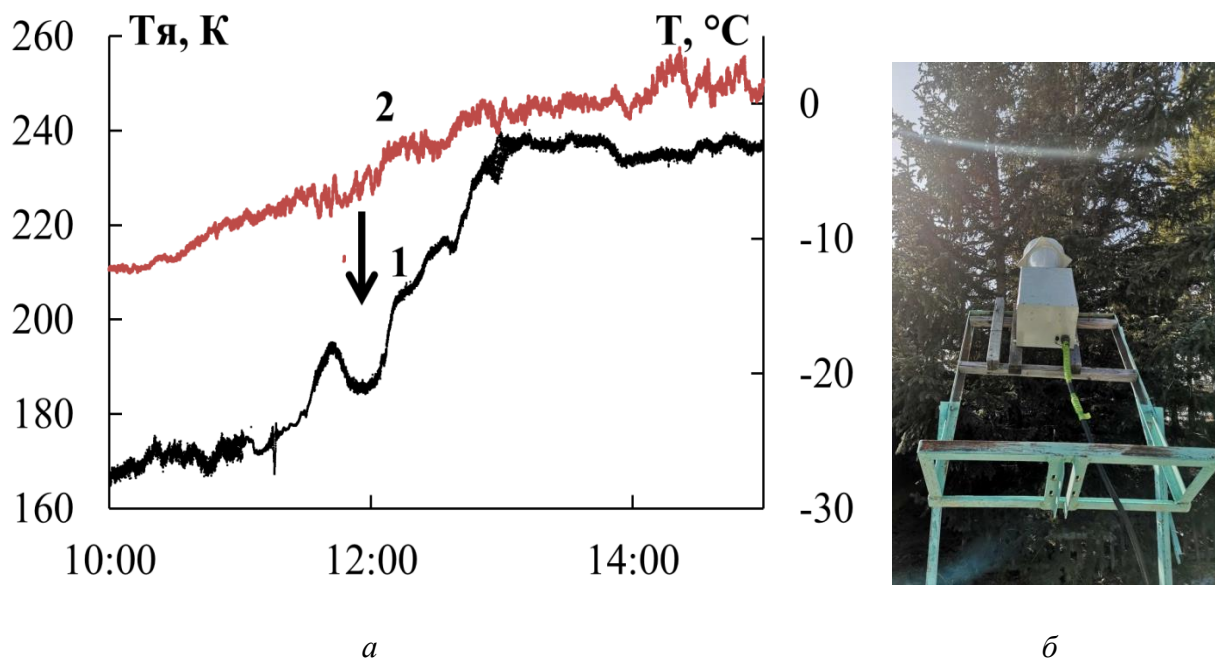


Рисунок 3.7.1 – а) результаты изменение радиояркостной температуры (1) хвойных деревьев в период суточных колебаний температуры (2). Стрелкой обозначен эффект уменьшения $T_{\text{я}}$; б) фотография радиометра и исследуемого объекта

На графике видно, что при повышении термодинамической температуры от -13°C происходит повышение радиояркостной температуры, что связывается с увеличением потерь в исследуемом образце. Однако около 12 часов произошло некоторое понижение T , которое связывается с эффектом «просветления» среды при возрастании температуры до -4°C . Стоит отметить, что температура, указанная на графике – это температура воздуха, которая измерялась на расстоянии около 5 м от исследуемых хвойных деревьев.

На рисунке 3.7.2 а представлены график мощности проходящего вертикально поляризованного излучения от генератора на длине волны 0,88 см через посадки кустарника (рисунок 3.7.2 б), а также температура поверхности веток. Расстояние от генератора приемника составила около 25 м.

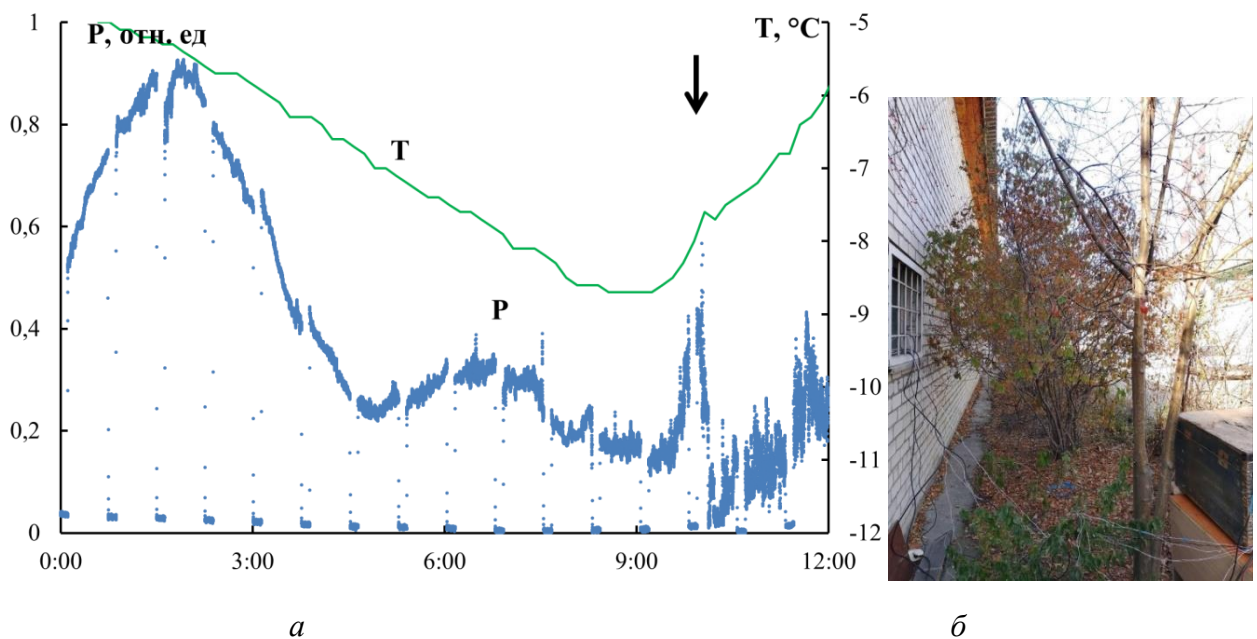


Рисунок 3.7.2 – а) Изменение мощности проходящего вертикально поляризованного излучения на длине волны 0,88 см через кустарники в относительных единицах, T – температура поверхности веток; б) фотография исследуемых кустарников; измерения выполнялись 21 октября 2025 г. Периодические сигналы в нижней части – калибровка установки. Стрелкой отмечено «просветление» при нагревании веток

На графике (рисунок 3.7.2 а) видно, что около 10 часов произошло существенное повышение мощности проходящего излучения через кустарники более, чем в 2 раза. В данное время после 9:00 под действием солнечного

излучения происходит нагрев кустарников, что видно на графике температуры поверхности веток. Указанное повышение мощности пропускаемого сигнала объясняется эффектом «просветления» жидкости, находящейся в замерзшем состоянии в ветках кустарников.

3.8 Исследование эффекта «просветления» в ледяном покрове пресного озера

По методике, приведённой в главе 2, выполнены эксперименты по регистрации прошедшего через лед излучения. На рисунке 3.8.1 представлены результаты измерений мощности проходящего излучения через ледяной покров пресного ледяного озера Арахлей, расположенного в Забайкальском крае. В момент измерений толщина ледяного покрова составляла ~130 см, толщина снежного покрова не превышала 10 см. Минерализация льда – около 1 мг/кг при минерализации исходной воды водоема 120 мг/л. Приемник и генератор устанавливали в углублениях ледяного покрова на расстоянии 40 м друг от друга.

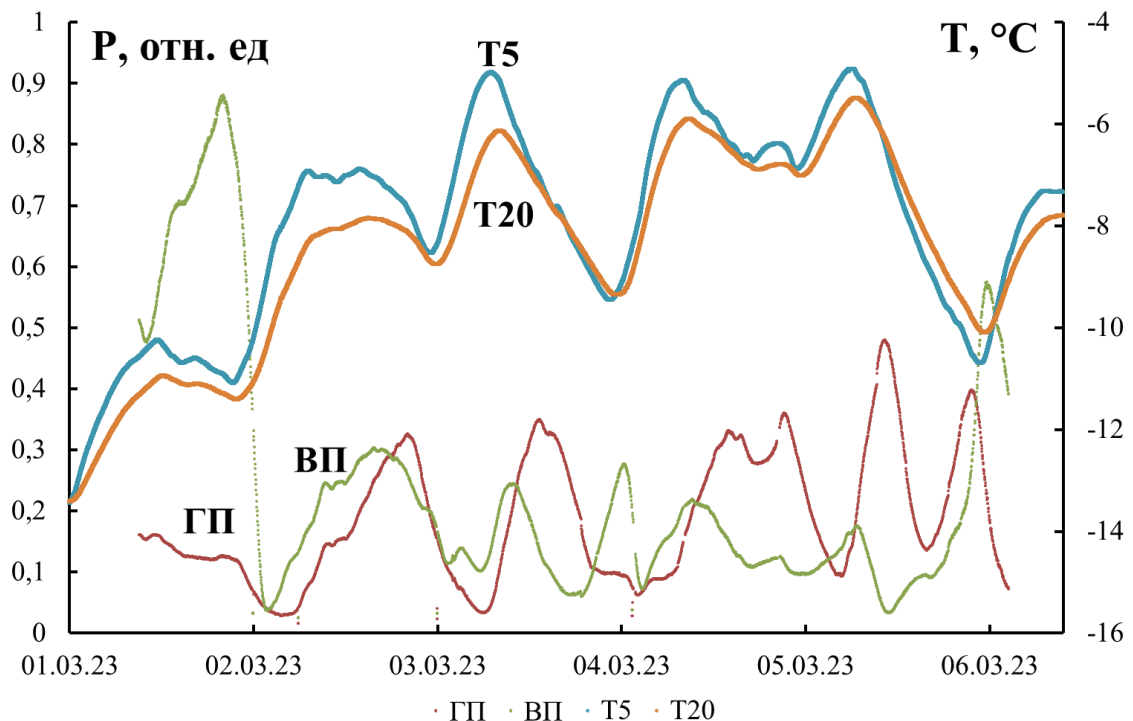


Рисунок 3.8.1 – Изменение мощности проходящего излучения на длине волны 2,3 см в ледяном покрове на двух поляризациях (ВП, ГП,), Т5 – температура льда на глубине 5 см, Т20 – температура льда на глубине 20 см

Особенность графиков связывается с тем, что в некоторые дни, в светлое время суток, наблюдается повышение мощности проходящего излучения, хотя при нагревании льда происходит увеличение ϵ'' , что в свою очередь увеличивает затухание в среде. Увеличение проходящего поляризованного излучения в дневное время, в частности на горизонтальной поляризации, можно объяснить появлением эффекта «просветления» во льду.

3.9 Зависимость эффекта «просветления» от минерализации льда

Для установления зависимости интенсивности протекания эффекта «просветления» от содержания включений в виде солей проводилось специальное исследование. По методике, схема которой представлена на рисунке 2.1.2, выполнялись измерения мощности проходящего излучения через образец льда с определенной минерализацией. Образы льда изготавливались следующим образом: в ультрачистой воде (полученной на установке Millipore Direct-Q 3 с проводимостью 0,05 мкСм/см при температуре 20 °С) растворяли определённое количество солей NaCl. Далее эта жидкость выливалась в кювету, которая помещалась в морозильную камеру, с постоянной температурой около –15 °С. Рост льда начинался с верхней границы раздела вода-воздух. При толщине льда более 3 мм через отверстие, сделанное во льду, вода из кюветы сливалась и таким образом получалась плоскопараллельная пластина льда. Далее эта пластина помещалась в экспериментальную установку. После регистрации эффекта «просветления», область льда, где производилось просвечивание, выпиливалась и расплавлялась для измерения содержания солей в данном образце. Исследования проводились на частоте 34 ГГц. Концентрация солей определялась кондуктометрическим методом. Толщина пластин льда составляла 3 мм.

На рисунке 3.9.1. представлены результаты измерения степени (γ) эффекта просветления в зависимости от содержания солей NaCl во льду на частоте 34 ГГц.

γ определяли как $\gamma = \frac{P-P_0}{P}$, где P – мощность проходящего излучения при «просветлении», P_0 – мощность проходящего излучения без «просветления». Время измерений составляло ~ 10 минут.

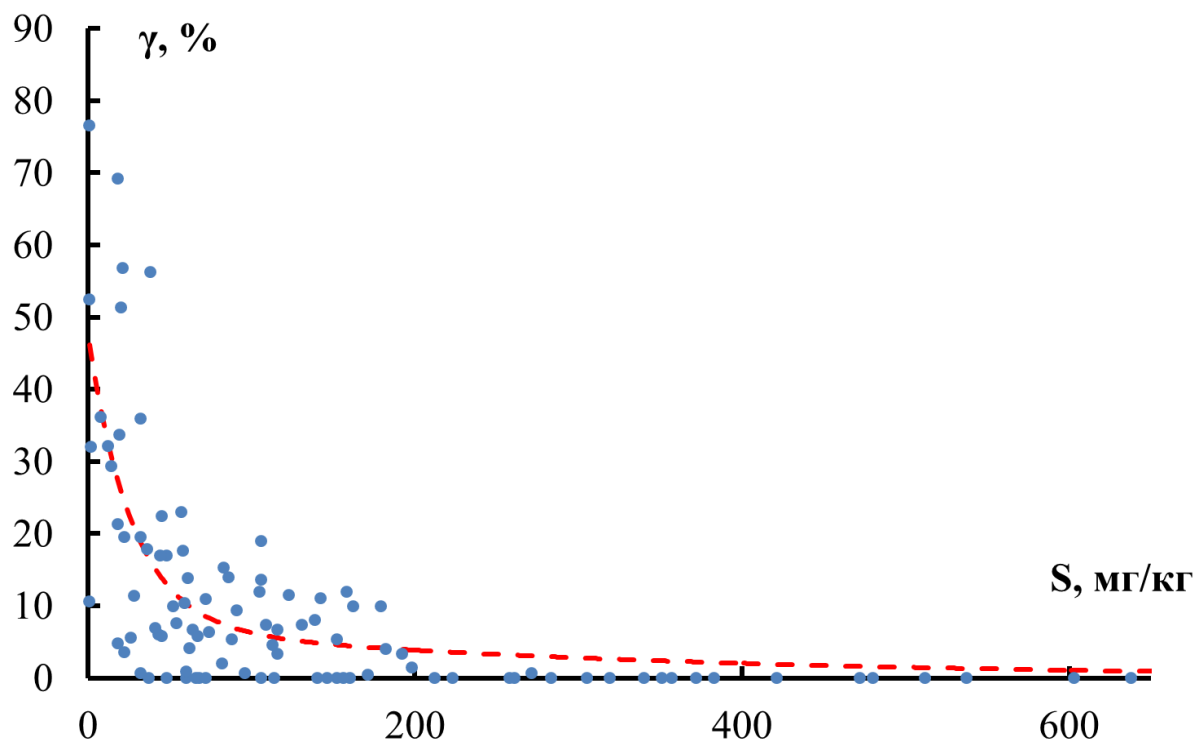


Рисунок 3.9.1 – Степень эффекта «просветления» в образцах льда в зависимости от содержания в них солей NaCl на частоте 34 ГГц. Точками обозначены экспериментальные данные, пунктирной линией – линия тренда

Из рисунка 3.9.1 видно, что при малых концентрациях NaCl $\sim 1 \dots 10$ мг/кг в образцах льда толщиной ~ 3 мм эффект «просветления» имеет достаточно высокое значение и значение γ может достигать более 70 %. При увеличении минерализации эффект ослабевает, это можно связать с тем, что при относительно высоком содержании солей в образцах льда происходят локальные сгущения солей по поверхности кристаллов в образце, которые содержатся в виде пленок жидкости. Сами кристаллы льда вырастают чистыми, но характеристики образцов существенно изменяются. Например, при подобном распределении солей пластическая деформация в образцах льда возникает при меньших внешних

усилиях, что, по-видимому, и влияет на эффект «просветления», так как кристаллы не подвергаются деформации.

Линия тренда аналитически представляется как: $\gamma = a_1 e^{-Sb_1} + a_2 e^{-Sb_2}$, где S – минерализация льда мг/кг, $a_1=40,11$; $b_1=-0,03681$; $a_2=7,187$; $b_2=-0,003153$. Коэффициент детерминации у данной функции равен 0,47.

На рисунке 3.9.2 показаны фотографии шлифов льда, сделанные в поляризационном микроскопе при скрещенных поляризаторе и анализаторе. Образцы были выращены при одинаковых условиях, но имели различную концентрацию растворенных солей в виде хлорида натрия. При увеличении концентрации солей, происходит увеличение дефектов в кристаллической структуре [17], что и видно на рисунке. Это проявляется по наличию большого количества отдельных кристаллов (рисунок 3.9.2. б), оптические оси которых имеют различное направление, что видно по интерференционной окраске в поляризационных снимках. Также стоит отметить, что при росте соленого льда между гранями кристаллов могут образовываться полости, в которых сосредотачивается рассол, что также относится к объемным дефектам [17, 128]. Это в свою очередь ослабляет механические напряжения в самих кристаллах, приводя к пластической деформации по граням.

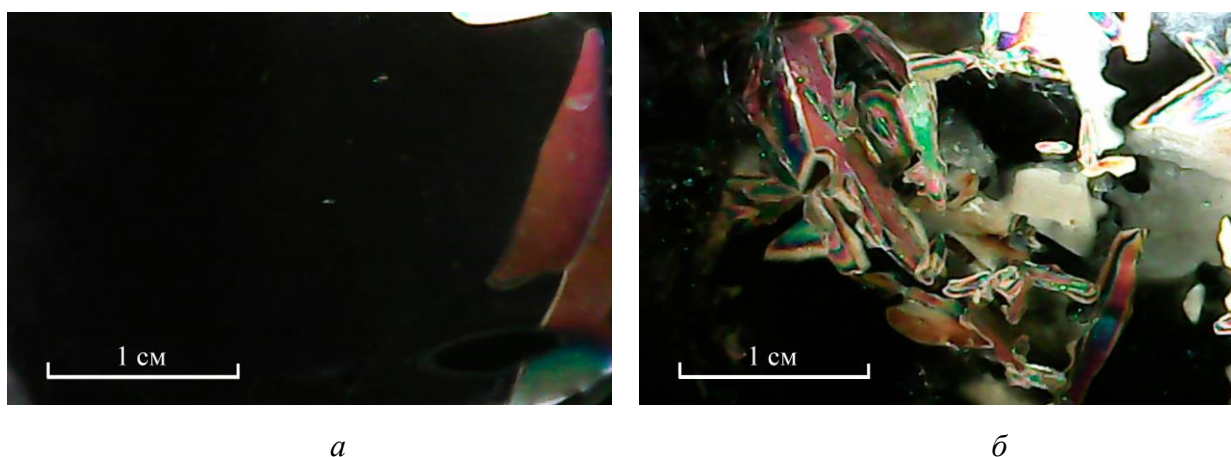


Рисунок 3.9.2 – Фотографии образца льда в поляризационном микроскопе при скрещенных поляризаторе и анализаторе а) с минерализацией ~1 мг/кг, б) с минерализацией ~300 мг/кг

Полученные данные позволяют оценить проявления исследуемого эффекта для малосоленых льдов. Это связывается с тем, что с течением времени под

действием перепадов температуры минеральные вещества в виде солей мигрируют в объеме льда, что приводит к опреснению некоторых объемов криогенных образований.

3.10 Зависимость эффекта «просветления» от деформации

Природные льды являются дисперсной средой, так как содержат разнообразные примеси (растворимые вещества) и включения (минеральные частицы, органические образования и др.). Как было показано выше, эффект «просветления» подавляется, если уменьшается прочность льда из-за появления в нем жидких солевых включений. Сами кристаллы льда не содержат включений, следовательно, степень эффекта определяется деформацией чистых кристаллов льда. При небольших деформациях льда Ih образцы подвергаются пластическому течению (без их разрушения), которое происходит на начальной стадии деформации по смещению вдоль базисных плоскостей кристаллов из-за ослабления связей между слоями среды [129].

Известно, что пластическая деформация усиливается при приближении температуры кристаллов к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при достижении предела текучести происходит разрушение кристаллов.

В настоящем исследовании выполнены измерения при малых деформациях образцов, возникающих при изменении их температуры и ее градиентов в различных условиях. Установлено, что эффект «просветления» возникает при температурах $\sim -1 \dots -0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, перед началом фазового перехода льда, когда среда начинает самопроизвольно пластически деформироваться, из-за наличия (или возникновения) внутренних механических напряжений.

Результаты, представленные на рисунке 3.9.1, позволяют качественно оценить связь деформаций и эффекта «просветления». Он определяется медленной деформацией кристаллов чистого льда в поликристаллическом образце. Включения в образцы уменьшают деформацию самих кристаллов из-за взаимного их скольжения по пленкам. Эффект сильно зависит от размеров

кристаллов и скорости внешних воздействий, например, ударных, как это было обнаружено в [140] при взрывах небольших пороховых зарядов в ледяных покровах – рисунок 3.10.1. На рисунке представлена мощность проходящего микроволнового излучения от времени после взрыва, в относительных единицах. Исследование осуществлялось по аналогичной методике, представленной на рисунке 2.2.2.

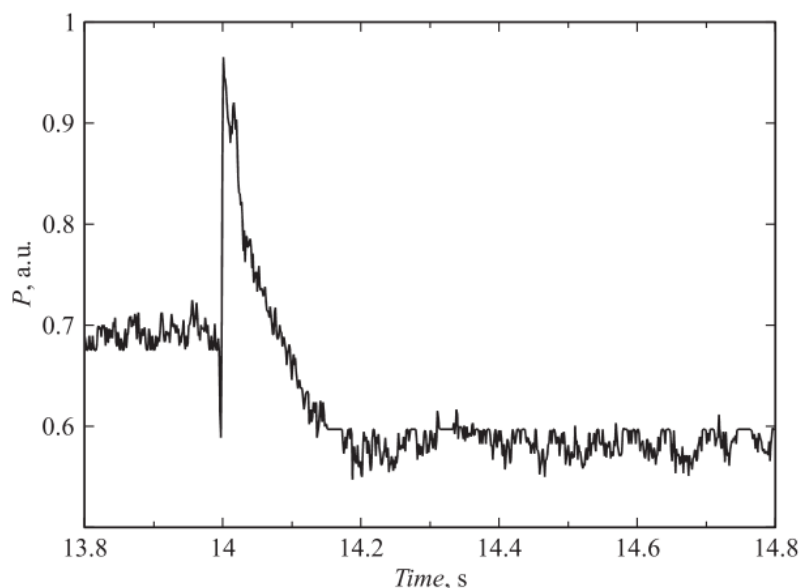


Рисунок 3.10.1 – «Просветление» ледяного покрова при взрыве небольшого порохового заряда при температуре льда $-2\dots-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ из-за существенно более высокого давления в среде, приведшего к пластическому ее течению и последующее разрушение за время порядка 0,01 с [140]

На рис. 3.10.2 представлена количественная зависимость интенсивности эффекта «просветления» (γ') в зависимости от механического напряжения (σ). γ' определялась как $\gamma' = \frac{L-L_0}{L} * 100\%$, где L – значение погонного затухания в среде, L_0 – значение погонного затухания в среде в момент «просветления», вызванное градиентом температур в образцах льда. Данная зависимость получена в настоящей работе. Видно, что при увеличении механического напряжения (вызванного как внутренними процессами, например, градиентом температур, так и внешним воздействием, например, сдавливанием) во льду, интенсивность

изменения диэлектрических характеристик будет увеличиваться. Линия аппроксимации определяется $\gamma' = 0,0149e^{23,479 \cdot \sigma}$.

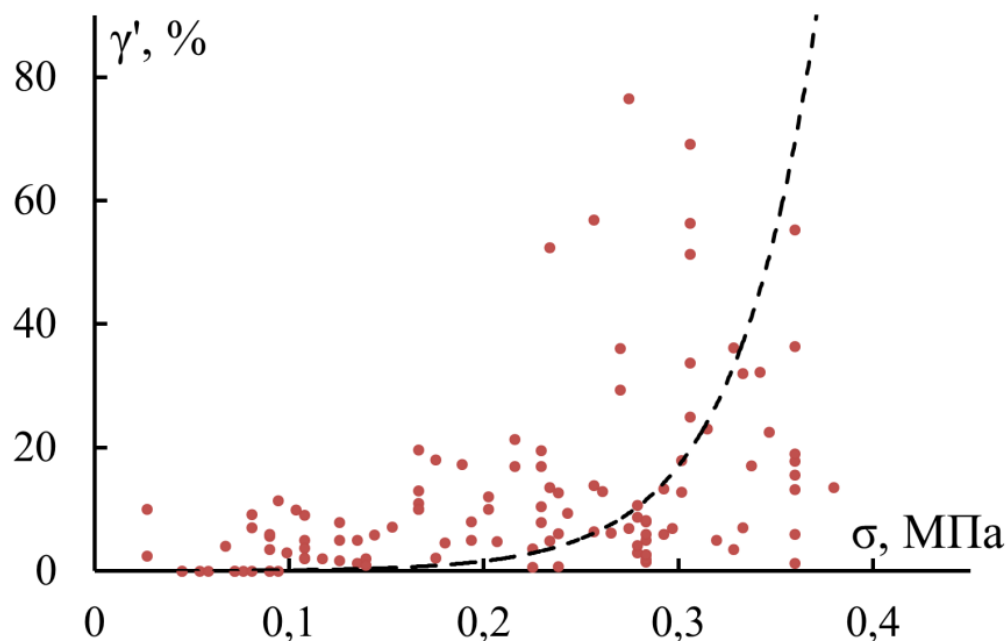


Рисунок 3.10.2 — Зависимость интенсивности эффекта «просветления» от механического напряжения вызванное градиентом температур в образцах льда при температуре вблизи фазового перехода. Точки – экспериментальные данные, штриховая линия – аппроксимация

Многообразие эффектов деформации льда и их влияние на эффект «просветления» требует специального исследования.

Выводы по главе: 1. Показан эффект уменьшения электромагнитных потерь («просветление») в кристаллах льда Ih вблизи температуры фазового перехода лед-вода при ползучести структуры из-за скольжения частей кристаллов по базисным плоскостям при их медленном нагревании.

2. Эффект наблюдается в широком интервале частот от микроволнового до ультрафиолетового диапазонов с экстремумом вблизи $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в чистом льду и в разнообразных мерзлых дисперсных средах.

3. Впервые экспериментально показано, что уменьшение погонного затухания электромагнитного излучения в поликристаллическом гексагональном льду, наблюдающееся в области температур $-0,5 \dots -0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ на частотах инфракрасного, видимого и ультрафиолетового диапазонов и в широком участке

микроволнового диапазона, экспоненциально зависит от механического напряжения.

ГЛАВА 4. РАСЧЕТ РАДИОЯРКОСНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КРИОГЕННЫХ ПЛОСКОСЛОИСТЫХ СРЕД ПРИ ЭФФЕКТЕ «ПРОСВЕТЛЕНИЯ»

В главе представлены результаты моделирования излучательных характеристик плоскостойстых сред при эффекте «просветления». На основе экспериментальных данных показано, что уменьшение в радиояростной температуре может достигать 30 К в микроволновом диапазоне. Основные результаты данной главы опубликованы в работе [116].

4.1 Модель для расчета радиояростной температуры

Множество окружающих сред в некотором приближении можно представить, как слоисто-неоднородные, неизотермические. Зная внутренние параметры сред, такие как температура и диэлектрическая проницаемость возможно восстановить их излучательные характеристики. Для описания подобных сред использован метод, представленный в работе [117]. Он заключается в суммировании интенсивностей излучения каждого слоя среды, с учетом потерь в каждом слое, а также эффектов интерференции под любым произвольным углом и поляризации. Данная методика оценки радиояростной температуры дает хорошую согласованность с экспериментальными данными [25, 35, 118, 119]. Преимущество данного метода состоит в том, что он также учитывает интерференционные эффекты, что, несомненно, имеет важное значение для описания достаточно полной картины излучательной способности природных сред. Согласно вышеуказанному методу $T_{\text{я}}$ определяется:

– для вертикальной поляризации:

$$T_{\text{я}}^v = \sum_{j=1}^N \frac{T_j |W_j|^2}{|1 - R_j^- R_j^+ e^{2i\psi_j}|^2} \times \left[(1 - e^{2\text{Im}\psi_j}) (1 + |R_j^- e^{i\psi_j}|^2) + 4 \frac{\text{Im}\psi_j}{\text{Re}\psi_j} \text{Re}(R_j^- e^{i\psi_j}) \text{Im}(e^{i\psi_j}) \left(\frac{|k_{zj}|^2 - k_x^2}{|k_j|^2} \right) \right] \frac{\text{Re}Z_j}{\text{Re}Z_0} + T_{N+1} |W_{N+1}|^2 \frac{\text{Re}Z_{N+1}}{\text{Re}Z_0} \quad (4.1),$$

–для горизонтальной поляризации:

$$T_{\text{я}}^h = \sum_{j=1}^N \frac{T_j |W_j|^2}{|1 - R_j^- R_j^+ e^{2i\psi_j}|^2} \times \left[(1 - e^{2\text{Im}\psi_j}) (1 + |R_j^- e^{i\psi_j}|^2) + \right. \\ \left. 4 \frac{\text{Im}\psi_j}{\text{Re}\psi_j} \text{Re}(R_j^- e^{i\psi_j}) \text{Im}(e^{i\psi_j}) \right] \frac{\text{Re}Z_j}{\text{Re}Z_0} + T_{N+1} |W_{N+1}|^2 \frac{\text{Re}Z_{N+1}}{\text{Re}Z_0} \quad (4.2),$$

где T_j – температура j -го слоя; R_j^+ , R_j^- – коэффициенты отражения амплитуд электрического поля от верхней и нижней границ слоя соответственно; W_j – коэффициенты пропускания по амплитуде электрического поля от внутренней стороны верхней границы слоя j на границу среды; Z_j – волновой импеданс слоя; $k_j = \frac{2\pi}{\lambda} \{\sin\theta_j, 0, \cos\theta_j\} \sqrt{\varepsilon_j}$ – волновой вектор; $\psi_j = k_j h_j$; h_j – толщина слоя; N – количество слоев. Индексом $j=1$ обозначена атмосфера, индексом $j = N + 1$ – подстилающая поверхность.

Данная модель не учитывает эффектов, связанных с рассеянием излучения. Для расчета подобных особенностей, в работах [118, 120, 121] была представлена усовершенствованная модель, которая учитывает физические и структурные особенности среды.

Таким образом, зная диэлектрические особенности, а также термодинамическую температуру каждого слоя можно теоретически определить мощность теплового излучения заданной структуры.

4.2 Результаты расчета радиояркостной температуры плоскостойких сред при эффекте «просветления»

Очевидным следствием эффекта «просветления» является существенное изменение не только передаточных характеристик сред, содержащих лед, но и вариации их собственного теплового излучения. Это в наибольшей степени должно проявляться в микроволновом диапазоне, где глубина проникновения (скин-слой) в пресный лед достигает десятков метров (в зависимости от длины волны излучения). Эффект изменения излучательных характеристик может быть

зарегистрирован с использованием микроволновой радиометрии при изменениях радиояркостной температуры. Поэтому выполнена теоретическая оценка влияния изменения ϵ'' при нагревании кристаллов льда до температуры фазового перехода в пресных ледяных и снежных покровах. Эти объекты выбраны, как наиболее простые для расчетов, но и являющиеся достаточно интересными для ряда практических применений [7].

Полученные в экспериментах значения ϵ' и ϵ'' (рисунок 3.1.1) использовались в расчетах радиояркостной температуры льда пресного ледяного покрова по формулам 4.1 и 4.2 при следующих условиях: толщина льда принималась 1,5 м, лед находился на воде с температурой 1 °С. Толщина слоя воды выбрана равной 1 м, такой слой непроницаем в микроволновом диапазоне на частотах выше единиц гигагерц. Средняя частота радиотеплового излучения 3,4 ГГц. Вычисления выполнены для угла зондирования от вертикали – 0°. Расчеты проведены при условии, что вся толщина льда будет иметь одинаковые значения ϵ' , ϵ'' и одно значение температуры. Рассчитанные значения $T_{\text{я}}$ при полосе пропускания радиометра 100 МГц и 300 МГц совпадают. Для воды расчетное значение радиояркостной температуры составило 97,9 К. Из графика на рисунке 4.2.1 видно, что при достижении льдом термодинамической температуры около –0,45 °С наблюдается наименьшее значение $T_{\text{я}}$. Это уменьшение составляет ~30 К по сравнению с температурами ниже –0,5 °С и выше –0,3 °С.

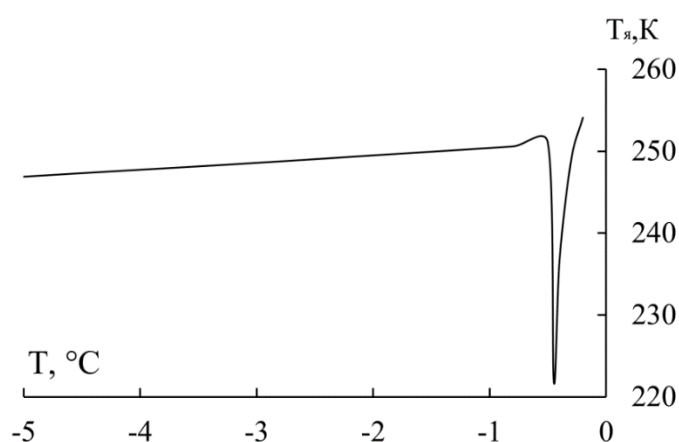


Рисунок 4.2.1 – Расчетные значения радиояркостной температуры на частоте 3,4 ГГц льда толщиной 1,5 м на воде от термодинамической температуры при полосе пропускания радиометра 100 МГц по данным измерений ϵ' и ϵ'' (рисунок 3.1.1)

По данным эксперимента – рисунок 3.1.2, выполнены расчеты $T_{\text{я}}$ снежного покрова, в условиях, что снег с различной толщиной лежит на льду ($h_{\text{льда}} = 1 \text{ м}$, $T = -1 \text{ }^{\circ}\text{C}$), под которым располагается слой воды толщиной 1 м с $T = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Угол наблюдения выбран равным 45° . Средняя частота 5,5 ГГц. Полоса частот пропускания радиометра 300 МГц. Радиояркостная температура рассчитывалась для двух линейных ортогональных поляризаций. Просветление во льду не учитывалось с целью определения эффекта только в снежном покрове. На рисунке 4.2.2 представлены результаты расчетов радиояркостной температуры при изменении термодинамической температуры и диэлектрической проницаемости снега для различных значений толщин снежного покрова, лежащего на ледяном покрове с неизменной температурой.

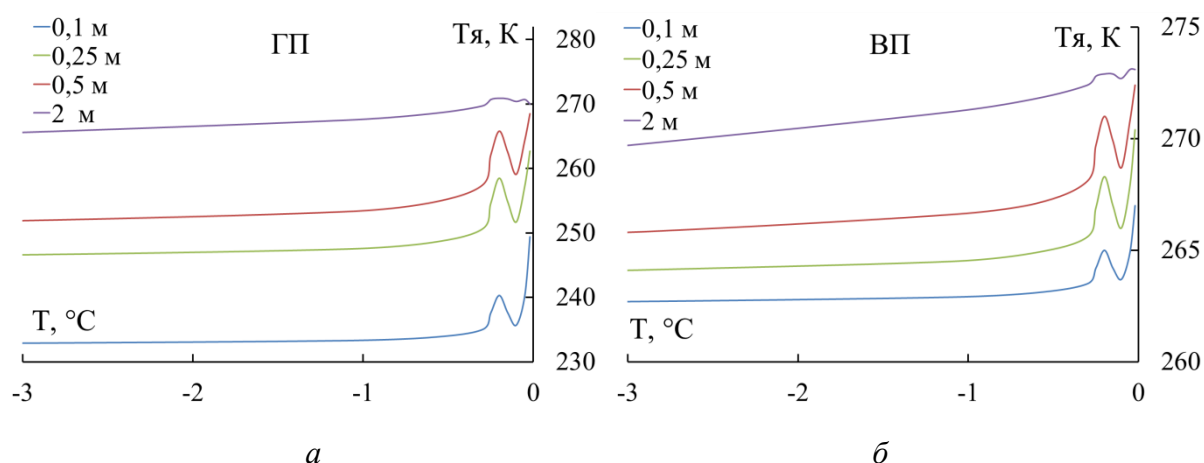


Рисунок 4.2.2 – Расчетная радиояркостная температура слоистой структуры с «просветлением» снега при его различной толщине на а) горизонтальной (ГП) и б) вертикальной (ВП) поляризациях на частоте 5,5 ГГц

Из полученных результатов видно, что значение $T_{\text{я}}$ на ортогональных поляризациях имеет отклик в виде «просветления» вблизи $-0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$. В зависимости от толщины снега наблюдается изменение эффекта заснеженного ледяного покрова. Максимальное изменение значений $T_{\text{я}}$ наблюдается при толщинах снежного покрова в интервале 0,25 м и 0,5 м и равняется $\sim 6 \text{ К}$. При толщине 2 м «просветление» практически исчезает. При нагревании первоначально наблюдали возрастание радиояркости, которое можно связать с влиянием квазижидкого слоя, возникающего на поверхности снежинок свежеснегавшего снега. Эффект

«просветления» для «старого» снега меньше, по сравнению со свежавыпавшим и соответствует понижению ϵ'' в 1,2 раза. Данный факт может быть связан с изменением площади поверхности снежинок при их старении. В работе [122] были представлены данные об изменении площади поверхности снежинок в зависимости от времени. Показано, что по мере старения снега его площадь поверхности в среднем уменьшается на 13% в сутки, при средней температуре $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Стоит отметить, что площадь поверхности снежинок сильно зависит от характеристик снега и температуры воздуха.

4.3 Обсуждение результатов моделирования

Результаты настоящего исследования позволили сделать вывод о влиянии расположения главной оптической оси кристалла льда относительно вектора напряженности электрического поля на значение уменьшения потерь в оптическом диапазоне. При условии, если вектор электрического поля волны находился в базисной плоскости кристаллов льда, увеличение мощности проходящего сигнала достигало 25% на длине волны 535 нм для образца толщиной ~ 10 см. В миллиметровом диапазоне на частотах 90 и 34 ГГц, приращение мощности проходящего сигнала составляло около 20% для образцов толщиной 15 см [4]. В настоящей работе, на частоте 3,4 ГГц было проведено несколько экспериментов, при различной ориентации вектора электрического поля относительно базисных плоскостей кристаллов льда. Максимальное увеличение мощности проходящего сигнала при перпендикулярном направлении вектора электрического поля к базисным плоскостям кристаллов льда достигало $\Delta P_{\perp} = 7$ дБ для льда при толщине образца 2,6 см, что соответствует уменьшению мнимой части относительной комплексной диэлектрической проницаемости в 2 раза. В случае, когда вектор электрического поля был направлен параллельно базисным плоскостям кристаллов льда, приращение мощности проходящего излучения достигало $P_{\parallel} = 12$ дБ, что соответствует понижению ϵ'' в 5 раз. В выполненных измерениях просветление изменялось в широких пределах.

Уменьшение ϵ'' для различных образцов льда составляло от 5 до 1,8 раз, что можно связать с различием их структуры: как с особенностями расположения главных оптических осей и геометрией кристаллов, так и влиянием примесей, которые располагаются по поверхностям кристаллов. Это также может быть связано с условиями измерений, например, вариациями скорости нагревания. Уменьшение ϵ'' для снега варьируется в пределах от 1,8 до 1,2 раз. Ввиду данных особенностей, в настоящей работе расчет радиояркостной температуры для ледяного покрова проводился для угла наблюдения 0 градусов к поверхности. Этому соответствуют значения диэлектрической проницаемости для случая, когда вектор напряженности электрического поля расположен параллельно базисным плоскостям. Отмеченная особенность имеет место, когда в ледяном покрове присутствует выделенное направление главной оптической оси кристаллов льда в вертикальном направлении. Такой лед характерен для небольших пресных водоемов и по классификации Черепанова относится ко льду типа A1 [40].

Выводы по главе. При обнаруженном в лабораторных измерениях уменьшении ϵ'' на частоте 3,4 ГГц в ~ 5 раз, понижение радиояркостной температуры пресного ледяного покрова толщиной 1,5 м должно достигать ~ 30 К. Это возможно в идеальной многослойной структуре, а также при изотермических условиях. В реальных условиях, подобные процессы в определенной степени нивелируются, хотя тающий лед и снег достаточно распространены на планете в то или иное время года. Трудности выделения эффекта «просветления» связаны, в первую очередь, с низким пространственным разрешением микроволновых радиометрических спутниковых систем. В этих измерениях происходит усреднение значений радиояркостной температуры подстилающей поверхности на больших площадях. С другой стороны, мало объектов, которые находятся в изотермических условиях и не все состоят из идеального льда типа A1. Ледяные покровы также покрыты неоднородным снежным покровом. В результате можно ожидать существенно уменьшение эффекта, вызванного «просветлением» льда. Однако при улучшении пространственного разрешения эффект «просветления» может существенно влиять на радиояркостную температуру объекта.

ГЛАВА 5. ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ЭФФЕКТА. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В главе представлено теоретическое обобщение результатов исследования. Описан механизм протекания эффекта «просветления». Предложена качественная модель структуры льда при возникновении понижения диэлектрических потерь во льду. Расчетами показано отсутствие связи эффекта «просветления» с интерференцией, возникающей в плоскостной среде. Обобщены результаты исследования в виде частотной зависимости интенсивности эффекта. Представлен анализ возможного проявления эффекта «просветления» при дистанционном зондировании криосферных объектов.

5.1 Возможный механизм эффекта «просветления»

Как было отмечено в ряде работ [3,4,92,123], эффект понижения диэлектрических потерь имеет зависимость от расположения оптической оси кристалла льда или его базисных плоскостей. Для теоретического рассмотрения явления «просветления» необходимо представить информацию о кристаллическом строении льда.

Каждый атом кислорода находится в центре тетраэдра, образуемого четырьмя атомами кислорода, находящимися на расстоянии 2,76 Å [124, 125]. В гексагональном льду водородные связи случайны и быстро меняются. Это связано с тем, что протоны ведут себя как квантовая жидкость в постоянном туннельном потоке [126]. На рисунке 5.1.1 приведена схема кристаллической решетки Ih льда. Гексагональный кристалл имеет размеры элементарных ячеек 4,5181 Å.

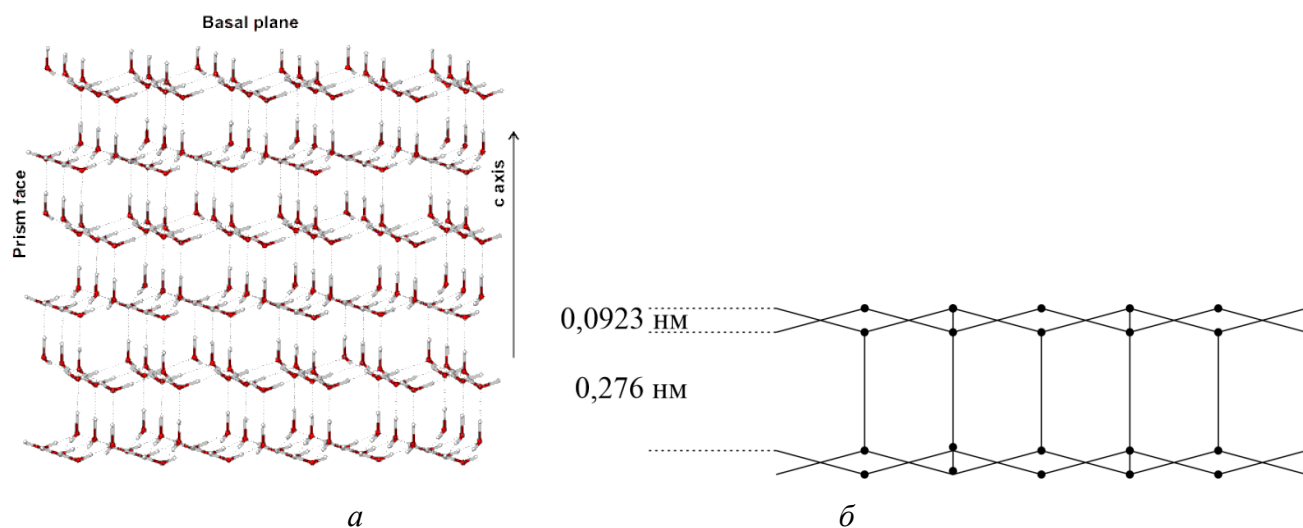


Рисунок 5.1.1 – Схема кристаллической решетки Ih льда а) проекция кристаллической решетки на базисную плоскость [15]; б) проекция кристаллической решетки на плоскость, проведенную через оптическую ось [149]

Как видно из рисунка 5.1.1, решетка льда состоит из слоев, которые перпендикулярны оси «с». Важной особенностью такой структуры льда является наличие «каналов», направленных как параллельно, так и перпендикулярно к оси «с» [124]. Достаточно сложным остается вопрос о деформации льда. Это связано с тем, что трудно учесть влияние различного рода включений во льду на его механические свойства. Известно, что деформация во льду по базисным плоскостям имеет облегченный характер. Это связано с тем, что требуется нарушение двух атомных связей на одну единичную ячейку [127]. При действии нагрузки по направлению, не совпадающему с базисной плоскостью, лед обычно ломается раньше, чем начинается сдвиг [128]. На рисунке 5.1.2 представлены возможные направления сдвигающих усилий относительно базисной плоскости кристаллов [130].

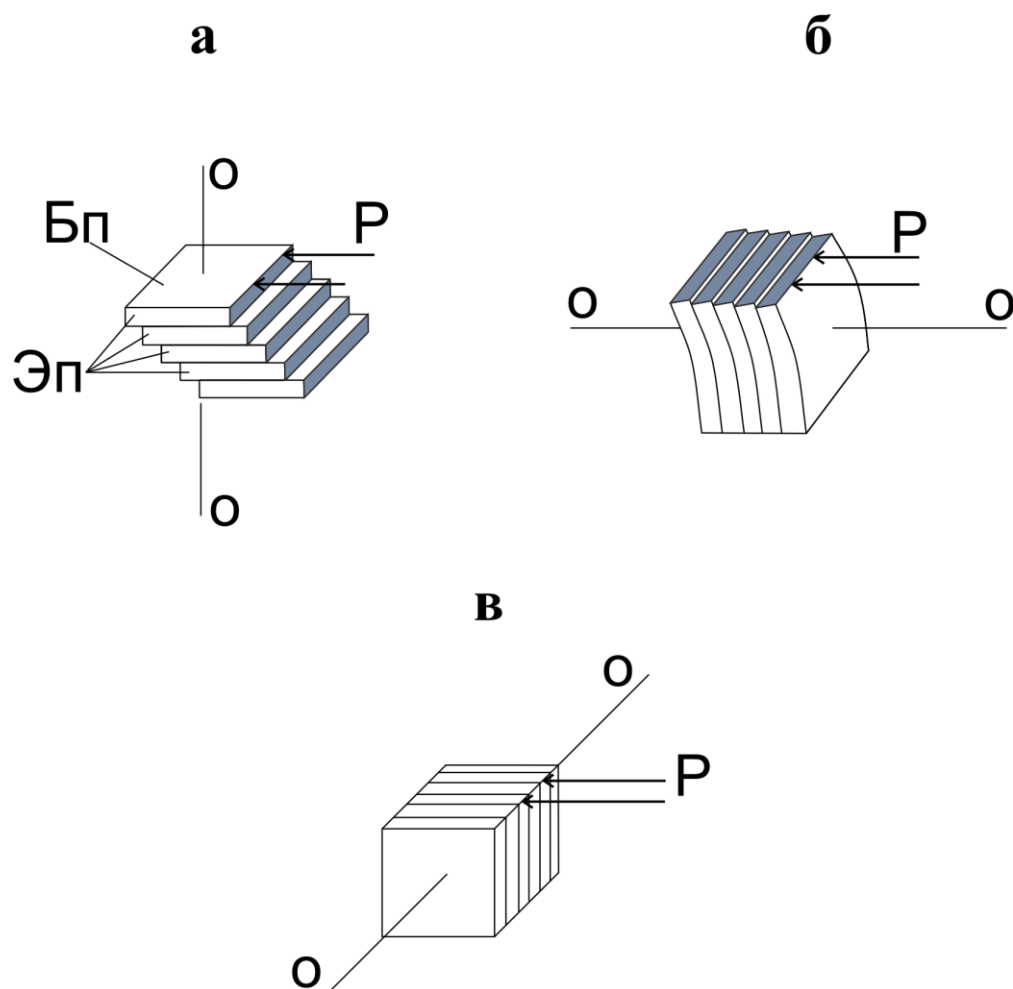


Рисунок 5.1.2 – Основные направления сдвигающих усилий относительно главной кристаллографической оси кристалла (ОО-оптическая ось кристалла, Бп – базисная плоскость, Эп – элементарные пластинки, Р – направление сдвигающего усилия); а – направление усилия Р совпадает с Бп; б – направление усилия Р перпендикулярно Бп; в – направление усилия Р в плоскости, перпендикулярной Бп [130]

Ранее отмечалось, что при температурных исследованиях диэлектрических характеристик льда в резонаторе максимальное увеличение мощности проходящего сигнала при перпендикулярном направлении вектора электрического поля к базисным плоскостям кристаллов льда достигало $\Delta P_{\perp} = 7$ дБ для льда при толщине образца 2,6 см, что соответствует уменьшению мнимой части относительной комплексной диэлектрической проницаемости в 2 раза. В случае, когда вектор электрического поля был направлен параллельно базисным плоскостям кристаллов льда, приращение мощности проходящего излучения

достигало $\Delta R_{\parallel} = 12$ дБ, что соответствует понижению ϵ'' в 5 раз. Это указывает на то, что природа эффекта связана с базисными плоскостями.

В работе [6] был предложен механизм протекания эффекта, который связывается с возникновением плазмон-поляритонов. При разрыве водородных связей в слоях, по которым происходит скольжение, образуются квазижидкие пленки воды. В работе [130] было показано, что на плоской границе контакта жидкой воды с диэлектриком происходит сегнетоэлектрическое упорядочение диполей воды в случае гидрофобной (или частично гидрофобной) поверхности. При этом, как было установлено теоретически и экспериментально в [106], в контактном слое между сегнетоэлектриком и диэлектриком возникает слой с высокой электропроводностью. Она может быть на шесть порядков выше, чем проводимость объемного материала. Этот эффект определяется разностью значений статической диэлектрической проницаемости двух материалов. Кроме того, известно, что пластическая деформация не происходит в виде плавного течения, а проявляется в виде автоволн локализованной пластичности [132, 133]. Длины этих волн в среде находятся в интервале 0,5–2 см. С указанными волнами связано также проявление разделения зарядов вследствие акустоэлектрического эффекта [134]. В результате, течение по пленкам представляет собой замерзание-таяние сверхтонких слоев льда с возникновением проводящих областей и электрических потенциалов. В процессе изменения состояния льда в локальных областях кристаллов с возникновением и исчезновением волн течения в объеме ледяного тела возникают островковые проводящие двумерные образования и появляются плазмон-поляритоны. Их резонансные частоты определяются размерами, проводимостью слоев и характеристиками контактных сред. При этом из-за неправильной формы плоских проводящих слоев резонансные свойства островков или полос, из них состоящих, имеют существенно более широкий спектр резонанса поверхностных плазмонов, который доходят до частот микроволнового диапазона [135, 136]. Тушение плазмонного усиления поля, которое наблюдали в экспериментах, может определяться существованием в среде определенного состояния окружения проводящих включений из примесей в

виде жидких и твердых солевых включений, некоторое количество которых всегда имеется в пресной воде. Указанный механизм подтверждается широким интервалом частот, где имеет место эффект: от ультрафиолетового до микроволнового диапазонов. Также стоит отметить работу [147], где было теоретически объяснен процесс сонолюминесценции в воде. Согласно этой модели, свет генерируется в результате преобразования двумерного плазмона, возникающего на поверхности схлопывающегося кавитационного пузырька, в результате конденсации диполей в насыщенном водяном паре.

Предполагаемая модель структуры льда при возникновении «просветления» среды. Возрастание электромагнитного поля вблизи периодических проводящих структур обнаруживается во многих экспериментах и исследуется, например, в наноплазмонике [105, 143]. Это явление возникает как на границе раздела «металл–диэлектрик», так и в малых отдельных проводящих частицах и их кластерах. Основой структур являются среды и частицы из них с отрицательной диэлектрической проницаемостью (в частности, сильно проводящие среды).

Проводящие среды в случае воды возникают на контакте нанометрового слоя жидкости и диэлектрика (в том числе льда). Это явление недавно экспериментально обнаружено в работе нобелевского лауреата Гейма и др. [144], где исследовали состояние воды между двумя пластинами диэлектрика. Вблизи толщины $\sim 1...2$ нм вода перешла в состояние сегнетоэлектрика с $\epsilon' \sim 10^3$ и проводимостью на 5 порядков выше исходной – рисунок 5.1.3. Причем ϵ' возростала только для направления электрического поля вдоль плоских границ пластин.

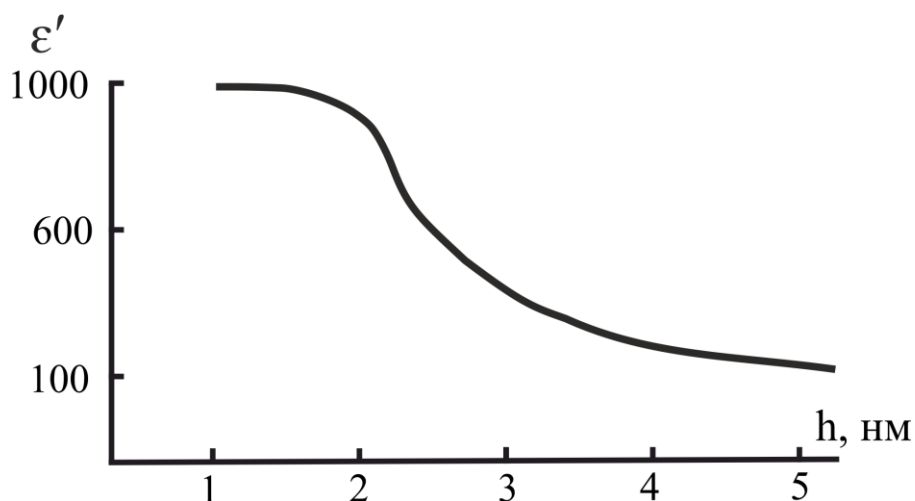


Рисунок 5.1.3 – ϵ' вдоль плоскости контактов пластин и воды в зависимости от толщины ее слоя [144]

Теоретически этот переход был предсказан в статье [131] на основе расчетов упорядочения диполей воды вблизи гидрофобной поверхности диэлектрика. При этом высоко проводящий слой возникает вследствие взаимодействия сегнетоэлектрической и параэлектрической сред из-за разности ϵ_s – статической диэлектрической проницаемости [106]. На рисунке 5.1.4 представлена гипотетическая модель структуры льда при его пластической деформации и образовании слоев с высокой ϵ' . Такая структура предсказывалась ранее, например, в [131] толщина квазижидкого слоя представлялась ~ 1 нм, при которой появляется сегнетоэлектрическое состояние [144], а расстояние между этими слоями предполагалось менее 3000 нм [17]. По данным из работы [40], в настоящее время, среднее значение этого расстояния составляет 60 нм. Стоит отметить, что значение расстояния между слоями может зависеть от величины сдвиговых напряжений, как отмечено в [17].

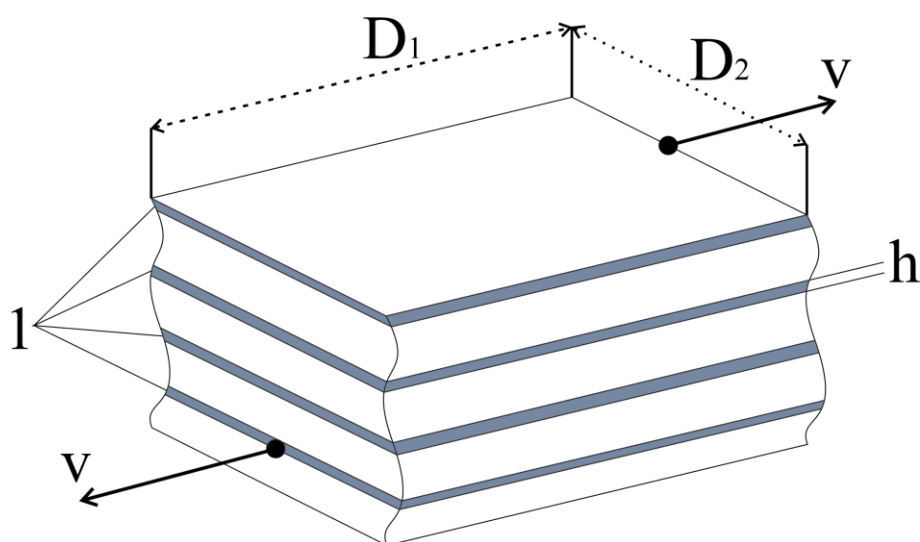


Рисунок 5.1.4 – Модель образования проводящих слоев по базисным плоскостям в кристалле льда под воздействием механических напряжений (существующих в среде и возникающих при градиенте температур). D_1 , D_2 – области кристалла подвергающиеся пластической деформацией, h – толщина квазижидкого слоя на базисной плоскости ~ 1 нм, v – направление сдвига

На рисунке 5.1.5 представлена гипотетическая модель плоской проводящей структуры жидкого слоя при пластической деформации кристалла льда в виде волн течения, обнаруженных в [133].

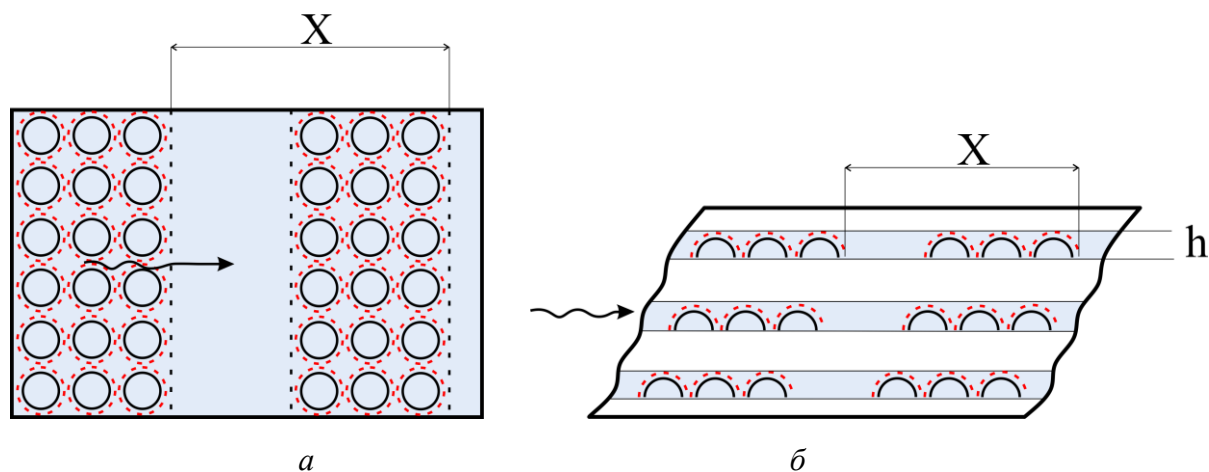


Рисунок 5.1.5 – Двумерная проводящая структура в виде замерзающих–тающих островковых проводящих пленок жидкой воды нанометровой толщины и возникающих волн пластического течения кристалла льда с длиной X . Возбуждение волн течения происходит при разгрузке внутренних механических напряжений в образцах льда или при возникающих внешних механических воздействиях. Стрелки – направление волн течения. а) вид на плоскость течения, б) вид сбоку

Возникновение поверхностных плазмонных мод позволяет воздействовать на электромагнитное поле (усиливать или ослаблять) – рисунок 3.1.1, где ϵ'' сильно изменяется со временем при изменении температуры. Это также связано с тем, что между островками возникает перколяция [145], т.е. электрическая проводимость в базисной плоскости.

Представленная модель качественно может объяснить эффект «просветления» льда. Кроме уменьшения потерь вблизи $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ она объясняет тот же эффект при импульсном механическом воздействии на лед при подрывах небольших пороховых зарядов, обнаруженных ранее в [140], при более низких температурах льда ($\sim -3\text{ }^{\circ}\text{C}$) – рисунок 3.10.1, а также раннее наблюдение изменения погонного затухания в кернах льда на длине волны $0,8\text{ см}$ с 13 дБ/м до 0 дБ/м в работе [5]. Количественное вычисление эффекта представляет сложную задачу.

Для исследования наличия проводящих слоев, расположенных по базисным плоскостям, и доказательства предложенной модели в настоящей работе проведен эксперимент, в котором к образцу льда в виде кубика с линейными размерами порядка 1 см прижимались угольные электроды для измерения сопротивления на постоянном токе (площадь одного контакта $\sim 0,4\text{ см}^2$). Исследовался образец природного льда, изъятый из оз. Арахлей с глубины $\sim 25\text{ см}$ от поверхности ледяного покрова. Его минерализация составляла около 1 мг/кг . Электроды на образце размещались таким образом, чтобы была возможность измерить сопротивление по направлениям, совпадающим с базисными плоскостями (R1) и по направлению главной оптической оси кристаллов (оси «с») (R2) – рисунок 5.1.6.

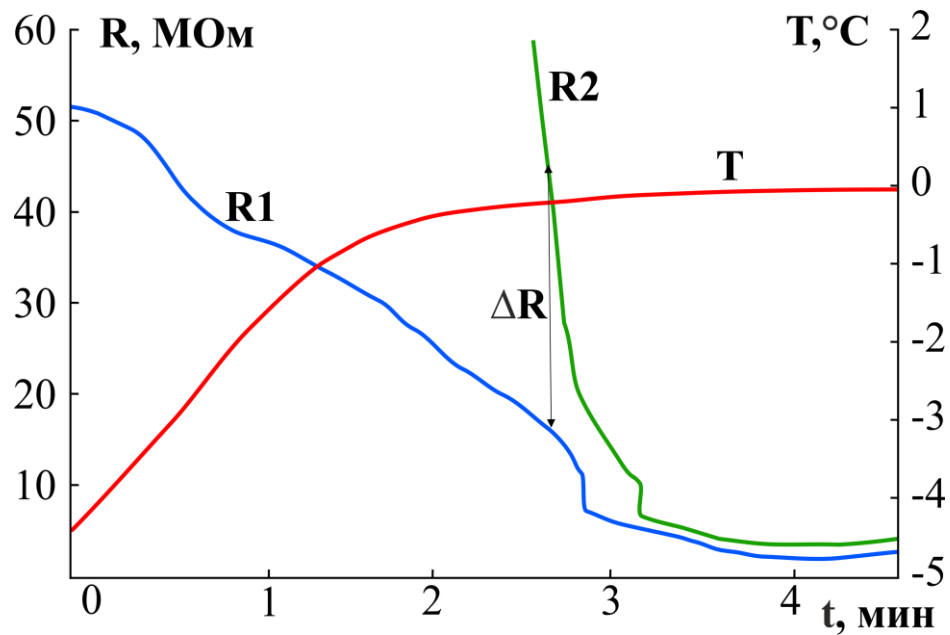


Рисунок 5.1.6 – Изменение сопротивления по базисным плоскостям ($R1$) и по направлению главной оптической оси кристаллов ($R2$) от времени нагревания, T – температура образца льда (кубический образец с размерами сторон 1,6 см)

Полученные в серии измерений результаты показывают наличие сильной анизотропии электрического сопротивления. Из рисунка видно, что разница (ΔR) в электрического сопротивления по базисным плоскостям и по направлению оси «с» при температуре около 0 °C отличается почти на 30 МОм (приблизительно в 3 раза). Это свидетельствует том, что по базисным плоскостям возникают структуры, создающие повышенную проводимость в объеме образца. Подобный результат был обнаружен в работе [146], где исследовалось электропроводность металлических пленок в контакте со льдом.

Для сравнения были выполнены исследования электрического сопротивления различных образцов льда: природного льда, изъятых из ледяного покрова оз. Арахлей с глубины ~25 см, (представлены на рисунке 5.1.7); изъятых из оз. Арахлей с глубины 0,5 см; образцов искусственного льда, который образовался в морозильной камере (при температуре -20 °C) из ультрачистой воды, полученной на установке Millipore Direct-Q 3 с проводимостью 0,05 мкСм/см (при температуре 20 °C). Электрическое сопротивление при сравнении образцов искусственного и природного льда отличается в

значительной степени. В искусственном льду при температуре близкой к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ΔR составило значение около 1 МОм (отличие, приблизительно в 6 %). Это связано с тем, что в образцах, выращенных в лабораторных условиях, отсутствует выделенное направление базисных плоскостей, т.е. главной оптической оси кристаллов льда. Ниже на рисунке 5.1.7 представлены фотографии, сделанные в поляризационный микроскоп, вышеуказанных образцов льда.

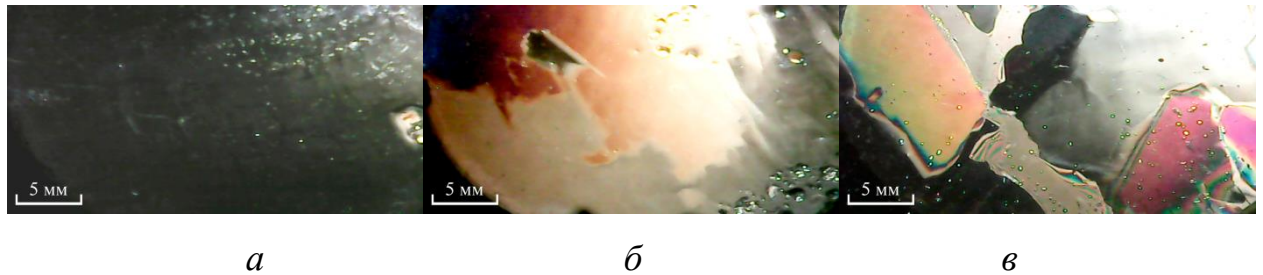


Рисунок 5.1.7 – Фотографии в поляризационном микроскопе при скрещенных поляризаторе и анализаторе образцов льда: а) природный лед с глубины 25 см; б) природный лед с глубины 0,5 см; в) искусственный лед

Из рисунка видно, что для природного льда с глубины 25 см имеется строго выделенное направление оси «с», а соответственно и базисных плоскостей. Для образца с глубины 0,5 см имеются отдельные кристаллы, оптическая ось которых имеет отклонение от оптической оси микроскопа. В искусственном же льду имеется большое количество отдельных кристаллов, где оси «с» имеют, судя по интерференционной окраске, большое отклонение $>20^{\circ}$ от оптической оси микроскопа [112].

Таким образом, экспериментально подтверждено образование проводящих поверхностей в кристаллах льда, на которых возможно возникновение плазмонных явлений. Скольжение по базисным плоскостям при нагревании возникает вследствие разгрузки внутренних механических напряжений вблизи $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оно может возникать и при более низких температурах, где прочность кристалла выше, при внешних импульсных механических напряжениях перед разрушением льда.

5.2 Теоретические оценки интенсивности проходящего излучения через слой льда

Возникает вопрос, не является ли «просветление» результатом явлений интерференции в плоскостойких структурах. Для этих целей выполнены расчеты для плоской пластины льда толщиной 0,1 мм, на которую нормально падает волна с $\lambda=15$ мкм. Для указанной длины волны $\epsilon'=1,24$, а $\epsilon''=0,0762$ [21]. Рассеяние в среде не учитывалось. Для решения задачи о прохождении излучения в трехслойной плоскостойкой структуре использована модель, представленная на рисунке 5.2.1.

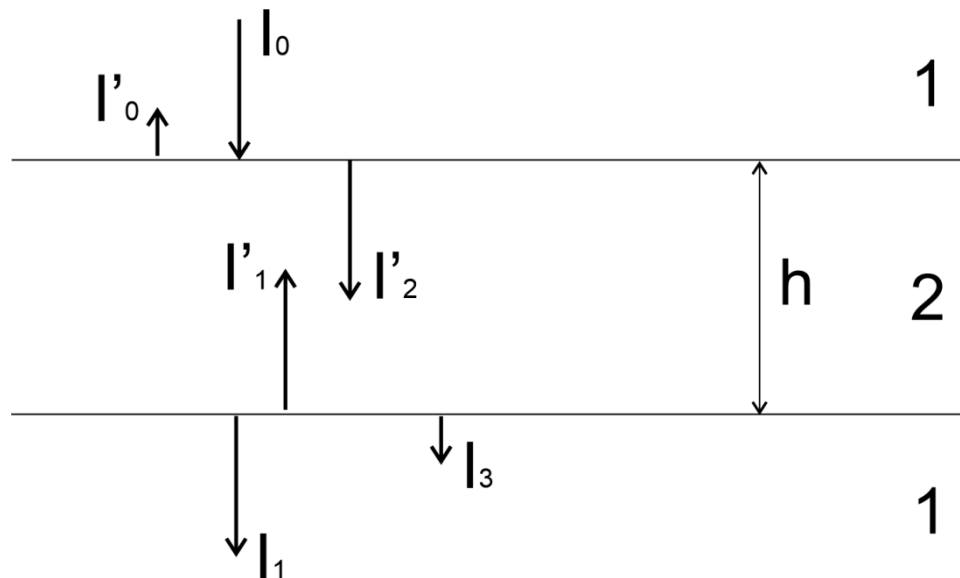


Рисунок 5.2.1. Схема распределения интенсивностей излучений в структуре воздух (1)-лед (2)-воздух (1). h – толщина слоя, I – интенсивность излучения, I' – интенсивность отраженного излучения

Введем обозначения:

α – коэффициент поглощения в среде;

R – коэффициент отражения;

h – толщина слоя;

n – показатель преломления.

Отношение I_3/I_1 показывает степень влияния интерференции в представленной трёхслойной структуре. Интенсивность отраженного излучения

будет определяться $I'_0 = I_0 \times R_{12}$, где $R_{12} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2$. По закону Бугера — Ламберта — Бера I_1 найдем из:

$$I_1 = (I_0 - I'_0) \times e^{-\alpha h} - I'_1 \quad (5.1),$$

$$I'_1 = (I_0 - I'_0) \times e^{-\alpha h} \times R_{21} \quad (5.2),$$

$$I'_2 = I'_1 \times e^{-\alpha h} \times R_{21} \quad (5.3),$$

$$I_3 = I'_2 \times e^{-\alpha h} - I'_2 \times e^{-\alpha h} \times R_{21}. \quad (5.4).$$

На указанной длине волны $\alpha = 64000 \text{ м}^{-1}$ [114]. В результате выполненных расчетов отношение интерферирующих излучений I_3/I_1 составляет 10^{-9} . Следовательно, эффект «просветления» на данной длине волны не связан с интерференционными явлениями отраженного от двух границ излучения. Кроме того, полученный результат определяется высокими значениями α . Для длины волны 1 мкм, при толщине плоской пластины льда 0,1 мм, $\alpha = 25 \text{ м}^{-1}$, $\epsilon' = 1,302$, а $\epsilon'' = 0,000002$ [21] отношение интерферирующих излучений I_3/I_1 составляет 10^{-4} , что также является низким значением, по сравнению с наблюдаемыми в экспериментах приращениями мощности проходящего излучения при эффекте «просветления».

В случае микроволновых радиометрических измерений в микроволновом диапазоне интерференция отсутствует (или существенно ослаблена) из-за широкой полосы частот используемых радиометров и большой толщины образцов (раздел 4.2).

5.3 Частотная зависимость эффекта «просветления»

Интересным остается вопрос о частотной зависимости интенсивности эффекта «просветления». Для удобного сравнения введем параметр γ' , который будет определяться следующим образом:

$$\gamma' = \frac{L - L_0}{L} \quad (5.5),$$

где L – значение погонного затухания в среде, L_0 – значение погонного затухания в среде в момент «просветления».

Для построения частотной зависимости γ' использовались экспериментальные данные об интенсивности проходящего излучения до и в момент эффекта «просветления». Эти результаты были получены в настоящей работе, а также использовались данные, полученные в публикациях [3,4]. В указанных статьях приведены сведения об увеличении мощности проходящего излучения через образцы льда на частотах 90, 14 ГГц. На рисунке 5.3.1 представлен график зависимости γ' от длины волны излучения λ .

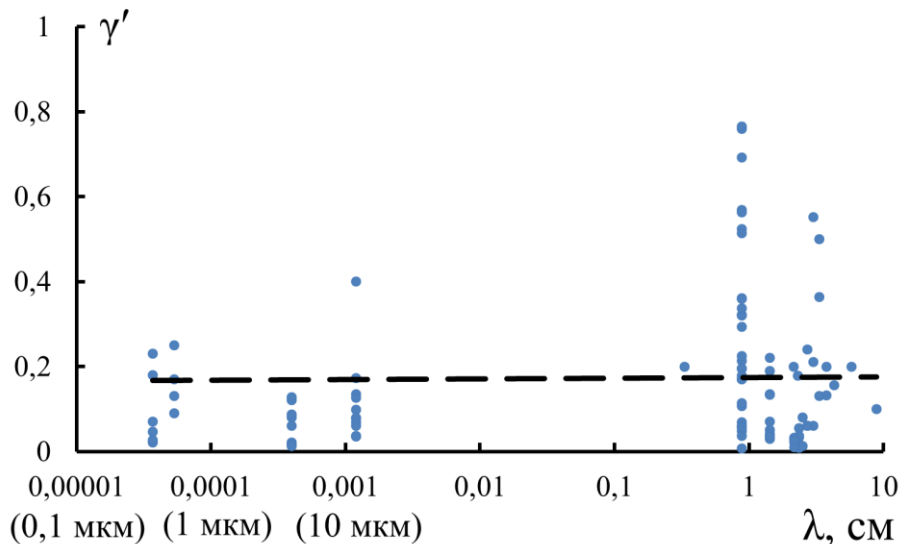


Рисунок 5.3.1. Интенсивность эффекта «просветления» льда в зависимости от длины волны.

Точками обозначены экспериментальные данные. Штриховая линия – линия тренда

Данный график показывает интенсивность протекания эффекта «просветления» на различных длинах волн. Минимальное значение близкое 0 – это те случаи, когда эффект «просветления» отсутствовал. Эффект «просветления» оказывается широкополосным. Наблюдается сильный разброс значений γ' , особенно вблизи длины волны излучения 1 см. Эта особенность может быть связана с возникновением волн пластического течения во льду. Штриховая линия – линия тренда ($\gamma' = 0,0009 \cdot \lambda + 0,166$. Коэффициент детерминации равен $6 \cdot 10^{-5}$). Среднее значение γ' в данных экспериментах $\sim 0,2$.

5.4 Использование эффекта «просветления» при дистанционном зондировании ледяных и снежных образований

Знания микроволновых характеристика льда и дисперсных сред вблизи температуры $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеет особое значение. В первую очередь это касается технологии дистанционного зондирования окружающей среды. Полученные данные в настоящем исследовании могут объяснить ряд наблюдаемых эффектов вблизи температуры таяния льда в природных средах. Ниже представим некоторые из этих эффектов.

В отдельных ранее выполненных работах наблюдались признаки эффекта «просветления». Раннее упоминание о сильных уменьшениях погонного затухания в пресном льду было представлено в работе [5], где было обнаружено, что погонное затухание на длине волны $0,8\text{ м}$ в кернах изменялось от 13 дБ/м до 0 дБ/м . Можно предположить, что при достижении в кернах льда термодинамической температуры, близкой к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, в цитируемой работе и был зафиксирован данный эффект. Другим примером является работа [137], где были приведены графики радиояркостной температуры ледяного покрова Обской губы. На представленных графиках, перед деструкцией ледяного покрова, в некоторые годы, наблюдаются кратковременные понижения $T_{\text{я}}$ приблизительно на 10 К на частоте $1,4\text{ ГГц}$. Необычность наблюдения в том, что при повышении температуры окружающей среды и появлении начальных признаков таяния ледяного покрова, должно возникать повышение $T_{\text{я}}$ из-за начала увлажнения областей льда. Проявление эффекта «просветления» было замечено и ранее в работе тех же авторов [67] при исследовании радиояркостной температуры льдов Антарктиды. Было выявлено, что при достижении льдом термодинамической температуры, близкой к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, возникает понижение радиояркостной температуры. В работе [94] при исследовании излучательных и отражательных характеристик ледяного покрова Антарктики в период начала таяния было также обнаружено понижение радиояркостной температуры и величины обратного рассеяния.

Еще один из примеров – работа [138], где исследовалось обратное рассеяние от поверхности ледников Гренландии на частоте 5,5 ГГц. В период повышения температуры воздуха выше 0 °С, появляются флуктуации в величине обратного рассеяния. Это можно объяснить тем, что при локальном уменьшении мнимой части относительной диэлектрической проницаемости льда, интенсивность рассеянного сигнала от некоторых участков будет значительно изменяться.

Другим примером является работа [22], где представлено исследование фенологии льда крупных пресных водоемов северной Канады: Большом Медвежьем озере и Большом Невольничьем. Для этого использовался усовершенствованный микроволновый сканирующий радиометр – система наблюдения Земли (AMSR-E). Измерения T_y осуществлялось на частотах 18,7; 23,8; 36,5 и 89,0 ГГц на двух ортогональных поляризациях (ГП и ВП). Результаты измерений T_y для ледяного покрова Большого Медвежьего озера представлены на рисунке 5.4.1.

Достаточно интересной остается область вариаций T_y перед началом деструкции ледяного покрова, когда наблюдается рост термодинамической температуры. На рисунке 5.4.1 (а) эта область обозначена как «melt-refreeze» (таяния-замораживания). Особый интерес связан с тем, что T_y в данных вариациях достигает значений, как у открытой водной поверхности, хотя согласно представленным данным, лед еще не растаял, а также еще имеется снежный покров.

По-своему интересной является работа [139]. В ней обсуждается слой льда, где отсутствуют рассеянные сигналы. Такие слои расположены вблизи коренных пород. Как отмечают сами авторы, физические причины отсутствия рассеяния в этих слоях не известны. Можно предположить, что при возникновении течения льда происходит эффект «просветления». Подобное показано в работе [4], где в металлическом волноводе при быстром изменении температуры наблюдается похожий эффект. В работе [140], как отмечалось выше, наблюдается эффект и при взрывоподобном увеличении давления для температур заметно ниже 0 °С.

а

б

в

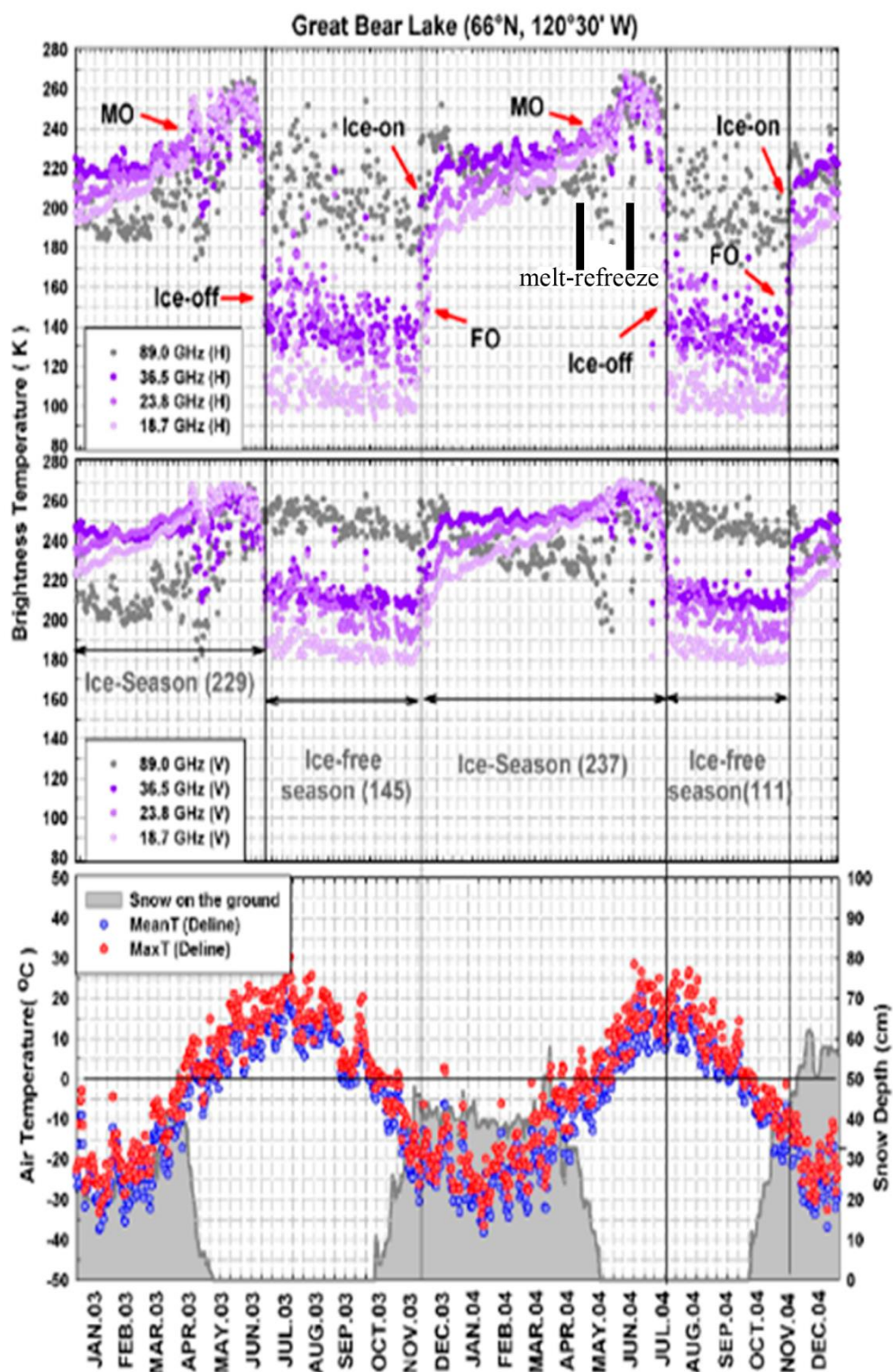


Рисунок 5.4.1 – Временная эволюция радиояркостной температуры на горизонтальной (а) и вертикальной (б) поляризациях: 18,7 (светло-фиолетовый), 23,8 (средне-фиолетовый), 36,5 (темно-фиолетовый), 89,0 (темно-серый) ГГц (2003-2004). Временные ряды максимальных (Max T, красный) и средних (Mean T, синий) температур воздуха (в), полученных на определенной метеорологической станции, глубина снега обозначена серым цветом [88]

В работе [141] упоминается о проблеме обнаружения айсбергов на радиолокационных снимках. Если представить, что диэлектрические потери льда айсберга уменьшаются вследствие эффекта «просветления», то интенсивность отраженного сигнала от некоторых участков будет значительно изменяться.

Таким образом, вариации локальных сигналов могут быть связаны с эффектом «просветления» льда и должны использоваться при расшифровке особенностей рассеянных сигналов. Из выполненного анализа следует, что для практических целей требуется выполнение специальных исследований диэлектрических характеристик снежных и ледяных покровов перед началом их таяния и разработка на их основе соответствующих методик обработки данных дистанционного зондирования Земли.

Выводы по главе. Представлен физический механизм «просветления» льда от микроволнового до оптического диапазона, который определяется возникновением плазмонного усиления электромагнитного поля, обусловленного повышением электропроводности квазижидких слоев, образующихся при ползучести частей кристаллов льда по базисным плоскостям. Широкополосность эффекта определяется различием размеров образующихся островковых слоев и анизотропией их формы. Выявлено отсутствие связи эффекта с интерференцией. Представлен график интенсивности эффекта «просветления» льда в зависимости от длины волны. Показана возможность использования эффекта «просветления» при дистанционном зондировании ледяных и снежных образований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые экспериментально показано, что уменьшение погонного затухания электромагнитного излучения в поликристаллическом гексагональном льду, наблюдающееся в области температур $-0,5...-0,1$ °С на частотах инфракрасного, видимого и УФ диапазонов и в широком участке микроволнового диапазона, экспоненциально зависит от механического напряжения.

2. На основании экспериментальных данных впервые установлена зависимость эффекта «просветления» льда от: пластической деформации; длины волны; температуры; концентрации примесей; пространственного расположения вектора напряженности электрического поля излучения относительно базисных плоскостей кристаллов льда.

3. Теоретически и экспериментально показано, что понижение мнимой части относительной комплексной диэлектрической проницаемости, возникающее в результате «просветления» льда, приводит к уменьшению значения радиояркостной температуры плоскостойкой среды из льда и воды на десятки градусов К вблизи температуры фазового перехода (лед Ih-вода) в микроволновом диапазоне.

4. Представлен физический механизм «просветления» льда от микроволнового до оптического диапазона, который определяется возникновением плазмонного усиления электромагнитного поля, обусловленного повышением электропроводности квазижидких слоев, образующихся при ползучести частей кристаллов льда по базисным плоскостям. Широкополосность эффекта определяется размерами образующихся островковых слоев и анизотропией их формы.

5. Предложены усовершенствованные методики исследования диэлектрических характеристик пресного льда при пластической деформации вблизи температуры фазового перехода лед Ih – вода в широком интервале частот: от единиц гигагерц до ультрафиолетового диапазона при их медленном нагревании.

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

E	– энергия активации
$\mathbf{E}$	– вектор электрического поля электромагнитных волн
f	– частота
f_0	– собственная частота пустого резонатора
f_{nmp}	– частота прямоугольного резонатора
f_s	– критическая частота (или частота релаксации)
Δf	– разность частот
h	– толщина образца
I	– интенсивность излучения
i	– мнимая единица
L	– погонное затухание в среде
n	– коэффициент преломления
P	– мощности проходящего излучения
Q	– добротность резонатора
R	– коэффициент отражения
R_g	– универсальная газовая постоянная
S	– минерализация
T	– термодинамическая температура
$T_{\text{я}}$	– радиояркостная температура
t	– время
α	– коэффициент поглощения
$\hat{\epsilon}$	– относительная комплексная диэлектрическая проницаемость
ϵ_s	– статическая диэлектрическая проницаемость
ϵ'	– действительная часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости

ε'' — мнимая часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости

λ — длина волны

μ' — магнитная проницаемость

σ_0 — обратное рассеяние электромагнитного излучения

τ — время релаксации

σ — механическое напряжение

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бордонский Г. С. Тепловое излучение ледяного покрова пресных водоёмов / Г. С. Бордонский. – Новосибирск: Наука, 1990. – 102 с.
2. Notz D. The Trajectory Towards a Seasonally Ice-Free Arctic Ocean / D. Notz, J. C. Stroeve // Current Climate Change Reports. – 2018. – Vol. 4, №. 15. – P. 407-416.
3. Бордонский Г. С. "Просветление" льда в микроволновом диапазоне при текучести / Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев, С. Д. Крылов // Письма в Журнал технической физики. – 2009. – Т. 35, № 22. – С. 46-54.
4. Бордонский Г. С. Электромагнитные потери пресного льда в микроволновом диапазоне при 0°C / Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев, С. Д. Крылов // Радиотехника и электроника. – 2014. – Т. 59, № 6. – С. 587.
5. Глушнев В. Г. Об изменении затухания радиоволн восьмимиллиметрового диапазона в морском и пресноводном льдах и снеге / В. Г. Глушнев, Б. Д. Слуцкер, М. И. Финкельштейн // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 1976. – Т. 19, № 9. – С. 1305-1307.
6. Бордонский Г. С. Возможный механизм просветления льда в микроволновом диапазоне вблизи 0 °C / Г. С. Бордонский // Письма в Журнал технической физики. – 2024. – Т. 50, № 9. – С. 35-38.
7. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2-х томах. Т. 1. / Е. А. Шарков. – М.: ИКИ РАН, 2014. – 544 с.
8. 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.
9. Рис У. Г. Основы дистанционного зондирования / У. Г. Рис. – М.: Техносфера, 2006. – 336 с.
10. Шутко А. М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов / А. М. Шутко. – М.: Наука, 1986. – 190 с.

11. Кикоин И. К. Таблицы физических величин / И. К. Кикоин. – М.: Атомиздат., 1976. – 1008 с.
12. Богородский В. В. Радиотепловое излучение земных покровов / В. В. Богородский, А. И. Козлов, Л. Т. Тучков. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 224 с.
13. Matzler C. Dielectric properties of fresh-water ice at microwave frequencies / C. Matzler, U. Wegmuller // J. Phys. D.: Appl. Phys. – 1987. – P. 1623-1630.
14. Warren S. G. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: a revised compilation / S. G. Warren, R. E. Brandt // J. Geoph. Res. – 2008. – Vol. 113. – P. 10-D14220.
15. Petrenko V. F. Physics of Ice / V. F. Petrenko, R. W. Whitworth. – Oxford: University Press, 1999. – 384 p.
16. Artemov V. G. A unified mechanism for ice and water electrical conductivity from direct current to terahertz / V. G. Artemov // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2019. – Vol. 21. – P. 8067-8072.
17. Hobbs P. V. Ice Physics / P. V. Hobbs. – Oxford: Clarendon Press, 1974. – 837 p.
18. Hippel V. The dielectric relaxation spectra of water, ice, and aqueous solutions, and their interpretation. 1. Critical survey of the status-quo for water / V. Hippel // IEEE Trans. Electr. Insul. – 1988. – Vol. 23. – P. 801-816.
19. Kuhs W. F. Physics and Chemistry of Ice / W. F. Kuhs. – Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2007. – 704 p.
20. Matsuoka T. Effect of temperature on dielectric properties of ice in the range 5–39 GHz / T. Matsuoka, S. Fujita, S. Mae // J. Appl. Phys. – 1996. – Vol. 80. – P. 5884-5890.
21. Warren S. G. Optical properties of ice and snow / S. G. Warren // Phil. Trans. R. Soc. A. – 2019. – Vol. 377. – P. 20180161.
22. Бордонский Г. С. Диэлектрические потери пресного льда на СВЧ / Г. С. Бордонский // Радиотехника и электроника. – 1995. – № 11. – С. 1620-1622.

23. Mangan T. P. The phase of water ice which forms in cold clouds in the mesospheres of Mars, Venus, and Earth / T. P.Mangan, J. M. C. Plane, B. J. Murray // *Journal of Geophysical Research: Planets*. – 2021. – Vol. 126. – P. e2020JE006796.
24. Dynamic signatures of the transition from stacking disordered to hexagonal ice: Dielectric and nuclear magnetic resonance studies / C. Gainaru et al. // *The Journal of Chemical Physics*. – 2018. – Vol. 148, №. 13. – P. 134502.
25. Гурулев А. А. Радиотепловое излучение ледяных покровов пресных и слабосоленых водоемов: физическое исслед. : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук : 01.04.03 «Радиофизика» / Александр Александрович Гурулев – Москва, 2005. – 125 с.
26. Microwave dielectric properties of the ice core from Dome Fuji, Antarctica / T. Matsuoka et al. // *Geophysical Research Letters*. – 1998. – Vol. 25, №. 10. – P. 1573-1576.
27. Bordonski G. S. Loss-factor behavior of freshwater ice at 13.5 and 37.5 GHz / G. S. Bordonski, S. D. Krylov // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. –1998. –Vol. 36, №. 2. – P. 678-680.
28. Artemov V. The Electrodynamics of Water and Ice / V. Artemov. – Switzerland:Springer Nature. – 2021. – 231 p.
29. Wiltshire B. Robust and sensitive frost and ice detection via planar microwave resonator sensor / B. Wiltshire et al. // *Sensors and Actuators, B: Chemical*. – 2019. – Vol. 301, № 126881. – P. 1-8.
30. Fujita S. Dielectric anisotropy in ice Ih at 9.7 GHz / S. Fujita, S. Mae, T. Matsuoka // *Annals of Glaciology*. – 1993. – Vol. 17. – P. 276-280.
31. Saruya T. Dielectric anisotropy as indicator of crystal orientation fabric in Dome Fuji ice core: method and initial results / T. Saruya, S. Fujita, R. Inoue // *Journal of Glaciology*. – 2021. – P. 1-12.
32. Densification of layered firn in the ice sheet at Dome Fuji, Antarctica / S. Fujita et al. // *Journal of Glaciology*. – 2016. – Vol. 62, № 231. – P. 103-123.
33. Fujita S. Radio-wave depolarization and scattering within ice sheets: a matrix-based model to link radar and ice-core measurements and its application / S.

Fujita, H. Maeno, K. Matsuoka // *Journal of Glaciology*. – 2006. – Vol. 52, № 178. – P. 407-424.

34. Inferring ice fabric from birefringence loss in airborne radargrams: Application to the eastern shear margin of Thwaites Glacier, West Antarctica / T. J. Young et al. // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. – 2021. – Vol. 126. – P.e2020JF006023.

35. Бордонский Г. С. Особенности радиотеплового излучения ледяных покровов водоемов с различной степенью минерализации / Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев // *Водные ресурсы*. – 2008. – Т. 35, № 2. – С. 210-215.

36. Бордонский Г. С. Зависимость действительной части диэлектрической проницаемости пресного льда от температуры и времени в сантиметровом диапазоне длин волн / Г. С. Бордонский А. С. Истомин, С. В. Цыренжапов // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. – 2002. – Т. 45, № 12. – С. 1043-1048.

37. Multiple freezing–melting pathways of high-density ice through ice XXI phase at room temperature / Y. H. Lee et al. // *Nat. Mater.* – 2026. – Vol. 25. – P. 302-309.

38. Радиолокационное исследование ледяного покрова озера Доронинского / Г. С. Бордонский и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2013. – Т. 10, № 4. – С. 289-297.

39. Борзенко С. В. Формы сероводорода в минеральных содовых водах озера Доронинское (восточное Забайкалье) / С. В. Борзенко // *Вестник Камчатской региональной организации «Учебно-научный центр»*. Серия: Науки о Земле. – 2009. – № 13. – С. 54-57.

40. Богородский В. В. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии / В. В. Богородский, В. П. Гаврило. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 384 с.

41. Гурулев А. А. Радиолокационное определение неоднородностей ледяного покрова пресных озер / А. А. Гурулев, С. Д. Крылов, С. В. Цыренжапов

// Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2013. – № 5(51). – С. 114-116.

42. Бордонский Г. С. Миграция солевых включений в ледяных покровах озёр Забайкалья / Г. С. Бордонский, С. Д. Крылов // Изв. РАН. Серия географическая. – 2000. – № 4. – С. 98-102.

43. Диэлектрические характеристики пресного льда с содержанием различного рода примесей : Труды. XXIV Всеросс. научной конф. Иркутск, 29 июня – 05 июля 2014 г. // Иркутск : Изд-во Института солнечно-земной физики СО РАН, 2014. – С. 159-160.

44. The Influence of the Internal Properties of River Ice on Ground Penetrating Radar Propagation / H. Han et al. // Water. – 2023. – Vol. 15. – P. 889.

45. Morphology Dynamics of Ice Cover in a River Bend Revealed by the UAV-GPR and Sentinel-2 / C. Li et al. // Remote Sens. – 2023. – Vol. 15. – P. 3180.

46. Vlander L. M. H. EtTect of frost flowers, rough saline snow and slush on the ERS-l SAR backscatter of thin Arctic sea-ice / L. M. H. Vlander, A. Carlström, J. Askne // International Journal of Remote Sensing. – 1995. – Vol. 16, №17. – P. 3287-3305.

47. Vant M. R. The complex-dielectric constant of sea ice at frequencies in the range 0.1–40 GHz / M. R. Vant, R. O. Ramseier, V. Makios // Journal of Applied Physics. – 1978. – Vol. 49, № 3. – P. 1264-1280.

48. Выявление областей торошения пресного ледяного покрова по собственному тепловому излучению / А. А. Гурулев и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20, № 1. – С. 219-228.

49. Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов / А. Д. Фролов. – Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. – 607 с.

50. Орлов А. О. Микроволновые свойства переохлаждённой поровой воды на частотах 11 ÷ 140 ГГц: физическое исслед. : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук : 01.04.03 «Радиофизика» / Алексей Олегович Орлов – Москва, 2017. – 164 с.

51. Геофизические признаки источников гигантской наледи на р. Анмангында (Магаданская область) / В. В. Оленченко и др. // Геодинамика и тектонофизика. – 2023. – Т. 14, № 3. – С. 0702.
52. Артемов В. Г. Подобие процессов диэлектрической релаксации и транспортных характеристик воды и льда / В. Г. Артемов, И. А. Рыжкин, В. В. Сеницын // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2015. – Т. 102, № 1-2. – С. 45-49.
53. Ellison W. J. Water: a dielectric reference / W. J. Ellison, K. Lamkaouchi, J.-M. Moreau // Journal of Molecular Liquids. – 1996. – Vol. 68, № 2-3. – P. 171-279.
54. Correlation between Macroscopic and Microscopic Relaxation Dynamics of Water: Evidence for Two Liquid Forms / N. Vinh et al. // Journal of Chemical Physics. – 2023. – Vol. 158. – P. 204507.
55. Гурулев А. А. Холодная вода и ее влияние на электромагнитные свойства криосферных объектов / А. А. Гурулев, Г. С. Бордонский // Российская Арктика. – 2024. – Т. 6, № 1(24). – С. 62-70.
56. Бордонский Г. С. Диэлектрические потери в переохлаждённой поровой воде на частоте 34 ГГц / Г. С. Бордонский, А. О. Орлов, К. А. Щегрина // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2016. – Т. 59, № 10. – С. 906-915.
57. Бордонский Г. С. Сравнение различных моделей фактора потерь переохлажденной воды с экспериментальными данными в микроволновом диапазоне / Г. С. Бордонский, А. О. Орлов // Исследование Земли из космоса. – 2019. – № 3. – С. 104-112.
58. Бордонский Г. С. Особенности физических характеристик воды вблизи нуля градусов Цельсия / Г. С. Бордонский // Ученые записки Забайкальского государственного университета. – 2020. – Т. 15, № 3. – С. 85-93.
59. Speedy R. J. Isothermal compressibility of supercooled water and evidence for a thermodynamic singularity at -45°C / R. J. Speedy, C. A. Angell // The Journal of Chemical Physics. – 1976. – Vol. 65, № 3. – P. 851-858.

60. Бордонский Г. С. О физико-химических превращениях с участием воды вблизи температуры -45°C / Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 478-489.
61. Анисимов М. А. Холодная и переохлажденная вода как необычный сверхкритический флюид / М. А. Анисимов // Сверхкритические флюиды: Теория и практика. – 2012. – Т. 7, № 2. – С. 19-37.
62. Бордонский Г. С. Влияние геометрии пор на состояние объемной поровой воды в фазовом пространстве давление-температура / Г. С. Бордонский // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 459-465.
63. Бордонский Г. С. Исследование сегнетоэлектрических фазовых переходов воды в нанопористых силикатах при совместных электрических шумовых и калориметрических измерениях / Г. С. Бордонский, А. О. Орлов // Физика твердого тела. – 2014. – Т. 56, № 8. – С. 1575-1582.
64. 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.
65. 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.
66. 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.
67. Анализ сезонной зависимости яркостной температуры ледового щита Антарктиды по микроволновым спутниковым данным / В. В. Тихонов и др. // Исследование Земли из космоса. – 2019. – № 1. – С. 14-28.

68. Armstrong R. L. Recent Northern Hemisphere snow extent: A comparison of data derived from visible and microwave satellite sensors / R. L. Armstrong, M. J. Brodzik // *Geophysical Research Letters*. – 2001. – Vol. 28, №. 19. – P. 3673-3676.
69. Singh P. R. Retrieval of snow water equivalent using passive microwave brightness temperature data / P. R. Singh, T. Y. Gan // *Remote Sensing of Environment*. – 2000. – Vol. 74, №. 2. – P. 275-286.
70. Tedesco M. Assessment of the NASA AMSR-E SWE Product / M. Tedesco, P. Narvekar // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. – 2010. – Vol. 3, №. 1. – P. 141-159.
71. О возможности восстановления снегозапаса снежного покрова по данным спутниковой микроволной радиометрии / В. В. Тихонов и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2021. – Т. 18, № 5. – С. 47-64.
72. Satellite Microwave Remote Sensing of Boreal and Arctic Soil Temperatures From AMSR-E / L. A. Jones et al. // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. – 2007. – Vol. 45, No. 7. – P. 2004-2018.
73. An empirical model to estimate the microwave penetration depth of frozen soil / S. Zhao et al. // *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. – 2012. – P. 4493-4496.
74. Музалевский К. В. Экспериментальное и теоретическое исследование угловых и поляризметрических особенностей радиотеплового излучения почвенного покрова в ходе естественных циклов промерзания и оттаивания на частоте 1,4 ГГц / К. В. Музалевский, А. С. Яценко, П. П. Бобров // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. – 2017. – Т. 18, № 1. – С. 62-68.
75. Spectral induced polarization imaging to monitor seasonal and annual dynamics of frozen ground at a mountain permafrost site in the Italian Alps / T. Maierhofer et al. // *The Cryosphere*. – 2024. – Vol. 18. – P. 3383-3414.

76. A sea-ice thickness retrieval model for 1.4 GHz radiometry and application to airborne measurements over low salinity sea-ice / L. Kaleschke et al. // *The Cryosphere*. – 2010. – Vol. 4. – P. 583-592.
77. Mäkynen M. Arctic Thin Ice Detection Using AMSR2 and FY-3C MWRI Radiometer Data / M. Mäkynen, M. Simila // *Remote Sensing*. – 2024. – Vol. 16, № 9. – P. 1600.
78. Validation of an AMSR2 Thin-Ice Thickness Algorithm for Global Sea-Ice-Covered Oceans Using Satellite and In Situ Observations / K. Nakata et al. // *Remote Sens.* – 2025. – Vol. 17. – P. 171.
79. Vergnano A. Drone-Borne Ground-Penetrating Radar for Snow Cover Mapping / A. Vergnano, D. Franco, A. Godio // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14. – P. 1763.
80. Duguay C. R. Determining depth and ice thickness of shallow sub-Arctic lakes using space-borne optical and SAR data / C. R. Duguay, P. M. Lafleur // *International Journal of Remote Sensing*. – 2003. Vol. 24, № 3. – P. 475-489.
81. Бордонский Г. С. Газовые включения в озерных льдах и радиояркостная температура ледяного покрова / Г. С. Бордонский, Ф. П. Кренделев, С. В. Поляков // *Геология и геофизика*. – 1985. – Т. 26, № 9. – С. 66-73.
82. Бордонский Г. С. Особенности радиояркости пресного ледяного покрова, содержащего газы / Г. С. Бордонский, С. Д. Крылов, С. В. Поляков // *Исследование Земли из космоса*. – 1992. – № 5. – С. 13-21.
83. Bordonsky G. S. Brightness temperature of fresh-water ice cover on the region with bottom's gas liberation / G. S. Bordonsky, S. D. Krvlov, S. V. Polvakov // *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'91)*. – 1991. – Vol. 3. – P. 1577-1579.
84. Определение областей донного газоотделения на акваториях с пресным льдом по данным радарных и радиометрических измерений / Г. С. Бордонский и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2016. – Т. 13, № 3. – С. 150-161.

85. Murfitt J. Evaluating RADARSAT-2 for the Monitoring of Lake Ice Phenology Events in Mid-Latitudes / J. Murfitt, L. C. Brown, S. E. L. Howell // *Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 10, № 10. – P. 1641.
86. Posch C. Lake ice break-up in Greenland: timing and spatiotemporal variability / C. Posch, J. Abermann, T. Silva // *The Cryosphere*. – 2024. – Vol. 18. – P. 2035-2059.
87. Changing sea ice melt parameters in the Canadian Arctic Archipelago: Implications for the future presence of multiyear ice / S. Howell et al. // *Journal of Geophysical Research-Oceans*. – 2008. – Vol. 113. – P. C09030.
88. Kang K. K. Estimating ice phenology on large northern lakes from AMSR-E: Algorithm development and application to Great Bear Lake and Great Slave Lake, Canada / K. K. Kang, C. Duguay, S. Howell // *The Cryosphere*. – 2012. – Vol. 6. – P. 235-254.
89. Анализ изменений ледяного покрова пресноводных водоемов по данным SMOS / В. В. Тихонов и др. // *Исследование Земли из космоса*. – 2017. – № 6. – С. 46-53.
90. Обнаружение выхода газа в озере Шакшинское (Забайкальский край) дистанционными методами / А. А. Гурулев и др. // *Российская Арктика*. – 2023. – Т. 5, № 4 (23). – С. 27-36.
91. Бордонский Г. С. Изучение характеристик пропускания и отражения микроволнового излучения льдом вблизи температуры таяния / Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев // *Ученые записки Забайкальского государственного университета*. – 2018. – Т. 13, № 4. – С. 80-89.
92. Экспериментальное обнаружение просветления пресного льда в оптическом диапазоне вблизи 0 °C / Г. С. Бордонский и др. // *Оптика и спектроскопия*. – 2023. – Т. 131, № 10. – С. 1374-1379.
93. Гидрологический режим Обской губы в период ледостава по данным спутниковой микроволновой радиометрии и его связь с гидролого-климатическими изменениями региона и бассейна реки Обь : материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования

Земли из космоса». Москва, 15-19 нояб. 2021 г. – Москва: Изд-во ИКИ РАН, 2021. – С. 290.

94. Kunz L. Melt detection in Antarctic ice shelves using scatterometers and microwave radiometers / L. Kunz, G. L. David // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2006. – Vol. 44, № 9. – P. 2461-2469.

95. Марков Г. Т. Электродинамика и распространение радиоволн. Учебное пособие для вузов / Г. Т. Марков, Б. М. Петров, Г. П. Грудинская. – М.: Сов. радио, 1979. – 376 с.

96. Особенности методики микроволновых радиометрических измерений с борта БПЛА на волне 0,8 см / Г. С. Бордонский и др. // Техника радиосвязи. – 2025. – № 1(64). – С. 102-111.

97. Warren S. G. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave / S. G. Warren // Appl. Opt. – 1984. – Vol. 23, № 8. – P. 1206-1225.

98. Борн М. Основы оптики. под ред. Г. П. Мотулевич. / М. Борн, Э. Вольф. – М: Наука, 1973. – 719 с.

99. Methods of research of radiothermal radiation of cryospheric objects in the microwave range / A. Gurulev, G. Bordonskiy, V. Kazantsev, A. Kozlov // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 525. – P. 02009.

100. Бордонский Г. С. Проявление автоволн пластического течения в пресном льду при микроволновых измерениях / Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев // Письма в Журнал технической физики. – 2019. – Т. 45, № 6. – С. 40-42.

101. Особенности распространения микроволнового излучения в пресном ледяном покрове / А. А. Гурулев и др. // Ученые записки Забайкальского государственного университета. – 2021. – Т. 16, № 3. – С. 59-68.

102. 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.

103. Кюри П. О симметрии в физических явлениях: симметрия электрического и магнитного полей. Избр. Труды / П. Кюри. – М.-Л.: Наука, 1966. – 19 с.
104. Бордонский Г. С. Электромагнитное излучение криогенных природных сред: физическое исслед. : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук : 05.07.12 «Дистанционные аэрокосмические исследования» / Георгий Степанович Бордонский – Чита, 1994. – 322 с.
105. Климов В. В. Наноплазмоника / В. В. Климов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 480 с.
106. 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.
107. 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.
108. 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. – P.12780.
109. Выявление термальных источников с использованием космических методов исследований / А. А. Гурулев и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21, № 2. – С. 131-140.
110. Gurulev A. A. Detection of thermal pollution of urban reservoirs using the method of IR-radiometry based on the example of the Lake Kenon, Zabaykalsky Krai / A. A. Gurulev, V. A. Kazantsev // Nexa Revista Científica. – 2022. – Vol. 35, №. 02. – P. 527-532.

111. Gurulev A. A. The specific features of the thermal radiation of lake Kenon during freeze-up in the infrared band / A. A. Gurulev, V. A. Kazantsev // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2022. – Vol. 962, № 1. – P. 012016.
112. Шумский П. А. Основы структурного ледоведения: Петрография пресного льда как метод гляциологического исследования / П. А. Шумский. – М.: АН СССР, 1955. – 492 с.
113. Irvine W. M. Infrared optical properties of water and ice spheres / W. M. Irvine, J. B. Pollack // Icarus. – 1968. – Vol. 8, № 1-3. – P.324-360.
114. Гайдук В. И. Двухфракционная модель для расчета резонансных спектров комплексной диэлектрической проницаемости льда в дальнем инфракрасном диапазоне / В. И. Гайдук, Б. Г. Кутуза // Оптика и спектроскопия. – 2006. – Т. 101, №5. – С. 744-754.
115. Optical constants of amorphous and crystalline H₂O-ice: 2.5–22 μm (4000–455 cm^{-1}) optical constants of H₂O-ice / R. M. Mastrapa et al. // The Astrophysical Journal. – 2009. – Vol. 701, № 2. – P. 1347–1356.
116. Казанцев В. А. Оценка влияния «просветления» льда вблизи 0 °C на радиояркостную температуру снежных и ледяных покровов в длинноволновой части сантиметрового диапазона / В. А. Казанцев, Г. С. Бордонский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2025. – Т. 22, № 1. – С. 259-267.
117. Клепиков И. Н. Теоретические исследования собственного излучения резконеоднородных неизотермических сред / И. Н. Клепиков, Е. А. Шарков // Исследования Земли из космоса. – 1992. – № 6. – С. 3-15.
118. Электродинамическая модель излучения арктического ледяного покрова для решения задач спутниковой микроволновой радиометрии / И. А. Репина и др. // Исследование Земли из космоса. – 2012. – № 5. – С. 29.
119. Оценка глубины промерзания почвенного покрова по данным спутника SMOS / Д. А. Боярский и др. // Исследование Земли из космоса. – 2019. – № 2. – С. 3-13.

120. Boyarskii D. A. The Influence of Stratigraphy on Microwave Radiation from Natural Snow Cover / D. A. Boyarskii, V. V. Tikhonov // J. Electromag. Waves Appl. – 2000. – Vol. 14, № 9. – P. 1265-1285.
121. Inclusion of scattering losses in the models of the effective permittivity of dielectric mixtures and applications to wet snow / D. A. Boyarskii et al. // J. Electromag. Waves Appl. – 1994. – Vol. 8, № 11. – P. 1395-1410.
122. Changes in surface area and concentrations of semi-volatile organic contaminants in aging snow / D. A. Burniston et al. // Environmental Science and Technology. – 2007. – Vol. 41, №. 14. – P. 4932-4937.
123. Бордонский Г. С. Широкополосные измерения диэлектрических характеристик льда вблизи температуры 0 °С / Г. С. Бордонский, В. А. Казанцев // Журнал технической физики. – 2025. – Т. 95, № 7. – С. 1427-1433.
124. Сколунов А. В. Геометрия воды и льда / А. В. Сколунов. – М.: Издательство «Спутник +», 2013. – 313 с.
125. Colloquium: Ice rule and emergent frustration in particle ice and beyond / A. Ortiz-Ambriz et al. // Reviews of Modern Physics. – 2019. – Vol. 91, №4. – P. 1539.
126. Benton O. Electromagnetism on ice: classical and quantum theories of proton disorder in hexagonal water ice / O. Benton, O. Sikora, N. Shannon // Physical Review B. – 2016. – Vol. 93. – P. 125143.
127. Гляциологический словарь. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. – 564 с.
128. Савельев Б. А. Гляциология: учебник / Б. А. Савельев. – М.: МГУ, 1991. – 288 с.
129. Шавлов А. В. Лед при структурных превращениях / А. В. Шавлов. – Новосибирск: Наука, 1996. – 182 с.
130. Войтковский К. Ф. Основы гляциологии / К. Ф. Войтковский. – М.: Наука, 1999. – 255 с.
131. Меньшиков Л. И. Эффекты дальнего действия в воде / Л. И. Меньшиков, П. Л. Меньшиков, П. О. Федичев // УФН. – 2020. – Т. 190, № 5. – С. 475.

132. Зуев Л. Б. Пластическое течение как процесс формирования пространственно-временных структур. Часть 1. Качественные и количественные закономерности / Л. Б. Зуев, Ю. А. Хон // Физ. Мезомеханика. – 2021. – Т. 24, № 6. – С. 5-14.
133. Гурулев А. А. Регистрация автоволн пластического течения в ледяных структурах при радиолокационных измерениях / А. А. Гурулев, Г. С. Бордонский, А. О. Орлов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 222-229.
134. Бордонский Г. С. Акустоэлектрический эффект в пресном льду / Г. С. Бордонский, С. В. Цыренжапов, Ю. В. Харин // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2012. – Т. 14, № 2. – С. 162.
135. Борен К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафмен. – М.: Мир, 1986. – 660 с.
136. 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
137. Analysis of the hydrological regime of the Gulf of Ob in the freezing period using SMOS data / V. V. Tikhonov et al. // Russian Arctic. – 2022. – Vol. 2, № 17. – P. 44-71.
138. Glacier melt detection at different sites of Greenland ice sheet using dual-polarized Sentinel-1 images / G. Li et al. // Geo-spatial Information Science. – 2023. – Vol. 27. – P. 1-16.
139. Layer disturbances and the radio-echo free zone in ice sheets / R. Drews et al. // Cryosphere. – 2009. – Vol. 3, № 2. – P. 195.
140. Усиление микроволнового излучения во льду при фазовом переходе, вызванном давлением / Г. С. Бордонский и др. // Письма в Журнал технической физики. – 2012. – Т. 38, № 19. – С. 30-36.

141. Бычкова И. А. Особенности совместного использования спутниковых данных видимого диапазона и радиолокационных данных для мониторинга арктических айсбергов на примере района Земли Франца-Иосифа / И. А. Бычкова, Е. В. Платонова, В. Г. Смирнов // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2023. – Т. 69, № 2. – С. 191-205.
142. Особенности собственного излучения Обской губы в L-диапазоне в период ледостава / В. В. Тихонов и др. // Исслед. Земли из космоса. – 2020. – № 3. – С. 59-76.
143. Майер С. А. Плазмоника: теория и приложения / С. А. Майер. – М.-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2011. – 278 с.
144. In-plane dielectric constant and conductivity of confined water / R. Wang et al. // Nature. – 2025. – № 646. – P. 606-610.
145. Тарасевич Ю. Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы / Ю. Ю. Тарасевич. – М.: ЛИБРОКОМ, 2012. – 112 с.
146. Шавлов А. В. Динамика электропроводности пленок металлов во льду при его структурном превращении. Рекомбинационно-фононный механизм ускорения коррозии / А. В. Шавлов, А. Д. Писарев, А. А. Рябцева // Криосфера Земли. – 2006. – Т. 10, № 3. – С. 42-48.
147. Plasmon Mechanism of Sonoluminescence in Water / V. V. Maksimenko et al. // Russian Journal of Physical Chemistry A. – 2025. – Vol. 99, № 12. – P. 3150-3158.
148. Гурулев А. А. Аномальные радиофизические характеристики различных фазовых состояний воды: физическое исслед. : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук: 1.3.4 «Радиофизика» / Александр Александрович Гурулев – Москва, 2026. – 285 с.
149. Патерсон У. С. Б. Физика ледников / Пер. с англ. М.Г. Гросвальда и др.; Под ред. В.М. Котлякова / У. С. Б. Патерсон. – М.: Мир, 1984. – 472 с.
150. Казанцев В. А. Существование эффекта "просветления" льда в инфракрасном диапазоне / В. А. Казанцев, Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев // Оптика и спектроскопия. – 2026. – Т. 134, № 4. – С. 423-426.