

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Горбунова Михаила Евгеньевича

на диссертационную работу Гурулева Александра Александровича

«Аномальные радиофизические характеристики различных фазовых состояний воды»,  
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по  
специальности 1.3.4 – «Радиофизика»

Диссертационная работа Гурулева А.А. посвящена экспериментальному исследованию радиофизических свойств воды в интервале температур от  $-70^{\circ}\text{C}$  до  $+4^{\circ}\text{C}$ , или так называемой «холодной воды».

Целью диссертационной работы являлась разработка общего подхода к экспериментальным исследованиям радиофизических характеристик холодной воды, основанного на современной физико-химической модели воды как комплекса взаимодействующих кластеров высокой и низкой плотности, определяющих ее аномальные свойства. Для достижения указанной цели был решен ряд задач, в частности: 1) исследованы диэлектрические характеристики холодной воды в диапазоне частот от 1 до 300 ГГц; 2) исследован фазовый переход при  $-23^{\circ}\text{C}$ , приводящий к образованию льда 0; 3) исследован фазовый переход при  $-45^{\circ}\text{C}$ , соответствующий линии Видома при нормальном атмосферном давлении, с применением методов микроволновой спектроскопии; 4) исследовано влияние фазовых переходов на радиофизические характеристики воды; 5) сформулированы новые направления спутниковой гидрологии.

Актуальность диссертационной работы обусловлена широким использованием радиофизических методов дистанционного зондирования для исследования природных сред. Широкое распространение воды на Земле и в земной атмосфере делает необходимым определение радиофизических характеристик в широком диапазоне температур, давлений и частот электромагнитного излучения. Исследование воды и ее аномалий, таких как критические точки, возможно лишь на основе современных физико-химических представлений о микроструктуре воды. Такое исследование важно для радиотеплового и радиолокационного зондирования гидросферы, криосферы, атмосферы и биосферы.

Диссертационная работа представлена на 285 страницах машинописного текста и содержит 123 рисунка и 4 таблицы. Список литературы состоит из 262 публикаций других авторов и 82 публикаций диссертанта, всего из 344 наименований. Основные результаты по теме диссертации изложены в 82 публикациях, 81 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 33 – в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и 48 – в периодических научных журналах, индексируемых Scopus. Диссертация состоит из введения, 6 глав, содержащих материал, выносимый на защиту, заключения, содержащего основные результаты и выводы, и списка цитируемых источников.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, приведен обзор текущего состояния данной области, сформулирована основная цель исследования, определена методология исследования, сформулирована научная новизна и выносимые на защиту положения, отмечена научная и практическая ценность работы, а также ее теоретическая и практическая значимость.

Первая глава посвящена физико-химическим характеристикам холодной воды. Интерес к изучению переохлажденной воды возник после открытия аномального роста теплоемкости при постоянном давлении, коэффициентов изотермической сжимаемости и объемного расширения около  $-45^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент объемного расширения воды отрица-

телен в диапазоне температур от  $-70^{\circ}\text{C}$  до  $+4^{\circ}\text{C}$ . Это позволяет выделить воду в этом диапазоне температур в особый объект исследования, «холодную воду». На фазовой диаграмме жидкой воды выделяются области стабильной воды и переохлажденной воды, ультравязкой воды, область стеклообразной воды низкой плотности, или аморфного льда. При повышении давления происходит фазовый переход в состояния высокой плотности. Выделяется также неисследованная область («no man's land») при температурах от  $-37^{\circ}\text{C}$  до  $-120^{\circ}\text{C}$  и давлениях выше 20 МПа. Стеклование воды происходит при температуре около  $-137^{\circ}\text{C}$ . Отмеченная выше сингулярность ( $\lambda$ -точка) при  $-45^{\circ}\text{C}$  объясняется линией Видома на фазовой диаграмме. Линия Видома, или линия максимальных флуктуаций является продолжением линии фазового перехода вода–вода.

С точки зрения задач дистанционного зондирования важна диэлектрическая проницаемость как функция температуры и частоты. Так, хорошо исследована статическая диэлектрическая проницаемость воды до температуры  $-20^{\circ}\text{C}$  и наиболее распространенного гексагонального кристаллического льда  $I_h$  до температуры  $-120^{\circ}\text{C}$ . Статическая диэлектрическая проницаемость жидкой воды при низких температурах хорошо описывается аналитической моделью Онсагера–Дюпюи.

В природе переохлажденная вода или ее растворы встречаются в биологических тканях (прежде всего растений), пористых горных породах или грунтах, а также в атмосферных аэрозолях. Свойства аэрозолей важны для моделей переноса излучения. Стратосферные облака играют важную роль в разрушении озона. Знание зависимости диэлектрической проницаемости горных пород и грунтов, являющихся сложными многофазными системами важно для задач радиофизического зондирования. В частности, это относится к зондированию планет Солнечной системы. Особый интерес представляет вода в нанопористых системах, где она имеет особые фазовые переходы, связанные с образованием упорядоченных молекулярных структур. В порах радиусом 1 нм вода не замерзает.

В гидросфере, помимо гексагонального льда  $I_h$ , возможно образование кубического льда  $I_c$ . Он образуется в виде мелких кристаллов при температурах ниже  $-20^{\circ}\text{C}$  при конденсации водяного пара. В нижних слоях атмосферы он переходит форму  $I_h$ . Лед 0 был теоретически открыт в 2014 году. Он является формой, предшествующей льду  $I_h$ . Эта форма льда, которая может образовываться в естественных земных условиях, представляет интерес для гидрологии и дистанционного зондирования.

Для задач дистанционного радиофизического зондирования важна комплексная диэлектрическая проницаемость водных сред как функция частоты. Хорошим приближением здесь является двухчастотная модель Дебая, хотя она и не имеет физического обоснования. Диэлектрическая проницаемость воды до недавнего времени была хорошо изучена лишь при температурах выше  $0^{\circ}\text{C}$ . Данные для переохлажденной воды имелись лишь для ограниченных областей на плоскости температура – частота. Различные модели действительной части проницаемости при этом неудовлетворительно согласуются друг с другом.

Аномальные свойства воды связаны с тем, что вода, будучи однородной, тем не менее является смесью конкурирующих состояний высокой и низкой плотности. Это следует из экспериментальных данных по рассеянию рентгеновских лучей, измерений эффекта Керра и других. Аномальные свойства смеси влияют на скорость химических реакций, описываемых формулой Аррениуса. Это важно для понимания тепловых и химических процессов при круговороте воды.

Радиофизические характеристики воды важны для исследования водных объектов, особенно в свете развития спутниковой гидрологии. В связи с изменениями климата важ-

ную роль играют процессы таяния ледников и вечной мерзлоты, а также динамика протяженности льда в Арктике.

Во второй главе рассматриваются методики экспериментальных исследований холодной воды. Прежде всего, важны методы получения переохлажденной воды. Первый метод, примененный диссертантом, был основан на переохлаждении в нанопористых системах. При этом за счет использования эффекта гистерезиса, можно достичь температуры замерзания  $-60^{\circ}\text{C}$  при скорости охлаждения менее  $10^{\circ}\text{C}/\text{час}$ . Если замерзание начинается при температуре ниже  $-23^{\circ}\text{C}$ , то в увлажненной среде может образовываться лед 0, что приводит к значительному росту комплексной диэлектрической проницаемости. Однако при радиусе пор менее 1 нм нарушается структура жидкости, что приводит к заметным отличиям характеристик от объемной воды.

Был также применен оригинальный метод, основанный на создании в кристаллах льда II пластической деформации, приводящей к аморфизации льда. При этом во льду возникают слои с разорванными водородными связями, по свойствам приближающиеся к жидкости. Методика позволяет достичь второй критической точки воды при температуре  $-53^{\circ}\text{C}$  и давлении 100 МПа.

Сложность исследования микроволновых свойств воды резонаторным методом состоит в том, что при замерзании увлажненных пористых материалов, образуются макроскопические неоднородности. Поэтому использовались резонаторы больших объемов, что позволяло выполнять усреднение. Определение диэлектрических параметров воды было основано на том, что (комплексный) индекс рефракции смеси различных диэлектриков равен линейной комбинации индексов рефракции компонентов. Эта модель, дополненная априорной информацией, позволяет найти диэлектрическую проницаемость воды. Измерения проводились на частотах от 6 до 18 ГГц. Для измерения коэффициента затухания в широком диапазоне температур применялось усреднение по образцу, подавляющее эффекты пространственной дисперсии. Были усовершенствованы методики обнаружения фазовых переходов по микроволновым измерениям. Частотный диапазон был расширен до 200 ГГц, измерялся комплексный коэффициент отражения, выбирались режимы нагревания и охлаждения, позволяющие выявлять нелинейные свойства сред. Фазовый переход определяется производной температуры образца по времени при равномерном изменении температуры в камере. Была разработана схема измерений с использованием сигналов с шириной полосы, составляющей около 10% (1 ГГц) от средней частоты (12,2 ГГц). Это позволяло подавить эффекты интерференции и пространственной дисперсии.

Были проведены натурные измерения при отрицательных температурах на объектах, представляющих собой дисперсные среды, содержащие холодную и переохлажденную воду. В качестве объектов были выбраны ледяные покровы водоемов Забайкалья и оз. Байкал, лесные массивы в Ивано-Арахлейском заказнике, а также мезосферные облака. При измерении свойств ледяных покровов озер использовались высокоточные датчики деформации. Передатчик и приемник размещались на глубине около 50 см. Для учета свойств жидких включений в лед был разработан метод радиоспектроскопии льда, позволяющий выявить анизотропию структуры льда, основанный на использовании различных поляризаций. Была разработана методика исследований деформаций пресных ледяных покровов с целью поиска волн течения по дифракции микроволнового излучения на периодических структурах. Волны течения приводят к образованию слоев с разорванными водородными связями, близкими по характеристикам жидкой воде. Измерения проводи-

лись в течение 6–8 часов в утреннее и дневное время, когда наблюдалось существенное изменение температуры воздуха, на частотах 8,5–14 ГГц.

Измерения электромагнитных свойств древесной растительности проводились с линейно поляризованным излучением на частоте 5 ГГц на трассе длиной 40 м. Эксперименты носили длительный характер, что позволило получить новые данные о радиофизических свойствах древесной растительности. Было исследовано возникновение текучести льда созданием импульсного давления, для чего использовался подрыв порохового заряда. Механическая энергия, затраченная на разрыв водородных связей, выделяется как в виде тепла, так и через когерентное электромагнитное излучение, которое можно наблюдать.

В весенний и летний период были исследованы мезосферные облака на высотах 80–87 км, состоящие из пылевых частиц, покрытых льдом 0. У стратосферных облаков обнаружено отражение радиолокационных сигналов.

Для радиолокационного исследования пресных ледяных покровов в микроволновом диапазоне был разработан метод измерений с использованием автомобиля высокой проходимости с радиометром, регистрирующим радиотепловое излучение ледяного покрова в сантиметровом и миллиметровом диапазонах, и радарной системой, регистрирующей обратное рассеяние на другой частоте. Был разработан метод калибровки радиометра.

В третьей главе приведены результаты измерений радиофизических параметров холодной воды, увлажненных сред и льда. Комплексная диэлектрическая проницаемость воды при температурах ниже  $-18^{\circ}\text{C}$  до недавнего времени не была экспериментально определена. Однако существовали модели с двумя частотами релаксации, в частности модель MW [Meisner, Wents, 2004], хорошо согласующиеся с экспериментальными данными при положительных температурах. Было выполнено усовершенствование модели. Ее физическое обоснование связано с наличием кластеров высокой и низкой плотности. В исходной версии модели MW частоты релаксации обращаются 0 при температуре  $-45^{\circ}\text{C}$ . Для усовершенствованной модели, описывающей жидкую воду при более низких температурах, была введена область температур ниже  $-20^{\circ}\text{C}$  и найдены параметры двухчастотной модели Дебая для температур от 0 до  $-60^{\circ}\text{C}$ . Новые измерения использовали резонатор большого объема для подавления пространственной дисперсии. Это позволило найти две частоты релаксации и уточнить коэффициенты в формуле для комплексной диэлектрической проницаемости воды при низких температурах. Улучшенная модель справедлива до частот около 300 ГГц. Для охвата частот от 1 ГГц до терагерцового диапазона была предложена дисперсионная формула с тремя постоянными релаксации. Были также исследованы радиофизические параметры дисперсных увлажненных сред, таких как силикагель, соленый лед, увлажненное пеностекло.

Особый интерес представляют измерения электромагнитных потерь при температуре около  $0^{\circ}\text{C}$ . Сложность таких измерений связана с тем, что образцы при таких температурах являются смесью льда и состояния, близкого к жидкой воде. При этом вблизи фазового перехода может наблюдаться значительное снижение затухание при нахождении вектора поляризации в одной из базисных плоскостей гексагональных кристаллов.

Четвертая глава посвящена исследованию взаимодействию микроволнового излучения с жидкими включениями в объеме льда. Рассмотрена возможность обнаружения жидких включений и пластических деформаций. Показано, что при температурах ниже  $0^{\circ}\text{C}$  в кристаллическом льду могут возникать локальные зоны со свойствами, приближа-

ющимися к жидкости, и эти зоны можно идентифицировать по изменениям отражённых и проходящих микроволновых сигналов.

Были выполнены лабораторные исследования коэффициента отражения от ледяных образований. Для использовали блоки льда, извлеченного из пресноводных озер. Направление главной оптической оси кристаллов такого льда перпендикулярно поверхности водоема. Геометрия блока со скошенной задней гранью позволяла подавить интерференцию между сигналами, отраженными от передней и задней грани. Блок с температурой  $-10^{\circ}\text{C}$  при комнатной температуре  $+20^{\circ}\text{C}$  быстро нагревали, что приводило к появлению в нем жидких структур и механических напряжений. Измерения проводились на частотах от 12 до 13.5 ГГц. Для измерений на частоте 13 ГГц при температуре блока от  $-5^{\circ}\text{C}$  до  $0^{\circ}\text{C}$  наблюдались максимальные флуктуации амплитуды и фазы отраженного сигнала. Фаза при этом становилась полностью случайной. При начале таяния образца величина флуктуаций существенно уменьшалась. Это объясняется тем, что пластическая деформация кристаллической структуры приводит к образованию случайных нестационарных структур типа дифракционных решеток, рассеивающих падающее излучение.

Были выполнены измерения комплексного коэффициента отражения для ультрапресных озер, подвергающимся значительным суточным вариациям температуры до  $30^{\circ}$ . Измерения проводились на частотах 8.5–13.5 ГГц. Были снова зафиксированы хаотические измерения фазы коэффициента отражения на частоте 13.5 ГГц и температуре около  $-1^{\circ}\text{C}$ . Они также объясняются возникновением неоднородностей среды вследствие пластической деформации.

Общий вывод заключается в том, что радиофизические характеристики ледяных образований меняются вблизи температуры фазового перехода вследствие пластической деформации. Это позволяет обнаруживать пластические течения ледяных объектов методами дистанционного микроволнового зондирования. Это можно объяснить в рамках теории пластического течения, разработанной в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН. Теория предсказывает возникновение автоволн пластичности с характерными масштабами 0.5–2 см. Автоволны представляют собой чередование пассивных зон, где деформации пренебрежимо малы, и активных зон с развитой пластической деформацией. Разные коэффициенты преломления двух состояний льда, соответствующих двум видам зон, приводят к возникновению дифракционных решеток.

Для подтверждения теории автоволн был проведен эксперимент по микроволновой радиометрии ледяного покрова ультрапресного и соленого озер. Было показано, что эффект возникает только для пресноводных льдов, тогда как для соленых льдов деформации льда приводят к скольжению кристаллов по жидким прослойкам. Существование автоволн было подтверждено и прямыми изменениями деформации при помощи датчик с базой 1.5 см. Автоволны проявляются в виде вариаций деформации с периодом около 9 минут.

Был также проведен эксперимент по радиопросвечиванию ледяных покровов пресных водоемов. Передатчик излучал волну круговой поляризации на частоте 13.4 ГГц. Приемник принимал излучение на 12 линейных поляризациях. Передатчик и приемник были разнесены на 40 м и расположены на глубине 0.5 м. Был обнаружен максимум пропускания, связанный с экстремумом градиента температуры. Сравнение интенсивностей сигнала на двух ортогональных поляризациях выявило интерференционную картину, характерную для появления добавочных, или «новых» электромагнитных волн Гинзбурга–Пекара, являющиеся признаком нелинейности среды.

При измерениях в соленом льду было обнаружено высокое затухание и дихроизм, т.е. зависимость потерь от поляризации. Искажения поляризационных диаграмм. Исследование пресного льда при температуре, близкой к  $0^{\circ}\text{C}$  выявили искажения поляризационных диаграмм, меняющиеся во времени, что предположительно является следствием наличия автоволн.

Были исследованы аномалии радиофизических свойств воды при температурах от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $+4^{\circ}\text{C}$ . Для этого использовалась увлажненная дисперсная среда, криогель. На частотах 9 и 11 ГГц обнаружен излом фазы проходящего сигнала при  $+4^{\circ}\text{C}$ . Это противоречит стандартным моделям диэлектрической проницаемости воды. Возможное объяснение состоит во взаимодействии поверхностного слоя воды с микропорами, приводящим к возникновению сегнетоэлектрических свойств. Это указывает на необходимость дальнейших исследований.

Пятая глава посвящена исследованию кристаллической модификации льда, называемой лед 0, особенностям аморфного льда, который образуется при пластических деформациях кристаллического гексагонального льда Ih, и их проявлениям в естественных и лабораторных условиях.

Лед 0 был предсказан теоретически на основе компьютерного моделирования свойств переохлажденной метастабильной воды при температурах ниже  $-23^{\circ}\text{C}$ . Лед 0 предшествует образованию льда Ih или Ic и является сегнетоэлектриком. Его экспериментальное обнаружение было затруднено из-за быстрой кристаллизации объемной переохлажденной воды.

Диссертант использует новую методику поиска льда 0, основанной на использовании материалов с нанопорами диаметром 2–10 нм, в которых вода может переохлаждаться до температур около  $-80^{\circ}\text{C}$  и ниже. Методика идентификации льда 0 использует его уникальное свойство: будучи сегнетоэлектриком, при фазовом переходе он резко меняет электрические параметры, такие как коэффициент отражения от границы воздух–среда. Эта методика обладает преимуществом по сравнению с прямыми структурными наблюдениями, такими как рентгеновскую спектроскопию, нейтронографию и рамановское рассеяние (рентген и т.п.), поскольку вода находится в пористом материале в малой концентрации. Измерения коэффициента отражения и проходящей мощности выполнялись в микроволновом диапазоне на частотах 12,4 ГГц и 94 ГГц. Это должно было помочь идентифицировать тонкий слой с аномально высокой проводимостью на границе раздела льда 0 и диэлектрика. Измерения диэлектрических потерь выполнялись в низкочастотном диапазоне 120 Гц – 100 кГц. Резкие изменения потерь указывают на перестройку электрической доменной структуры, характерной для сегнетоэлектриков. Дополнительно для идентификации сегнетоэлектрической фазы использовались измерения электрических шумов, возникающих в сегнетоэлектриках вследствие эффекта Баркгаузена, состоящего в перестройке доменов. Измерения позволили зафиксировать аномалии вблизи температуры  $-23^{\circ}\text{C}$ , подтверждающие образования льда 0.

Диссертант предлагает новое объяснение свечения серебристых облаков. Оно состоит в конденсации льда 0 на поверхности диэлектрических наночастиц. Анизотропия их формы приводит к росту рассеяния падающего излучения, в частности, в микроволновом диапазоне. Эффект связан с возникновением поверхностных электромагнитных мод, для которых экстремум поглощения и рассеяния достигается на частоте Фрелиха. Эта частота убывает с ростом размера частицы. Переходный слой между сегнетоэлектрическим льдом 0 и диэлектрической частицей обладает высокой электропроводностью и плазменной ча-

стотой. Ниже плазменной частоты возникает сильное рассеяние. Так, для плазменной частоты в длинноволновой области ИК спектра рассеяние будет наблюдаться только в радиоволновом диапазоне, но не в видимом диапазоне, что согласуется с наблюдениями. Для подтверждения этой модели рассеяния были проведены эксперименты со сверхтонкими пленками льда 0 на диэлектрических подложках. Измеренная зависимость проходящей мощности лазерного излучения с длиной волны 0,52 мкм через пластинку из кварцевого стекла от температуры в цикле охлаждение-нагревание демонстрирует гистерезис с сильным пиком на ветви, соответствующей нагреванию, при температуре  $-23^{\circ}\text{C}$ . Аналогичные результаты были получены для ИК-диапазона.

Были проведены радиометрические измерения рассеяния излучения серебристыми облаками на частотах 20...125 ГГц. Во время появления серебристых облаков был зафиксирован близкий рост радиояркостной температуры на всех частотах, составлявший от 4–6 К, иногда достигавший 25 К). Это согласуется с моделью плазмонного резонанса на проводящих наночастицах.

Были проведены исследования по обнаружению аморфного льда. Диссертант предполагает, что он возникает при пластической деформации льда Ih, в частности под действием градиентов температуры и давления. В экспериментальном исследовании использовались блоки свежезамерзшего льда в волноводах и резонаторах. Мощность излучения на частоте 32 ГГц, проходящая через лед в волноводе, имеет экстремумы, совпадающие с быстрыми изменениями температуры. Это объясняется тем, что свежобразованный лед содержит аморфную фазу, возникающую из-за внутренних напряжений при замерзании. Аморфный лед имеет меньшие диэлектрические потери, чем кристаллический, так как в нем разрушена регулярная сетка водородных связей и меньше дефектов. Со временем аморфная фаза переходит в кристаллическую. Аморфное состояние является промежуточным между кристаллом и жидкостью.

Для ряда регионов Северного полушария, где зимние температуры достигают значений около  $-50^{\circ}\text{C}$ , актуальной является задача изучения радиофизических характеристик тканей деревьев при низких температурах. Эти характеристики определяются пористой структурой биологических тканей. Были проведены исследования прохождения сигнала через ветки и хвою сосны при циклическом замораживании-оттаивании. Для этого проводились натурные измерения на частоте 5,2 ГГц и лабораторные измерения на частоте 34 ГГц. В результате был обнаружен гистерезис потерь. Для древесины веток потери были выше на этапе нагревания. Это объясняется тем, что древесина имеет вытянутые наноразмерные поры, благоприятные для образования льда 0.

Были проведены исследования неорганических криогелей. Были также найдены аномалии прохождения и отражения сигнала, гистерезис и скачки в районе температур  $-45...-65^{\circ}\text{C}$ . Это связывается с прохождением через линию Видома при температуре  $-45^{\circ}\text{C}$ , где флуктуации свойств воды максимальны.

Эти результаты имеют важные практические применения. Аномальный интервал температур воды от  $-70$  до  $+4^{\circ}\text{C}$  близок к диапазону температур в биосфере Земли. Холодная вода в порах горных пород, почв, строительных материалов и биологических тканей часто обладает свойствами, близкими к объемной, что существенно для гидрологии. Существование льда 0 имеет ряд практических следствий. В атмосферная химия следует учитывать его влияние на разрушение озона. Для биологии важна связь температуры гибели клеток  $-45^{\circ}\text{C}$  с фазовыми переходами и линией Видома. Для геофизиологии важно усиление процессов выщелачивания и криохимических реакций в мерзлых породах за

счет новых границ раздела фаз. В строительстве необходимо учитывать электрокоррозию металлов при контакте с сегнетоэлектрическим льдом 0. Важную роль во всех этих сферах могут играть радиофизические методы исследования с их высокой чувствительностью к образованию льда 0.

Шестая глава подытоживает направления радиофизических исследований холодной воды. Понимание фазовых переходов и структурных изменений в воде на молекулярном уровне открывает новые возможности для совершенствования спутниковой гидрологии, гляциологии и зондирования атмосферы.

Шкала температур фазовых переходов и аномалий воды включает точки: 1)  $+4^{\circ}\text{C}$  – ниже этой температуры плотность воды убывает. 2)  $0^{\circ}\text{C}$  – точка замерзания. Она используется в дистанционном зондировании: льда резко меняет затухание, отражение и рассеяние электромагнитных волн. 3)  $-23^{\circ}\text{C}$  – точка образования метастабильного сегнетоэлектрического льда 0, существует до  $-120^{\circ}\text{C}$ . Его образованием можно объяснить свечение серебристых облаков. 4)  $-45^{\circ}\text{C}$  – линия Видома. При этой температуре в соленом льду при высоком давлении может наблюдаться взрывная неустойчивость. 5)  $-70^{\circ}\text{C}$  – нижняя граница аномалий холодной воды. Изучение свойств воды при этих температурах, характерных для Антарктиды, важно для понимания устойчивости ледяных щитов и изменения электрофизических свойств мерзлых пород в условиях климатических изменений. Необходимо установить связи современных теоретических положений о структуре холодной воды в применении к наблюдениям природных объектов. Так, атомная теория воды, основанная на концепции ядерных спинов водорода, предсказывает точки шкалы фазовых переходов и аномалий, некоторые точно, некоторые достаточно близко. Ряд направлений связаны с исследованием ледников. Изучаются излучаемые ими акустические сигналы на частоте около 5 Гц и электромагнитные сигналы на частотах 30–800 МГц. Диссертант указывает на возможность мониторинга подвижек льда с использованием спутниковых радаров с синтезированной апертурой. Зоны пластического течения льда выглядят на радиоизображениях более яркими. Имеется возможность регистрации сейсмических волны по изменениям поляризации диаграммы ледяного покрова, связанной с его деформацией.

Диссертант указывает на важность развития радиометрических методов исследования, позволяющих детектировать процессы, связанные со льдом 0. Необходимо уточнение диэлектрических свойств холодной воды в нанопорах вблизи линии Видома. В центре внимания должен оставаться объект «холодная вода» как система, состоящая из взаимодействующих кластеров высокой и низкой плотности, без разделения свойств границей в  $0^{\circ}\text{C}$ .

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Представленная диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями, написана грамотно и ясно, подтверждает высокий уровень научной квалификации диссертанта, его глубокие знания актуальных задач физики и способность получать значимые научные результаты.

Достоверность представленных результатов обеспечивается их согласием с современными теоретическим представлениям о воде, достаточным объемом и воспроизводимостью лабораторных и полевых экспериментальных данных, применением современных методов анализа, использованием проверенных методик и сертифицированного оборудования для измерений радиофизических характеристик вещества, согласием с результатами других исследователей.

Новизна диссертационной работы заключается в том, что выделен объект исследования «холодная вода»; проведены исследования его комплексной диэлектрической проницаемости для температур от  $-70$  до  $+4$  °С и частот  $1-300$  ГГц; впервые экспериментально обнаружена метастабильная кристаллическая модификация льда – лед 0; с использованием новой методики микроволновой спектроскопии обнаружены автоволны пластического течения во льду при механических воздействиях на среду; по вариациям экстинкции продемонстрировано существование второй критической точки воды на линии Видома при температуре  $-45$  °С и давлении  $0,1$  МПа.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что предложен общий подход к рассмотрению радиофизических характеристик холодной воды; уточнена теория электродинамической релаксации Дебая для холодной воды на основе представлений о ее структуре, состоящей из кластеров низкой и высокой плотности; рассмотрена линия Видома в формировании аномалий радиофизических характеристик дисперсных сред; рассмотрена электромагнитная модель ледяных частиц, содержащих сегнетоэлектрический лед 0, и показано возникновение в них резонанса плазмонных мод, влияющего на экстинкцию электромагнитного излучения; показано, что медленные волны пластического течения в пресном льду, которые создают дифракционные решетки, наиболее сильно рассеивающие микроволновое излучение вблизи  $13$  ГГц.

Практическая значимость работы состоит в том, что ее результаты создают базу для расчетов микроволновых характеристик различных объектов, содержащих холодную воду, что важно, в частности для задач дистанционного зондирования природных сред и объектов.

При оценке диссертационной работы следует отметить некоторые недостатки:

1) Неудачна формулировка «во всем интервале температур и частот ее существования».

2) Опечатка в фамилии Дюпюи, в формуле (1.1) не расшифрованы обозначения  $\mu$ ,  $\mu_j$ . Можно было ограничиться определением  $G$  как фактора Кирквуда.

3) При обсуждении подавления эффектов пространственной дисперсии путем осреднения по достаточно большому объему следовало привести оценку эффекта и необходимую величину объема для достижения заданной точности.

4) На рис. 5.1(а) должно быть стрелками указано направление изменения температуры, однако стрелок там не видно. На рис. 5.2 стрелки есть, но следовало объяснить заметные проявления гистерезиса диэлектрических потерь на частоте  $10$  кГц для температур, превышающих  $-23$ °С.

5) Объем работы можно было бы сократить примерно на 30%.

В целом, несмотря на сделанные замечания, диссертация Гурулева А.А. представляет собой законченное исследование, научная значимость и оригинальность которого не вызывают сомнения. Работа выполнена на высоком профессиональном уровне. Автор демонстрирует высокую квалификацию при анализе экспериментальных данных. Сделанные в диссертации выводы являются обоснованными и имеют высокую практическую значимость.

Автореферат работы Гурулева А.А. соответствует содержанию, достаточно полно отражает структуру диссертации и даёт возможность сделать заключение о ее высоком научном уровне. Диссертационная работа в целом представляет собой законченный научный труд, основные положения диссертации в достаточной мере нашли отражение в ... научных работах, опубликованных в авторитетных научных изданиях, включенных в пе-

речень ВАК и/или индексируемых Web of Science и Scopus. Работа прошла апробацию на ведущих российских и международных конференциях. Таким образом, диссертация соответствует пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемых к диссертационным работам на соискание учёной степени доктора физико-математических наук.

Из вышеизложенного следует, что представленная к защите диссертационная работа Гурулева А.А. полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым на соискание учёной степени доктора наук, а сам Гурулев А.А. заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 — «Радиофизика».

Официальный оппонент,  
заведующий лабораторией турбулентности  
и распространения волн  
Института физики атмосферы им. А.М. Обухова  
Российской Академии Наук (ИФА РАН)  
доктор физико-математических наук,

 Горбунов Михаил Евгеньевич

Специальность 01.04.03 – радиофизика  
Адрес: 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3  
Телефон: +7 (495) 951-95-74  
E-mail: [gorbunov@ifaran.ru](mailto:gorbunov@ifaran.ru)

Подпись Горбунова М.Е. заверяю.  
Ученый секретарь  
Института физики атмосферы им. А.М. Обухова  
Российской Академии Наук  
кандидат физико-математических наук



Киселева Юлия Викторовна

17.02.2026