

УТВЕРЖДАЮ

Директор
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт космических исследований
Российской академии наук
доктор физико-математических наук,
академик РАН



Петрукович А.А.

февраль 2026 г.

ОТЗЫВ

ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

НА ДИССЕРТАЦИОННУЮ РАБОТУ
ГУРУЛЕВА АЛЕКСАНДРА АЛЕКСАНДРОВИЧА
«АНОМАЛЬНЫЕ РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗЛИЧНЫХ
ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ ВОДЫ»,
ПРЕДСТАВЛЕННУЮ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК
ПО НАУЧНОЙ СПЕЦИАЛЬНОСТИ 1.3.4. РАДИОФИЗИКА

Диссертационная работа Гурулева Александра Александровича «Аномальные радиофизические характеристики различных фазовых состояний воды» посвящена развитию общего подхода к изучению электромагнитных характеристик объемной воды и льда на основе современных физико-химических представлений, а также совершенствованию радиотепловых (пассивных) и радиолокационных (активных) методов дистанционного зондирования гидросферы.

Актуальность диссертационной работы

В последние десятилетия была разработана новая физическая модель объемной воды, согласно которой ее структура определяется существованием двух видов кластеров – низкой плотности (LDL – low density liquid) и высокой плотности (HDL – high density liquid). Эти кластеры взаимодействуют между собой на пикосекундных временах и определяют все термодинамические аномалии воды. В настоящее время известно 75 таких аномалий. Наиболее ярким из них посвящено представленное диссертационное исследование. Они находятся в температурном интервале от $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$, где плотность воды понижается с уменьшением температуры.

В начале XXI века были достигнуты большие успехи в теоретическом исследовании характеристик воды с использованием компьютерных методов моделирования. Например, была открыта вторая критическая точка, существующая вблизи $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ при давлении около 100 МПа. Со второй критической точкой в области пространства «температура–давление» связана линия Видома (Widom line), определяющая область повышенных флуктуаций энтропии и плотности. В частности, вблизи линии Видома при нормальном атмосферном давлении обнаружена особенность сингулярного характера с резким возрастанием ряда термодинамических величин: теплоемкости при постоянном давлении, коэффициента объемного расширения, изотермической сжимаемости.

Необходимо отметить практически **полное отсутствие работ по исследованию электромагнитных особенностей** объемной воды в области ее термодинамических аномалий, где можно ожидать микроволновые проявления, которые важны для развития интроскопии и дистанционного зондирования геосфер Земли, а также холодных объектов в космосе. Важно, что полученные в работе результаты представляют междисциплинарный интерес и могут найти применение в смежных областях, например, при

изучении биосферы и в криохимии. Таким образом, тема настоящего исследования является важной и актуальной.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация А.А. Гурулева состоит из введения, шести глав, заключения, выводов и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, кратко изложено содержание работы.

Первая глава посвящена обзору физико-химических характеристик «холодной» воды и их использования в гидрологических исследованиях.

В разделе 1.1 рассмотрены характеристики переохлажденной воды и выделен особый объект гидрологии — «холодная» вода (объемная вода, существующая в интервале температур $-70^{\circ}\text{C} \dots +4^{\circ}\text{C}$ при нормальном атмосферном давлении).

В разделе 1.2 описывается холодная вода в природных и искусственных средах.

В разделе 1.3 рассмотрены известные фазовые переходы холодной воды.

Раздел 1.4 посвящен микроволновым, а раздел 1.5 — химическим особенностям холодной воды.

В разделе 1.6 рассмотрены направления в развитии гидрологии, а в разделе 1.7 сделаны выводы о необходимости выделения особого объекта гидросферы — холодной воды. Показана необходимость более глубокого исследования этого объекта. Поставлены конкретные задачи исследования. Главные из них: исследовать диэлектрические свойства холодной воды, близкой к метастабильному состоянию, в диапазоне частот от 1 до 300 ГГц; изучить фазовые переходы холодной воды; разработать методики ее исследования; определить особенности микроволновых характеристик переохлажденной воды вблизи температуры -45°C и нормального

атмосферного давления (линия Видома); сформулировать новые задачи спутниковой гидрологии на основе исследования микроволновых характеристик холодной воды и предложить их технические реализации.

Глава 2 посвящена развитию методик экспериментального исследования.

В разделе 2.1 рассмотрены методики получения переохлажденной воды. В разделе 2.2 выполнен ряд экспериментов по разработке методик измерения диэлектрической проницаемости холодной воды, коэффициентов затухания в широком интервале температур, обнаружению фазовых переходов по микроволновым измерениям. В разделе 2.3 представлены методики радиометрических и радиолокационных измерений снежных и ледяных покровов, а также мезосферных «серебристых» облаков.

Глава 3 посвящена результатам измерений электромагнитных параметров холодной воды, увлажненных дисперсных сред и льда.

Раздел 3.1 представляет результаты исследований диэлектрических свойств холодной воды на основе двухчастотной модели Дебая и ее усовершенствования по данным измерений на двух резонансных частотах с использованием многомодового резонатора. Получены более точные, чем в других исследованиях, значения комплексной диэлектрической проницаемости объекта исследования для частот от 1 до 300 ГГц и температурном интервале $-70^{\circ}\text{C} \dots +4^{\circ}\text{C}$.

В разделах 3.2 – 3.4 выполнены измерения электродинамических характеристик различных увлажненных дисперсных сред (силикагель, соленые льды, пеностекло) при отрицательных температурах.

Глава 4. В главе рассмотрен вопрос о спектральных особенностях взаимодействия микроволнового излучения с жидкими неоднородностями, находящимися в объеме льда.

В разделе 4.1 описаны исследования отражения излучения от блоков льда на различных частотах. Была установлена выраженная селективность

флуктуаций отраженной мощности излучения при нагревании блока до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ вблизи 13 ГГц. Аналогичные результаты представлены в разделе 4.2 для случая природного ледяного покрова.

Полученные в разделах 4.3 и 4.4 данные позволили сделать вывод о существовании в пресном льду волн пластического течения, которые имеют определенный пространственный период и создают в среде хаотически распределенные дифракционные решетки. Аналогичные волны были обнаружены ранее в материаловедении для металлических сред, состоящих из кристаллов.

В разделе 4.5 представлены исследования фазы коэффициента отражения при прохождении излучения через дисперсную среду, состоящую из поливинилового спирта в смеси с песком при температурах от $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+14\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обнаружено заметное изменение угла наклона графика зависимости фазы проходящего излучения при переходе через $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ на частотах 9 ГГц и 11 ГГц. Эта особенность подтверждает выделение особого электромагнитного состояния воды с границей при температуре $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (т.е. границы особого объекта — холодной воды).

Глава 5 посвящена исследованию фазовых переходов холодной воды.

В разделе 5.1 представлены данные об обнаружении новой метастабильной модификации льда — «льда 0». Эта модификация льда была впервые исследована в настоящей работе при осаждении водяного пара на охлажденные подложки из различных диэлектриков (стекла, слюды, льда Ih) при температурах ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В разделе 5.2 обсуждается гипотеза о физическом механизме свечения мезосферных серебристых облаков при осаждении на наноразмерные частицы пыли «льда 0», обладающего сегнетоэлектрическими свойствами. Образующиеся ледяные частицы нанометровых размеров создают повышенное рассеяние теплового излучения Солнца.

В разделе 5.3 приводятся исследования проявлений аморфного льда, а в разделе 5.4 — фазового перехода в дисперсных средах.

В разделе 5.5 показано значение представленных результатов по фазовому переходу для «льда 0» и обнаружению резонанса поверхностных плазмонных мод в облачных природных образованиях.

Глава 6. В этой главе рассмотрены электромагнитные характеристики холодной воды и новые возможные направления исследований в дистанционном зондировании. Приводится шкала температур фазовых переходов и особых температур объемной жидкой воды в области существования холодной воды. В выделенной области возможно обнаружение новых, ранее неизвестных, аномалий и постановка на этой основе новых задач дистанционного зондирования, включая исследование объектов из ледяных структур в космосе.

В **Заключении** сформулированы результаты диссертационной работы и обоснования основных защищаемых положений.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации

Представленные в диссертации результаты были получены автором лично или при его непосредственном и руководящем участии. А.А. Гурулев выполнил теоретическую постановку задач и их экспериментальную разработку, осуществлял руководство всеми полевыми зимними работами, участвовал в разработке и изготовлении измерительных микроволновых приборов и установок. Им получены основные результаты при участии в проведении, как экспериментов, так и расчетов, а также в формулировке выводов и публикации научных статей.

Результаты диссертационного исследования представлены в 82 работах, которые в основном написаны в соавторстве с сотрудниками Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН. Среди указанных работ 81 статья опубликована в изданиях из перечня ВАК. Среди них 33 статьи проиндексированы в системе WoS и 48 — в Scopus. При подготовке

публикаций автор участвовал в определении цели исследований, анализе результатов и формулировке выводов.

Научная новизна, теоретическая, практическая значимость и ценность результатов исследования

1. Предложен общий подход к рассмотрению радиофизических характеристик воды в интервале температур $-70\text{ }^{\circ}\text{C}\dots+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и впервые введено физически обоснованное понятие «холодная» вода.

Новизна этого теоретического вывода связана с выделением аномалий электромагнитных характеристик воды в области уменьшения ее плотности при понижении температуры.

2. Уточнена теория электромагнитной релаксации Дебая объемной воды и формула для расчета ее диэлектрической проницаемости на основе современных представлений о структуре в виде динамических кластеров воды LDL (низкой плотности) и HDL (высокой плотности).

Новизна и практическая значимость результатов заключается в том, что впервые на основе этого уточнения были измерены диэлектрические характеристики глубоко переохлажденной воды ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ для частот от 1 ГГц до 300 ГГц и достигнута точность в несколько раз более высокая, чем в ранее известных работах.

3. Впервые получены экспериментальные указания на существование метастабильного сегнетоэлектрического «льда 0», образующегося из холодной воды при температурах ниже -23 ° . При микроволновых измерениях обнаружены аномалии воды вблизи $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 0,1 МПа, что подтвердило существование линии Видома и, следовательно, существование второй критической точки.

Новизна и важная практическая значимость этих результатов связывается с обнаружением в природной среде структур с плазмонным резонансом, что позволило предложить метод изучения

сегнетоэлектрических льдов в холодных облаках и дисперсных средах при инфракрасных (ИК) и микроволновых измерениях.

4. Установлено особое динамическое состояние пресного поликристаллического льда — образование автоволн пластического течения (при ползучести льда), которое аналогично недавно открытому явлению автоволн в кристаллах металлов. Автоволны имеют длину порядка 1 см и обнаруживаются в пресных льдах вблизи 13 ГГц.

Автоволны течения и дифракция микроволнового излучения на них обнаружены для льда впервые и открывают возможность разработки практических методов исследования течения льда при бесконтактных измерениях массивных ледяных образований.

5. Новые методики бесконтактных измерений объектов криосферы и гидросферы особого гидрологического объекта («холодная» вода) позволяют более эффективно решать задачи дистанционного зондирования в Арктике и Субарктике в условиях климатических изменений.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность результатов определяется строгостью и обоснованностью теоретических выкладок, опирающихся на современные научные данные о структуре воды, а также длительными (около двадцати лет) лабораторными и натурными радиометрическими и радиолокационными измерениями, в микроволновом, ИК и видимом диапазонах. Основные результаты опубликованы в 82 статьях в ведущих рецензируемых журналах из списка ВАК и белого списка. Представлены тезисы докладов на международных и российских конференциях, а также получен патент Российской Федерации на изобретение.

Замечания по диссертационной работе

1. Практически на всех графиках Главы 3, касающейся экспериментальных исследований холодной воды и водосодержащих сред

при низких температурах, отсутствует какая-либо индикация погрешностей измерений. Несмотря на то, что основные оценки погрешностей приведены в тексте, это затрудняет анализ наблюдаемых отличий и сходства новых экспериментальных данных с известными ранее и полученными из теоретических расчетов.

2. В диссертации указано, что проведенные экспериментальные исследования позволили установить значения параметров двухчастотной модели Дебая в интервале температур от минус 60 °С до 0 °С. Для дополнительного подтверждения состоятельности примененной экспериментальной методики и получаемых аппроксимаций было бы желательно расширить исследования на область положительных температур (например, от 0 °С до плюс 40 °С), в которой диэлектрические свойства воды изучены существенно лучше.

3. В Главе 4 при анализе серии радиолокационных изображений озера Шакшинское цветовые шкалы коэффициента обратного рассеяния на рис. 4.12 не содержат абсолютных значений, а нормированы на минимум и максимум. При таком подходе цветовые контрасты крайне чувствительны к наличию выбросов (например, случайному возникновению отдельных экстремально низких значений на среднем изображении). Если этот фактор действительно сказался на картине измерений 22 января 2017 года, то гипотеза о наличии автоволн не требуется, а серию в целом можно интерпретировать как результат относительного роста рассеивающих свойств прибрежной кромки льда по мере увеличения возраста ледяного покрова.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации А.А. Гурулева. Она представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком теоретическом и экспериментальном уровне. Докторская диссертация имеет значительную научную и практическую значимость.

Заключение по содержанию диссертации

Из вышеизложенного следует, что в диссертационной работе Гурулева Александра Александровича представлены новые научные результаты в рамках актуальной и современной темы исследования электромагнитных характеристик воды, находящейся в условиях глубокого переохлаждения. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, обладает внутренним единством, грамотным представлением экспериментальных исследований, а также анализом полученных результатов и отвечает всем квалификационным требованиям пп. 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям. Автореферат диссертации соответствует требованиям п. 25 «Положение о присуждении степеней». Текст автореферата полностью отражает содержание диссертации, полученные результаты и выводы.

Тематика исследования соответствует специальности 1.3.4 – «Радиофизика», а ее автор, Гурулев Александр Александрович, заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на семинаре отдела «Исследования Земли из космоса» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт космических исследований Российской академии наук (протокол № 2026-02 от 10 февраля 2026 г.).

Отзыв составили

Доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник, заведующий отделом «Исследования Земли из космоса» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт космических исследований Российской академии наук
Телефон: +7 (495) 333-43-78

Эл. почта: d.m.ermakov@cosmos.ru



Ермаков Дмитрий Михайлович

Кандидат физико-математических наук
ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией «Спутникового мониторинга криосферы Земли» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт космических исследований Российской академии наук
Телефон: +7 (495) 333-42-56
Эл. почта: vasvlatikh@yandex.ru



Тихонов Василий Владимирович

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)
Адрес: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32
Телефон/факс: +7 (495) 333-52-12
Адрес электронной почты: iki@cosmos.ru

Подписи сотрудников Ермакова Дмитрия Михайловича и Тихонова Василия Владимировича заверяю.

Учёный секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)
кандидат физико-математический наук



Садовский Андрей Михайлович

« 12 » февраля 2026 г.