

На правах рукописи



ГУРУЛЕВ Александр Александрович

Аномальные радиофизические характеристики различных фазовых состояний воды

Специальность 1.3.4. Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Чита – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук (ИПРЭК СО РАН), в лаборатории геофизики криогенеза

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

Официальные оппоненты: **Гайкович Константин Павлович,**
доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела физики полупроводников Института физики микроструктур РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Горбунов Михаил Евгеньевич,
доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией турбулентности и распространения волн, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

Меньшиков Леонид Иеронимович,
доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", подразделение – Курчатовский комплекс промышленной безопасности.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук

Защита состоится «13» марта 2026 года в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте: <http://www.cplire.ru/rus/dissertations/Gurulev/index.html> ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Автореферат разослан «___» _____ 202_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук
профессор РАН



Кузьмин
Лев Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Развитие радиофизических методов исследования природных объектов невозможно без детального исследования электромагнитных характеристик вещества. Это, в частности, относится и к одной из наиболее важных составляющих многих природных сред – воде, в ее жидком и твердом состояниях. Широкое распространение воды на Земле, а также значимость этого вещества для биосферы определяют актуальность исследования ее радиофизических характеристик. Особо интересно то, что в последние два десятилетия была разработана новая физическая модель воды, основанная на ее микроскопических особенностях. По современным представлениям структура воды определяется существованием двух видов кластеров: низкой и высокой плотности (LDL – low density liquid и HDL – high density liquid), концентрация которых зависит от температуры. Кластеры этих двух видов, взаимодействуя друг с другом на пикосекундных временах, определяют все аномалии воды. Одна из таких аномалий – вторая критическая точка, существующая вблизи температуры $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 100 МПа. Со второй критической точкой связана линия Видома (Widom-line). Эта линия – область в фазовом пространстве давление-температура, в которой наблюдается рост флуктуации энтропии и плотности воды, что приводит к необычным физико-химическим характеристикам у переохлажденной воды. Например, при нормальном атмосферном давлении и температуре $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ (точка на линии Видома) была обнаружена особенность сингулярного характера. При приближении к этой температуре, по данным измерений, резко возрастают теплоемкость при постоянном давлении, коэффициент объемного расширения и изотермическая сжимаемость. Следует отметить, что можно ожидать и необычные микроволновые характеристики воды в области линии Видома и в интервале температур $+4\ldots-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. В указанной области температур также наблюдается аномалия плотности воды. Вода в данном интервале температур в настоящей работе названа «холодной» водой.

В настоящее время весьма актуальной является задача разработки единого подхода к исследованию электромагнитных характеристик воды, льда и увлажненных дисперсных сред для анализа радиотепловых и радиолокационных данных, используемых при изучении гидросферы, криосферы, атмосферы и биосферы.

Степень разработанности темы исследования

Начальный этап исследований электромагнитных характеристик воды и льда в микроволновом диапазоне относится к 40-м годам прошлого

столетия^[1,2,3]. Данные исследования приобрели большую актуальность при развитии дистанционных методов измерений^[4], с первыми микроволновыми измерениями земной поверхности и атмосферы на ИСЗ «Космос-243», «Космос-284»^[5,6]. В дальнейшем начались более детальные исследования, прежде всего комплексной диэлектрической проницаемости воды и льда в широком диапазоне частот (Александров Д.В., Бобров П.П., Митник Л.М., Романов А.Н., Садовский И.Н., Шарков Е.А., Davidson D.W., Cole R.H., Meissner Th., Wentz F.J., Stogrin A., Bull H.T., Rubayi K., Iravanchy S.). Были выполнены исследования и переохлажденной воды до температур $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Nilsson A., Schreck S., Perakis F., Анисимов М.А., Кутуза Б.Г., Stahlberg R., Yoo H., Matsumoto M., Yagasaki T., Tanaka H., Palmer J.C., Poole Peter H., Sciortino F., Debenedetti P.G.), а также проведены эксперименты по изучению свойств пресных и соленых льдов^[7,8]. Для интерпретации радиофизических свойств воды, в основном, использовалась модель диэлектрической проницаемости Дебая, причем была показана более высокая точность модели с двумя частотами релаксации^[9]. В настоящее время из обобщения экспериментальных данных предложена более широкополосная модель (до терагерцевых частот) для трех частот релаксации и интервала температур $-5...95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[10].

Необходимо отметить, что большую сложность для исследователей представили измерения диэлектрической проницаемости глубоко переохлажденной воды, что определяется сложностью получения макрообъемов этого вещества. В связи с этим область температур $-37...-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зарубежной научной литературе называют «no man's land» что можно перевести как «недоступная область» (Cerveny S., Mallamace F.,

¹ Collie C.H., Ritson D.M., Hasted J.B. Dielectric properties of water // Transactions of the Faraday Society / 1946. Vol. 42. P. A129.

² Hasted J.B., Ritson D.M., Collie C.H. Dielectric Properties of Aqueous Ionic Solutions. Parts I and II. // The Journal of Chemical Physics. 1948. 16(1). P. 1–21.

³ Haggis G.H., Hasted J.B., Buchanan T.J. The Dielectric Properties of Water in Solutions // The Journal of Chemical Physics. 1952. 20(9). P. 1452–1465.

⁴ Dicke R.H. The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies // Review of Scientific Instruments. 1946. Vol. 17, Iss. 7. P. 268–275.

⁵ Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 187с.

⁶ Гурвич А.С., Кутуза Б.Г. "Космос-243" - первый в мире эксперимент по исследованию Земли из космоса радиофизическими методами // Исследование Земли из космоса. 2010. № 2. С. 14-25.

⁷ Fujita S., Matsuoka T. et al. A summary of the complex dielectric permittivity of ice in the megahertz range and its applications for radar sounding of polar ice sheets. In Physics of Ice Core Records. Edited by Takeo Hondoh. 2000. Hokkaido University Press. P. 185–212.

⁸ Бордонский Г.С. Диэлектрические потери пресного льда на СВЧ // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40. № 11. С. 1620-1622.

⁹ Meissner T., Wentz F.J. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations//IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2004. V. 42. № 9. P. 1836-1849.

¹⁰ Vinh N.Q., Doan L.C. et al. Correlation between macroscopic and microscopic relaxation dynamics of water: Evidence for two liquid forms // J Chem Phys. 2023. V. 158, Iss. 20. P. 204507.

Sellberg J.A.). Для данной области отсутствуют разработанные технологии получения метастабильной объемной воды и, обычно, эксперименты ограничены температурами не ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. После работ^[11], где на частоте 9,6 ГГц были выполнены измерения действительной и мнимой части относительной диэлектрической проницаемости при охлаждении эмульсии воды до $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, определенное продвижение за более чем 30 лет было сделано в работе^[12]. В этой работе для получения переохлажденной воды использованы нанопористые силикатные материалы. В них удалось охладить объемную воду до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и определить ее фактор потерь до частот $\sim 140\text{ ГГц}$. Однако отсутствие полной модели диэлектрической проницаемости глубоко переохлажденной воды и технические сложности не позволили измерить действительную часть относительной диэлектрической проницаемости.

Подход, предложенный в данной диссертационной работе, позволяет подойти к решению проблемы микроволновых измерений холодной воды и льда на основе развитых современных представлений о ее структуре на молекулярном уровне. В настоящее время теоретические исследования структуры воды существенно опережают экспериментальные, что не позволяет выбрать наиболее адекватную электродинамическую модель и, соответственно, предсказывать микроволновые характеристики холодной воды, близкой по свойствам к объемной метастабильной воде. Такая вода с аномальными физическими характеристиками (в интервале $-70\dots+4\text{ }^{\circ}\text{C}$) существует в больших количествах в пористых средах, биологических тканях, в водоемах и других многочисленных природных образованиях.

Основная цель исследования заключалась в развитии общего подхода к изучению электромагнитных свойств воды и льда на основе современных достижений в области физико-химии воды, в которых холодная вода является общим объектом, связывающим электрофизические параметры переохлажденной воды ($-70\dots 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) и воды вблизи температуры фазового перехода ($0\dots+4\text{ }^{\circ}\text{C}$). При этом вода рассматривается, как образование, состоящее из двух видов кластеров LDL и HDL, находящихся в процессе перестройки на пикосекундных временах. Такой подход позволил выбрать направление исследования радиофизических характеристик переохлажденной воды и льда для более эффективного развития радиотепловых (пассивных) и радиолокационных (активных) методов дистанционного зондирования гидросферы.

¹¹ Bertolini D., Cassettari M., Salvetti G. The dielectric relaxation time of supercooled water // J. Chem. Phys. 1982. 76(6). P. 3285-3290.

¹² Орлов А.О. Исследование микроволновых свойств переохлажденной воды в пористых средах на частотах 34 и 94 ГГц // Вестник Забайкальского государственного университета. 2016. Т. 22. № 8. С. 14-20.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- проанализировать имеющуюся в современной литературе информацию о физических, в том числе микроволновых, свойствах холодной воды и увлажненных дисперсных сред в интервале температур $-70...+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ на частотах $1...300\text{ ГГц}$;

- сформулировать единый подход и выработать конкретные направления исследований холодной воды и льда на основе современных знаний их физико-химических особенностей: изучить электромагнитные свойства объекта, в том числе в составе дисперсных сред; исследовать связи физико-химических аномалий сред с их электромагнитными характеристиками; определить реакцию электромагнитных характеристик мерзлых сред на динамические процессы (деформацию и течение сред, нагревание-охлаждение);

- исследовать микроволновые диэлектрические характеристики холодной воды, близкой по характеристикам к метастабильной объемной воде во всем интервале температур и частот ее существования, а также природных образований, ее содержащих;

- изучить фазовые переходы глубоко переохлажденной воды при температуре $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (образование льда 0) и $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура на линии Видома) и их влияние на электромагнитные характеристики сред;

- разработать методики микроволнового активного и пассивного дистанционного исследования характеристик холодной воды и объектов содержащих ее в их статическом и динамическом состояниях (по волнам пластической деформации);

- исследовать особенности параметров переохлажденной воды вблизи температуры $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и нормальном атмосферном давлении (точки на линии Видома) и возможное криохимическое превращение вещества с регистрацией при измерениях методами микроволновой спектроскопии;

- сформулировать новые задачи спутниковой гидрологии на основе результатов исследования микроволновых характеристик холодной воды.

Методология и методы исследований

Исследования базировались на представлениях о физических характеристиках воды и ее аномалиях в области температур $-70...+4\text{ }^{\circ}\text{C}$, определяемых поведением кластеров воды LDL и HDL. Микроволновые особенности холодной воды представляют особый интерес для развития радиолокации гидросферы Земли. В этой области температур можно также ожидать весьма необычные электромагнитные свойства разнообразных объектов природной среды, как для воды, находящейся в свободном состоянии, так и в поровом пространстве, а также на контактных слоях с

другими средами. Термодинамические свойства холодной воды связываются с ее фазовыми переходами, которые могут проявляться в особенностях радиофизических характеристик объектов гидросферы.

Исследования опирались на микроволновую спектроскопию, как весьма эффективный метод бесконтактных электромагнитных измерений в микроволновом диапазоне в лабораторных условиях, а также на исследования радиометрическими и радиолокационными методами при выполнении полевых работ. Были усовершенствованы методики получения холодной воды. Разработаны установки и методики для выполнения лабораторных и натурных приземных радиометрических измерений в частотном интервале 1...300 ГГц. Выполнялись также электрофизические исследования на низких частотах 10...100 кГц. В натурных условиях были исследованы динамические явления, вызванные пластической деформацией, при которой изменяются микроволновые передаточные и отражательные характеристики ледяных структур. В этом случае в объекте наблюдаются процессы самоорганизации и в его структуре образуются упорядоченные объекты, состоящие из льда и воды.

На базе развиваемого подхода впервые разработан единый метод к исследованию глубоко переохлажденной воды и льда, как особого природного объекта «холодная» вода, представляющего интерес в разнообразных задачах дистанционного зондирования гидросферы.

Объект настоящего исследования – радиофизические характеристики и фазовые состояния холодной воды при дистанционном зондировании. Исследована диэлектрическая проницаемость на частотах 1...300 ГГц, фазовые переходы воды в области $-70...+4$ °С при давлении 0,1 МПа и их связь с радиофизическими аномалиями холодной воды. Разработаны и проанализированы методики изучения микроволновых характеристик ряда объектов природной среды (облачные образования, увлажненные пористые среды, растительные покровы, природные ледяные образования, искусственные сорбенты) и поставлены новые задачи дистанционного зондирования.

Научная новизна

1. Впервые выделен физически обоснованный особый объект гидросферы – холодная вода (объемная вода при температурах $-70...+4$ °С), определяющая многие особенности электромагнитных характеристик природных образований в гидросфере.

2. Изучены электромагнитные характеристики холодной воды, близкой по своим свойствам к объемной метастабильной воде; усовершенствована двухчастотная модель Дебая диэлектрической проницаемости, основной характеристики холодной воды; получены новые данные о зависимости

действительной и мнимой части относительной диэлектрической проницаемости от частоты (1...300 ГГц) и температуры ($-70...+4$ °C); существенно уточнены данные для температур ниже -40 °C (точность значений мнимой части диэлектрической проницаемости повышена в несколько раз).

3. Предложены новые методики микроволновых измерений характеристик искусственных образцов и природных объектов, содержащих в своем составе холодную воду: измерения диэлектрических характеристик холодной воды в дисперсной среде в резонаторах повышенного размера для усреднения локальных вариаций характеристик среды; измерения микроволнового свечения мезосферных облаков; определение возможного схода горных ледников по начальным признакам течения льда методом активной локации; методика изучения состояния воды в древесной растительности при ее просвечивании в условиях переменных температур.

4. На основании предложенной в работе методики микроволновых исследований сегнетоэлектрических дисперсных сред, впервые экспериментально обнаружена, в области температур холодной воды, новая метастабильная кристаллическая модификация льда – лед 0. Лед 0, согласно теоретическим исследованиям, образуется только из переохлажденной воды при температурах ниже -23 °C^[13] и существует в многочисленных образованиях гидросферы. В экспериментах показано, что поверхностные слои льда 0 на диэлектрических частицах, в том числе из гексагонального льда Ih, обладают плазмонными свойствами из-за образования нанометровых контактных слоев с высокой электропроводностью. Плазмонные резонансы поверхностных мод создают сильное поглощение и рассеяние излучений до частот микроволнового диапазона, что может найти применение при исследовании атмосферных ледяных частиц и конденсированной воды при низких температурах. Высказана гипотеза, что данный эффект определяет свечение серебристых мезосферных облаков на частотах ниже плазменной частоты носителей заряда в контактных слоях. В экспериментах обнаружено увеличение радиояркостной температуры на 5 K при появлении серебристых облаков на частотах от 20 ГГц до 125 ГГц.

5. Открыты автоволны пластического течения во льду при механических воздействиях на среду с использованием новой методики микроволновой спектроскопии. Она основана на измерениях экстинкции вблизи частоты 13 ГГц и в полосе частот $\sim 0,5$ ГГц. Волны течения представляют собой чередование кристаллического и аморфного состояния (т.е. твердого и жидкого), что можно использовать для дистанционной регистрации

¹³. Russo J., Romano F., Tanaka Y. New metastable form of ice and its role in the homogeneous crystallization of water // Nature Materials. 2014. V. 13. N. 7. P. 733-739.

механических подвижек больших масс льда, в том числе в начальной стадии «ползучести» ледников.

6. Впервые с использованием микроволновых измерений показано существование второй критической точки воды по проявлению вариаций экстинкции на линии Видома при температуре -45°C и давлении 0,1 МПа. Микроволновое подтверждение существования линии Видома указывает на существование второй критической точки воды, где имеет место предсказанное в физико-химии сосуществование двух видов воды LDL – низкой и HDL – высокой плотности. Микроволновая методика измерений может быть использована для уточнения положения второй критической точки воды в фазовом пространстве давление-температура.

7. Сформулированы новые задачи дистанционного зондирования на основе особенностей характеристик холодной воды: необходимость исследования плазмонных эффектов, существенно изменяющих электромагнитные характеристики дисперсных сред; определение начальной стадии (подготовки) схода горных ледников по возникновению медленных волн пластической деформации, наиболее сильно рассеивающих микроволновое излучение вблизи 13 ГГц; подход к измерению диэлектрической проницаемости холодной воды при глубоком переохлаждении в терагерцовом диапазоне и обоснование необходимости развития исследований микроволновых аномалий, радиометрии и спектроскопии дисперсных сред, содержащих холодную воду.

8. Экспериментально исследована возможность ускорения криохимических реакций с участием воды вблизи -45°C и ее регистрация по микроволновой экстинкции на примере возникновения вариаций проходящей мощности излучения в водных растворах йодистого калия, перекиси водорода и других веществ, помещенных в пористую среду.

Предмет защиты. Совокупность полученных результатов можно квалифицировать как научное достижение, связанное с решением **крупной научной задачи**, направленной на дистанционные радиофизические исследования гидросферы и связанной с ней другими оболочками Земли: криосферой, атмосферой, биосферой и литосферой – для восстановления параметров объектов, содержащих холодную воду. В настоящее время отсутствует единый подход к решению данной проблемы, начиная с неполных данных о значениях диэлектрической проницаемости глубоко переохлажденной воды в микроволновом диапазоне. Выполненное исследование представляет собой существенный вклад в мировую науку как в области теории, а также в области получения новых сведений о радиофизических характеристиках гидрологических объектов, так и для практики развития дистанционных измерений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Холодная объемная вода обладает не только аномальными термодинамическими, но также и особыми электрофизическими, в том числе микроволновыми свойствами, что обосновывает ее выделение в особый объект гидросферы. Исследованные микроволновые характеристики холодной воды, в том числе находящейся в дисперсных средах, позволяют сформулировать новые задачи и осуществить дистанционное измерение параметров различных объектов земных оболочек, содержащих воду, при температурах $-70...+4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Уточненная электродинамическая модель Дебая комплексной относительной диэлектрической проницаемости холодной воды, основанная на современных представлениях о микроскопическом строении воды в виде кластеров легкой (LDL – low density liquid) и тяжелой (HDL – high density liquid) воды, охватывает области температур до значения $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ в диапазоне $1...300\text{ ГГц}$ с двумя частотами релаксации. Модель и усовершенствованная методика резонаторных измерений с использованием высших типов колебаний резонатора позволили повысить точность значений диэлектрической проницаемости холодной воды в несколько раз при температурах ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с существующими моделями.

3. Ранее неизвестный фазовый переход холодной воды и существование второй критической точки, определенные с использованием радиофизических измерений, а именно: 1) образование метастабильного сегнетоэлектрического льда 0, при температурах ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2) микроволновые аномалии воды вблизи $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении $0,1\text{ МПа}$ (на линии Видома) – локусе повышенных флуктуаций энтропии и плотности воды, определяемые ее второй критической точкой сосуществования двух жидкостей LDL и HDL. Фазовые превращения изменяют электрофизические характеристики мерзлых сред, что позволяет исследовать их электрическую структуру методами микроволновой спектроскопии.

4. Впервые обнаруженное динамическое явление – автоволны пластического течения в пресном льду с характерной длиной волны порядка одного сантиметра при температурной деформации льда в лабораторных и натурных условиях по рассеянию поляризованного излучения вблизи 13 ГГц в полосе частот $0,5\text{ ГГц}$.

5. Новые методики спутниковой гидрологии и спектроскопии холодной воды в различных фазовых состояниях (жидком, твердом, в дисперсных средах) на основе регистрации рассеяния излучения на структурах из льда 0 и волн течения, в облачных образованиях, ледниках, ледяных покровах: способ регистрации катастрофических явлений (подготовка схода горных ледников); методика изучения аномальных рассеяний излучения облачной

атмосферы - мезосферных серебристых облаков из-за резонанса поверхностных плазмонных мод), определяемых малыми ледяными частицами со льдом 0; методика радарного определения деформации ледяных покровов, вызванной механическими воздействиями, по рассеянию излучения волнами течения; методика диэлектрической спектроскопии дисперсных сред при образовании структур с сегнетоэлектрическим льдом 0 и возникновении плазмонных резонансов.

Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием современным теоретическим общезначимым представлениям о воде, достаточным объемом и воспроизводимостью экспериментальных данных, результатами лабораторных и полевых экспериментальных исследований, выполненных с применением современных методов анализа, использованием стандартных и специальных методик измерений микроволновых диэлектрических характеристик вещества, совпадением результатов с работами других исследователей, а также использованием современного аттестованного измерительного оборудования.

Научная и практическая значимость

Основные теоретические и практические результаты диссертации были получены в рамках выполнения государственных заданий с 2006 г. по настоящее время по темам СО РАН, ФАНО РФ, Министерства науки и высшего образования РФ и включены в 17 годовых научно-технических отчетов лаборатории геофизики криогенеза ИПРЭК СО РАН.

Теоретическая значимость работы. Расширены представления о воде, как особом объекте гидрофизики, на основе современных физико-химических теорий структуры и показана необходимость исследования ее радиофизических и термодинамических характеристик.

1. Предложен общий подход к рассмотрению радиофизических характеристик воды в интервале температур $-70...+4$ °C и впервые введено физически обоснованное понятие «холодная вода». Данное понятие использовано для объяснения аномальных электромагнитных характеристик различных образований гидросферы и фазовых переходов воды. Выделенный интервал температур холодной воды соответствует аномалии плотности, которая уменьшается при понижении температуры в этом интервале.

2. Уточнена теория электродинамической релаксации Дебая с двумя частотами релаксации для холодной воды на основе современных представлений о ее структуре, состоящей из кластеров LDL (низкой) и HDL (высокой) плотности. Предложена и обоснована методика микроволновых измерений диэлектрической проницаемости холодной воды для частот от 1 ГГц до 300 ГГц.

3. Впервые рассмотрена линия Видома в формировании аномалий радиофизических характеристик дисперсных сред. Показано, что в земных оболочках в области линии Видома возможно ускорение криохимических превращений, которые могут регистрироваться при микроволновой спектроскопии. Данный подход открывает широкие возможности использования радиоспектроскопии для исследования критических явлений и физико-химических превращений в разнообразных природных объектах в области температур вблизи линии Видома (например, при $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ для давления 0,1 МПа).

4. Рассмотрена электромагнитная модель ледяных частиц, содержащих сегнетоэлектрический лед 0, и показано возникновение в них резонанса поверхностных плазмонных мод, сильно влияющего на экстинкцию электромагнитных излучений. Эффект возникает на частотах ниже плазменной частоты в тонких проводящих слоях на границе льда 0 с другими диэлектриками, включая лед Ih. Предложена гипотеза свечения серебристых мезосферных облаков на основе механизма плазмонного резонанса в ледяных частицах, покрытых льдом 0, при температурах ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Плазмонный резонанс в ледяных структурах на частотах видимого, ИК и микроволнового диапазонов открывает возможность совершенствования электромагнитных моделей объектов холодной атмосферы при температурах в области «no man's land».

5. Выполнено теоретическое рассмотрение медленных волн пластического течения со скоростью $10^{-5}\dots 10^{-4}$ м/с и длиной волны ~ 1 см в пресном льду, которые создают дифракционные решетки, наиболее сильно рассеивающие микроволновое излучение вблизи 13 ГГц.

6. Исследование создало теоретический базис для развития моделей, необходимых для решения задач переноса излучений через объекты гидросферы, криосферы и атмосферы, содержащих холодную воду, на частотах 1...300 ГГц, а также развития модели Дебая в терагерцовой области спектра при низких температурах.

Практическая значимость. Теоретические результаты и полученные новые экспериментальные данные определяют практическую значимость исследования.

Новые экспериментальные данные.

1. Открыта новая метастабильная кристаллическая модификация льда - лед 0, являющийся сегнетоэлектриком, который образуется при температуре ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при давлении 0,1 МПа).

2. Измерена диэлектрическая проницаемость воды, впервые определенная при температурах ниже $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ для частотного интервала 1...300 ГГц.

3. Показано существование линии Видома по микроволновым характеристикам воды, находящейся в нанопористых силикатных материалах и имеющая свойства объемной воды вблизи температуры -45°C при давлении 0,1 МПа.

4. Обнаружены волны пластического течения, создающие в пресном льду дифракционные решетки. Постоянная решетки равна ~ 1 см. Волны течения сильно рассеивают электромагнитные излучения на частотах сантиметрового диапазона с экстремумом вблизи 13 ГГц.

5. Обнаружено отражение теплового излучения Солнца на частотах от 20 ГГц до 125 ГГц от серебристых мезосферных облаков. Измеренное возрастание радиояркости серебристых облаков составило приблизительно 5 К на всех частотах. Высказана гипотеза об их свечении, которое определяется резонансом поверхностных плазмонных мод на малых ледяных частицах из льда 0. Гипотеза подтверждена лабораторными измерениями, при осаждении паров воды на холодные подложки при температуре ниже -23°C .

Практическая значимость исследования:

- введено понятие о новом объекте «холодная вода» – области, где можно ожидать проявлений особых электромагнитных характеристик увлажненных дисперсных сред, что имеет место эвристическую ценность для развития дистанционного зондирования и спектроскопии природных и искусственных сред;

- экспериментальные данные и полученные аналитические зависимости могут использоваться для расчетов микроволновых характеристик различных объектов, содержащих холодную воду, что существенно улучшает результаты электродинамических моделей объектов (облачные образования, аэрозоли, снежные и ледяные покровы, растительность, инженерные сооружения);

- открытие метастабильного сегнетоэлектрического льда 0, достаточно устойчивого в природной среде, позволяет существенно продвинуться в понимании процессов фазовых превращений при низких температурах; это знание необходимо при решении задач распространения электромагнитных волн от радиочастотного до видимого диапазона в холодных природных образованиях;

- возможность использования методов микроволновой спектроскопии для изучения фазовых превращений с участием воды, а также критических явлений вблизи линии Видома, на которой возможно ускорение криохимических превращений; это представляется важным для различных сфер деятельности в биологии, медицине, сельском хозяйстве, в хозяйственной деятельности в районах Арктики и Субарктики;

- плазмонный резонанс в дисперсной природной среде при фазовом переходе воды в лед 0 позволяет предложить новые методики дистанционного зондирования мезосферы и стратосферы; данный эффект может использоваться и при дистанционных измерениях разнообразных объектов в условиях резко континентального климата, например, при определении структурообразования холодных приземных туманов и промышленных аэрозолей;

- мониторинг волн пластического течения при спутниковой радиолокации позволит регистрировать подготовку горных ледников к образованию ледяных лавин и предупреждать о катастрофических явлениях, связанных с движением больших масс льда;

- новые данные об аномальных электромагнитных характеристиках льда и холодной воды могут использоваться при микроволновом зондировании Антарктиды, Луны, холодных планет Солнечной системы и их спутников, а также других космических объектов: комет, астероидов, пылевых образований;

- результаты исследований приняты к внедрению на предприятиях Сибирской угольной компании, в учебных курсах Забайкальского государственного университета;

- получен патент на изобретение.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, семинарах и симпозиумах: International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics/Atmospheric Physics (2007, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2023); Международная открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" (Москва, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024); Третья Всероссийская научная конференция с международным участием «Геологическая эволюция и взаимодействия воды с горными породами» (Чита, 2018); Международный симпозиум "Изменения климата и окружающей среды Центральной Азии" «Забайкалье в геополитике России» (Чита, 2003); Международная научно-практическая конференция «Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов» (Чита, 2014, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023); Всероссийская научная конференция. «Распространение радиоволн» (Иркутск, 2014); Международная научно-практическая конференция «Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов» (Екатеринбург, 2016); Всероссийская конференция с международным участием "Эволюция биосферы и техногенез" VI Всероссийского симпозиума с международным

участием "Минералогия и геохимия ландшафта горно-рудных территорий" и XIII Всероссийских чтений памяти академика А.Е. Ферсмана "Рациональное природопользование", "Современное минералообразование", посвященных 35-летию ИПрЭК СО РАН (Чита, 2016); Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2008).

Личный вклад автора

- проведен анализ современного состояния решения задач распространения микроволнового излучения в объектах гидрологии, выработан подход к их решению для целей радиозондирования; впервые выделен особый объект гидросферы «холодная» вода, для которой на основе физико-химических аномалий начато изучение радиофизических характеристик;

- предложены методики исследования микроволновых характеристик холодной воды и льда в интервале температур $-70...+4$ °С и выполнены экспериментальные исследования с обработкой полученных данных для частотного интервала $1...300$ ГГц;

- экспериментально показано существование новой кристаллической модификации метастабильного льда 0 , образующегося при температурах ниже -23 °С; методика доказательства его существования основана на резонансе плазмонных поверхностных колебаний в наноструктурированных островковых пленках;

- высказана гипотеза о физическом механизме свечения серебристых мезосферных облаков, определяемом резонансом поверхностных плазмонных мод на малых ледяных частицах, покрытых льдом 0 , и выполнены радиометрические измерения отраженного от них излучения Солнца на частотах $20...125$ ГГц, подтвердивших гипотезу;

- выполнено исследование волн пластического течения и предложен метод его регистрации по измерениям экстинкции и отражения излучения; при зондировании льда вблизи частоты 13 ГГц установлено существование автоволн пластического течения;

- предложено использование результатов изучения характеристик холодной воды в объектах геосфер для дистанционной регистрации их состояния и параметров – подготовки схода горных ледников, наблюдений «серебристых» облаков, состояния растительных покровов в зимнее время, криохимических превращений вблизи линии Видома, аномалий экстинкции излучения и ряда других результатов для решения задач микроволнового дистанционного зондирования.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертация соответствует формуле специальности «1.3.4. Радиофизика» и относится к области исследования, указанной в паспорте специальности под номером 5 в части «Разработка новых методов и принципов активной и пассивной дистанционной диагностики окружающей среды, основанных на современных методах решения обратных задач. Создание систем дистанционного мониторинга геосферы, гидросферы, ионосферы, магнитосферы и атмосферы».

Публикации

Основные результаты диссертации представлены в перечисленных ниже 82 работах, проиндексированных в РИНЦ: 81 статьи в изданиях из перечня ВАК, 1 – в других рецензируемых периодических научных изданиях. Среди указанных публикаций на момент завершения диссертации 33 проиндексированы в системе Web of Science (WoS), 48 – в Scopus. Индекс Хирша автора: в РИНЦ – 11, в WoS – 4, в Scopus – 4. Общее число цитирований работ автора в системе РИНЦ – 453.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы. Работа изложена на 285 страницах машинописного текста, включает 123 рисунка, 4 таблицы, список литературы из 343 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своему научному консультанту, профессору Г.С. Бордонскому, который привлек мое внимание к тематике исследования микроволновых свойств увлажненных дисперсных сред и пресного льда, в результате чего была представлена к защите настоящая диссертация. Автор благодарит коллектив лаборатории геофизики криогенеза Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, которые активно помогали в осуществлении полевых исследований в зимний период времени.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, показана необходимость исследований холодной воды, исходя из ее роли в земных оболочках и влияния на электромагнитные свойства увлажненных дисперсных сред. Отмечена возможность фазовых превращений холодной воды и их влияние на электромагнитные свойства природных образований, позволяющие развить новые методы спутниковой гидрологии. Определена цель работы, поставлены задачи, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе «Физико-химические характеристики холодной воды и их исследование для развития гидрологии» проведен анализ состояния проблемы по исследованию термодинамических и

электрофизических параметров холодной воды и увлажненных дисперсных сред, в том числе и пористых при отрицательных температурах. Свойства сред, содержащих поры, существенно зависят от параметров воды, находящейся в них. Этот вопрос достаточно хорошо изучен при положительных температурах, однако при температурах ниже $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ электрофизические свойства увлажненных дисперсных сред, особенно в микроволновой области спектра, исследованы недостаточно.

Вода, находящаяся при температурах $-70\dots+4\text{ }^{\circ}\text{C}$, имеет аномальное поведение плотности и ряда других характеристик. По этой причине, в работе^[14], метастабильную объемную воду при данных температурах называли холодной. В литературе принято называть жидкую метастабильную объемную воду при давлении 0,1 МПа – переохлажденной, для температур меньших $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В данном исследовании будут использоваться оба термина. Однако представляется важным выделить при радиофизических исследованиях особый объект исследований, имеющей эвристическую ценность. Это определяется тем, что до настоящего времени практически отсутствуют исследования ее электромагнитных аномалий, хотя молекулы воды имеют значительный дипольный электрический момент, который может проявляться в разнообразии необычных электромагнитных явлений. Плотность объемной холодной воды понижается с уменьшением температуры, в отличие от многих других веществ, что показано на рис. 1. (Адаптировано из работы^[15]).

Необычное поведение холодной воды связывается с существованием предполагаемой второй критической точки (при $T = -53\dots-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, давлении $\sim 100\text{ МПа}$). Из второй критической точки воды исходит линия Видома, на которой имеет место повышенные флуктуации энтропии и плотности. При давлении 0,1 МПа (атмосферное давление) температура на линии Видома равна $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, ее ранее называли λ -точкой (сингулярная точка), т.к. физические свойства воды претерпевают при приближении к ней резкие изменения, соответствующие критическому состоянию.

¹⁴ **Анисимов М.А.** Холодная и переохлажденная вода как необычный сверхкритический флюид // Сверхкритические флюиды: Теория и практика. 2012. Т. 7. № 2. С. 19-37.

¹⁵ **Mallamace F., Branca C. et al.** The anomalous behavior of the density of water in the range $30\text{ K} < T < 373\text{ K}$, Proceedings of the National Academy of Sciences. V. 104. 2007. P. 18387-18391.

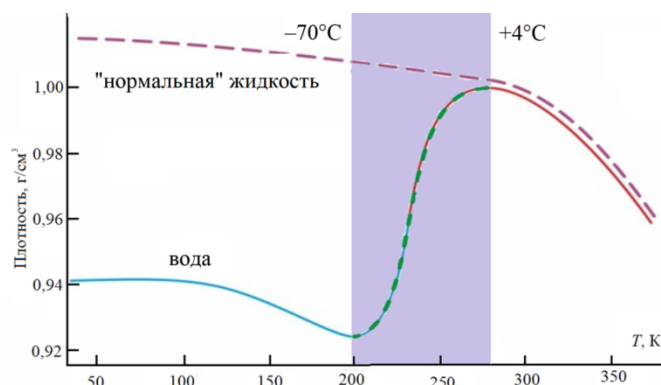


Рисунок 1 – Зависимость плотности воды от температуры ниже +4 °C. Пунктирная линия – зависимость плотности обычной жидкости от температуры; сплошная – для воды. Выделен интервал зеленой линией для холодной воды –70...+4°C (200 К – 276 К)

Эти и другие аномалии холодной воды в настоящее время объясняют существованием двух ее структурных модификаций LDL и HDL (вода низкой и высокой плотности). Их существование доказано в экспериментах при рентгеновских и оптических измерениях. Относительная концентрация модификаций, согласно теоретическим и экспериментальным данным, изменяется с температурой. Если преобладает одна модификация, то другая проявляет себя в виде флуктуаций ее объемов.

Вблизи линии Видома концентрация LDL и HDL выравнивается. Предполагается, что все аномалии термодинамических характеристик воды определяются взаимодействием двух вышеуказанных структурных модификаций воды.

В работе^[16] было показано, что вблизи линии Видома мнимая часть диэлектрической проницаемости (ϵ'') также испытывает немонотонное изменение. Оказалось, что ϵ'' можно аппроксимировать суммой двух гауссовых функций с экстремумами при –45 °C и около –60 °C. Совпадение экстремума с –45 °C со значением на линии Видома указывает на возможную связь аномалии со второй критической точкой. В работе^[16] эта связь специально не исследовалась. Таким образом, аномалии характеристик переохлажденной воды имеют место и для электрофизических величин. Данная особенность позволяет поставить вопрос об изучении электромагнитных характеристик переохлажденной воды и увлажненных дисперсных сред методами микроволновой спектроскопии.

Потребности измерений параметров водных объектов ставят задачу исследования электрофизических характеристик воды. В связи с развитием спутниковой гидрологии, а именно радиолокационных методов исследований, выделена задача определения частотных особенностей

¹⁶ Орлов А.О. Микроволновые свойства переохлаждённой поровой воды на частотах 11 ÷ 140 ГГц / диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Москва, 2017.

диэлектрических характеристик холодной воды. Фактически также не исследована область температур $0...+4\text{ }^{\circ}\text{C}$, хотя электрофизические характеристики воды при этих температурах представляют значительный интерес для дистанционного зондирования. В первой главе приведены различные примеры из спутниковой гидрологии, показывающие какую важную роль в понимании процессов, происходящих в водных объектах и в увлажненных пористых средах, играет холодная вода.

На основании проведенного анализа дано обоснование выбранного направления исследования.

Во второй главе «Методики экспериментального исследования» дается описание методов получения переохлажденной воды, методики и техники исследования.

Одной из наиболее сложных проблем в изучении холодной воды является ее получение в переохлажденном виде, т.е. для области температур ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Особенно это относится к температурам ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для выполнения экспериментов требуется вода, близкая по своим характеристикам к объемной метастабильной воде. В ряде случаев возникают проблемы с необходимым количеством, требуемым для выполнения исследований. До температуры $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в экспериментальных работах использовали микроэмульсии воды в масле. Однако наибольшие трудности возникали при достижении области «no man's land»: $-37...-120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наилучшие результаты были получены, когда в вакууме создавались капли воды микронных размеров, которые при испарении в течение миллисекунд охлаждались до $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$. Изучение структуры таких капель зарубежные исследователи выполнили при помощи импульсного рентгеновского лазера фемтосекундной длительности.

Кроме того, известен способ получения переохлажденной воды при растворении в ней солей. В этом случае достигается температура эвтектики и несколько ниже. Считается, что структура воды в растворах близка к структуре чистой воды, а влияние ионов эквивалентно повышению давления в средах.

В наших экспериментах были использованы два метода. Один из них был известен ранее, он связан с получением переохлаждения в пористых телах с порами нанометровых размеров. Второй метод впервые был использован в настоящем исследовании. Он основан на создании в кристаллах льда Ih пластической деформации при скольжении частей гексагональных кристаллов по их базисным плоскостям. Известно, что вдоль базисных плоскостей деформация облегчена. Это связано с меньшим числом водородных связей между данными плоскостями в решетке, в результате чего разрыв связей облегчен. При процессе скольжения возникают слои с

размерами ~ 10 нм с разорванными водородными связями и структура среды в них теряет пространственную периодичность.

Лабораторные исследования. 1. Для измерения коэффициента затухания увлажненного силикатного материала (например, молотый КСКГ со средними размерами пор ~ 8 нм) использовалась установка, в которой образец исследовали в плоской кювете в свободном пространстве. Измерения выполнялись на частотах 34...180 ГГц, которые широко используются при спутниковых измерениях земной, водной поверхности, а также атмосферы Земли.

2. В лабораторных условиях изучались микроволновые и тепловые свойства увлажненных дисперсных сред в резонаторах и волноводах, охлаждение которых до -190 °С осуществлялось подачей жидкого азота и его паров (до -70 °С) или помещением в температурную камеру фирмы ESPEC (до -65 °С). Таким путем определялись действительная (ϵ') и мнимая (ϵ'') части относительной комплексной диэлектрической проницаемости дисперсных сред в резонаторе при охлаждении исследуемых образцов до низких температур.

3. Были выполнены измерения амплитуды и фазы отраженной волны для льда в микроволновом диапазоне с целью поиска изменения радиофизических характеристик при пластической деформации льда. При измерениях применялся векторный анализатор цепей Р4М-18 производства «Микран».

Натурные измерения. Этот вид измерений выполняли в Забайкальском крае и на оз. Байкал, где имеют место низкие температуры приземного воздуха, достигающие значений -45 °С.

1. При исследовании природных дисперсных сред выполнялись эксперименты по измерению мощности микроволнового излучения, проходящего сквозь мерзлую среду. Такие измерения осуществлялись для ледяного покрова и лесных массивов. Для лесных массивов температура среды изменялась в течение нескольких суток в периоды резких суточных колебаний температуры в пределах -5 ... -35 °С. При радиоопросвечивании ледяного покрова излучением, распространяющимся внутри покрова параллельно поверхностям льда, аппаратуру устанавливали в углубления. Измерение выполняли на различных линейных поляризациях для изучения появления в ледяном покрове добавочных электромагнитных волн и автоволн пластического течения на частотах 5,2...34 ГГц.

2. Исследовали холодную воду в атмосфере на высотах 70...90 км по радиотепловому излучению серебристых облаков. Цель исследований заключалась в изучении фазовых переходов воды в мезосфере при температурах до -80 °С и их влияния на перенос излучения в атмосфере.

Также исследовались электромагнитные свойства холодной воды в приземном слое атмосферы при наблюдениях переохлажденного водного аэрозоля.

3. Исследовали нелинейные явления в ледяных образованиях. Известно, что под действием механических напряжений кристаллы льда подвергаются пластической деформации, в результате чего в них образуются слои с разорванными водородными связями. Эти слои близки по характеристикам к жидкой воде. При измерениях микроволновых коэффициентов отражения определяли интенсивность и фазу коэффициента отражения микроволнового излучения от ледяного покрова с использованием векторного анализатора частотных характеристик Р4М-18. Пластическая деформация в объекте возникает при изменениях температуры воздуха в течение суток.

Также моделировали возникновение текучести льда созданием импульсного давления, превышающего предел текучести монолитного поликристаллического льда. Значение предела текучести составляет порядка 1 МПа. Такое давление можно превысить, инициируя взрыв небольшого порохового заряда.

4. Исследовались излучательные свойства ледяного покрова пресных водоемов в весенний период времени в микроволновом диапазоне. На автомобиль устанавливался радиометрический комплекс.

Цель исследований заключалась в поиске холодной воды в природных объектах. В ледяной покров при его становлении происходит захват различных примесей в виде водной растительности, газовых пузырей и т.д. На поверхности таких образований в ледяном покрове происходит образование пленок воды, которые имеют отрицательную температуру. В результате ледяной покров, имеющий такие неоднородности, обладает отличительными отражательными и излучающими характеристиками, что определяется при радиометрических и радарных измерениях.

Кроме представленных установок были использованы разнообразные измерительные устройства при лабораторных измерениях. В натурных условиях при исследовании льда на оз. Байкал использовались микроволновые радиометры, установленные на судно на воздушной подушке и дельталет. В общем, в исследованиях применялись 12 микроволновых радиометров на частоты 1...125 ГГц и радиометр теплового ИК диапазона, разработанные в ИПРЭК СО РАН.

В третьей главе «Результаты измерений электромагнитных параметров холодной воды, увлажненных дисперсных сред и льда» приведены результаты измерений электромагнитных параметров дисперсных сред и ледяных покровов в широком диапазоне температур. Здесь была

представлена усовершенствованная модель диэлектрических характеристик холодной воды, ранее рассмотренная в работе^[9].

1. Результаты резонаторных измерений

А. Особенности методики измерений. Усовершенствование основано как на новом физическом подходе, так и модификации известных резонаторных измерений увлажненных дисперсных сред при низких температурах. При измерениях диэлектрических характеристик воды, находящейся в порах силикатных материалов, при малой увлажненности среды была показана целесообразность использования резонаторов при полном их заполнении. Особые свойства этих материалов связаны с тем, что в их порах переохлажденная вода по своим характеристикам близка к объемной воде. В случае использования такого подхода было установлено, что резонансные кривые сильно искажены из-за неоднородности среды при ее охлаждении. Этот эффект особенно проявляется для резонаторов с минимальным объемом, т.е. полуволновых резонаторов. Для устранения искажений резонансной кривой выполнены измерения параметров прямоугольного резонатора увеличенных размеров с типами колебаний H_{102} и H_{103} и использованием слабо увлажненных пористых силикатных сорбентов. Данная методика позволила определить значения комплексной диэлектрической проницаемости (ϵ) при температурах ниже -20°C (в интервале $0 \dots -60^\circ\text{C}$) одновременно вблизи частот 7,6 ГГц и 9,7 ГГц. Из выполненных измерений были найдены аналитические зависимости двух частот релаксации в формуле Дебая для двухчастотной модели. Усовершенствованная модель позволила получить аналитические значения ϵ' и ϵ'' в широком интервале частот от 1 ГГц до 300 ГГц в миллиметровом диапазоне и при глубоком переохлаждении воды. Точность определения мнимой части диэлектрической проницаемости при температурах ниже -20°C была улучшена в несколько раз по сравнению существующими моделями. Точность значений ϵ' и ϵ'' холодной воды по усовершенствованной модели $\sim 5\%$.

Б. Теоретическое обоснование модели. Двухчастотная модель Дебая холодной воды обоснована доказанным в настоящее время существованием двух кластеров воды – LDL и HDL и термодинамическими характеристиками холодной воды, которая переходит в стеклообразное состояние при температуре $\sim -130^\circ\text{C}$. Это значение и было введено в модель. При стекловании время релаксации достигает 100 с, при котором среда практически не реагирует на микроволновое излучение. Для принятой модели:

$$\epsilon(T) = \frac{\epsilon_s(T) - \epsilon_1(T)}{1 + i f / f_1(T)} + \frac{\epsilon_1(T) - \epsilon_\infty(T)}{1 + i f / f_2(T)} + \epsilon_\infty(T), \quad (1)$$

где $\varepsilon_1(T)$ – промежуточная константа диэлектрической проницаемости (подгоночный параметр), f – частота, $\varepsilon_s(T)$ – статическая диэлектрическая проницаемость, $f_1(T)$ и $f_2(T)$ – первая и вторая частоты релаксации, $\varepsilon_\infty(T)$ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость. Для этих величин использованы выражения из^[9]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_s(T) &= \frac{3,70886 \cdot 10^4 - 8,2168 \cdot 10^1 T}{4,21854 \cdot 10^2 + T} \\ \varepsilon_1(T) &= \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 \\ f_1(T) &= \frac{A + T}{\alpha_3 + \alpha_4 T + \alpha_5 T^2} \\ \varepsilon_\infty(T) &= \alpha_6 + \alpha_7 T \\ f_2(T) &= \frac{A + T}{\alpha_8 + \alpha_9 T + \alpha_{10} T^2},\end{aligned}\quad (2)$$

где f – в ГГц, T – в градусах Цельсия. В новой модели для холодной воды взято значение A , равное 130 (модуль температуры стеклования). Найденные в эксперименте параметры приведены в таблице.

Таблица 1 – Коэффициенты в формулах (2)

i	α_i	i	α_i	i	α_i
0	5,65	4	$-4,2926 \times 10^{-1}$	8	$3,9208 \times 10^{-1}$
1	$1,696 \times 10^{-2}$	5	$7,5714 \times 10^{-3}$	9	$-3,2094 \times 10^{-3}$
2	$-1,481 \times 10^{-4}$	6	3,6143	10	$7,6578 \times 10^{-4}$
3	$1,4627 \times 10^1$	7	$2,8841 \times 10^{-2}$		

Для сравнения результаты расчетов по формулам^[9] и с обновленными параметрами приведены на рис. 2. Представленные зависимости совпадают с теоретическими расчетами при охлаждении до -10°C работы^[9], однако имеют место существенные расхождения в области температур $-60 \dots -40^\circ\text{C}$, что можно связать с влиянием второй критической точки воды при -45°C на линии Видома (которое ранее не учитывалось другими исследователями). Расхождение достигает двух раз для ε' и ε'' при -35°C ; при последующем понижении температуры расхождение возрастает и ниже -45°C данные работы^[9] оказываются непригодными (т.к. ε'' обращается в 0).

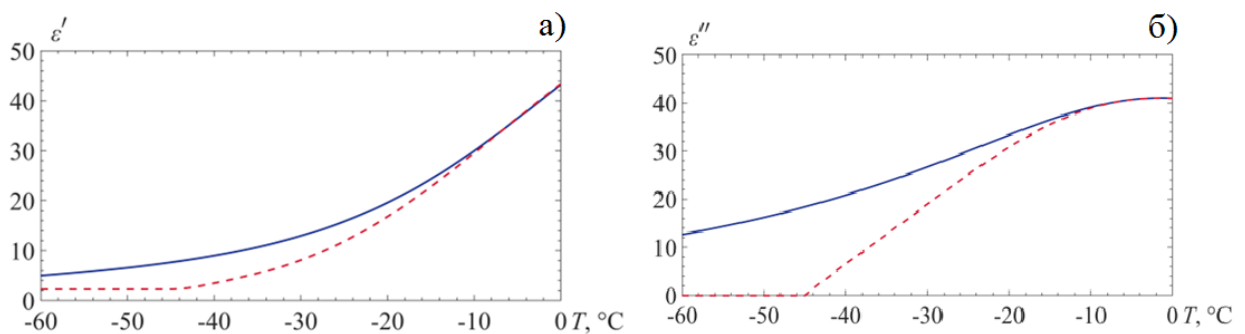


Рисунок 2 – Зависимости: а) $\varepsilon'(T)$ и б) $\varepsilon''(T)$ для объемной воды, построенные на основе измерений в резонаторе. Штриховая линия – результаты расчетов по модели^[9]. Частота 9,7 ГГц.

2. Измерения электромагнитных параметров увлажненных дисперсных сред

Измерения соленых льдов показали изменение фазового состояния переохлажденной жидкости в капиллярах образцов, а также наличие квазижидких пленок на границах поликристаллов, которые могут оказывать существенное влияние на проводимость льда. Так при измерении отраженной от образца, расположенного на дне металлической кюветы, мощности излучения на частоте 34 ГГц при замерзании раствора хлористого натрия регистрируется гистерезис фактора потерь при фазовых превращениях раствора. Кроме того, наблюдается резкое увеличение отраженной мощности излучения при вторичном замораживании раствора, когда его нагревали после первого цикла замораживания до температуры -5°C . При образовании эвтектической смеси, произошло «просветление» среды, что объясняется «памятью» талой воды, когда в ней после таяния льда при -5°C оставалось некоторое количество кристаллических зародышей. При вторичном охлаждении происходила гетерогенная нуклеация (а не гомогенная), что привело к более интенсивному образованию числа кристаллов. При замерзании и их росте в стесненном состоянии возникали сильные механические напряжения, приводящие к «просветлению» среды.

3. Измерения электромагнитных потерь образцов пресного льда вблизи 0°C

В этих экспериментах обнаружен эффект «просветления», который в наибольшей степени наблюдался в пресных льдах также вблизи температуры фазового перехода. Данные измерения представляют особый интерес, так как при 0°C часть молекул воды находится в упорядоченном состоянии (лед), а часть в близком к жидкой воде. Свойства такого льда обычно не исследуются из-за сложности разделения двух вкладов.

При измерениях образцов льда в лабораторных условиях было обнаружено увеличение мощности проходящего излучения увлажненного льда вблизи температуры фазового перехода лед-вода при нагревании среды – рис. 3. В некоторых случаях, по имеющимся экспериментальным данным, максимальное уменьшение потерь при 0°C соответствует полному «просветлению» среды, т.е. отсутствию погонного затухания. Эффект оказывается более выраженным, по выполненным измерениям, при совпадении базисных плоскостей кристаллов льда с ориентацией вектора электрического поля волны.

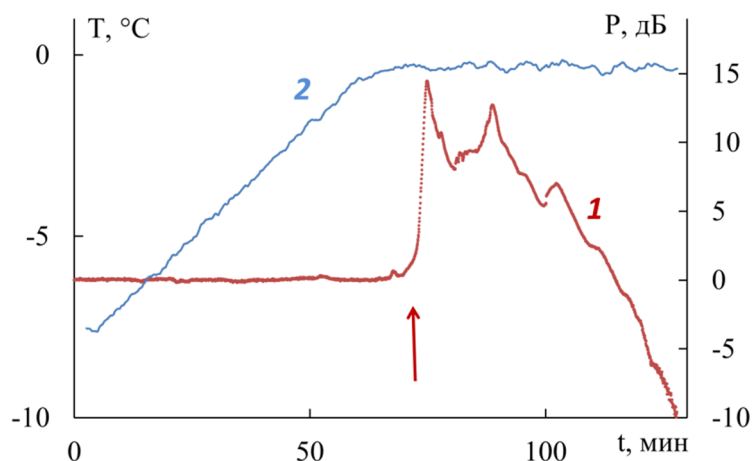


Рисунок 3 – Результаты измерения пропускания резонатором со льдом мощности излучения (1) на частоте 3,4 ГГц (в децибелах от условного уровня 0 дБ) и температуры (2) в зависимости от времени нагревания; стрелочкой отмечено начало просветления

Механизм просветления, как представляется, связан с существованием отрицательной дифференциальной вязкости, известной для кристаллов льда. В свою очередь, она приводит к отрицательной дифференциальной проводимости «квазжидких» пленок, по которым происходит скольжение частей кристаллов. Величина эффекта, возможно, зависит от характера и скорости пластической деформации. Особые свойства льда состоят в том, что течение среды существует при любых наблюдаемых в природе температурах и механических напряжениях. Поэтому изменение электромагнитных потерь необходимо учитывать при изучении распространения радиоизлучений в природных мерзлых объектах в широком интервале температур.

В четвертой главе «Спектральные исследования взаимодействия излучения с жидкими неоднородностями в объеме льда» рассмотрен вопрос о спектральных исследованиях взаимодействия микроволнового излучения с жидкими неоднородностями в объеме льда.

1. Следуя предположению о взаимосвязи жидкого и кристаллического состояний, были выполнены измерения коэффициента отражения микроволнового излучения от плоской границы раздела воздух-пресный лед. Создание жидких структур осуществляли путем нагревания блока льда с размерами порядка десятков сантиметров и температурой $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ при его нахождении в лабораторном помещении с температурой воздуха $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. При нагревании блока в нем возникали сильные механические напряжения из-за градиента температуры от поверхности к центру блока.

В данном эксперименте была установлена выраженная селективность флуктуаций характеристик отражённого сигнала в зависимости от частоты при нагревании блока льда до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4). Флуктуации существенно отличались от гауссовских. Эксперимент показал, что на частоте 13 ГГц (длина волны излучения во льду 1,35 см) и в полосе частот $\sim 0,5\text{ ГГц}$

наблюдается аномалия характеристик отражённого излучения от блока льда при его пластической деформации. Эффект обнаружен приблизительно для половины измеренных точек в области частот, для которых наблюдали возрастание флуктуаций интенсивности отражённого монохроматического излучения и его фазы. При этом фаза отражённой волны могла принимать любое значение в диапазоне $\pm 180^\circ$, в некоторые интервалы времени, в процессе измерения вблизи 13 ГГц.

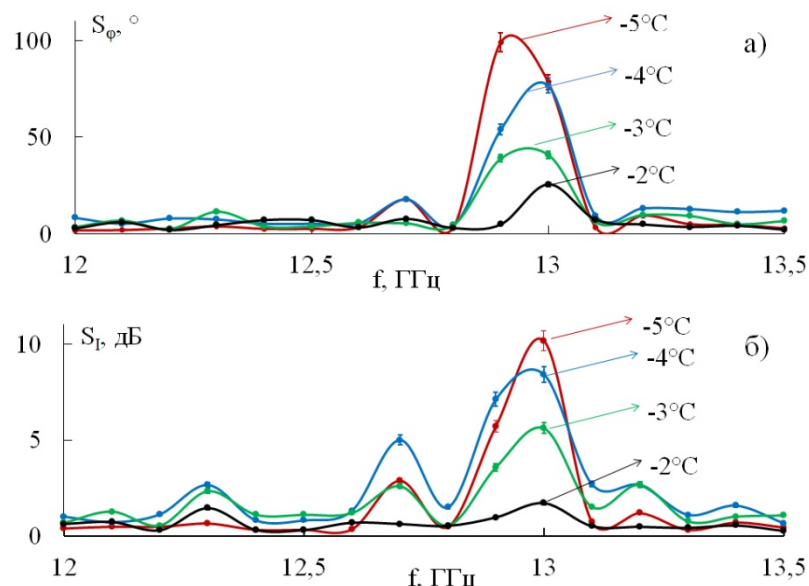


Рисунок 4 – Зависимости значений характеристик отраженного сигнала: а) – стандартного отклонения фазы и б) – интенсивности в зависимости от частоты при различных температурах льда

Эксперимент подтвердил существование автоволн пластической деформации с характерной их длиной $\sim 0,01$ м. Длина варьируется в зависимости от образцов и условий наблюдения. Эти волны во льду обнаружены впервые. Они образуют дифракционные решетки, которые были также зарегистрированы на радарных изображениях Sentinel-1B, для поляризаций VV, пресного ледяного покрова оз. Шакшинского (Забайкальский край) на частоте 5,4 ГГц в январе 2017 г.

Фазовые измерения также позволили показать существование аномалий поведения жидкой воды в интервале $0...+4^\circ\text{C}$ для ее электромагнитных параметров, что было выявлено при измерении проходящего и отраженного излучения сквозь увлажненную дисперсную среду, состоящую из криогеля. Криогель – дисперсная среда, которая при циклических процессах замораживания – оттаивания превращается в среду с высокой упругостью и хорошей адгезией к породе. В эксперименте использовали водный раствор поливинилового спирта в смеси с песком. Было обнаружено, что в районе $+4^\circ\text{C}$ наблюдается перелом графика зависимости фазы проходящего излучения от температуры (рис. 5). Эффект объясняется наличием в среде остаточной воды в поровом пространстве.

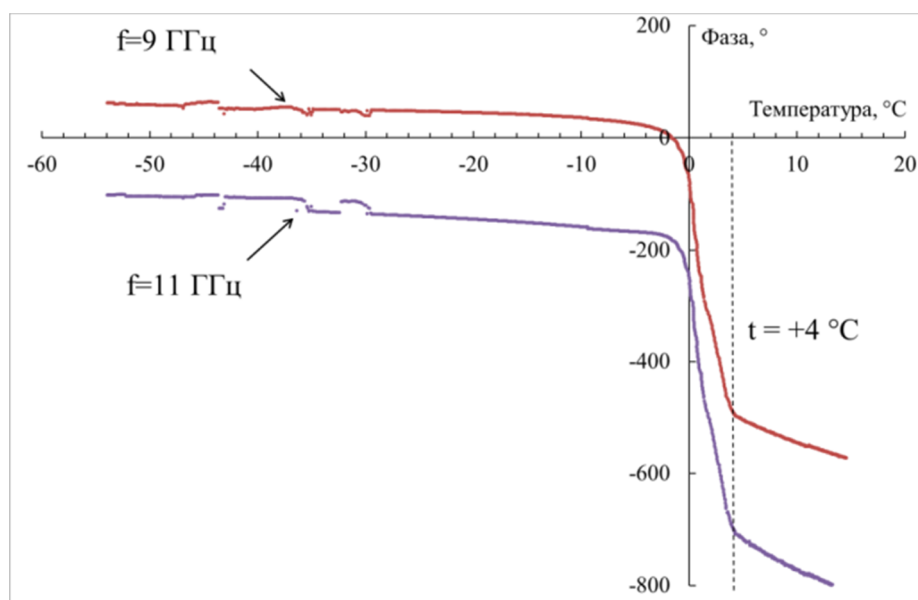


Рисунок 5 – Температурная зависимость фазы проходящего излучения сквозь дисперсную среду на частотах 9 ГГц, 11 ГГц

Быстрое изменение фазы от температуры в интервале $-2...+4$ °С можно связать с остаточными включениями воды в криогеле после его циклической обработки в процессе охлаждения-нагревания. В этом эксперименте впервые зафиксировано наличие температурной границы между обычной и холодной водой для микроволнового излучения при плюсовых температурах.

2. В твердых кристаллических телах, например, в металлах другими исследователями недавно были обнаружены автоволны пластической деформации (течения), которые появляются в результате механического деформирования среды в виде периодически разделенных деформируемых и недеформируемых объемов. Данные области обладают периодичностью с длиной порядка 10^{-2} м и распространяются со скоростью $10^{-5}...10^{-4}$ м/с. До настоящего времени не было сообщений об их исследованиях для структур из водного льда. Однако в этом случае в волнах течения должны происходить фазовые превращения с разрывом водородных связей и образованием холодной воды. Данный процесс может позволить исследовать состояние холодной воды во льду и в объеме дисперсных средах дистанционными методами. Поэтому представляется актуальным исследовать микроволновые характеристики деформируемых увлажненных сред и льда.

Исследования для деформируемых кристаллов металлов и некоторых других веществ позволили выявить причины появления аналогичных волн течения и для кристаллов льда. Проявление волн течения было обнаружено в лабораторном исследовании. Для протяженного объекта волны течения были обнаружены при измерениях радиотеплового излучения пресного ледяного покрова оз. Арахлей (Забайкальский край) при установке аппаратуры в прибрежной части водоема (рис. 6). Непосредственное измерение скорости распространения волн течения с использованием датчика деформаций дало

значение их скорости $\sim 10^{-4}$ м/с, что подтвердило наличие медленных волн пластической деформации.

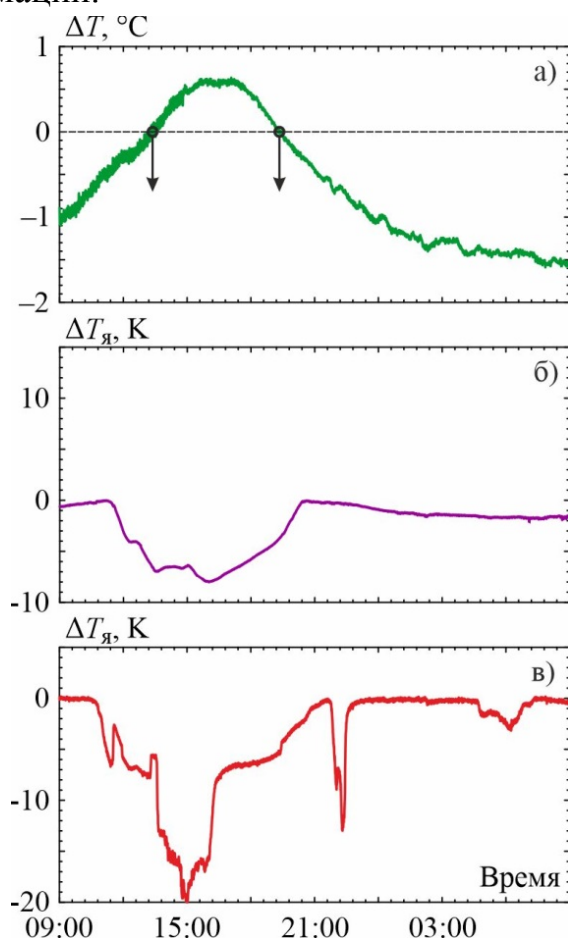


Рисунок 6 – Результаты измерений характеристик ледяного покрова: а) разность температур на двух глубинах (5 см и 10 см) в зависимости от времени. 28.02.2019–01.03.2019 (Время местное); б) приращение радиояркой температуры на частоте 21 ГГц; в) то же на частоте 34 ГГц. Стрелками на верхнем графике отмечены изменения направлений вектора градиента температуры в верхнем слое ледяного покрова

3. Результаты радиопросвечивания льда, подвергающегося температурным деформациям, в натурных условиях.

При радиопросвечивании пресного ледяного покрова в микроволновом диапазоне при повышении температуры воздуха в дневное время обнаружены волны Гинзбурга-Пекара (определяемые пространственной дисперсией), а также аномальные волны, которые приводят к сильным вариациям принимаемого электромагнитного излучения на горизонтальной поляризации. На рис. 7 приведен пример изменений принимаемой мощности излучения на двух частотах 13,4 ГГц и 34 ГГц. Как видно из данных, при возникновении во льду механических напряжений, вызванных суточными изменениями температуры и пластической деформацией, в нем появляются аномальные добавочные электромагнитные волны. В ходе эксперимента удалось наблюдать течение ледяной структуры с помощью датчиков деформации.

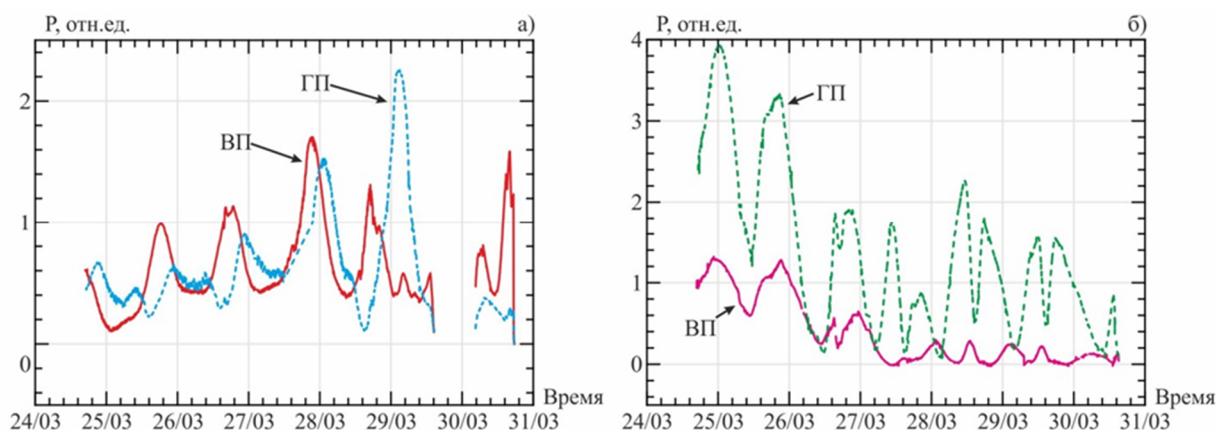


Рисунок 7 – Мощность проходящего через лед излучения, измеренная на двух линейных поляризациях на дистанции 45 метров а) частота 13,4 ГГц б) частота 34 ГГц. 24–31 марта 2011 года. Ледяной покров оз. Арахлей. Излучение на круговой поляризации

Поляризационные измерения показали, что существуют аномалии, которые проявляются в нелинейности свойств льда, а именно, существуют сильные искажения поляризационных диаграмм, а, следовательно, эллипсов поляризации. Эти искажения имеют выраженный частотный характер. Искажения проявляются из-за изменения амплитуд волн, у которых плоскость поляризации совпадает с базисными плоскостями кристаллов в ледяном покрове, вдоль которых преимущественно происходит сдвиг слоев льда. Они были обнаружены при сравнении первого параметра Стокса (S_1), измеренного в двух различных поляризационных базисах (рис. 8). Искажения возникли при изменении направления градиента температуры во льду по вертикали.

В случае плоской монохроматической электромагнитной волны S_1 не зависит от поляризационного базиса. Причины этой аномалии связаны с волнами течения в среде с преимущественной ориентацией главной оптической оси кристаллов льда.

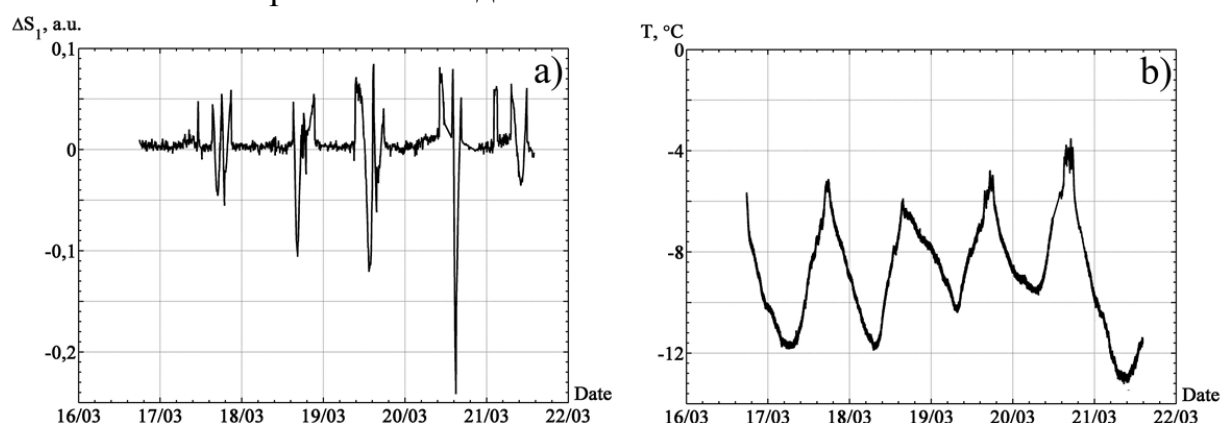


Рисунок 8 – а) зависимость от времени разности значений первого параметра Стокса по измерениям в двух поляризационных базисах (ВП, ГП) и $(-45^\circ; +45^\circ)$ для микроволнового излучения, распространяющегося в ледяном покрове (исходное излучение имеет круговую поляризацию). б) изменение температуры льда на глубине 10 см от поверхности; толщина снежного покрова 2–5 см. Дата измерений: 16–21 марта 2015 г.

Использованная микроволновая методика измерения характеристик коэффициентов отражения и прохождения позволяет более детально изучать стадии процесса формирования автоволин в объёме поликристаллических образцов на примере пресного льда. Кроме того, изучение льда и мёрзлых дисперсных сред новым способом представляет особый интерес в связи с их широким распространением в природной среде и в разнообразных искусственных объектах.

В пятой главе «Особенности фазовых переходов холодной воды» представлены результаты по экспериментальному обнаружению льда 0 и аморфного льда в природных и искусственных средах.

Лед 0. В ряде работ, выполненных в последние годы, сообщалось об открытии новой кристаллической модификации льда, названной лёд 0. Данная модификация образуется из переохлаждённой воды, предшествуя образованию льда Ih или Ic. Лёд 0 был обнаружен при компьютерном моделировании свойств переохлаждённой метастабильной воды при температурах ниже -23°C . Наряду со льдом Ih он существует при низких давлениях.

Непосредственное экспериментальное определение появления льда 0 затруднено, т.к. нет доступных технологий получения объёмной метастабильной переохлаждённой воды при температурах ниже -23°C из-за быстрого образования зародышей кристаллов льда Ih.

Поиски льда 0 выполнены с использованием электромагнитных методов исследования в пористых увлажнённых средах. Анализ результатов измерений основан на уникальной особенности льда 0 проявлять сегнетоэлектрические свойства.

Результаты экспериментов, которые были объяснены образованием сегнетоэлектрического льда 0, приведены на рис. 9. Сегнетоэлектрические свойства определяют возрастание коэффициента отражения микроволнового излучения из-за существенного роста проводимости среды на поверхности частиц дисперсной среды (см. рис. 9а, в зависимости от температуры), а также низкочастотные электрические флуктуации при циклическом изменении температуры (рис. 9б). Температура резких изменений электрических параметров находится вблизи -23°C , что соответствует предсказанному теоретически значению, при котором возможно образование льда 0 из переохлаждённой объёмной воды.

Земная атмосфера, находящаяся при отрицательных температурах, является областью криосферы, где наиболее активно лёд 0 участвует в физико-химических и в фотохимических превращениях. При конденсации водяного пара на твёрдых мелких частицах и в их порах с большой площадью порового пространства при температурах ниже -23°C , такие

частицы приобретают особые электромагнитные характеристики. По своим свойствам они похожи на мелкие металлические частицы. Это связано с известной особенностью возникновения тонкого слоя с высокой электропроводностью на границе сегнетоэлектрика и диэлектрика. Поэтому появление льда 0 в структурах, содержащих воду, может регистрироваться по изменению их микроволновых и электрофизических характеристик, что позволяет дистанционно определять наличие в них воды при измерениях рассеяния и отражения излучений. При некоторых условиях (при высокой электропроводности слоя) этот эффект может возникнуть для видимого и инфракрасного излучений.

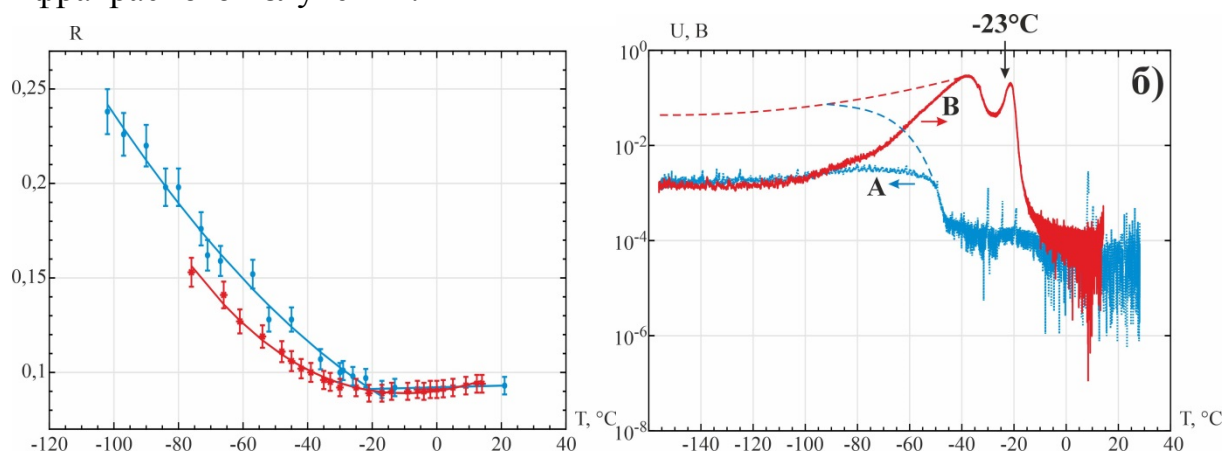


Рисунок 9 – Результаты измерения микроволновых параметров увлажнённых сред при отрицательных температурах. а) Зависимость от температуры коэффициента отражения мощности микроволнового излучения от увлажнённого силикагеля Acros 60 в волноводе на частоте 12,4 ГГц. Весовая влажность 3,5 %. Стрелками показано направление изменения температуры в цикле охлаждение-нагревание. б) Гистерезис амплитуды низкочастотных электрических шумов (в единицах напряжения на выходе измерителя). А – при процессе охлаждения исследуемого образца, Б – нагревания; штриховые линии – учет рассогласования из-за возрастания импеданса ячейки.

Кроме того, большие площади сезонно замерзающей почвы являются особым биохимическим реактором, где должны проявляться особые процессы превращения вещества. Это относится к районам Арктики и Субарктики. Надо полагать, что изучение разнообразных характеристик объектов, содержащих лёд 0, при низких температурах дистанционными методами представляет значительный научный и прикладной интерес.

Аморфный лед. Известно, что при быстрой кристаллизации глубоко переохлажденной воды возникает аморфный лед. В настоящей работе показано, что в случае пластической деформации в замкнутых объемах возникает аморфный лед. То же самое было показано по изменению проходящей мощности электромагнитного излучения при высоких градиентах температуры в блоках льда (рис. 10), а также при измерениях параметров резонансной частоты в резонаторах с течением времени и вариациях температуры.

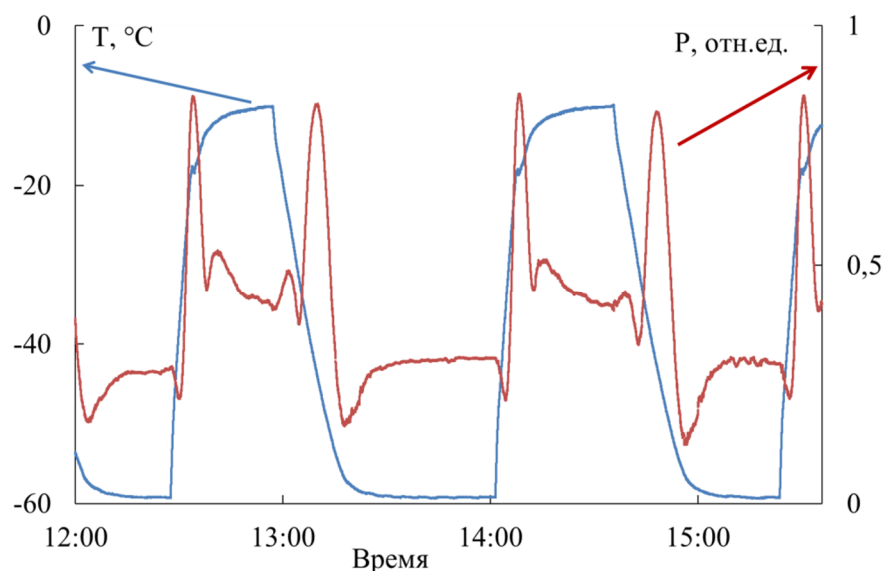


Рисунок 10 – Зависимости проходящей через лед в волноводе мощности излучения (P) на частоте 13 ГГц и температуры льда (T) от времени измерений. Мощность представлена в относительных единицах

Аморфный лед экспериментально наблюдали в работе^[17] при рентгеноструктурных исследованиях льда в образцах замерзшей пресной воды при температурах $(-20 \pm 5)^\circ\text{C}$. Эксперименты проводили для льда в замкнутых объемах при атмосферном давлении. Полученные результаты, не соответствовали известной в настоящее время диаграмме аморфных льдов. Выполненный нами эксперимент подтвердил появление аморфного льда или особой формы холодной воды в медленно деформируемой среде (при пластической деформации).

В главе также приведены примеры фазовых переходов в различных дисперсных средах, древесной растительности, криогелях. Показано, что существует температурный гистерезис потерь как в случае наблюдений температуры в натуральных условиях для хвойных веток, так и при лабораторных измерениях для древесины веток без хвои. Такое поведение можно объяснить гистерезисом температуры фазового перехода воды в мелких капиллярах, а также структурными превращениями в растворах и их переохлаждением.

В шестой главе «Холодная вода и направления исследований в радиофизике» представлено, как микроволновые свойства холодной воды могут давать дополнительную информацию при интерпретации результатов дистанционного зондирования холодных природных объектов. Обсуждаются перспективы дальнейших исследований аномалий радиофизических характеристик различных фазовых состояний воды. В выполненном исследовании был выделен физически обоснованный объект – холодная вода,

¹⁷ **Силонов В.М., Чубаров В.В.** Аморфный лед // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2015. Т. 7. № 1. С. 55-67

свойства которого определяются взаимодействием двух структур – LDL и HDL (их кластеров из десятков молекул). Особенностью объекта является то, что в нем отсутствует деление свойств воды границей вблизи 0 °С, как это часто имеет место в гидрологии.

После длительного накопления результатов изучения свойств воды наблюдается прорыв в понимании не только проблемы ее необычных физико-химических, но и радиофизических характеристик. В настоящей работе отмечена эффективность спектрорадиометрии для исследований в области микроволнового дистанционного зондирования в холодных регионах планеты.

Для практического использования пассивной локации представляется целесообразным развитие систем радиометрии с высоким пространственным разрешением, сопоставимым с радиолокаторами с синтезированием апертуры (РСА). Это возможно, если радиометрическая аппаратура устанавливается на автомобиль, суда на воздушной подушке или авиационные носители (пилотируемые или беспилотные).

Электромагнитные характеристики сред, содержащих объемную воду, существенно зависят от ее фазового состояния. Все известные точки фазовых переходов находятся в интервале $-70...+4$ °С (при нормальном атмосферном давлении). Эти точки приведены на шкале температур фазовых переходов жидкой воды – рис. 11. Представлены также температуры T' и T'' , ограничивающие область существования холодной воды.

Не все аспекты свойств воды затронуты в исследовании. К ним относится поведение орто- и пара- воды. Эти модификации связаны с квантовомеханическими явлениями, которые определяют взаимодействие и конверсию кластеров LDL и HDL. Молекулы воды в орто- и парасостояниях отличаются суммарным спином, который равен 1 или 0, что приводит их к различным квантовым статистикам. По имеющимся данным^[18] переходы между уровнями энергии орто- и пара- молекул должны наблюдаться для случая холодной воды при следующих определенных температурах: -140 °С, -80 °С, -40 °С, -23 °С, -6 °С $+4$ °С, которые или совпадают или близки к значениям, представленным на рис. 11.

Особые точки на температурной шкале необходимо учитывать при исследовании холодных объектов, содержащих воду, потому что связанные с этими температурами аномалии холодной воды могут привести к неправильной интерпретации данных в дистанционном зондировании. Выделение холодной воды также представляется эвристической гипотезой для планирования новых радиофизических исследований.

¹⁸ Pershin S.M. Coincidence of rotational energy of H₂O ortho-para molecules and translation energy near specific temperatures in water and ice // Physics of Wave Phenomena. 2008. T. 16. № 1. С. 15-25.

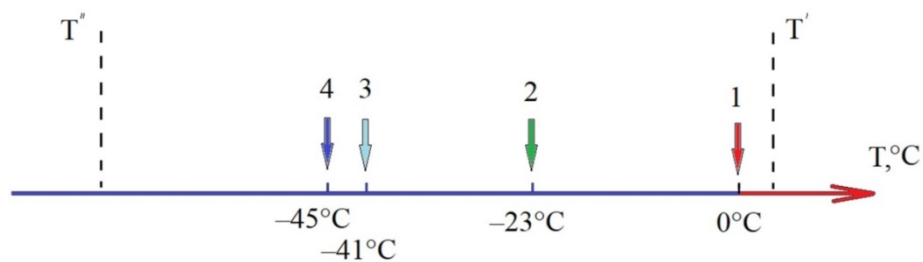


Рисунок 11 – Шкала температур фазовых переходов объемной жидкой воды в области отрицательных температур при давлении 0,1 МПа: 1 – точка перехода жидкость – твердое тело, 2 – граница образования льда 0 из переохлажденной воды, 3 – температура гомогенной нуклеации, 4 – точка на линии Видома, исходящей из второй критической точки; штриховые линии соответствуют T' и T'' – границам областей ΔT_A , где существует холодная вода с выраженными аномалиями физических характеристик. $T' = +4^\circ\text{C}$, 1 – $T_0(1) = 0^\circ\text{C}$, 2 – $T_x(2) = -23^\circ\text{C}$, 3 – $T_f(3) = -41^\circ\text{C}$, 4 – $T_b(4) = -45^\circ\text{C}$, $T'' = -70^\circ\text{C}$

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные защищаемые положения диссертационного исследования подтверждены следующими результатами:

В области изучения холодной воды (при температурах $-70\dots+4^\circ\text{C}$), обладающей аномальными электрофизическими и термодинамическими свойствами

1. Проведен анализ состояния проблемы, связанной с физическими свойствами холодной воды при температурах $-70\dots+4^\circ\text{C}$, находящейся в свободном состоянии и в различных природных увлажненных дисперсных средах гидросферы (растительность, мерзлые грунты, ледяные покровы, атмосферные аэрозоли). Установлена необходимость более глубокого изучения электромагнитных характеристик воды в данном интервале температур и недостаточность соответствующих теоретических и экспериментальных исследований: отсутствие адекватной модели и измеренных значений микроволновой диэлектрической проницаемости воды при температурах ниже -20°C ; отсутствие знаний о микроволновых характеристиках при фазовых переходах холодной воды и льда, а также их проявлений в электромагнитных процессах, основанных на современных физико-химических представлениях о структуре воды в виде кластеров LDL и HDL.

2. В выполненных радиофизических экспериментах показано существование ранее неизвестных электромагнитных и термодинамических особенностей воды в границах температурного интервала $-70\dots+4^\circ\text{C}$: образование метастабильного сегнетоэлектрического льда 0; появление медленных волн пластического течения с длиной волны $\sim 1\text{ см}$; линия Видома при температуре -45°C , для давления 0,1 МПа, связанная со второй критической точкой воды.

3. Усовершенствована электродинамическая модель Дебая и экспериментально получены зависимости действительной и мнимой частей относительной комплексной диэлектрической проницаемости объемной воды для интервала температур $-130...+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ в частотном интервале $1...300\text{ ГГц}$. Впервые выполнены измерения двух частот релаксации воды для температур $-70...+4\text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволило определить диэлектрическую проницаемость объемной воды в порах силикатного материала для всего интервала частот микроволнового диапазона в области глубокого переохлаждения с точностью $\sim 5\%$ (ранее разброс значений оценок диэлектрической проницаемости по существующим моделям для глубоко переохлажденной воды составлял значения до сотен процентов).

4. Из радиофизических экспериментов следует существование новой метастабильной кристаллической модификации – льда 0, образующегося при давлении $0,1\text{ МПа}$ и температурах ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обладая сегнетоэлектрическими свойствами, эта модификация в составе с другими льдами (Ih и Ic), а также на контакте с диэлектрическими средами образует нанометровые слои с высокой электропроводностью, что приводит к возникновению плазменных явлений, которые резко изменяют электромагнитные характеристики дисперсных сред.

5. При лабораторных и натуральных радиолокационных измерениях ледяных структур вблизи частоты 13 ГГц обнаружены волны течения пластической деформации пресного льда с длинами волн $\sim 1\text{ см}$. Такие волны обнаружены в пресном льду впервые. По современным исследованиям аналогичные волны открыты для металлических кристаллов. В случае льда открывается возможность их исследования радиофизическими методами в объеме мерзлых сред, например, при различных стадиях течения ледников.

6. Показано изменение микроволновой экстинкции растворов ряда химических соединений при $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ на линии Видома, что подтверждает существование второй критической точки холодной воды вблизи $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении $\sim 100\text{ МПа}$. Выдвинута гипотеза об ускорении криохимических превращений вблизи линии Видома и получены ее доказательства при микроволновой спектроскопии дисперсной среды, наполненной растворами перекиси водорода, йодистого калия и газообразного водорода по изменению затухания в узком интервале температуры $\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Эти результаты доказывают вынесенное на защиту положение 1.

Исследования диэлектрических характеристик холодной воды

1. Представлена модифицированная электромагнитная модель Дебая относительной диэлектрической проницаемости, основанная на современных представлениях о структуре воды в виде кластеров легкой (LDL) и тяжелой (HDL) воды. В модели рассмотрены две частоты релаксации холодной воды в

частотном диапазоне от 1 ГГц до 300 ГГц в интервале температур $+4 \dots -70$ °С и ее стекловании при -130 °С. Представленное физическое обоснование модели было полностью подтверждено в 2023 г. в работе зарубежных исследователей, где было дополнительно выполнено измерение диэлектрической проницаемости в терагерцовом диапазоне, однако только для «теплой» воды (для температур выше -5 °С)^[10].

2. Модель базируется на впервые выполненных резонаторных измерениях действительной и мнимой частей относительной диэлектрической проницаемости в резонаторе повышенного размера и одновременных измерениях на типах колебаний в прямоугольном резонаторе H_{102} и H_{103} . Усовершенствованная методика измерений устранила влияние неоднородностей увлажненной дисперсной среды, с использованием которой проведены измерения двух частот релаксации на длинах волн сантиметрового диапазона, что позволило рассчитать значения действительной и мнимой частей относительной диэлектрической проницаемости холодной воды до частоты 300 ГГц. Выполненное исследование повысило точность значений диэлектрической проницаемости в несколько раз при температурах ниже -20 °С по сравнению с существующими моделями.

Перечисленные результаты доказывают вынесенное для защиты положение 2.

Исследование электромагнитного поведения холодной воды

1. Впервые экспериментально доказано образование новой кристаллической модификации льда, называемой в литературе льдом 0, который является переходной формой между переохлажденной водой и льдами I_h и I_c . Лед 0 образуется из жидкой метастабильной воды при давлении 0,1 МПа и температурах ниже -23 °С. Превращение воды в сегнетоэлектрический лед 0 в дисперсной среде было обнаружено радиофизическими методами с использованием его особого свойства образовывать на границе с диэлектриками тонкие высокопроводящие слои.

2. Измерения микроволновых потерь во льду, подвергающемуся пластической деформации, выявили существенную зависимость его электромагнитных потерь от структуры объекта. Установлено уменьшение мнимой части относительной диэлектрической проницаемости на десятки процентов вблизи 0 °С при деформации, вызванной нагреванием, в случае совпадения электрического вектора электромагнитной волны с базисной плоскостью кристаллов льда.

3. Измерения микроволнового затухания увлажненных дисперсных сред вблизи -45 °С показали существование особого состояния воды на линии

Видома, на которой имеет место равенство концентраций двух видов воды LDL (низкой) и HDL (высокой) плотности.

Полученные результаты доказывают вынесенное для защиты положение 3.

Изучение динамических явлений в мерзлых средах

1. Впервые обнаружены волны пластической деформации в пресном льду, представляющие чередование кристаллического и аморфного состояния (близкого к жидкой воде). Волны распространяются в ледяных структурах при механических воздействиях на них (сейсмические, тепловые, импульсные механические нагрузки, вызванные ударами и т.п.). Характерные для этого явления длины волн, известные для металлов и некоторых других сред, составляют значение 0,5...2 см. По выполненным измерениям для поликристаллического пресного льда длины волн имеют те же значения. Волны течения существенно изменяют отражательные и собственные излучательные характеристики ледяных объектов на частотах электромагнитного излучения 13...34 ГГц, особенно в области 13 ГГц (в полосе 0,5 ГГц). Относительная прозрачность ледяных структур в микроволновом диапазоне открывает возможности изучения структур в их объеме.

Полученные результаты доказывают вынесенное для защиты положение 4.

Разработка новых направлений дистанционных исследований природной среды

1. Предложена методика спутникового мониторинга схода горных ледников, основанная на регулярном радиолокационном построении изображений и обнаружении областей с усилением обратного рассеяния, т.е. областей, где начинается пластическая деформация (образование медленно изменяющихся волн течения, представляющих из себя наборы дифракционных решеток). Метод позволяет проводить раннюю диагностику опасного природного явления – схода лавин.

2. Высказана и обоснована гипотеза об аномальном рассеянии излучений облачной атмосферы при конденсации паров воды на холодных диэлектрических частицах. Усиление рассеяния связано с осаждением воды и образованием сегнетоэлектрического льда 0 в виде тонких слоев нанометровых размеров с высокой электропроводностью. При этом возникает плазмонный резонанс, что приводит к сильному рассеянию и поглощению излучений, в том числе в микроволновом диапазоне. Данная гипотеза исследована в лабораторных экспериментах и в натурных условиях наблюдениями за серебристыми мезосферными облаками, создающими свечение при отражении теплового излучения Солнца. Полученные

результаты с использованием радиометрических приемников сантиметрового и миллиметрового диапазонов на территории Забайкалья показали возрастание радиояркости при появлении серебристых облаков на 5 К и подтвердили предложенную гипотезу механизма рассеяния излучений.

3. Установлено, что домены льда 0 – новой сегнетоэлектрической модификации льда могут сохраняться в атмосферных ледяных частицах при их нагревании до -10°C (на примере частиц града). Это представляет интерес для разработки новых методик радиозондирования тропосферных облачных образований и приповерхностных слоев земной коры (ледяных и снежных покровов, грунтов, растительных покровов). В данном случае также возможно проявление плазмонного резонанса.

4. Исследования фазовых превращений воды при 0°C и -23°C , включая особенности на линии Видома (при температуре -45°C и давлении 0,1 МПа), открывают возможности разработки группы методов, связанных с фазовыми переходами холодной воды, которые проявляются в природных образованиях и могут исследоваться микроволновым методами дистанционного зондирования.

5. На ряде примеров показана связь между гидросферой, криосферой, атмосферой, биосферой и литосферой через радиофизические свойства связующей их холодной воды. Эффективным явились преимущества методов микроволновой радиометрии и радиолокации, определяемые частотным и температурным поведением диэлектрической проницаемости холодной воды, ее аномалий и взаимодействием с другими средами.

6. Выделены особые области температур холодной воды от 0°C до $+4^{\circ}\text{C}$, а также вблизи -70°C – на границах, определяющих аномалию плотности холодной воды. Для данных областей выполнены первые микроволновые измерения, подтверждающие аномальные особенности воды. Область от 0°C до $+4^{\circ}\text{C}$ представляется перспективной для радиофизических исследований, так как она характеризуется большими объемами воды на земной поверхности и, практически, малой изученностью.

Предложенные результаты доказывают вынесенное на защиту положение 5.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Патент на изобретение

1. Пат. 2742051 РФ на изобр., МПК G01S 13/02. Способ определения начальной стадии деформации наблюдаемого с космического аппарата ледника / Гурулев А.А., Бордонский Г.С., Орлов А.О. – № 2020104654, заявл. 31.01.2020, опубли. 02.02.2021, Бюл. №4.

Статьи в научных журналах Web of Science и Scopus:

2. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д., Цыбикжапов А.Ц., Цыренжапов С.В. Обнаружение "новых" волн Гинзбурга-Пекара во льду в микроволновом диапазоне // ЖТФ. – 2006. – Т. 76, № 5. С. 94-97.
3. Bordonskiy G.S., **Gurulev A.A.** Measurements of the thermal emission of Chita atmosphere at magnetic storm of 2006 December 14 // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 14th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics/Atmospheric Physics. 2007. Buryatia. Russian Federation. Vol. 6936. P. 69361U.
4. Bordonskiy G.S., **Gurulev A.A.**, Krylov S.D., Orlov A.O., Tsyrenzhapov S.V. Microwave radiation scattering measurements of different types of lake ice covers // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 14th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics/Atmospheric Physics. 2007. Buryatia. Russian Federation. 24-30 June 2007. Vol. 6936. P. 69361W.
5. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.** Изменчивость фазы коэффициента отражения от границы льда в микроволновом диапазоне вблизи температуры фазового перехода // ПЖТФ. – 2008. – Т. 34, № 6. – С. 43-49.
6. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.** Особенности радиотеплового излучения ледяных покровов водоемов с различной степенью минерализации // Водные ресурсы. – 2008. – Т. 35, № 2. – С. 210-215.
7. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д. «Просветление» льда в микроволновом диапазоне при текучести // ПЖТФ. – 2009. – Т. 35, № 22. – С. 46-54.
8. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д. Причины изменения фазы коэффициента отражения от границы воздух-лёд в микроволновом диапазоне // Известия высших учебных заведений. – Радиофизика. – 2009. – Т. 52, № 3. – С. 260-266.
9. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Поляризационные аномалии микроволнового излучения и добавочные электромагнитные волны в деформируемых ледяных покровах // ЖТФ. – 2011. – Т. 81, № 9. – С. 93-99.
10. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д. Электромагнитные свойства нанослоя жидкого азота на поверхности различных веществ при измерениях в резонаторе // ПЖТФ. – 2011. – Т. 37, № 12. – С. 8-15.
11. Бордонский Г.С., **Гурулёв А.А.**, Обязов В.А., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Изучение карстовых ледяных пещер дистанционными методами // География и природные ресурсы. – 2012. – № 1. – С. 133-137.

12. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Усиление микроволнового излучения во льду при фазовом переходе, вызванном давлением // ПЖТФ. – 2012. – Т. 38, № 19. – С. 30-36.
13. **Гурулев А.А.**, Цыренжапов С.В., Орлов А.О. Выявление внутренних неоднородностей в пресном ледяном покрове с использованием пассивной радиолокации // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 9. – С. 38-41.
14. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д. Электромагнитные потери пресного льда в микроволновом диапазоне при 0°C // Радиотехника и электроника. – 2014. – Т. 59, № 6. – С. 587.
15. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Лукьянов П.Ю., Цыренжапов С.В. Приземные микроволновые радиометрические измерения ледяного покрова оз. Байкал // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12, № 2. – С. 91-99.
16. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Определение областей донного газоотделения на акваториях с пресным льдом по данным радарных и радиометрических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 3. – С. 150-161.
17. **Gurulev A.A.**, Zheleznyak I.I., Tsyrenzhapov S.V. Microwave absorption ambiguity of pine needles at negative temperatures // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2017. Irkutsk. Russian Federation. 3-7 July 2017. Vol. 10466, P. 104660I.
18. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.** Экспериментальное доказательство существования линии Видома по особенностям поведения водорода в нанопористом силикате при –45 °С и атмосферном давлении // ПЖТФ. – 2017. – Т. 43, № 8. – С. 34-40.
19. Лукьянов П.Ю., Железняк И.И., **Гурулев А.А.** Устройство для послойного измерения физических свойств ледяного массива в условиях его естественного залегания // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – № 6. – С. 90-93.
20. Bordonskiy G.S., **Gurulev A.A.**, Orlov A.O. Attenuation of microwave radiation at millimeter waves in supercooled water of atmospheric aerosols // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics 2018. Tomsk. Russian Federation. V. 10833. P. 1083322.
21. Бордонский Г.С., Крылов С.Д., **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Особенности структуры пропарины в ледяном покрове, образованной выходами газа // Лед и снег. – 2018. – Т. 58, № 3. – С. 405-416.

22. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Вариации микроволновых потерь в ветках сосны при отрицательных температурах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 5. – С. 120-129.
23. Bordonskiy G.S., **Gurulev A.A.**, Orlov A.O. The Possibility of Observing Noctilucent Clouds in Microwave Radiometric Measurements // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2019. Novosibirsk. Russian Federation. V. 11208. P. 1120818.
24. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.** Проявление автоволн пластического течения в пресном льду при микроволновых измерениях // ПЖТФ. – 2019. – Т. 45, № 6. – С. 40-42.
25. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Орлов А.О. Пропускание электромагнитного излучения видимого диапазона тонким слоем льда 0, конденсированного на диэлектрическую подложку // Письма в ЖЭТФ. – 2020. – Т. 111, № 5. – С. 311 – 315.
26. Бордонский Г.С., Крылов С.Д., **Гурулев А.А.** Лёд 0 в природной среде (экспериментальные данные и предполагаемые области его существования) // Лед и снег. – 2020. – Т. 60, №2. – С.263-273.
27. Bordonskiy G.S., **Gurulev A.A.**, Orlov A.O. Measurements of IR radiation of cold aerosol in the atmosphere above the city of Chita // Proc. SPIE 11560. 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2020. Vol. 11560. P. 115601T-1/5.
28. Цыренжапов С.В., **Гурулев А.А.** Тепловые деформации и радиояркость температура ледяного покрова пресных водоёмов // Лёд и снег. 2020. – Т. 60, № 3. – С. 445-452.
29. Bordonskiy G.S., **Gurulev A.A.**, Orlov A.O., Tsyrenzhapov S.V. Search for plastic flow autowaves in ice by radio brightness temperature // Current problems in remote sensing of the Earth from space. – 2020. – Vol. 17, N 6. – P. 89-92.
30. Orlov A.O., **Gurulev A.A.** The estimated effect of ice 0 on scattering of microwave radiation by cold aerosol // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 27. "27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics" 2021. P. 1191615.
31. **Gurulev A.A.**, Bordonskiy G.S. Locating the sections of ice hummocks on freshwater ice cover by infrared and microwave radiometric measurements // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 27. "27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics" 2021. P. 1191616.

32. Orlov A.O., **Gurulev A.A.**, Tsyrenzhapov S.V. A method of measuring transmittance of radiation from the film of ice 0 in the ir wave band deposited on a dielectric plate // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. "Evolution of Biosphere and Technogenesis, 2nd EBT 2021" 2022. P. 012027.
33. **Gurulev A.A.**, Kazantsev V.A. The specific features of the thermal radiation of lake Kenon during freeze-up in the infrared band // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. "Evolution of Biosphere and Technogenesis, 2nd EBT 2021" 2022. P. 012016.
34. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Орлов А.О. Диэлектрическая проницаемость глубоко переохлажденной воды по данным измерений на частотах 7.6 и 9.7 ГГц // Радиотехника и электроника. 2022. 67(3). С. 259-267.
35. **Гурулев А.А.**, Орлов А.О. Проявление линии Видома при микроволновых измерениях увлажненных перекисью водорода сорбентов // ПЖТФ. – 2022. – Т. 48, № 2. – С. 41-43.
36. **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Цыренжапов С.В., Казанцев В.А., Козлов А.К. Выявление областей торошения пресного ледяного покрова по собственному тепловому излучению // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. Т. 20, № 1. – С. 219-228.
37. **Гурулев А.А.**, Бордонский Г.С., Орлов А.О. Регистрация автоволн пластического течения в ледяных структурах при радиолокационных измерениях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 222-229.
38. **Gurulev A.A.**, Kazantsev V.A., Kozlov A.K. Radiometric research of the winter atmosphere in the city of Chita in the infrared and microwave ranges // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2023. P.12780.
39. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Казанцев В.А., Середин Д.В. Экспериментальное обнаружение просветления пресного льда в оптическом диапазоне вблизи 0 // Оптика и спектроскопия. – 2023. – Т.131, № 10. – С. 1374–1379
40. Bordonskiy G.S., **Gurulev A.A.**, Orlov A.O. Electromagnetic features of structures made of Ih ice covered with ice 0 // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2023. P. 12780.
41. **Гурулев А.А.**, Замана Л.В., Куклин А.П., Казанцев В.А. Выявление термальных источников с использованием космических методов исследований // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21, № 2. – С. 131-140.

42. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Казанцев В.А. Предполагаемый механизм свечения мезосферных облаков // Радиотехника и электроника. – 2024. – Т. 69, № 4. – С. 307-315.

43. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Орлов А.О. Предварительные результаты поисков длительного микроволнового излучения грозовой атмосферы на волне 1.35 см // Исследование Земли из космоса. – 2024. – № 1. – С. 78-84.

44. **Gurulev A.**, Bordonskiy G., Kazantsev V., Kozlov A. Methods of research of radiothermal radiation of cryospheric objects in the microwave range // IV International Conference on Geotechnology, Mining and Rational Use of Natural Resources (GEOTECH-2024). Les Ulis, 2024. P. 02009.

45. Romanov A.N., Bordonskiy G.S., **Gurulev A.A.**, Khvostov I.V., Troshkin D.N., Peleneva M.P., Kazantsev V.A., Kozlov A.K., Orlov A.O. (2024). On some features of diurnal dynamics of solonchak emissivity in summer. // International Journal of Remote Sensing. – 2024. – Vol. 46, Iss. 3. P. 1248–1256.

Статьи в научных журналах РФ, рекомендованных ВАК:

46. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Цыренжапов С.В., Цыбикжапов А.Ц. Обнаружение пространственной дисперсии для микроволнового излучения в ледяных покровах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2006. – Т. 3, № 2. – С. 45-49.

47. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.** Возможные ошибки при интерпретации данных радиозондирования ледяных покровов // Исследование Земли из космоса. – 2007. – № 4. – С. 3-7.

48. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д., Цыренжапов С.В. Изучение волн Гинзбурга-Пекара в ледяных покровах в микроволновом диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2007. – Т. 4, № 1. – С. 267-272.

49. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д., Цыренжапов С.В., Орлов А.О. О коэффициенте отражения электромагнитных волн от границы воздух – лед в сантиметровом диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2008. – Т. 5, № 2. – С. 30-32.

50. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.** Корреляция радиотеплового излучения атмосферы на длинах волн 3.3 мм и 8.5 мм // Исследование Земли из космоса. – 2008. – № 3. – С. 11-17.

51. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Особенности электромагнитных свойств льда и радиозондирование объектов криосферы // Современные проблемы

дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2009. – Т. 6, № 1. – С. 322-326.

52. **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Радиометрические и скаттерометрические исследования озер Забайкалья в зимний период времени // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2009. – Т. 6, № 1. – С. 359-363.

53. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Эффекты гирации микроволнового излучения в ледяных покровах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7, № 3. – С. 139-144.

54. **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Тепловое излучение трехслойной среды с тонким промежуточным слоем // Исследование Земли из космоса. – 2011. – № 4. – С. 5-11.

55. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Добавочные электромагнитные волны в ледяных покровах // Лёд и снег. – 2011. – Т. 116, № 4. – С. 71-79.

56. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д. Влияние температурных напряжений на микроволновые поляризационные характеристики ледяных покровов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 2. – С. 18-25.

57. **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Излучательные характеристики трехслойных сред с тонким промежуточным слоем в СВЧ-диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 2. – С. 26-33.

58. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Многочастотные микроволновые измерения распространения поляризованного излучения внутри ледяного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. – Т. 9, № 1. – С. 275-280.

59. **Гурулев А.А.**, Харин Ю.В., Лукьянов П.Ю., Щегрина К.А. Особенности свойств ледяного покрова содового озера на частоте 13,7 ГГц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 1. – С. 289-293.

60. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д., Лукьянов П.Ю., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Анизотропия микроволнового затухания в ледяном покрове содового озера // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2012. – Т. 7, № 3. – С. 39-44.

61. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Кантемиров Ю.И., Орлов А.О., Лукьянов П.Ю., Щегрина К.А., Цыренжапов С.В. Радиолокационное

исследование ледяного покрова озера Доронинского // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. Т. 10, № 4. – С. 289-297.

62. Бордонский Г.С., Орлов А.О., **Гурулев А.А.**, Щегрина К.А. Изучение ледяного покрова соленых озер радиолокационным методом // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2013. – Т. 51, № 5. – С. 112-114.

63. **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д., Цыренжапов С.В. Радиолокационное определение неоднородностей ледяного покрова пресных озер // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2013. – Т. 51, № 5. – С. 114-116.

64. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Изучение механизма образования добавочных электромагнитных волн в ледяных структурах и возможные задачи дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 3. – С. 193-200.

65. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Различие картин радарных и радиометрических измерений (на примере ледяного покрова эвтрофированного озера) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11, № 2. – С. 228-240.

66. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д., Сигачев Н.П., Щегрина К.А. Изучение свойств композитных криогелей по их микроволновым характеристикам // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2016. – Т. 18, № 3. – С. 304-311.

67. **Гурулев А.А.**, Филенко Р.А., Цыренжапов С.В. Определение подповерхностного пожара угольного месторождения с использованием пассивных радиолокационных методов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2017. – № 1. – С. 75-83.

68. **Gurulev A.A.**, Tsyrenzhapov S.V., Kharin Y.V. Research of Radiation and Radar Characteristics of a Growing Ice Cover // Сибирский журнал науки и технологий. – 2017. – Т. 18, № 2. – С. 373-378.

69. Орлов А.О., **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д., Цыренжапов С.В. Коэффициент затухания электромагнитного излучения в увлажненных аэрозолях при отрицательных температурах в микроволновом диапазоне // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 31, № 2. – С. 109-113.

70. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Влияние аморфизации льда на микроволновые характеристики // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2018. – Т. 24, № 9. – С. 4-13.

71. Цыренжапов С.В., **Гурулев А.А.**, Орлов А.О. Измерение содержания незамерзшей воды в пеностекле при отрицательных температурах // Известия Уральского государственного горного университета. – 2018. – Т. 51, № 3. – С. 83-88.
72. **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Влияние наледей на радиотепловое излучение пресных ледяных покровов // Естественные и технические науки. – 2018. – Т. 122, № 8. – С. 109-111.
73. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Крылов С.Д., Цыренжапов С.В. Использование микроволновой спектроскопии для изучения состояния переохлажденной воды // Конденсированные среды и межфазные границы. 2019. – Т. 21, № 1. – С. 16-23.
74. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.** Резонаторные измерения действительной части относительной диэлектрической проницаемости переохлажденной воды вблизи 9 ГГц // Естественные и технические науки. – 2019. Т. 136, № 10. – С. 16-19.
75. Железняк И.И., Цыренжапов С.В., **Гурулев А.А.** Исследование пластового льда, минеральных образований и воздуха многолетнемерзлой карстовой пещеры Хээтэй в Забайкалье // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2020. – Т. 26, № 7. – С. 33-43.
76. **Гурулев А.А.**, Бордонский Г.С. Микроволновый радиометрический метод изучения волн пластического течения в ледяных образованиях // Естественные и технические науки. – 2022. Т. 173, № 10. – С. 26-28.
77. Бордонский Г.С., **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Изучение фактора потерь льда наледи из пресной воды в миллиметровом диапазоне // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2022. – Т. 3, № 23. – С. 532-541.
78. **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Козлов А.К., Казанцев В.А. Дистанционное изучение опасного атмосферного явления (выпадение града) в г. Чита // Естественные и технические науки. – 2023. – Т. 184, № 9. – С. 30-34.
79. Козлов А.К., **Гурулев А.А.** Особенности радиотеплового изучения наледей в микроволновом диапазоне // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 3. – С. 73-85.
80. **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Казанцев В.А., Козлов А.К., Цыренжапов С.В., Середин Д.В. Обнаружение выхода газа в озере Шакшинское (Забайкальский край) дистанционными методами // Российская Арктика. – 2023. Т. 5, № 4 (23). – С. 27-36.

81. **Гурулев А.А.**, Бордонский Г.С. Холодная вода и ее влияние на электромагнитные свойства криосферных объектов // Российская Арктика. 2024. – Т. 6, № 1 (24). – С. 62-70.

82. **Гурулев А.А.**, Орлов А.О., Цыренжапов С.В., Усманов М.Т. Комплексный поиск протечки дамбы электромагнитными методами зондирования // Мелиорация и гидротехника. – 2025. – Т. 15, № 1. – С. 155–172.