

На правах рукописи



**Лукин Юрий Иванович**

**ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДЫ В  
МИНЕРАЛЬНЫХ ПОЧВОГРУНТАХ ПРИ  
ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ  
ТЕМПЕРАТУРАХ**

Специальность 01.04.01 —  
«Приборы и методы экспериментальной физики по  
физико-математическим наукам»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Красноярск — 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН), обособленном подразделении ФИЦ КНЦ СО РАН «Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФ СО РАН).

Научный руководитель: **Миронов Валерий Леонидович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
член-корреспондент РАН

Официальные оппоненты: **Кашкин Валентин Борисович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУВО «Сибирский федеральный университет»

**Кочеткова Татьяна Дмитриевна**,  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
ФГАОУВО «Национальный исследовательский  
Томский государственный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный педагогический университет»

Защита состоится 5 марта 2021 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 003.075.02 при ФИЦ КНЦ СО РАН по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 38, Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН и на официальном сайте ИФ СО РАН <http://kirensky.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
Д 003.075.02,  
доктор физико-математических наук



Втюрин Александр Николаевич

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** С развитием аэрокосмических технологий широкое распространение получили радиоволновые дистанционные методы зондирования Земли, что дало новые возможности для оперативного экологического мониторинга больших территорий планеты. В последнее время в задачах дистанционного зондирования активно применяется СВЧ диапазон электромагнитных (ЭМ) волн, что позволяет минимизировать влияние тропосферы и ионосферы на зондирующие сигналы. Рабочие частоты аппаратов радиоволнового дистанционного зондирования поверхности Земли находятся в диапазоне больше 400 МГц (диапазоны УВЧ, СВЧ и КВЧ). В качестве примеров таких аппаратов с рабочими частотами  $f$  можно привести BIOMASS<sup>1</sup> ( $f = 435$  МГц), ALOS-1 ( $f = 1.270$  ГГц), Sentinel-1 ( $f = 5.405$  ГГц), Meteor-M (10.6 – 183.31 ГГц), Sentinel-3 ( $f = 23.8$  ГГц и 36.5 ГГц), SMOS ( $f = 1.413$  ГГц).

Методы дистанционного зондирования могут быть пассивными, когда измеряется собственная радиояркостная температура природных объектов с помощью радиометров, и активными, когда измеряется рассеянный объектами сигнал. Дистанционное зондирование позволяет решать широкий круг задач по мониторингу окружающей среды: определение влажности, температуры, классификация объектов, определение глобальных потоков влаги и тепла, изучение глобального изменения климата. Для выполнения таких задач кроме разработки измерительной аппаратуры высокой точности возникает необходимость в интерпретации полученных результатов. Известно, что радиояркостная температура и коэффициент радарного рассеяния связаны с физическими характеристиками объекта через диэлектрическую проницаемость, которая в случае частотной дисперсии является комплексной величиной. Поэтому возникает необходимость в разработке адекватной модели комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) природных объектов. Одними из основных объектов дистанционного зондирования являются почвогрунты<sup>2</sup>. Важнейшим компонентом почвогрунтов является вода, относительное количественное содержание которой оказывает наибольшее влияние на диэлектрические свойства почвогрунтов. Кроме того, наличие воды обуславливает частотную дисперсию влажных почвогрунтов, поэтому важным является учёт в диэлектрических моделях почвогрунтов физических свойств воды. Известно, что в почвогрунтах вода может быть в связанном с поверхностью минеральных частиц состоянии и в несвязанном, заполняя пространство капилляров. Диэлектрические свойства этих компонентов почвенной воды различаются.

---

<sup>1</sup>Планируется к запуску в 2022 г.

<sup>2</sup>Общее название почв и грунтов.

Таким образом, исследование диэлектрических свойств влажных почвогрунтов требует изучения диэлектрических характеристик каждого типа почвенной воды.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования в представленной работе является вода в условиях молекулярного взаимодействия с поверхностью твёрдых частиц в бентонитовой глине при положительных и отрицательных температурах. Предметом исследования являются методы диэлектрических спектроскопических измерений различных типов почвенной воды в талом и мёрзлом почвогрунте.

**Целью** диссертации является разработка метода диэлектрической спектроскопии отдельных типов воды, присутствующих в талых и мёрзлых минеральных почвогрунтах, и его апробация на примере влажной бентонитовой глины. Разработка этого метода предполагает, во-первых, измерение спектров КДП образцов глины при различных влажностях, температурах и плотностях сухого сложения, а во-вторых, создание методик перехода от измеренных спектров КДП образцов влажной глины к спектрам КДП и диэлектрическим характеристикам отдельных компонентов почвенной воды. В связи с этим в работе решались следующие **задачи**:

- Выбор метода измерения частотного спектра КДП почвогрунтов, позволяющего проводить измерения в мегагерцовом и гигагерцовом диапазоне частот ЭМ волны.

- Обеспечение возможности изотермического измерения КДП почвогрунтов в диапазоне температур измерений.

- Оценка погрешности метода расчёта КДП из измеренных параметров ЭМ волны, взаимодействующей с измеряемым образцом.

- Обоснование возможности применения спектроскопической модели Дебая для описания КДП различных типов воды в талой и мёрзлой бентонитовой глине.

- Обоснование возможности измерения термодинамических параметров, описывающих температурную зависимость модели Дебая для диэлектрических спектров различных типов воды в бентонитовой глине.

- Определение параметров температурно-зависимой диэлектрической модели бентонитовой глины в области частот ориентационной релаксации диполей воды из полученных спектров КДП различных типов почвенной воды.

- Расширение применимости температурно-зависимой диэлектрической модели бентонитовой глины на область рабочих частот аппаратов дистанционного зондирования, в которой возможно влияние дополнительных релаксаций.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой исследовательской работы является гипотеза о возможности применения обобщённой рефракционной диэлектрической модели смеси (ОРДМС) к описанию

КДП влажных почвогрунтов в рассматриваемом диапазоне частот ЭМ поля и температур. Применимость ОРДМС обеспечивается хорошим согласованием с независимыми экспериментальными данными, имеющимися в литературе.

#### **Научная новизна:**

1. Разработан автоматизированный измерительный комплекс для измерения КДП почвогрунтов в широком частотном и температурном диапазоне, который может быть использован как в научных, технических, так и в образовательных целях. Разработан метод калибровки измерительного тракта, адаптированный к измерению спектра КДП с помощью коаксиальной измерительной ячейки.

2. Впервые получены в широком частотном диапазоне спектры КДП прочносвязанной и рыхлосвязанной воды в бентонитовой глине в диапазоне отрицательных температур.

3. Обоснована возможность использования модели Дебая для описания спектров КДП воды в прочносвязанном, рыхлосвязанном и несвязанном состоянии в талой и мёрзлой бентонитовой глине. Определено количество релаксаций в различных типах почвенной воды, которое необходимо учесть при создании многорелаксационной модели КДП бентонитовой глины в диапазоне частот от 15 МГц до 15 ГГц.

4. Исследованы вклады в КДП влажного мёрзлого почвогрунта КДП прочносвязанной, рыхлосвязанной и несвязанной воды на примере бентонитовой глины.

5. Установлено, что количество прочносвязанной воды в бентонитовой глине не зависит от температуры.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

– Методики измерения спектров комплексной диэлектрической проницаемости и параметров, характеризующих температурные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости, воды в минеральных почвогрунтах в диапазоне частот от 15 МГц до 15 ГГц с использованием рефракционной модели комплексной диэлектрической проницаемости почвогрунтов.

– В диапазоне частот электромагнитного поля от 2.6 до 15 ГГц частотные спектры комплексных диэлектрических проницаемостей прочносвязанной, рыхлосвязанной и несвязанной воды в бентонитовой глине могут быть описаны однорелаксационной моделью Дебая.

– Методы идентификации и определения относительного содержания прочносвязанной, рыхлосвязанной и несвязанной воды (льда) в бентонитовой глине с использованием физических явлений: диэлектрической поляризации, явления ядерного магнитного резонанса протонов атомов водорода в почвенной воде и явления фазового перехода почвенной воды.

– Температурно-зависимая однорелаксационная диэлектрическая модель в гигагерцовом диапазоне частот талой и мёрзлой бентонитовой глины, учитывающая фазовые переходы почвенной воды, на основе обобщённой рефракционной диэлектрической модели смеси и однорелаксационной модели Дебая для комплексных диэлектрических проницаемостей типов почвенной воды.

– Многорелаксационная температурно-зависимая диэлектрическая модель в диапазоне частот от 15 МГц до 15 ГГц талой и мёрзлой бентонитовой глины, учитывающая обоснованное количество диэлектрических релаксаций в каждом типе воды в рассматриваемом диапазоне частот и содержащая эмпирически обоснованную модель ионной проводимости бентонитовой глины.

**Достоверность** измеренных данных КДП бентонитовой глины обеспечивается совпадением в пределах расчётных погрешностей измеренных с помощью используемых методов величин КДП тестовых веществ со значениями КДП, полученными другими авторами. Достоверность применения ОРДМС обеспечивается сравнительным анализом различных моделей КДП в работах автора диссертации и работах других авторов, в которых ОРДМС продемонстрировала наибольшую точность описания КДП влажных почвогрунтов и восстановления влажности при использовании в задачах дистанционного зондирования. Достоверность методов определения количества связанной воды в бентонитовой глине обеспечивается совпадением величин, найденных с помощью этих методов, в пределах погрешностей измерений. Достоверность применения формул для описания температурных зависимостей параметров спектров КДП различных типов почвенной воды обеспечивается совпадением в пределах погрешностей измерений экспериментальных и расчётных значений спектроскопических параметров в рассматриваемом диапазоне температур.

**Теоретическая и практическая значимость.** Полученные в работе результаты могут быть использованы для развития фундаментальных теорий взаимодействия воды с мелкодисперсными частицами и фазовых переходов различных типов воды в почвогрунтах в процессе замораживания или оттаивания, что может найти применение не только в дистанционном зондировании, но и в геофизике, геокриологии, метеорологии. На основе созданного метода диэлектрической спектроскопии разрабатываются физические модели КДП влажных почвогрунтов, учитывающие их состав и физическое состояние.

**Апробация работы.** Основные результаты работы по теме диссертации докладывались и обсуждались на конференциях всероссийского и международного уровня, таких как: Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2006, 2008, 2010, 2012, 2013, 2015), Международная научная конференция «Решетнёвские чтения» (Красноярск, 2006, 2012), XIV Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана».

Физика атмосферы» (Бурятия, 2007), «International Geoscience and Remote Sensing Symposium» (IGARSS'07, Barcelona, Spain, 2007; IGARSS'10, Honolulu, Hawaii, 2010; IGARSS'12, Munich, Germany, 2012), «Progress in Electromagnetics Research Symposium» (PIERS'09, Moscow, Russia, 2009), XV Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2017).

**Связь с плановыми работами.** Работа была выполнена в рамках следующих программ и грантов:

1. Грант РФФИ+ККФН № 05-02-97712-р-енисей-а «Изучение релаксационных процессов в незамёрзшей почвенной и растительной влаге». 2005–2006 гг.

2. Грант РФФИ-Франция 09-05-91061-НЦНИ-а «Разработка модели диэлектрической постоянной почвы». 2009–2011 гг.

3. Базовый бюджетный проект СО РАН. Приоритетное направление 2.5. Современные проблемы радиофизики и акустики.

Программа 2.5.1. Радиофизические методы диагностики окружающей среды.

Проект. 2.5.1.1. Диэлектрическая спектроскопия природных сред в радиоволновом диапазоне частот. 2009 г.

4. Базовый бюджетный проект СО РАН. Направление II.10. Современные проблемы радиофизики и акустики, в том числе фундаментальные основы радиофизических и акустических методов связи, локации и диагностики, изучение нелинейных волновых явлений.

Программа II.10.1. Радиофизические методы дистанционной диагностики окружающей среды. 2010–2012 гг.

Название проекта: «Диэлектрическая спектроскопия и дистанционная диагностика почвенного покрова и горных пород в радиоволновом диапазоне частот». 2010–2012 гг.

5. Грант РФФИ №13-05-00502 «Многорелаксационная диэлектрическая модель влажных почв при положительных и отрицательных температурах». 2013–2015 гг.

**Личный вклад.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Автор активно участвовал в разработке экспериментальной установки, самостоятельно выполнял экспериментальные работы и обработку данных, участвовал в обсуждении результатов. Автором диссертации разработана оригинальная методика калибровки элементов измерительного волноводного тракта с использованием пустых измерительных коаксиальных контейнеров. Подготовка к публикациям изложенных в диссертационной работе результатов проводилась совместно с соавторами, причём вклад диссертанта был определяющим.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 21 печатном издании, 9 из которых изданы в журналах, рекомендованных

ВАК, 8 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 8 — в тезисах докладов. Зарегистрированы 2 программы для ЭВМ.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 3 приложений. Полный объем диссертации составляет 200 страниц, включая 52 рисунка и 9 таблиц. Список литературы содержит 176 наименований.

## Содержание работы

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования. Приводится оценка научной новизны полученных результатов. Изложена структура и краткое содержание диссертации. Перечислены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводится обзор последних достижений в области исследования диэлектрических свойств влажных почвогрунтов. Приведены основные методы измерения КДП влажных почвогрунтов. Отмечены основные проблемы, решаемые при разработке методов исследования диэлектрических свойств почвогрунтов.

**Во второй главе** приводится описание лабораторной установки и методик измерения температурных зависимостей спектров КДП почвогрунтов. Метод измерения КДП предполагает использование измерительного контейнера, выполненного в виде отрезка жёсткого коаксиального волновода, диэлектрическим заполнением которого является исследуемый образец. Размеры контейнера обеспечивают одномодовый режим коаксиального волновода. Контейнер подключается к векторному анализатору цепей *Keysight N5232* для измерения элементов  $S$  матрицы рассеяния. Заданный температурный режим обеспечивается температурной камерой *SU-241 Espec*. Управление процессом измерения осуществляется автоматически с помощью персонального компьютера с разработанным оригинальным программным обеспечением. Предложено два метода расчёта КДП почвенного образца, включающие калибровочную процедуру элементов контейнера.

В первом методе используются следующие элементы  $S$  матрицы:  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$ . Для расчёта КДП образца применяются аналитические формулы. Калибровочная процедура предполагает измерения элементов  $S$  матрицы двух пустых контейнеров разной длины. В результате анализа погрешностей метода были обнаружены значительные ошибки расчёта КДП в диапазоне частот ниже 500 МГц, а также на резонансных частотах контейнеров. Вне области резонансных частот, в диапазоне частот от 0.5 до 15 ГГц средняя относительная погрешность измерения вещественной части КДП не превышает 4 % для сухого и 8 % для влажного образца почвогрунта. Средняя абсолютная погрешность

измерения мнимой части КДП сухого почвогрунта не превышает 0.03. Относительная погрешность измерения мнимой части КДП влажного почвогрунта не превышает в среднем 6 %.

Второй метод предполагает использование в расчёте КДП элементов  $S_{12}$  или  $S_{21}$ . В калибровочной процедуре используется тот же контейнер, что и при измерении КДП образца. Расчёт КДП производится численным методом. Данный метод показывает хорошую точность расчёта КДП образца в мегагерцовом диапазоне частот, а также на резонансных частотах контейнера, но демонстрирует снижение точности в диапазоне частот выше 7.4 ГГц. При использовании данного метода средняя относительная погрешность измерения вещественной части КДП сухого образца почвогрунта в диапазоне частот от 15 МГц до 15 ГГц не превышает 4 %, средняя абсолютная погрешность измерения мнимой части КДП не превышает 0.02. В случае измерения влажного почвогрунта средняя относительная погрешность в том же частотном диапазоне не превышает 7 % для вещественной части и 4 % для мнимой части КДП образца.

Основываясь на результатах анализа погрешностей предложенных методик расчёта КДП образцов, в данной работе первый метод расчёта использовался для измерения КДП бентонитовой глины в диапазоне частот от 0.5 до 15 ГГц, второй метод — в диапазоне частот от 15 МГц до 1 ГГц.

В качестве исследуемого образца почвогрунта была выбрана бентонитовая глина, ввиду того, что в ней практически отсутствуют органические составляющие и относительно большое количество воды может находиться в связанном состоянии, что позволяет наглядно продемонстрировать возможности предложенного метода исследования КДП почвенной воды применительно к связанной воде.

**В третьей главе** представлены результаты измерений спектров действительной и мнимой части комплексного показателя преломления (КПП) бентонитовой глины в диапазоне частот от 0.5 до 15 ГГц, в диапазоне влажностей от сухого образца до значения максимальной капиллярно-сорбционной влагоёмкости, которая для бентонитовой глины составляет примерно 1 г/г, при температурах от 25 до минус 30 °С в процессе замораживания. Вещественную и мнимую часть КПП называют соответственно показателем преломления (ПП) и нормированным коэффициентом затухания (НКЗ). Величины ПП  $n$  и НКЗ  $\kappa$  связаны с вещественной  $\varepsilon'$  и мнимой  $\varepsilon''$  частью КДП следующим образом:

$$n^* = n + i\kappa = \sqrt{\varepsilon^*} = \sqrt{\varepsilon' + i\varepsilon''}. \quad (1)$$

Величины  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  часто называют относительной диэлектрической проницаемостью (ОДП) и коэффициентом диэлектрических потерь (КП).

На основе измеренных данных КПП образцов влажной бентонитовой глины разработана спектроскопическая диэлектрическая модель бентонитовой

глины в заданном диапазоне частот и температур. С помощью предложенной диэлектрической модели были найдены спектроскопические и термодинамические параметры, описывающие КДП прочносвязанной, рыхлосвязанной и несвязанной воды в бентонитовой глине.

Разработанная диэлектрическая модель бентонитовой глины основана на ОРДМС и записывается с помощью следующей системы уравнений:

$$\frac{n_s^* - 1}{\rho_d} = \begin{cases} \frac{n_m^* - 1}{\rho_m} + \frac{n_b^* - 1}{\rho_b} M_g, & M_g \leq M_{g1}; \\ \frac{n_s^*(M_{g1}) - 1}{\rho_d} + \frac{n_t^* - 1}{\rho_t} (M_g - M_{g1}), & M_{g1} < M_g \leq M_{g2}; \\ \frac{n_s^*(M_{g2}) - 1}{\rho_d} + \frac{n_{u,i}^* - 1}{\rho_{u,i}} (M_g - M_{g2}), & M_g > M_{g2}, \end{cases} \quad (2)$$

где индексы  $s, m, b, t, u, i$  обозначают соответственно влажный образец почвы, минерал, прочносвязанную воду, рыхлосвязанную воду, несвязанную воду в талой почве и лёд в мёрзлой почве;  $M_g$  — массовая влажность образца, г/г;  $M_{g1}$  — максимальное количество прочносвязанной воды по массе (МПВ), г/г;  $M_{g2}$  — максимальное общее количество прочносвязанной и рыхлосвязанной воды по массе (МОВ), г/г;  $\rho_d$  — плотность сухого сложения почвы, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_q$  — плотность  $q$ -й компоненты смеси, г/см<sup>3</sup>, где  $q = m, b, t, u, i$ .

Для описания частотных спектров КДП различных типов воды в бентонитовой глине используется следующая модифицированная модель Дебая:

$$\varepsilon_p^* = \varepsilon_{p\infty} + \frac{\varepsilon_{p0} - \varepsilon_{p\infty}}{1 - i2\pi f\tau_p} + i\frac{\sigma_p}{2\pi\varepsilon_r f}, \quad (3)$$

где  $i = \sqrt{-1}$ ;  $p = b, t, u, i$ ;  $\varepsilon_{p0}$  — низкочастотный предел диэлектрической проницаемости (НПДП);  $\varepsilon_{p\infty}$  — высокочастотный предел диэлектрической проницаемости (ВПДП);  $\tau_p$  — эффективное время релаксации молекул, с;  $\sigma_p$  — эффективная удельная проводимость, См/м;  $\varepsilon_r = 8.854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Для описания температурной зависимости НПДП и ВПДП  $p$ -й компоненты воды в бентонитовой глине используется эмпирическая формула, полученная на основе формулы Клаузиуса—Массотти, в следующем виде:

$$\varepsilon_{0,\infty p}(T) = \frac{1 + 2 \exp(F_{0,\infty p}(T_{s\varepsilon 0,\infty p}) - \beta_{\varepsilon 0,\infty p}(T - T_{s\varepsilon 0,\infty j}))}{1 - \exp(F_{0,\infty p}(T_{s\varepsilon 0,\infty p}) - \beta_{\varepsilon 0,\infty p}(T - T_{s\varepsilon 0,\infty p}))}, \quad (4)$$

где

$$F_{0,\infty p}(T) = \ln \left[ \frac{\varepsilon_{0,\infty p}(T) - 1}{\varepsilon_{0,\infty p}(T) + 2} \right],$$

$\beta_{\varepsilon 0, \infty p}$  — эмпирический температурный коэффициент,  $\text{K}^{-1}$ . Формула (4) применяется для диапазона температур, определяемого произвольной температурой из этого диапазона  $T_{s\varepsilon 0, \infty p}$ ,  $\text{K}$ .

Для описания температурной зависимости времени релаксации используется формула Эйринга в следующем виде:

$$\tau_p = \frac{h}{kT_K} \exp \left[ \frac{\Delta H_p}{R} \frac{1}{T_K} - \frac{\Delta S_p}{R} \right], \quad (5)$$

где  $h = 6.624 \cdot 10^{-34}$  Дж · с — постоянная Планка;  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана;  $T_K$  — температура,  $\text{K}$ ;  $\Delta H_p$  — изменение энтальпии активации релаксационного процесса, Дж;  $\Delta S_p$  — изменение энтропии активации релаксационного процесса, Дж/К;  $R = 8.314$  Дж/(моль · К) — универсальная газовая постоянная.

Для описания температурной зависимости эффективной удельной проводимости  $\sigma_p$  типов воды в бентонитовой глины используется следующее линейное приближение:

$$\sigma_p(T) = \sigma_p(T_{s\sigma p}) + \beta_{\sigma p}(T - T_{s\sigma p}), \quad (6)$$

где  $\beta_{\sigma p}$  — температурный коэффициент проводимости,  $\text{См}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $\sigma_p(T_{s\sigma p})$  — значение удельной проводимости,  $\text{См}/\text{м}$ , при некоторой произвольной температуре  $T_{s\sigma p}$ ,  $\text{K}$ . Формула (6) применяется для описания температурной зависимости удельной проводимости различных типов почвенной воды в ОРДМС в заданном диапазоне температур, определяемом произвольной температурой  $T_{s\sigma p}$  из этого диапазона.

Формулы (2) — (6) составляют температурно-зависимую ОРДМС (ТОРДМС).

Алгоритм определения спектроскопических характеристик влаги в почвогрунте можно сформулировать в виде следующей последовательности действий:

1. С помощью векторного анализатора электрических цепей и температурной камеры, используя коаксиальный контейнер и предложенную калибровочную процедуру, измеряются частотные спектры амплитуды и фазы элементов  $S$  матрицы рассеяния образцов бентонитовой глины различных влажностей.

2. Из измеренных спектров элементов  $S$  матрицы рассеяния вычисляются частотные спектры КПП для каждого образца заданной влажности.

3. Для каждой частоты и температуры строятся зависимости нормированных на плотность сухого сложения коэффициентов ПП  $(n_s - 1)/\rho_d$  и НКЗ  $\kappa_s/\rho_d$  от массовой влажности  $M_g$ .

4. Методом аппроксимации с помощью формулы (2) находятся спектры ПП и НКЗ прочносвязанной, рыхлосвязанной и несвязанной воды в бентонитовой глине. Среди прочих параметров определяются величины МПВ  $M_{g1}$  и МОВ

$M_{g2}$ . Поскольку в литературе приводятся довольно противоречивые данные по величине плотности связанной воды в почвогрунтах, в данной работе значения плотностей типов почвенной воды в формуле (2) были приняты равными значению плотности объёмной воды вне почвы  $\rho_{b,t,u} = 1 \text{ г/см}^3$ , а значение плотности льда в почвогрунтах принято равным значению плотности льда, образованного из объёмной воды,  $\rho_i = 0.92 \text{ г/см}^3$ .

5. Методом аппроксимации экспериментальных спектров КДП типов почвенной воды с помощью формул (1) и (3) находятся значения спектроскопических параметров каждого типа воды в бентонитовой глине: НПДП  $\varepsilon_0$ , ВПДП  $\varepsilon_\infty$ , эффективного времени релаксации  $\tau$ , эффективной удельной проводимости  $\sigma$ .

6. Методом аппроксимации с помощью формул (4) — (6) для каждого типа воды определяются термодинамические параметры: температурный коэффициент НПДП  $\beta_{\varepsilon 0}$ , температурный коэффициент ВПДП  $\beta_{\varepsilon \infty}$ , изменение энтальпии релаксационного процесса  $\Delta H$ , изменение энтропии релаксационного процесса  $\Delta S$ , температурный коэффициент проводимости  $\beta_\sigma$ .

Полученная совокупность параметров однозначно определит температурную, частотную и влажностную зависимость КДП бентонитовой глины, а также позволит вычислить значения ОДП и КП каждого типа почвенной воды для заданной частоты ЭМ поля и температуры.

Применяя концепцию ОРДМС при анализе влажностных зависимостей приведённых ПП и НКЗ бентонитовой глины были идентифицированы следующие типы воды: прочносвязанная вода, рыхлосвязанная вода, несвязанная вода (в талых образцах) и лёд (в мёрзлых образцах). На рисунке 1 изображены температурные зависимости МПВ и МОВ, найденные с помощью аппроксимации влажностных зависимостей приведённых ПП и НКЗ бентонитовой глины с применением формулы (2).

С помощью метода ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и метода дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) были проведены соответственно измерения количества связанной и незамёрзшей воды в том же типе

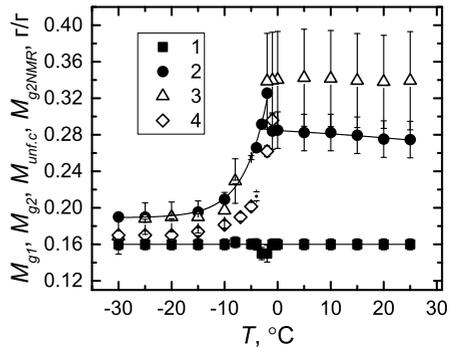


Рисунок 1 — 1) МПВ ( $M_{g1}$ ), найденное с помощью диэлектрического метода, 2) МОВ ( $M_{g2}$ ), найденное с помощью диэлектрического метода, 3) МОВ  $M_{g2NMR}$ , найденное методом ЯМР, 4) количество незамёрзшей воды  $M_{unf.c.}$ , найденное калориметрическим методом

бентонитовой глины для сравнения с величиной  $MOB$ , найденной с помощью описанного выше диэлектрического метода.

ЯМР спектры образцов влажной бентонитовой глины были записаны с помощью импульсного спектрометра *AVANCE 300* производства фирмы «*Bruker*» на частоте прецессии магнитного момента атома  $^1H$  в молекуле  $H_2O$  300.14 МГц в диапазоне температур от 20 до минус 45 °С. Для записи спектров использовалась стандартная методика Фурье-спектроскопии. Длительность 90-градусного радиочастотного импульса составляла около 1.5 мкс. После преобразования Фурье накопленного сигнала индукции, измерялась ширина спектра на половине высоты. Для того чтобы выделить компоненты воды в бентонитовой глине, для каждой температуры измерений были построены зависимости от влажности полуширины спектра ЯМР  $^1H$ , показанные на рисунке 2. На рисунке 2 можно видеть, что по аналогии с концепцией рефракционной модели влажностную зависимость полуширины спектров ЯМР  $^1H$  в бентонитовой глине можно описать кусочно-линейной функцией, а точки излома отнести к максимальному количеству связанной воды при заданных температурах.

Для калориметрических измерений был использован ДСК-калориметр *DSC 204 F-1 Phoenix* фирмы *NETZSCH*. Измерения проводились в диапазоне температур от минус 40 до 20 °С в процессе нагревания.

Измеренные ДСК сигналы были пересчитаны в тепло, выделившееся при оттаивании льда в образце бентонитовой глины. На первом этапе с помощью последовательного измерения тепла, выделившегося при фазовых переходах в образцах почвогрунта различных влажностей, было определено количество незамерзающей воды, как доля воды, не испытывающая фазовый переход во всём рассматриваемом диапазоне температур. На втором этапе был использован образец с влажностью  $M_g > M_{g2}$ , в котором содержатся все типы воды. В данном образце калориметрическим методом измерялась масса

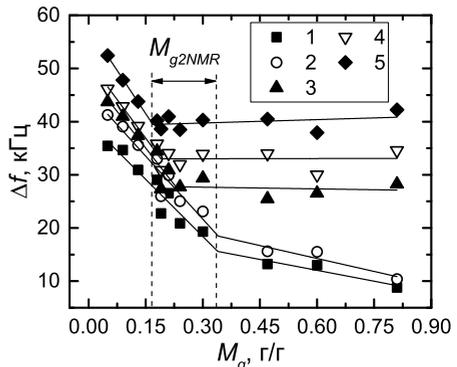


Рисунок 2 — Зависимости полуширин  $\Delta f$  спектров ЯМР  $^1H$  образцов бентонитовой глины от массовой влажности при температурах: 1)  $T = 25$  °С, 2)  $T = 0$  °С, 3)  $T = -8$  °С, 4)  $T = -15$  °С, 5)  $T = -30$  °С. Линиями показаны результаты кусочно-линейной аппроксимации

воды, возникшей при таянии льда на отдельных температурах в отрицательном диапазоне температур в процессе нагревания. Данное количество воды в совокупности с количеством незамерзающей воды отнесено к незамёрзшей воде.

Найденные величины различных типов воды в бентонитовой глине с помощью методов ЯМР и ДСК приведены на рисунке 1. Корреляция величины МОВ, найденной с помощью диэлектрического метода, с максимальным количеством связанной воды, найденном с помощью ЯМР, и с количеством незамёрзшей воды, найденном с помощью ДСК, говорит о том, что данная величина является физическим параметром модели, который можно измерить независимо с помощью других методов.

Для обоснования применимости модели Дебая к описанию КДП воды в бентонитовой глине использовались линейные соотношения, которые можно получить из формулы (3). Можно показать, например, что зависимость  $\varepsilon'(z_\tau)$ , где  $z_\tau(f) = 2\pi f\varepsilon''(f)$ , является линейной функцией в случае присутствия единственной релаксации в веществе. На рисунке 3 изображены построенные зависимости  $\varepsilon'(z_\tau)$  для прочносвязанной, рыхлосвязанной и несвязанной воды при температуре  $T = 25^\circ\text{C}$ , также линиями показаны результаты линейной аппроксимации. Как видно на рисунке 3, экспериментальные данные для рыхлосвязанной и несвязанной воды в

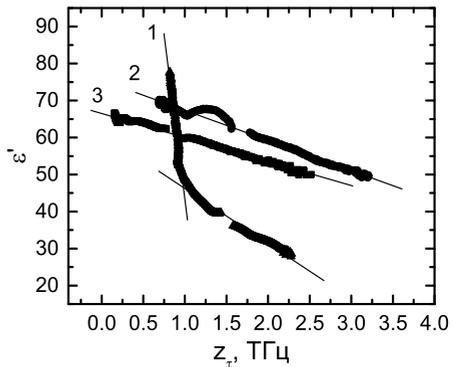


Рисунок 3 — Зависимости  $\varepsilon'(z_\tau)$ , построенные для прочносвязанной (1), рыхлосвязанной (2) и несвязанной воды (3) при температуре  $T = 25^\circ\text{C}$ , линиями показаны результаты линейной аппроксимации

бентонитовой глине действительно следуют линейным зависимостям в рассматриваемом диапазоне частот. Для прочносвязанной воды в диапазоне  $z_\tau < 1$  ГГц, что соответствует частотам  $f < 2.6$  ГГц, экспериментальные точки отклоняются от аппроксимационной прямой, но в этом диапазоне можно построить вторую линейную зависимость, и в результате зависимость  $\varepsilon'(z_\tau)$  во всём рассматриваемом диапазоне частот может быть описана кусочно-линейной функцией с точкой излома, соответствующей частоте  $f = 2.6$  ГГц. Кусочно-линейная зависимость  $\varepsilon'(z_\tau)$  является признаком присутствия нескольких релаксаций. Дополнительная релаксация может быть связана с эффектом Максвелла—Вагнера.

В результате описанного выше анализа спектров КДП типов воды в бентонитовой глине, диапазон частот ЭМ поля, в котором находились параметры

однорелаксационной модели ОРДМС влажной бентонитовой глины, был ограничен интервалом от 1 до 15 ГГц. С помощью метода аппроксимации найденных спектров КДП различных типов воды в бентонитовой глине были получены спектроскопические параметры, температурные зависимости которых показаны на рисунках 4 — 7.

С помощью аппроксимации температурных зависимостей спектроскопических параметров КДП типов воды в бентонитовой глине с применением формул (4) — (6) были найдены термодинамические параметры, описывающие температурные зависимости спектров КДП различных типов воды в бентонитовой глине.

В почвах обычно содержится гораздо меньше связанной воды, чем в глинистых грунтах. В этом случае объёмы отдельных типов связанной воды настолько малы, что идентифицировать их, а также измерить диэлектрические параметры, становится очень сложной задачей. Поэтому при построении диэлектрических моделей почв для прикладных целей можно упростить концепцию ОРДМС, не рассматривая отдельные типы связанной воды. При этом параметры ОРДМС являются эффективными величинами для всего объёма связанной воды. В качестве примера, в диссертационной работе такая упрощённая модель была построена для суглинистой почвы.

В четвёртой главе для использования в диапазоне частот ЭМ поля от 15 МГц до 15 ГГц разработана многорелаксационная ОРДМС (МРДМС) бентонитовой глины, учитывающая как ориентационную поляризацию молекул воды в бентонитовой глине, так и влияние низкочастотных поляризацій.

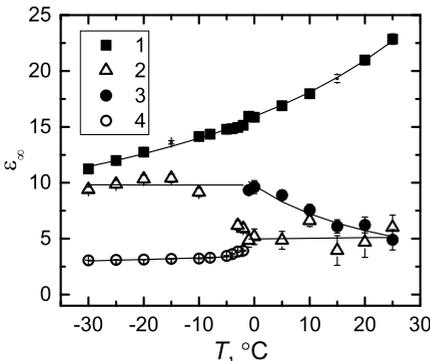


Рисунок 4 — Температурные зависимости ВПДП: прочносвязанной воды  $\varepsilon_{\infty b}$  (1), рыхлосвязанной воды  $\varepsilon_{\infty t}$  (2), несвязанной воды  $\varepsilon_{\infty u}$  (3) и льда  $\varepsilon_{\infty i}$  (4). Линиями показаны модельные зависимости

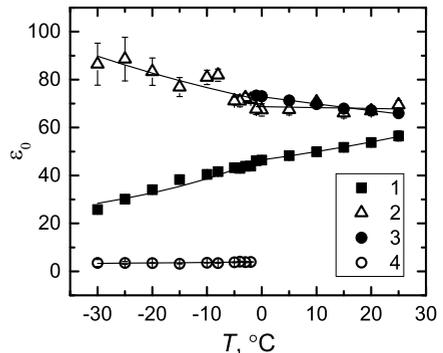


Рисунок 5 — Температурные зависимости НПДП: прочносвязанной воды  $\varepsilon_{0b}$  (1), рыхлосвязанной воды  $\varepsilon_{0t}$  (2), несвязанной воды  $\varepsilon_{0u}$  (3) и льда  $\varepsilon_{0i}$  (4). Линиями показаны модельные зависимости

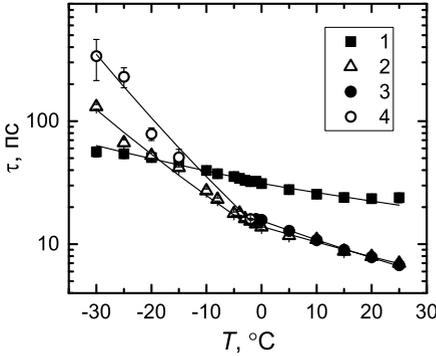


Рисунок 6 — Температурные зависимости времён релаксаций: прочносвязанной воды  $\tau_b$  (1), рыхлосвязанной воды  $\tau_t$  (2), несвязанной воды  $\tau_u$  (3) и льда  $\tau_i$  (4). Линиями показаны модельные зависимости

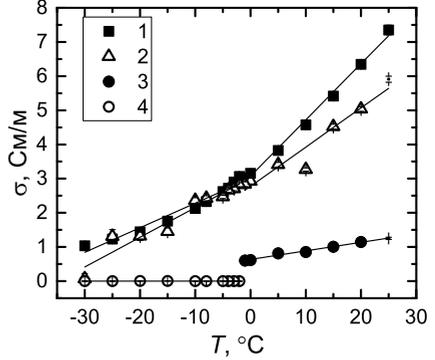


Рисунок 7 — Температурные зависимости эффективных удельных проводимостей: прочносвязанной воды  $\sigma_b$  (1), рыхлосвязанной воды  $\sigma_t$  (2), несвязанной воды  $\sigma_u$  (3) и льда  $\sigma_i$  (4). Линиями показаны модельные зависимости

Для того чтобы учесть низкочастотные релаксации воды в бентонитовой глине, при описании КДП типов почвенной воды используется многорелаксационная модель Дебая, которая для  $l$  релаксаций записывается в виде следующей формулы:

$$\varepsilon_p^* = \varepsilon_{\infty p} + \sum_{k=1}^l \frac{\Delta\varepsilon_{0pk}}{1 - i2\pi f\tau_{pk}}, \quad (7)$$

где

$$\Delta\varepsilon_{pk} = \begin{cases} \varepsilon_{0pk} - \varepsilon_{0p(k+1)}, & k < l, \\ \varepsilon_{0pk} - \varepsilon_{\infty p}, & k = l. \end{cases}$$

Поскольку в бентонитовой глине содержатся растворимые в воде минералы, которые являются источниками свободных ионов, диэлектрическую модель почвогрунта следует дополнить параметром, характеризующим ионную удельную проводимость на постоянном токе образца бентонитовой глины  $\sigma_s$  в виде дополнительного слагаемого к  $\varepsilon_s''$  следующим образом:

$$\varepsilon_s'' = 2n_s\kappa_s + \frac{\sigma_s}{2\pi f\varepsilon_r}, \quad (8)$$

где величины  $n_s$  и  $\kappa_s$  вычисляются с помощью формулы (2).

Слагаемое, обусловленное ионной проводимостью, в формуле (8) зависит от частоты ЭМ поля и в общем случае от влажности образца. Поэтому становится невозможным на низких частотах получить экспериментальные спектры ОДП и

КП почвенной воды с помощью МРДМС. В данном случае спектроскопические параметры КДП каждого типа почвенной воды могут быть получены с помощью аппроксимации спектров ОДП и КП образцов влажной бентонитовой глины, а не экспериментальных спектров ОДП и КП самих типов воды, как в процессе построения однорелаксационной ОРДМС.

На основании результатов регрессионного анализа было определено, что при описании КДП типов воды в бентонитовой глине в рассматриваемом диапазоне частот следует учитывать три релаксации ( $l = 3$ ) для прочносвязанной воды, одну релаксацию ( $l = 1$ ) для рыхлосвязанной воды, две релаксации ( $l = 2$ ) для несвязанной воды и одну релаксацию ( $l = 1$ ) для льда.

На рисунке 8 показаны измеренные спектры ОДП и КП влажных образцов бентонитовой глины для температур 25 и минус 15 °С, также на рисунке линиями показаны результаты аппроксимации с применением формул МРДМС.

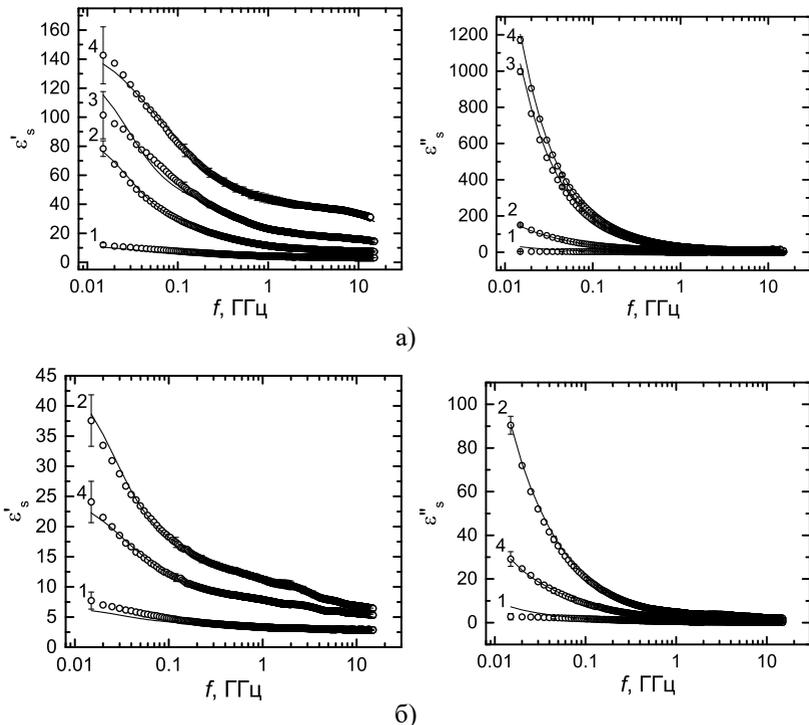


Рисунок 8 — Частотные спектры ОДП (слева) и КП (справа) бентонитовой глины при температурах:  $T = 25$  °С (а) и  $T = -15$  °С (б); и массовых влажностей: 1)  $M_g = 0.04$  г/г, 2)  $M_g = 0.15$  г/г, 3)  $M_g = 0.25$  г/г, 4)  $M_g = 0.92$  г/г. Линиями показаны результаты аппроксимации с применением формул МРДМС

На основе экспериментальных значений удельной проводимости, полученных в качестве параметров МРДМС в процессе аппроксимации измеренных величин КДП образцов бентонитовой глины различных влажностей, предложена модель для ионной удельной проводимости талой влажной бентонитовой глины, выраженной в виде кусочно-линейной функции с точками излома, соответствующими значениям МПВ и МОВ, по аналогии с влажностной концепцией ОРДМС (2). Для описания удельной ионной проводимости мёрзлой влажной бентонитовой глины предложена следующая модель:

$$\sigma_s = \begin{cases} \sigma_b M_g \frac{\rho_d}{\rho_b}, & M_g \leq M_{g1}; \\ \sigma_s(M_{g1}) + \sigma_t(M_g - M_{g1}) \frac{\rho_d}{\rho_t}, & M_{g1} < M_g \leq M_{g2}; \\ \exp\left(- (M_g - M_{g2}) \frac{\rho_d}{d_{fi} \rho_i}\right) \sigma_s(M_{g2}), & M_g > M_{g2}, \end{cases} \quad (9)$$

где  $d_{fi}$  — эмпирический коэффициент, характеризующий снижение проводимости образца за счёт замещения капилляров льдом.

На рисунках 9 и 10 показаны найденные НПДП и времена релаксаций типов почвенной воды, учитываемых в МРДМС бентонитовой глины. В результате аппроксимации температурных зависимостей спектроскопических параметров КДП различных типов воды в бентонитовой глине с применением формул (4) — (6) были найдены термодинамические параметры, характеризующие влияние температуры на диэлектрические релаксации каждого типа почвенной воды.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в работе.

**В приложениях** приведены погрешности измерения амплитуд и фаз элементов  $S$  матрицы рассеяния, а также приводятся графики, показывающие точность описания экспериментальных частотных и температурных зависимостей КДП бентонитовой глины разработанными диэлектрическими моделями.

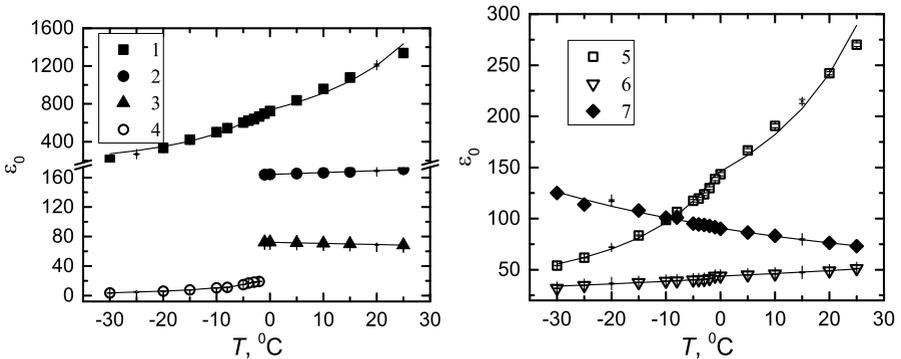


Рисунок 9 — Температурные зависимости НППД: прочносвязанной воды  $\varepsilon_{0b1}$  (1),  $\varepsilon_{0b2}$  (5),  $\varepsilon_{0b3}$  (6); несвязанной воды  $\varepsilon_{0u1}$  (2),  $\varepsilon_{0u2}$  (3); рыхлосвязанной воды  $\varepsilon_{0t}$  (7); льда  $\varepsilon_{0i}$  (4). Линиями показаны модельные зависимости

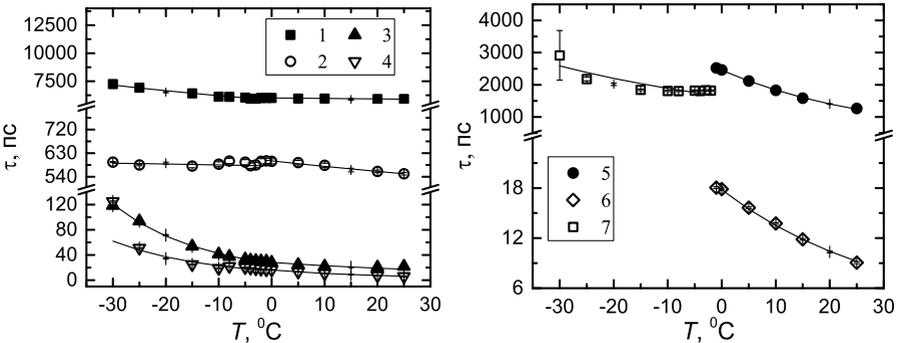


Рисунок 10 — Температурные зависимости времён релаксаций: прочносвязанной воды  $\tau_{b1}$  (1),  $\tau_{b2}$  (2),  $\tau_{b3}$  (3); рыхлосвязанной воды  $\tau_t$  (4); несвязанной воды  $\tau_{u1}$  (5), несвязанной воды  $\tau_{u2}$  (6); льда  $\tau_i$  (7). Линиями показаны модельные зависимости

## Основные результаты диссертационной работы

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. Предложены методики лабораторных измерений частотного спектра КДП влажных почвогрунтов в диапазоне частот ЭМ поля от 15 МГц до 15 ГГц при положительных и отрицательных температурах. Разработан метод калибровки волноводного измерительного тракта с использованием в качестве эталонов пустых измерительных контейнеров разной длины. Проведён анализ погрешностей предложенных методик измерения частотного спектра КДП почвогрунтов.

2. Измерены спектры КДП образцов влажной бентонитовой глины в диапазоне частот от 15 МГц до 15 ГГц, в диапазоне влажностей от сухого состояния образца до значения максимальной капиллярно-сорбционной влагоёмкости, которое для бентонитовой глины составляет примерно 1 г/г, и в диапазоне температур от 25 до минус 30 °С в процессе замораживания.

3. Описаны методики измерения спектров КДП и спектральных параметров КДП типов воды в минеральных почвогрунтах на основе концепции ОРДМС.

4. Разработаны методы идентификации и определения относительного количества различных типов воды в бентонитовой глине с использованием ЯМР и ДСК. Обнаружена корреляция между величиной МОВ, найденной диэлектрическим методом, с количеством связанной воды, найденным с помощью метода ЯМР в диапазоне температур от минус 30 до 25 °С и с количеством незамёрзшей воды, найденным с помощью метода ДСК в диапазоне температур от минус 30 до минус 2 °С.

5. С помощью изложенной методики, основанной на использовании рефракционной диэлектрической модели смеси, выявлены следующие типы воды в бентонитовой глине: прочносвязанная вода, рыхлосвязанная вода, несвязанная вода (в талых образцах) и лёд (в мёрзлых образцах).

6. Показано, что в диапазоне частот от 2.6 до 15 ГГц спектры КДП типов воды в бентонитовой глине могут быть описаны однорелаксационной моделью Дебая.

7. Разработана однорелаксационная ТОРДМС для описания КДП талой и мёрзлой бентонитовой глины в диапазоне частот от 1 до 15 ГГц.

8. Для почв с относительно малым содержанием связанной воды приведены рекомендации по упрощению диэлектрической модели. В качестве примера такая модель была построена для среднесуглинистой минеральной почвы.

9. Разработана многорелаксационная ТОРДМС для описания КДП талой и мёрзлой бентонитовой глины в диапазоне частот от 15 МГц до 15 ГГц.

10. С помощью регрессионного анализа определено количество релаксаций в различных типах воды в бентонитовой глине, которое необходимо учесть при создании моделей спектров КДП каждого типа воды в диапазоне частот от 15 МГц до 15 ГГц.

11. Предложена модель ионной проводимости влажной талой и мёрзлой бентонитовой глины на основе экспериментальных данных, полученных в результате анализа спектров КДП образцов бентонитовой глины различных влажностей с применением многорелаксационной ОРДМС.

## Публикации автора по теме диссертации

### В изданиях из списка ВАК РФ

1. *Комаров, С. А.* Исследование частотного спектра комплексной диэлектрической проницаемости влажных почвогрунтов [Текст] / С. А. Комаров, В. Л. Миронов, Ю. И. Лукин // Известия вузов. Физика. — 2006. — Т. 49, № 9. — С. 29—34. — (Q3, IF=0.625, Scopus, WoS).
2. *Лукин, Ю. И.* Исследование диэлектрических спектров влажной почвы в процессе замораживания-оттаивания [Текст] / Ю. И. Лукин, В. Л. Миронов, С. А. Комаров // Известия вузов. Физика. — 2008. — Т. 51, № 9. — С. 24—28. — (Q3, IF=0.625, Scopus, WoS).
3. *Миронов, В. Л.* Трёхрелаксационная обобщённая рефракционная диэлектрическая модель влажных почв [Текст] / В. Л. Миронов, С. В. Фомин, Ю. И. Лукин // Известия вузов. Физика. — 2015. — Т. 58, 82. — С. 28—31. — (Q3, IF=0.625, Scopus, WoS).
4. Методика измерения частотного спектра комплексной диэлектрической проницаемости почв [Текст] / В. Л. Миронов [и др.] // Радиотехника и электроника. — 2010. — Т. 55, № 12. — С. 1465—1470. — (Q3, IF=0.51, Scopus, WoS).
5. *Миронов, В. Л.* Физическая модель диэлектрических спектров талой и мёрзлой бентонитовой глины в диапазоне частот от 1 до 15 ГГц [Текст] / В. Л. Миронов, Ю. И. Лукин // Известия вузов. Физика. — 2010. — Т. 53, № 9. — С. 71—76. — (Q3, IF=0.625, Scopus, WoS).
6. Анализ фазовых переходов в замёрзших влажных почвах, проводимый на основе характеристик фазовых переходов для различных типов почвенной влаги [Текст] / В. Л. Миронов [и др.] // Известия вузов. Физика. — 2012. — Т. 55, № 8/3. — С. 108—111. — (Q3, IF=0.625, Scopus, WoS).
7. Определение максимального содержания связанной воды в бентонитовой глине с использованием диэлектрического и ЯМР-измерений [Текст] / В. Л. Миронов [и др.] // Известия вузов. Физика. — 2011. — Т. 54, № 1. — С. 65—69. — (Q3, IF=0.625, Scopus, WoS).
8. Joint studies of water phase transitions in Na-bentonite clay by calorimetric and dielectric methods [Text] / V. L. Mironov [et al.] // Cold Reg. Sci. Technol. — 2018. — Vol. 153. — P. 172—180. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165232X17302598>. — (Q1, IF=2.767, Scopus, WoS).

9. *Миронов, В. Л.* Многорелаксационная температурная модель комплексной диэлектрической проницаемости бентонитовой глины в диапазоне частот от 15 МГц до 15 ГГц [Текст] / В. Л. Миронов, Ю. И. Лукин // Радиотехника. — 2019. — Т. 83, 12(19). — С. 33—44.

### **Зарегистрированные программы для ЭВМ**

10. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Программа для обработки результатов измерений физических параметров почв [Текст] / Ю. И. Лукин, П. М. Зацепин ; Ф. государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный университет». — № 2014618949 ; заявл. 04.09.2014 ; опубли. 20.09.2014, приоритет 07.07.2014, 2014616500 (Рос. Федерация).
11. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Расчёт спектра комплексной диэлектрической проницаемости из  $S_{12}$  параметра [Текст] / И. П. Молостов, Ю. И. Лукин ; Ф. государственное бюджетное учреждение науки Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН). — № 2013617581 ; заявл. 20.08.2013 ; опубли. 20.09.2013, приоритет 16.04.2013, 2013612985 (Рос. Федерация).

### **В сборниках трудов конференций**

12. *Lukin, Yu. I.* Dielectric spectroscopy of bound water in the bentonitic clay [Text] / Yu. I. Lukin, S. A. Komarov // 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. — 2007. — P. 735—737.
13. Phase transition analysis in freezing moist soils carried out on the basis of phase transitions characteristic to the different types of soil water [Text] / V. L. Mironov [et al.] // Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE International. — 07/2012. — P. 4497—4500.
14. *Лукин, Ю. И.* Спектроскопические свойства влажной бентонитовой глины при отрицательных и положительных температурах [Текст] / Ю. И. Лукин, И. В. Савин // Тезисы X Международной научной конференции «Решетнёвские чтения», 8–10 ноября 2006 г. — Красноярск, 2006.
15. *Лукин, Ю. И.* Диэлектрическая спектроскопия связанной воды в бентонитовой глине [Текст] / Ю. И. Лукин // Тезисы XIV Международного симпозиума «Атмосфера и оптика океана. Физика атмосферы» 24–29 июня 2007г. — Бурятия, Россия, 2007. — С. 238.
16. The maximum bound water content measurement by dielectric and NMR technique [Text] / V. L. Mironov [et al.] // IEEE Proceedings IGARSS, July 25–30. — Honolulu, Hawaii, USA, 07/2010. — P. 4474—4476.

17. Использование ЯМР в измерении соотношения масс различных типов воды в почвах [Текст] / А. А. Суховский [и др.] // Материалы XVI Международной научной конференции «Решетнёвские чтения» 7–9 ноября. Т. 1. — Красноярск, 2010. — С. 221–222.
18. Method of retrieving permittivity from  $S_{12}$  element of the waveguide scattering matrix [Text] / V. L. Mironov [et al.] // IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 12–13 Sept. 2013. — Krasnoyarsk, Russia, 2013. — P. 1–3.
19. Учёт количества незамёрзшей воды в модели диэлектрической проницаемости мёрзлых почв и грунтов [Текст] / В. Л. Миронов [и др.] // XV Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 13–17 ноября 2017 г. — Москва, 2017. — С. 375.

#### **В прочих изданиях**

20. *Миронов, В. Л.* Применимость концепции незамёрзшей воды при моделировании диэлектрической проницаемости мёрзлых почв [Текст] / В. Л. Миронов, А. Ю. Каравайский, Ю. И. Лукин // Вестник СибГАУ. — 2013. — Т. 51, № 5. — С. 97–100.
21. *Mironov, V. L.* Temperature dependable microwave dielectric model for frozen soils [Text] / V. L. Mironov, Yu. I. Lukin // PIERS Online. — 2009. — Vol. 5, no. 5. — P. 406–410.
22. *Комаров, С. А.* Учёт влияния элементов волноводного тракта при измерениях диэлектрической проницаемости [Текст] / С. А. Комаров, Ю. И. Лукин // Известия АлтГУ. — 2006. — № 1. — С. 126–129.
23. *Mironov, V. L.* The calibration technique for moist soils complex permittivity measurements in the microwave band [Text] / V. L. Mironov, Yu. I. Lukin // PIERS Online. — 2009. — Vol. 5, no. 4. — P. 369–372.

*Лукин Юрий Иванович*

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДЫ В МИНЕРАЛЬНЫХ  
ПОЧВОГРУНТАХ ПРИ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата  
физико-математических наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1.4. Тираж 70 экз.

Типография Института физики им. Л. В. Киренского  
Сибирского отделения Российской академии наук —  
обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38