

На правах рукописи



Каравайский Андрей Юрьевич

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МИНЕРАЛЬНЫХ ПОЧВ,
УЧИТЫВАЮЩИЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ ПОЧВЕННОЙ ВОДЫ

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск – 2020

Работа выполнена в Институте физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

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

Официальные оппоненты: Дамдинов Баир Батуевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Репин Андрей Владимирович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный педагогический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Защита состоится 05 июня 2020 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 003.075.01 в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН- обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 38.

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

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 003.075.01,
доктор физико-математических наук

Втюрин
Александр Николаевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В последнее время активно развиваются аэрокосмические технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в микроволновом диапазоне частот, что дает новые возможности для получения информации о земной поверхности, при решении экологических и других народнохозяйственных задач. В настоящее время методы микроволнового аэрокосмического зондирования широко применяются для решения задач мониторинга влажности талых почв. Одним из важнейших параметров определяющим закономерности отражения, рассеяния и излучения электромагнитных волн почвенными покровами является комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) почв. В связи с этим разработка диэлектрических моделей, связывающих КДП с геофизическими характеристиками влажных почв, является важной частью создания алгоритмов дистанционного зондирования (ДЗ) поверхности суши.

Используемые в настоящее время и перспективные космические аппараты ДЗЗ: Advanced Land Observing Satellite (ALOS-2), Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS), Soil Moisture Active Passive (SMAP), TerraSAR-X, Global Change Observation Mission (GCOM-W1), и Biomass, Copernicus Imaging Microwave Radiometer (CIMR) осуществляют ДЗЗ в широком МГц и ГГц диапазонах частот. В связи с этим является актуальным разработка спектроскопических диэлектрических моделей почв в МГц и ГГц диапазонах частот. В литературе отмечается, что не существует универсальной диэлектрической модели, охватывающей все ландшафты и климатические условия, а разработка новых диэлектрических моделей талых и мёрзлых почв для конкретных территорий таких, как арктическая тундра является актуальной нерешенной задачей.

Особый интерес представляют мерзлые почвы, так как на большей части Российской Федерации в течение длительного времени температура почвенного покрова держится ниже 0 °С. Вместе с тем, в литературе имеется ограниченный набор данных диэлектрических измерений почв в мёрзлом состоянии, а созданные диэлектрические модели ограничены по точности. Основным отличием состояния почвы при отрицательной температуре является то, что часть воды может находиться в состоянии льда, если влажность в почве выше некоторого критического значения, такие почвы называются мерзлыми. Существенным для построения диэлектрических моделей мёрзлых почв является установление законов количественного изменения содержания незамерзшей воды и льда в процессе повышения и понижения температуры мёрзлой почвы, то есть исследовать фазовые переходы (ФП) почвенной воды.

Для определения количества незамерзшей воды существуют различные методы, основными из которых являются калориметрический метод, метод ядерно-магнитного резонанса и диэлектрический метод. В известных работах

по диэлектрическим моделям мерзлых почв постулировалось, что с использованием диэлектрических измерений могут быть исследованы ФП воды, однако доказательств влияния ФП почвенной воды на величину измеряемой КДП почвы не приводилось. В связи с этим необходимо подтвердить результаты, доказывающие, что диэлектрические измерения действительно позволяют идентифицировать ФП почвенной воды. Целью таких исследований является установление температурной зависимости количества незамерзшей воды с помощью диэлектрических измерений.

Таким образом, разработка диэлектрических моделей, минеральных почв как для мерзлого так и для талого состояния, включая почвы арктического региона, учитывающие ФП почвенной воды является актуальной задачей.

Цель настоящей работы заключается в изучении диэлектрических свойств компонент воды в почве в процессе фазовых переходов почвенной влаги методами диэлектрической спектроскопии и дифференциально сканирующей калориметрии, и построение диэлектрических моделей влажных минеральных почв учитывающих влияние фазовых переходов.

Для достижения данной цели были решены следующие **задачи**:

- Проведены измерения комплексной диэлектрической проницаемости естественных минеральных почв с различным содержанием глинистой фракции в диапазоне частот от 0,05 до 15 ГГц, температур от -30 до 25 °C, влажностей от нуля до наименьшей влагоемкости;
- Для образцов Na-бентонитовой глины в диапазоне температур от -40 до 20 °C и диапазоне влажностей от нуля до 0,69 г/г проведены измерения тепловых потоков с помощью дифференциально сканирующего калориметра;
- Данные калориметрических измерений использованы для обоснования предложенного диэлектрического метода исследований фазовых переходов воды в мерзлой почве;
- Разработана температурно- и гранулометрически зависящая диэлектрическая модель талых и мерзлых минеральных почв из одного региона арктической тундры на частоте 1,4 ГГц. И оценена погрешность созданной диэлектрической модели путем сопоставления рассчитанных с ее помощью и измеренных значений КДП почвенных образцов;
- Разработана спектроскопическая модель, описывающая КДП для группы арктических почв в МГц и ГГц диапазоне частот с различным гранулометрическим составом и влажностями для талого и мерзлого состояния, учитывающая фазовые переходы компонент воды в почве.

Объектом исследования являются естественные минеральные почвы с различным содержанием глинистой фракции.

Предмет исследования – фазовые переходы компонент воды в почве.

Методы исследования. КДП талых и мерзлых почвенных образцов измерялась коаксиально-волноводным методом с использованием векторного

анализатора цепей и камеры тепла и холода. Влажность почвенных образцов контролировалась термостатно-весовым методом. Математическая модель КДП талых и мёрзлых почв, строилась на основе обобщенной рефракционной модели смеси. Обработка экспериментальных данных и построение диэлектрической модели осуществлялась в программной среде OriginPro при этом использовались методы минимизации функций многих переменных.

Положения, выносимые на защиту

- Следствием фазового перехода компонент воды в мёрзлой почве является зависящая от температуры и содержания глинистой фракции величина максимального содержания общего количества связанной воды, найденная с помощью диэлектрических измерений.
- Удельная теплота плавления имеет разные значения при переходе льда в незамерзшую связанную почвенную воду и при переходе льда в несвязанную почвенную воду, в области температур от -40 до 20 °С.
- Модель КДП мёрзлых арктических минеральных почв на частоте $1,4$ ГГц, учитывающая влажность от 0 до наименьшей влагоемкости, температуру от -30 до 25 °С, содержание глинистой фракции и фазовые переходы компонент воды в почве.
- Спектроскопическая модель КДП арктических минеральных талых и мерзлых почв в МГц и ГГц диапазоне частот с различным содержанием глинистой фракции от $9,1$ до 42% , влажностями от 0 до наименьшей влагоемкости, учитывающая фазовые переходы компонент почвенной воды.

Научная новизна

- Обоснованно использование метода диэлектрической спектроскопии для исследований фазовых переходов компонент почвенной воды.
- Впервые найдены значения удельной теплоты плавления в двух случаях: при переходе льда в незамерзшую связанную почвенную воду и при переходе льда в жидкую несвязанную почвенную воду.
- Предложен метод одновременной аппроксимации диэлектрических данных для группы почв с различным содержанием глинистой фракции для поиска параметров одночастотной и спектроскопической диэлектрических моделей.
- Впервые разработаны диэлектрические модели для группы минеральных почв собранных в районе арктической тундры на полуострове Ямал в широком диапазоне частот, для различных влажностей, как для мерзлого, так и для талого состояния.

Практическая значимость полученных результатов.

Разработан диэлектрический метод измерения максимального содержания незамерзшей воды как основного параметра определяющего фазовое состояние воды в мерзлой почве. Применение найденных значений удельной

теплоты плавления дает возможность оценки теплоты, выделившейся или поглотившейся верхним покровом почвы, используя методы ДЗ.

Предложенные в диссертационной работе диэлектрические модели являются основой для разработки алгоритмов дистанционного зондирования минеральных почв арктического региона для восстановления таких физических характеристик как температура и влажность поверхностного слоя почвенного покрова в талом и мерзлом состоянии. Диэлектрическая модель разработанная на частоте 1,4 ГГц может быть применены в алгоритмах SMOS и SMAP, а спектроскопическая диэлектрическая модель, разработанная в МГц и ГГц диапазонах может быть применена для совокупности спутниковых систем, а также георадаров использующих широкий диапазон частот.

Достоверность результатов обеспечивается использованием апробированных методов и подходов, подтверждается совпадением измеренных значений максимального количества незамерзшей воды в исследуемых почвенных образцах измеренных диэлектрическим методом и методом дифференциальной сканирующей калориметрии, совпадением в пределах установленной погрешности рассчитанных и измеренных значений КДП почвенных образцов, в том числе и с независимыми экспериментальными данными, совпадением ряда экспериментальных данных с результатами, полученными другими исследователями.

Апробация результатов. Основные результаты работы по теме диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях всероссийского и международного уровня, таких как: Восемнадцатая всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-18) (Красноярск, 2012); Международная научная конференция «Решетневские чтения» (Красноярск, 2012); Международная научная конференция «Зондирование земных покровов радарными и радиометрами с синтезированной апертурой» (Улан-Удэ, 2013); Международные научно-практические конференции «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск 2013, 2015); International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Омск, 2015); International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (Пекин, 2016); Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS) (Shanghai, China, 2016, St. Petersburg, 2017); Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Москва, 2017)

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 15 работ: 8 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК [1–8], и 7 публикаций в материалах международных и всероссийских конференций [9–15].

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 150 страниц, включая 40 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 136 наименований.

Включенные в диссертацию результаты получены автором при выполнении работ в рамках следующих грантов: Грант РНФ «Разработка радарного и радиотеплового метода космического дистанционного зондирования температуры в деятельном слое почвенного покрова полуострова Ямал», 2014 – 2016 гг., рег. № 14-17-00656; грант РФФИ «Многорелаксационная диэлектрическая модель влажных почв при положительных и отрицательных температурах», 2013 – 2015 гг. рег. № 13-05-00502; грант РФФИ «Одночастотные диэлектрические модели талых и мерзлых минеральных и органических почв», 2016 – 2018 гг. рег. № 16-05-00572.

Содержание работы

Во введении рассматривается актуальность темы диссертации, кратко описано состояние решаемой проблемы на текущий момент, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, приведены защищаемые положения, показана научная новизна и практическая значимость результатов работы.

В первой главе описаны диэлектрические свойства воды в талых и мерзлых почвах. Проанализированы способы идентификации различных компонент почвенной воды с использованием метода диэлектрической спектроскопии и дифференциально сканирующей калориметрии (ДСК). Описано, что связанная вода в мерзлых почвах может испытывать ФП в широком диапазоне отрицательных температур. Приведен сравнительный анализ диэлектрических моделей для расчета КДП влажных почв в талом и мерзлом состоянии.

Во второй главе поведены исследования ФП компонент почвенной воды диэлектрическим и калориметрическим методами для одних и тех же образцов На-бentonитовой глины. В результате калориметрических измерений, во время нагревания, были записаны ДСК сигналы для образцов с заданными влажностями. Обнаружено, что при малых влажностях не наблюдается поглощения тепла, а следовательно, для данных влажных образцов не наблюдаются и ФП. Осуществляя аппроксимацию влажностной зависимости поглощенной теплоты при ФП было найдено значение максимальной весовой влажности почвенных образцов $m_{gt} = 0,166$ г/г до достижения которой, вода в образцах На-бentonитовой глины не испытывает ФП (при $m_g < m_{gt}$ и $m_g > m_{gt}$ не наблюдалось и наблюдалось поглощение тепла, соответственно).

Зная максимальную весовую влажность до достижения которой, вода в образцах не испытывает ФП, было рассчитано то количество воды в образце Δm_w (г), которое будет испытывать ФП. В результате была построена зависимость теплоты, которая поглощается при ФП, от количества воды Δm_w , испытывающей ФП (Рисунок 1).

Аппроксимация кусочно-линейной зависимостью количество теплоты, поглощенное водой во время фазового перехода (см. Рисунок 1), с точкой излома при $m_g = 0,38$ г/г, позволило определить значения удельной теплоты

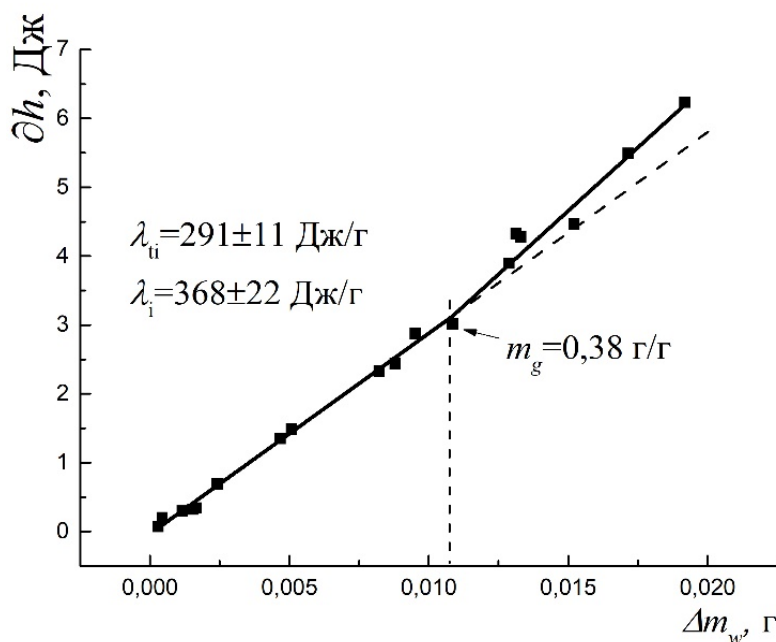


Рисунок 1 – Количество теплоты, поглощенное водой во время фазового перехода

плавления $\lambda_{ti} = 291 \pm 11$ Дж/г и $\lambda_i = 368 \pm 22$ Дж/г, которые можно соотнести с ФП льда в различные компоненты воды. Таким образом было предположено, что найденное значение λ_{ti} является удельной теплотой плавления ФП льда в незамерзшую связанную воду, а λ_i – удельной теплотой плавления при фазовом превращении льда в несвязанную воду. Принимая это во внимание, мы можем рассматривать значение влажности $m_g = 0,38$ г/г, в точке

излома линейных зависимостей, как максимальное содержание незамерзшей связанной воды, определенное калориметрическим методом.

Для тех же образцов На-бентонитовой глины, которые использовались в калориметрических измерениях, были проведены диэлектрические измерения и найдены значения комплексного показателя преломления (КПП), $n_s^* = \sqrt{\epsilon_s} = n_s + i\kappa_s$, где n_s и κ_s – это показатель преломления (ПП) и нормированный коэффициент затухания (НКЗ), соответственно, i – это мнимая единица. Измерения проводились в диапазоне температур от -30 до 0 °C и в диапазоне частот от $0,05$ до 15 ГГц. На рисунке 2, для некоторых температур, символами

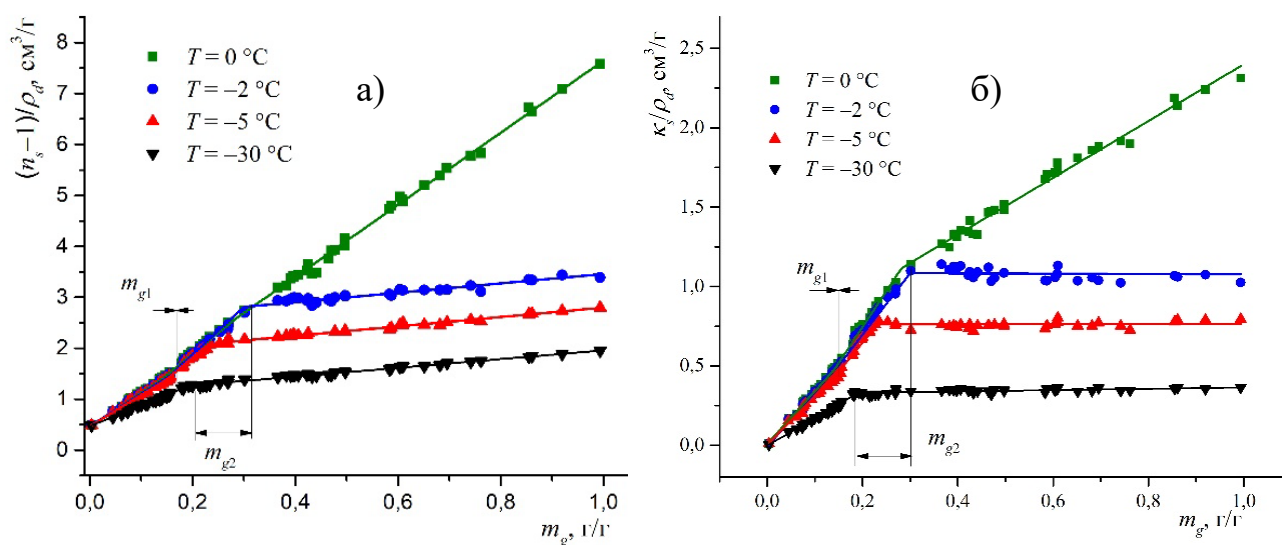


Рисунок 2 – Приведенные ПП, $\frac{n_s-1}{\rho_d}$ (а), и НКЗ, $\frac{\kappa_s}{\rho_d}$ (б), в зависимости от массовой влажности

показаны значения приведенных ПП и НКЗ в зависимости от влажности, усредненные в диапазоне частот измерения.

Для описания приведенного КПП от влажности было использовано рефракционное уравнение смеси (1) с тремя компонентами почвенной воды (прочносвязанная, рыхлосвязанная и несвязанная вода или лед):

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

где ρ – плотность, m_{g1} – максимальное содержание прочносвязанной воды, m_{g2} – максимальное содержание общего количества связанной воды. Индексы s, d, m, b, u и i (которые относятся к n^* , и ρ) связаны с влажной почвой, сухой почвой, твердой (минеральной) компонентой почвы, прочносвязанной водой, рыхлосвязанной водой, несвязанной водой и влажным льдом, соответственно. Аппроксимация влажностных зависимостей КПП с использованием уравнения (1), позволила определить значения m_{g1} и m_{g2} в зависимости от температуры (Рисунок 3).

На рисунке 3 также приведены значения количества незамерзшей воды в

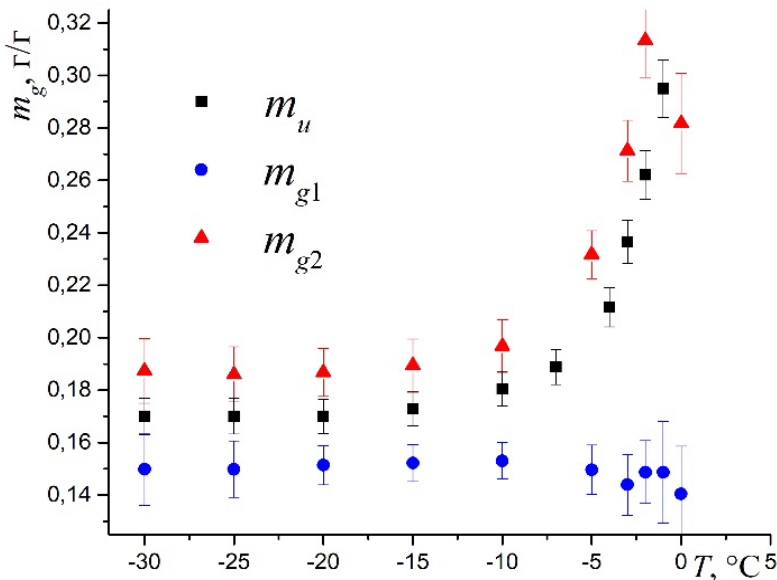


Рисунок 3 – Температурные зависимости максимального содержания прочно связанной воды m_{g1} , максимального содержания общего количества связанной воды m_{g2} , полученные с помощью диэлектрического метода, и количества незамерзшей воды m_u , полученное с помощью калориметрии

зависимости от температуры, полученные из данных калориметрических измерений. При расчетах количества незамерзшей воды, было использовано значение удельной теплоты плавления, соответствующей переходу льда в связанную незамерзшую почвенную воду, считая, что вся незамерзшая вода находится в связанном состоянии при температурах $T < 0$ °C.

На основе полученных результатов диэлектрических и калориметрических измерений был проведен анализ ФП. Сравнивая значения максимального содержания общего

количества связанной воды, полученное с помощью диэлектрического метода (m_{g2}) с одной стороны и количества незамерзшей воды, полученное с помощью калориметрического метода (m_u) с другой стороны, показанных на рисунке 3, можно увидеть, что в пределах погрешности измерений они находятся в хорошем соответствии друг с другом, при этом среднеквадратическое отклонение (СКО) m_{g2} от величины m_u составляет 0,026, а коэффициент детерминации (R^2) равен 0,71. Поскольку, калориметрический метод предполагает измерение поглощенного тепла, которое пересчитывается в количество незамерзшей воды, то это доказывает ее возникновение в следствии ФП. Кроме того, поскольку количество незамерзшей воды совпадает с величиной, полученной из диэлектрических измерений, то максимальное содержание общего количества связанной воды m_{g2} также соответствует незамерзшей воде, возникающей в следствии ФП. Таким образом было доказано, что метод диэлектрической спектроскопии позволяет измерять количество воды испытывающей ФП в мерзлой почве.

Основываясь на данных полученных во второй главе, в **третьей главе** была разработана модель КДП для талых и мерзлых минеральных арктических тундровых почв, три образца для создания которой были отобраны на полуострове Ямал (почвы 1,2,3 в таблице 1), на частоте 1,4 ГГц, учитывающая влажность, температуру, содержание глинистой фракции от 9,1 до 42%, и ФП компонент воды в почве. В настоящее время для измерения влажности почвы и оценки талого и мёрзлого состояния широко используются радиометрические данные спутников SMOS и SMAP на частоте 1,4 ГГц. Исходя из этого, при разработке одночастотной диэлектрической модели, была выбрана частота 1,4 ГГц. Диэлектрические измерения действительной и мнимой частей КДП для почвенных образцов проводились в диапазоне частот от 0,05 до 15 ГГц для значений влажностей почвы от нуля до наименьшей влагоемкости, при изменении температуры от -30 до -1 °С, во время нагревания. Для разработки диэлектрической модели использовались данные на частоте 1,4 ГГц.

Таблица 1 – Гранулометрический состав почв

№	Тип почвы	местонахождение	Гранулометрический состав почвы (%)			
			Песок $d > 0,05$ мм	Ил $0,05 \geq d \geq 0,002$ мм	Глина $d < 0,002$ мм	Органика
1	Супесь	N 70°16' 31" E 68°53'30"	41,4	49,5	9,1	0,9
2	Илистый суглинок	N 70°18'05" E 68°50'29"	40,4	39,0	20,6	2,1
3	Илистая глина	N 70°16'52" E 68°53'29"	1,6	57,1	41,3	2,3
4	Суглинок	N 45°02'41" E 38°58'33"	20,6	46,0	33,4	4,1
5	Илистая глина	N 70°17'48" E 68°54'12"	2,0	55,8	42,2	3,2

Ряд зависимостей, приведенных ПП и НКЗ в зависимости от влажности, при температуре -15 °С, показаны символами на рисунке 4. В результате в естественных минеральных почвах были идентифицированы только две компоненты почвенной воды: незамерзшая связанная вода и увлажненный лед или несвязанная вода. При этом предполагается, что связанная вода включает

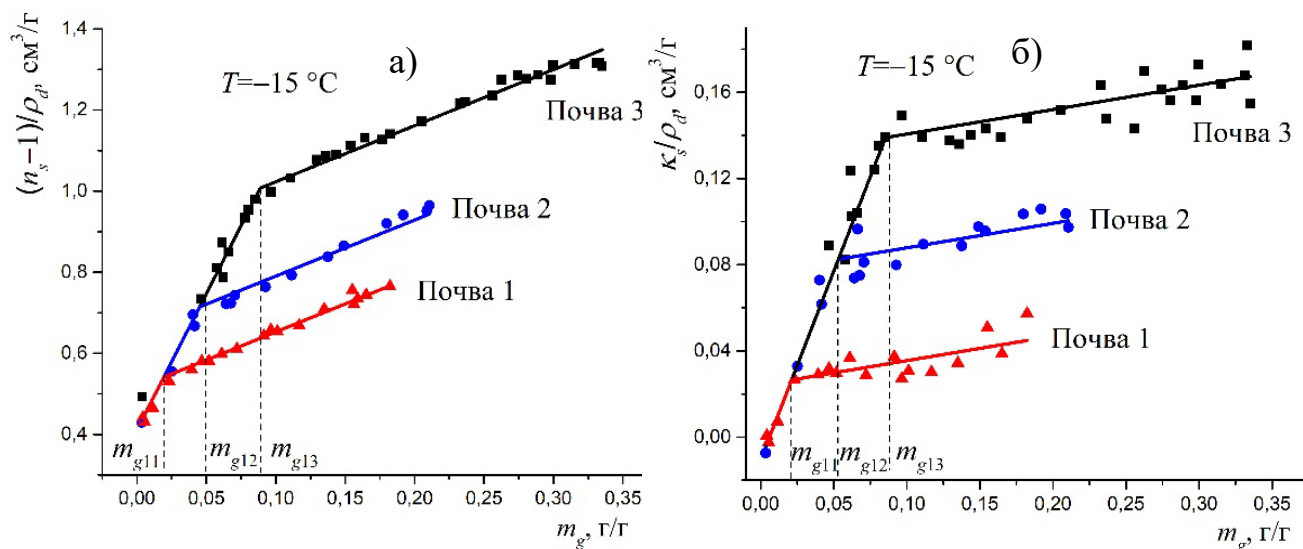


Рисунок 4 – Приведенные ПП (а) и НКЗ (б) измеренных почв при температуре $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и частоте электромагнитной волны 1,4 ГГц в зависимости от массовой влажности

в себя прочносвязанную и рыхлосвязанную воду. Поэтому рефракционное уравнение смеси (1), для измеренных почв, необходимо записать в следующем виде:

$$\frac{n_s^* - 1}{\rho_d} = \begin{cases} \frac{n_m^* - 1}{\rho_m} + \frac{n_b^* - 1}{\rho_b} m_g, & m_g \leq m_{g1}, \\ \frac{n_m^* - 1}{\rho_m} + \frac{n_b^* - 1}{\rho_b} m_{g1} + \frac{n_{u,i}^* - 1}{\rho_{u,i}} (m_g - m_{g1}), & m_g \geq m_{g1}, \end{cases} \quad (2)$$

где m_{g1} – это максимальное содержание незамерзшей связанной воды при фиксированной температуре. При описании влажностных зависимостей, показанных на рисунке 4, был использован новый подход, в котором осуществлялась одновременная аппроксимация приведенных ПП и НКЗ трех почв с использованием уравнения (2). В результате такого подхода было обнаружено, что диэлектрические свойства воды в почве слабо зависят от содержания глинистой фракции для исследуемых почвенных образцов. Это хорошо видно на рисунке 4, где сегменты кусочно-линейной функции, соответствующие связанной воде (при $m_g < m_{g1}$) совпадают друг с другом, а сегменты кусочно-линейной функции, соответствующие несвязанной воде (при $m_g > m_{g1}$) идут параллельно друг другу. В связи с этим, параметры модели (2): $\frac{n_m^* - 1}{\rho_m}$, $\frac{\kappa_m}{\rho_m}$, $\frac{n_b^* - 1}{\rho_b}$, $\frac{\kappa_b}{\rho_b}$, $\frac{n_{u,i}^* - 1}{\rho_{u,i}}$ и $\frac{\kappa_{u,i}}{\rho_{u,i}}$ были общими для всех почв, в то время как параметр m_{g1} находился для каждой отдельной почвы и был равен m_{g11} , m_{g12} , m_{g13} , соответственно для почв №1, 2, 3 в таблице 1. Данные параметры были найдены для всех измеренных температур (Рисунок 5). В результате было получено, что значения КПП различных компонент воды зависят только от температуры, а m_{g1} зависит как от температуры, так и от содержания глинистой

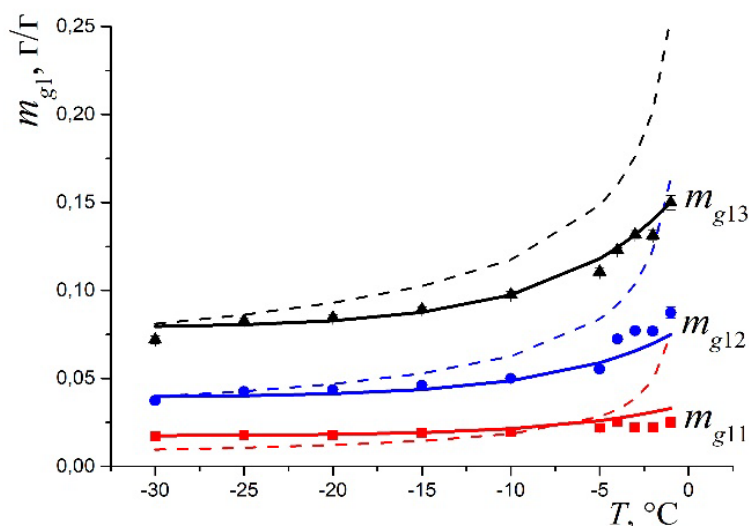


Рисунок 5 – Количество связанной воды в зависимости от температуры для почв 1, 2, и 3 из таблицы 1. Сплошные линии соответствуют разработанной модели, пунктирные линии соответствуют модели из [16]

глинистой фракции были получены следующие формулы:

$$m_{g1} = 0,0019C \left(1 + 1,056 \exp \left(\frac{T}{6,77} \right) \right), \quad (3)$$

$$\frac{n_m - 1}{\rho_m} = 0,415 - 0,0256 \exp \left(\frac{T}{3,57} \right), \quad (4)$$

$$\frac{n_b - 1}{\rho_b} = 8,042 + 0,0921T, \quad (5)$$

$$\frac{n_i - 1}{\rho_i} = 1,305 + 1,022 \exp \left(\frac{T}{4,02} \right), \quad (6)$$

$$\frac{\kappa_m}{\rho_m} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\kappa_b}{\rho_b} = 1,654 - 0,258 \exp \left(\frac{T}{4,07} \right), \quad (8)$$

$$\frac{\kappa_i}{\rho_i} = 0,204 + 0,00354T. \quad (9)$$

В итоге была разработана температурно- и гранулометрически зависящая диэлектрическая модель мерзлых минеральных почв на частоте 1,4 ГГц, которая описывается формулами (2) – (9). Входными параметрами данной модели служат плотность сухой почвы ρ_d , г/см³, массовая влажность m_g , г/г, температура T , °С, и содержание глинистой фракции в почве C , %.

Оценка погрешности разработанной диэлектрической модели была осуществлена с использованием измеренных значений КДП не использованных при ее создании (почвы 4, 5 в таблице 1). Кроме того, был проведен сравнительный анализ статистических ошибок разработанной диэлектрической модели и диэлектрических моделей известных в литературе относительно соответствующих измеренных диэлектрических значений для

фракции. Как было определено в главе 2, изменение m_{g1} с изменением температуры относится к ФП связанной воды в лед, которые прямо определяются диэлектрическим методом. В тоже время m_{g1} определяется содержанием глинистой фракции в почве, чем больше глины в почве, тем большее количество связанной воды испытывает ФП.

Для количественного описания параметров из уравнения (2) в зависимости от температуры и содержания

почв в талом и мерзлом состоянии. Полученные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Погрешности для разработанной диэлектрической модели (ТМЗ ОРДМС) и модели предложенной в [16] (ММП) для мерзлых почв, и ранее разработанной диэлектрической модели [17] (ТМЗ ОРДМС) и модели предложенной в [18] (Доб) для талых почв

	Независимые почвы, $T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$					
	СКО		НСКО, %		R^2	
	ТМЗ ОРДМС	ММП	ТМЗ ОРДМС	ММП	ТМЗ ОРДМС	ММП
ε'_s	0,76	2,16	9,42	26,9	0,89	0,60
ε''_s	0,36	1,18	26,26	85,5	0,53	0,19
	Независимые почвы, $T > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$					
	ТМЗ ОРДМС	Доб	ТМЗ ОРДМС	Доб	ТМЗ ОРДМС	Доб
	ТМЗ ОРДМС	Доб	ТМЗ ОРДМС	Доб	ТМЗ ОРДМС	Доб
ε'_s	1,54	2,79	12,29	22,29	0,96	0,90
ε''_s	0,65	2,41	33,41	181,31	0,84	0,42

В результате оказалось, что значения СКО и нормированного средне-квадратичного отклонения (НСКО) для действительной и мнимой частей КДП мерзлой почвы, относящиеся к модели ММП, имеют величину почти в 3 раза больше по сравнению с аналогичными величинами, относящиеся к разработанной модели, для почв в мерзлом состоянии. А значения НСКО, относящиеся к модели [18] для действительной и мнимой частей КДП влажной почвы превышают соответствующие значения, относящиеся к модели [17], в 2 и 5 раз, соответственно. Это свидетельствует о том, что разработанная диэлектрическая модель описывает КДП почв отобранных на полуострове Ямал лучше.

В связи с тем, что космические аппараты используют приборы ДЗ в МГц и ГГц диапазонах частот, в Главе 4 разработана спектроскопическая диэлектрическая модель на основе измеренных значений КДП почв рассмотренных в главе 3. Для максимального количества связанной воды использовались усредненные по частоте значения приведенных ПП и НКЗ как для талого, так и для мерзлого состояния. В результате были получены следующие уравнения:

$$m_{g1} = (0,0066 + 0,0016C) + (-0,0071 + 0,0023C) \exp\left(\frac{T}{6,9}\right) \quad (-30 \leq T \leq -1^{\circ}\text{C}), \quad (10)$$

$$m_{g1} = 0,0079 + 0,0034C \quad (0 \leq T \leq 25^{\circ}\text{C}). \quad (11)$$

Эти уравнения близки к тем, что были получены на частоте 1,4 ГГц, это свидетельствует о том, что m_{g1} не зависит от частоты.

Для описания спектров КДП почвенной воды было применено много-релаксационное уравнение Дебая:

$$\varepsilon'_p = \frac{\varepsilon_{0pL} - \varepsilon_{0pM}}{1 + (2\pi f \tau_{pL})^2} + \frac{\varepsilon_{0pM} - \varepsilon_{0pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pM})^2} + \frac{\varepsilon_{0pH} - \varepsilon_{\infty pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pH})^2} + \varepsilon_{\infty pH}, \quad (12)$$

$$\varepsilon''_p = \frac{\varepsilon_{0pL} - \varepsilon_{0pM}}{1 + (2\pi f \tau_{pL})^2} (2\pi f \tau_{pL}) + \frac{\varepsilon_{0pM} - \varepsilon_{0pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pM})^2} (2\pi f \tau_{pM}) + \frac{\varepsilon_{0pH} - \varepsilon_{\infty pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pH})^2} (2\pi f \tau_{pH}), \quad (13)$$

где f частота электромагнитной волны, ε_{0pL} , ε_{0pM} , ε_{0pH} и $\varepsilon_{\infty pH}$ низкочастотные и высокочастотный пределы действительной части КДП почвенной воды, соответственно. Параметры τ_{pL} , τ_{pM} , и τ_{pH} – это времена релаксаций почвенной воды. Индексы H , M , и L относятся к высокочастотной, среднечастотной и низкочастотной релаксациям, соответственно. Описывая спектры КДП образцов с использованием уравнений (12) и (13) были определены параметры релаксации Дебая для связанной воды (ε_{0bL} , ε_{0bM} , ε_{0bH} , $\varepsilon_{\infty bH}$, τ_{bL} , τ_{bM} , и τ_{bH}), несвязанной воды (ε_{0uL} , ε_{0uH} , $\varepsilon_{\infty uH}$, τ_{uL} , и τ_{uH}) в талой почве и для влажного льда (ε_{0iL} , ε_{0iH} , $\varepsilon_{\infty iH}$, τ_{iL} , и τ_{iH}) в мерзлой почве для всех исследуемых температур. Данные параметры были найдены используя новый подход в котором осуществлялась одновременная аппроксимация спектров КДП трех исследуемых почв. Для описания температурных зависимостей спектроскопических параметров были применены теоретические формулы Клаузиуса-Моссотти (14) и (15), Эйринга (16) и удельной проводимости (17). В качестве примера на рисунке 6 приведены экспериментальные температурные зависимости низкочастотных пределов диэлектрической проницаемости (ДП). Из рисунка видно, что при нагревании образцов от -30 до 0 °C наблюдается увеличение

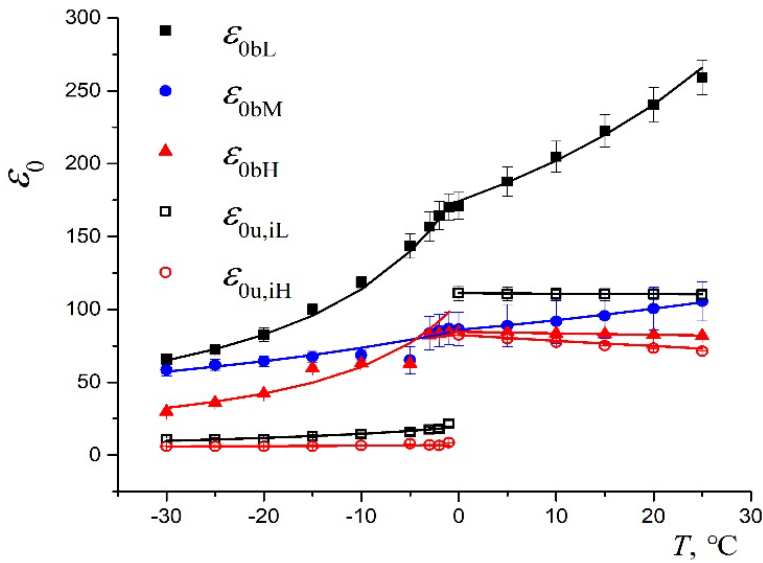


Рисунок 6 – Низкочастотные пределы ДП в зависимости от температуры. Символами показаны измеренные значения, сплошными линиями результат аппроксимации

низкочастотного предела ДП связанной воды. Такое поведение ДП говорит о том, что в исследуемом диапазоне температур наблюдаются ФП влажного льда в незамерзшую связанную воду. При достижении температуры 0 °C данный ФП прекращается. В то же время при 0 °C имеется разрыв для низкочастотного предела ДП несвязанной воды, это свидетельствует о том, что происходит ФП льда в несвязанную жидкую воду.

$$\varepsilon_{qpQ}(T) = \frac{1 + 2 \exp \left[F_{pQ}(T_{sepQ}) - \beta_{vpqQ}(T - T_{sepQ}) \right]}{1 - \exp \left[F_{pQ}(T_{sepQ}) - \beta_{vpqQ}(T - T_{sepQ}) \right]}, \quad (14)$$

$$F_{pQ}(T) = \ln \left[\frac{\varepsilon_{qpQ}(T) - 1}{\varepsilon_{qpQ}(T) + 2} \right], \quad (15)$$

где β_{vp} – объемный коэффициент расширения связанный с компонентами почвенной воды, T и T_{sep} представляет собой текущую и начальную температуру.

$$\ln\left(\frac{kT_K}{h}\tau_{pq}\right) = \frac{\Delta H_{pq}}{R} \frac{1}{T_K} - \frac{\Delta S_{pq}}{R}, \quad (16)$$

где h – постоянная Планка ($6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с), k – постоянная Больцмана ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж·К⁻¹), ΔH_p – энергия активации релаксационного процесса, R – универсальная газовая постоянная ($8,314$ Дж·К⁻¹·моль⁻¹), ΔS_p – энтропия активации, а T_K – температура в Кельвинах.

$$\sigma_{pj}(T) = \sigma_{pj}(T_{sop}) + \beta_{\sigma pj}(T - T_{sop}) \quad (17)$$

где $\beta_{\sigma p}$ – производная проводимости по температуре, а $\sigma_p(T_{sop})$ – значение проводимости при произвольной начальной температуре T_{sop} .

Температурно-зависимые параметры, найденные в результате применения уравнений (14) – (17) приведены в таблице 3. В результате применения нового подхода, который позволяет проводить одновременную аппроксимацию трех исследуемых почв, а также учитывая, что диэлектрические свойства компонент почвенной воды являются близкими, позволило существенно сократить количество параметров входящих в разработанную диэлектрическую модель.

Таблица 3 – Параметры температурно-зависимой диэлектрической модели для компонент почвенной воды

Компонента поч- венной воды	$T \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$				
	Связанная вода ($p=b$)			Несвязанная вода ($p=u$)	
Релаксация	Высокая ($Q=H$)	Средняя ($Q=M$)	Низкая ($Q=L$)	Высокая ($Q=H$)	Низкая ($Q=L$)
Параметры					
$\varepsilon_{0p}(T_{s\varepsilon 0pQ})$	$82,6 \pm 0,4$	101 ± 15	241 ± 12	$73,3 \pm 0,2$	111 ± 4
$T_{s\varepsilon 0pQ}\text{ (}^{\circ}\text{C)}$	20				
$\beta_{v0pQ}\text{ (K}^{-1}\times 10^{-3}\text{)}$	$0,040 \pm 0,005$	$-0,25 \pm 0,01$	$-0,23 \pm 0,01$	$0,18 \pm 0,01$	$0,010 \pm 0,003$
$\frac{\Delta H_{pQ}}{R}\text{ (K)}$	1758 ± 29	-270 ± 190	-339 ± 21	2450 ± 170	415 ± 42
$\frac{\Delta S_{pQ}}{R}$	$1,64 \pm 0,11$	$-8,7 \pm 0,7$	$-10,5 \pm 0,1$	$4,5 \pm 0,6$	$-9,0 \pm 0,2$
$\varepsilon_{\infty p}(T_{s\varepsilon \infty pQ})$	$20,9 \pm 0,7$			$4,3 \pm 2,7$	
$T_{s\varepsilon \infty pQ}\text{ (}^{\circ}\text{C)}$	20				
$\beta_{v\infty pQ}\text{ (K}^{-1}\times 10^{-3}\text{)}$	$-1,1 \pm 1,2$			$-0,12 \pm 0,14$	
Компонента поч- венной воды	$T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$				
	Связанная вода ($p=b$)			Лед ($p=i$)	
$\varepsilon_{0p}(T_{s\varepsilon 0pQ})$	$42,30 \pm 0,03$	65 ± 4	83 ± 5	$6,10 \pm 0,05$	$10,5 \pm 1,2$
$T_{s\varepsilon 0pQ}\text{ (}^{\circ}\text{C)}$	-20				
$\beta_{v0pQ}\text{ (K}^{-1}\times 10^{-3}\text{)}$	$-2,1 \pm 0,1$	$-0,57 \pm 0,05$	$-0,98 \pm 0,02$	$-2,3 \pm 1,3$	$-4,7 \pm 0,5$
$\frac{\Delta H_{pQ}}{R}\text{ (K)}$	1530 ± 165	-218 ± 184	-61 ± 13	3460 ± 670	93 ± 85
$\frac{\Delta S_{pQ}}{R}$	$0,7 \pm 0,7$	$-8,3 \pm 0,7$	$-9,5 \pm 0,5$	$8,4 \pm 2,8$	$-10,2 \pm 0,7$
$\varepsilon_{\infty p}(T_{s\varepsilon \infty pQ})$	$17,3 \pm 0,1$			$4,40 \pm 0,03$	
$T_{s\varepsilon \infty pQ}\text{ (}^{\circ}\text{C)}$	-20				
$\beta_{v\infty pQ}\text{ (K}^{-1}\times 10^{-3}\text{)}$	$-0,29 \pm 0,15$			$-0,3 \pm 0,3$	

Таким образом совокупность параметров из таблицы 3 с соответствующими формулами и соотношениями, представляют спектроскопическую диэлектрическую модель в МГц и ГГц диапазоне частот для почв с различным

содержанием глинистой фракции и влажностями для талого и мерзлого состояния, учитывающую ФП компонент почвенной воды. Измеренные и модельные спектры КДП исследуемых почв приведены на рисунке 7.

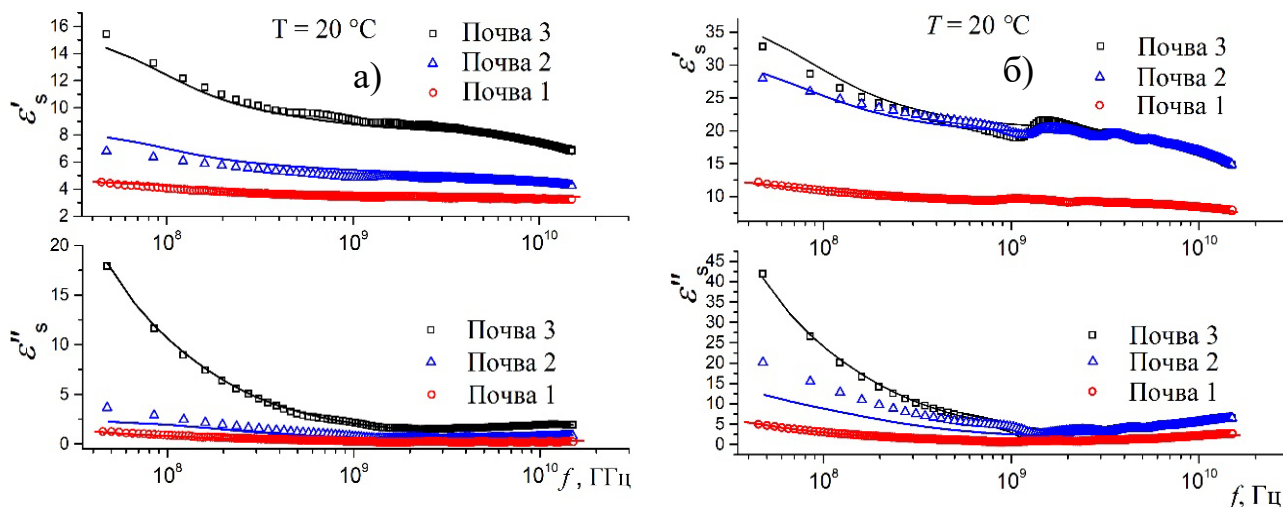


Рисунок 7 – Спектры действительной и мнимой частей КДП. а) при температуре $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и влажностях содержащих только связанную воду, б) на температуре $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ при влажностях содержащих свободную воду

Оценка погрешностей разработанной диэлектрической модели была осуществлена путем сравнения рассчитанных значений КДП с соответствующими измеренными данными. В результате были получены значения НСКО равные 5 и 25% для действительной и мнимой частей КДП, соответственно. При этом значение R^2 оказались равными 0,994 и 0,965 для действительной и мнимой частей КДП, соответственно. Кроме того, был проведен анализ разработанной диэлектрической модели с измеренными данным, которые не использовались при разработке модели (почва 4 в таблице 1). В результате были получены значения НСКО равные 7% и 22%, а значения R^2 оказались равными 0,989 и 0,954 для действительной и мнимой частей КДП, соответственно. Полученные результаты близки к ошибкам измерения соответствующих величин.

В заключении сформулированы основные результаты исследований.

1. Проведены совместные экспериментальные диэлектрические и калориметрические исследования механизмов фазовых переходов воды для одних и тех же образцов Na-бентонитовой глины. В результате получены совпадение количества незамерзшей воды, определенное методом дифференциально сканирующей калориметрии, и общего количества связанной воды, полученные в результате диэлектрических измерений, которые доказывает, что диэлектрический метод позволяет исследовать фазовые переходы связанной воды в мерзлой почве.

2. На основе экспериментальных данных дифференциально сканирующей калориметрии найдены значения удельной теплоты плавления в двух случаях, при переходе льда в незамерзшую связанную почвенную воду $\lambda_{ti} =$

291 ± 11 Дж/г, и при переходе льда в жидкую несвязанную почвенную воду ($\lambda_i = 368 \pm 22$ Дж/г).

3. Разработана температурно- и гранулометрически зависимая диэлектрическая модель описывающая комплексную диэлектрическую проницаемость группы минеральных почв из одного региона арктической тундры для талого и мерзлого состояния на частоте 1,4 ГГц. Определена статистическая ошибка значений КДП рассчитанных с использованием разработанной модели, данная ошибка не превышает величины погрешностей самих измерений.

4. Разработанная диэлектрическая модель количественно учитывает влияния фазовых переходов почвенной воды в зависимости от температуры и содержания глинистой фракции используя найденный параметр – максимальное содержание связанной воды.

5. Предложен новый подход основанный на одновременном анализе влажностных зависимостей комплексного показателя преломления совокупности почв, в результате которого обнаружено, что диэлектрические проницаемости компонент почвенной воды являются близкими для почв с различным содержанием глинистой фракции, собранных из одного региона арктической тундры.

6. Разработана температурно- и гранулометрически зависимая диэлектрическая модель описывающая комплексную диэлектрическую проницаемость группы минеральных почв из одного региона арктической тундры для талого и мерзлого состояния в МГц и ГГц диапазонах частот, которая учитывает влияние фазовых переходов почвенной воды. При создании модели использовался подход позволяющий проводить одновременную аппроксимацию спектров КДП почв с различным содержанием глинистой фракции, в результате чего существенно сократилось количество входящих параметров.

Список основных публикаций по теме диссертации:

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Каравайский А.Ю. СВЧ-диэлектрическая модель влажной среднеглинистой почвы, учитывающая физическую природу фазовых переходов воды в процессах замерзания и оттаивания / А.Ю. Каравайский, В.Л. Миронов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Vol. 56. – № 10/3. – Р. 76-78.
2. Миронов В.Л. Применимость концепции незамерзшей воды при моделировании диэлектрической проницаемости мерзлых почв / В.Л. Миронов, А.Ю. Каравайский, Ю.И. Лукин // Вестник Сибирского государственного университета. – 2013. – Vol. 51. – № 5. – Р. 97-100.
3. Миронов В.Л. Обобщенная рефракционная диэлектрическая модель влажных почв, учитывающая ионную релаксацию почвенной воды / В.Л.

- Миронов, П.П. Бобров, С.В. Фомин, А.Ю. Каравайский // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Vol. 56. – № 3. – Р. 75-79.
4. Каравайский А.Ю. Диэлектрическая модель мерзлого среднеглинистого чернозема в режиме нагревания от -30 до -1 °С на частотах 1,4 и 6,9 ГГц / А.Ю. Каравайский, В.Л. Миронов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Vol. 58. – № 8/3. – Р. 31-34.
 5. Mironov V.L. Temperature- and texture-dependent dielectric model for frozen and thawed mineral soils at a frequency of 1.4 GHz / V.L. Mironov, L.G. Kosolapova, Y.I. Lukin, A.Y. Karavaysky, I.P. Molostov // Remote Sensing of Environment. – 2017. – Vol. 200. – Р. 240-249.
 6. Миронов В.Л. Диэлектрический метод измерения скрытой теплоты плавления льда при оттаивании мерзлой почвы / В.Л. Миронов, А.Ю. Каравайский, Ю.И. Лукин, Е.И. Погорельцев // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2018. – № 12.
 7. Mironov V.L. Joint studies of water phase transitions in Na-bentonite clay by calorimetric and dielectric methods / V.L. Mironov, A.Y. Karavayskiy, Y.I. Lukin, E.I. Pogoreltsev // Cold Regions Science and Technology. – 2018. – Vol. 153. – Р. 172-180.
 8. Mironov V.L. A dielectric model of thawed and frozen Arctic soils considering frequency, temperature, texture and dry density / V.L. Mironov, A.Y. Karavayskiy, Y.I. Lukin, I.P. Molostov // International Journal of Remote Sensing. – 2020. – Vol. 41. – № 10. – Р. 3845-3865.

Прочие статьи и тезисы докладов

9. Каравайский А.Ю. Исследование гистерезиса массы незамерзшей воды при замерзании-оттаивании почв с использованием диэлектрического метода / А.Ю. Каравайский, В.Л. Миронов // Восемнадцатая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых. – 2012. – Vol. 18. – Р. 245-247.
10. Каравайский А.Ю. Применимость концепции вымерзания незамерзшей воды в мерзлой почве для расчета зависимости диэлектрической проницаемости от влажности и температуры / А.Ю. Каравайский, В.Л. Миронов // Материалы XVI Международной научной конференции “Решетневские чтения.” – 2012. – Vol. 1. – № 16. – Р. 210-212.
11. Mironov V.L. Temperature dependent dielectric model at 1.4 GHz for an agricultural soil thawed and frozen / V.L. Mironov, A.Y. Karavaysky // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2015. – Р. 1-4.
12. Mironov V.L. A dielectric model at a frequency of 1.4GHz for frozen mineral soils in the temperature range -1 to -30 °C / V.L. Mironov, L.G. Kosolapova, Y.I. Lukin, A.Y. Karavaysky, I.P. Molostov // 2016 Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2016 - Proceedings. – IEEE, 2016. – Р. 2518-2522.

13. Mironov V.L. Temperature dependent multi-relaxation spectroscopic dielectric model for an arctic silt clay loam soil thawed and frozen at 0.1-15 GHz / V.L. Mironov, I.P. Molostov, A.Y. Karavaysky // International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – IEEE, 2016. – Vols. 2016-Novem. – P. 3122-3125.
14. Mironov V.L. Frequency-, temperature-, and texture-dependent dielectric model for frozen and thawed arctic mineral soils / V.L. Mironov, I.P. Molostov, Y.I. Lukin, A.Y. Karavaysky, S. V. Fomin // Progress in Electromagnetics Research Symposium. – 2017. – P. 2546-2553.
15. Миронов В.Л. Учет количества незамерзшей воды в модели диэлектрической проницаемости мерзлых почв и грунтов / В.Л. Миронов, Ю.И. Лукин, А.Ю. Каравайский, Е.И. Погорельцев // Сборник тезисов докладов пятнадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". – 2017. – P. 375.

Список цитируемой литературы

16. Zhang L. The estimation of dielectric constant of frozen soil-water mixture at microwave bands / L. Zhang, J. Shi, Z. Zhang, K. Zhao // IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477). – 2003. – Vol. 4. – P. 2903-2905.
17. Mironov V.L. Temperature- and Texture-Dependent Dielectric Model for Moist Soils at 1.4 GHz / V.L. Mironov, Y. Kerr, J.-P. Wigneron, L. Kosolapova, F. Demontoux // Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE. – 2013. – Vol. 10. – P. 419-423.
18. Dobson M.C. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part II: Dielectric Mixing Models / M.C. Dobson, F.T. Ulaby, M.T. Hallikainen, M.A. El-rayes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1985. – Vol. GE-23. – № 1. – P. 35-46.

Каравайский Андрей Юрьевич

Диэлектрические модели минеральных почв, учитывающие фазовые
переходы почвенной воды

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук

Подписано в печать 20.03.2020. Заказ № 1

Формат 60х90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 70 экз.

Отпечатано в типографии ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской акаде-
мии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН, ИФ СО РАН)
660036, Красноярск, Академгородок, 50