

На правах рукописи



Фомин Сергей Викторович

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЛАЖНЫХ ПОЧВ
ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОМЕТРИИ И РАДИОЛОКАЦИИ
ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Специальность 2.2.16 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2022

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: Чимитдоржиев Тумэн Намжилович, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

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 ДД месяц 2022 г. в ЧЧ:ММ часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.404.03 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, Академика Киренского, 28.

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

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 24.2.404.03,
доктор физико-математических наук

Дмитриев
Дмитрий Дмитриевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Важнейшей задачей современности становится изучение, мониторинг и прогнозирование состояния Земли как планеты, ее климата, опасных стихийных явлений, катастроф и чрезвычайных ситуаций, влияния человеческой деятельности на состояние окружающей среды и гидрометеорологические процессы. Получение глобальных оперативных данных о состоянии экосистемы Земли возможно только с помощью измерительных средств космического базирования. Экономическая эффективность космического дистанционного зондирования так же весьма высока. Спутниковая радиометрия и радиолокация в микроволновом диапазоне частот являются на сегодняшний день одним из важнейших наиболее успешно и динамично развивающихся направлений дистанционного зондирования земли (ДЗЗ). По сравнению с оптическим, радиодиапазон является всепогодным, круглосуточным и позволяет получать информацию не только непосредственно с поверхности исследуемого объекта, но и проводить зондирование на большую глубину проникновения волны. В основном это аппараты, работающие в гигагерцовом диапазоне: Advanced Land Observing Satellite (ALOS-1,2)/PALSAR-1,2 – 1,26 ГГц, TerraSAR-X – 9,6 ГГц, Global Change Observation Mission (GCOM-W1)/AMSR-2 – 6,9 - 89 ГГц, Soil Moisture & Ocean Salinity (SMOS) и Soil Moisture Active Passive (SMAP) – 1,4 ГГц, Meteor-M – 10,6 - 183,3 ГГц. В ближайшее время 2022г планируется запуск спутника BIOMASS, который будет впервые оснащен радаром с синтезированной апертурой на рабочей частоте 435 МГц.

Созданная за последние десятилетия спутниковая группировка ДЗЗ послужила технологической основой для создания новых микроволновых методов и алгоритмов зондирования влажности почвы в глобальном масштабе. В настоящее время космический продукт влажность почв предоставляется на основе радиолокационных данных спутников ASCAT и Sentinel-1 и радиометрических данных спутников GCOM-W1/AMSR-2, SMAP, SMOS. К сожалению, российская группировка спутников дистанционного зондирования Земли – «Электро-Л» №1, «Метеор-М» № 1 и № 2, «Канопус-В», «Ресурс-П» не предоставляет данные по влажности почвенного покрова Земли. Это заключение сделано исходя из материалов, предоставленных на официальных сайтах Научного центра оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) и федерального государственного бюджетного учреждения "Научно-исследовательского центра космической гидрометеорологии "Планета" (ФГБУ "НИЦ "Планета"), являющихся ведущими организациями по эксплуатации и использованию национальной космической системы дистанционного зондирования земли.

Вода в почвах является составной частью водного баланса Земли, входит в качестве параметра в климатические модели и определена Всемирной

метеорологической организацией как одна из основных климатических переменных, требующих глобального спутникового и наземного мониторинга. Диэлектрическая проницаемость почвенного покрова является ключевым элементом алгоритмов восстановления влажности почв на основе физических моделей микроволнового радиотеплового излучения и радарного рассеяния. К началу представленных в данной работе исследований в алгоритмах восстановления влажности минеральных, талых, незасоленных почв, использовались модели Добсона (M.C. Dobson), Ванга-Шмагге (J.R. Wang, T.J. Schmugge), Халикайнена (M.T. Hallikainen). Данные модели описывали ограниченное количество типов минеральных почв, не позволяли физически обоснованно учесть взаимное количество связанной и свободной почвенной воды, что создавала принципиальные ограничения в их точности прогнозирования и расчета комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) почв широкого гранулометрического состава при различной положительной температуре и плотности почвы.

Поэтому к началу данного исследования, особую актуальность приобрела задача разработки физически-обоснованной модели КДП минеральных почв, пригодной для практического использования в алгоритмах восстановления влажности спутниковых систем, корректно учитывающие взаимное количество связанной и свободной воды в зависимости от гранулометрического состава естественных не засоленных талых почв, их плотности, температуры и влажности, в широком диапазоне частот работы существующих и перспективных микроволновых спутниковых радарных и радиометрических систем.

Целью диссертации является усовершенствование методов космической радиометрии и радиолокации поверхности земли путем создания физически обоснованных моделей диэлектрической проницаемости талых минеральных почв, учитывающих влажность, температуру и тип почвы, которые позволяли бы с большей точностью по сравнению с уже имеющимися моделями рассчитывать диэлектрическую проницаемость талых минеральных почв в широком диапазоне частот, как на тех почвах, которые используются для построения модели, так и на независимых почвах.

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

- Проведены классификация и анализ существующих обширных данных диэлектрических измерений почвенных образцов пригодных для построения наиболее обобщенной диэлектрической модели талых, незасоленных минеральных почв;
- На основе имеющихся данных диэлектрических измерений создана новая спектроскопическая диэлектрическая модель талых минеральных почв, учитывающая влажность, гранулометрический состав почв в микроволновом диапазоне частот, с большей чем предыдущие модели точностью и удобная в использовании;

- Создана температурно-зависимая спектроскопическая диэлектрическая модель талых минеральных почв;
- Для понимания физической природы возрастания диэлектрической проницаемости влажных почв с уменьшением частоты и увеличения точности созданных диэлектрических моделей в мегагерцовом диапазоне усовершенствована спектроскопическая диэлектрическая модель учета релаксационных процессов воды в почве.

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

Предмет исследования являются функциональные зависимости КДП почвы от ее физических параметров.

Методы исследования. Для разработки диэлектрических моделей влажных почв в микроволновом диапазоне частот применялись методы диэлектрической спектроскопии, методы решения обратных задач, проводился регрессионный анализ спектров экспериментальных данных, в результате которого определялись параметры модели при фиксированных значениях температуры, гранулометрического состава почвы. Затем путем регрессионного анализа определенных на предыдущем этапе значений модельных параметров были получены функциональные зависимости этих параметров от содержания глинистой фракции и температуры. Для определения погрешностей разрабатываемых моделей применялись методы статистической обработки данных путем нахождения коэффициента детерминации и среднеквадратического отклонения между измеренными и модельными значениями.

Положения, выносимые на защиту

- Метод нахождения спектроскопических параметров обобщенной рефракционной диэлектрической модели талых незасолённых почв, содержание глинистой фракции в которых варьировалось от 0 до 76 %, путём совместного регрессионного анализа экспериментальных спектров комплексной диэлектрической проницаемости почв для области связанной и свободной воды.
- Минералогически-зависимая обобщенная рефракционная диэлектрическая модель смеси, рассчитывающая действительную и мнимую части относительной КДП талых минеральных почв с нормированным значением среднеквадратического отклонения 11 и 21 %, соответственно, при температуре около 20 °С, в диапазоне частот электромагнитных волн от 0,3 до 26 ГГц, с содержанием глинистой фракции в почве от 0 до 76 %, и объёмной влажности от 0,4 до 94 %. Входными параметрами модели являются: частота электромагнитного поля, объёмная влажность почвы и весовое содержание глинистой фракции.
- Температурно- и минералогически-зависимая обобщенная рефракционная диэлектрическая модель, рассчитывающая действительную и мнимую части относительной КДП талых минеральных почв с нормированным значением среднеквадратического отклонения 12 и 31 %, и

соответственно, в диапазоне температур от 0 до 40 °С в диапазоне частот электромагнитных волн от 0,3 до 26 ГГц, объёмной влажности от 0,4 до 94 %, содержания глинистой фракции от 0 до 76 %. Входными параметрами модели являются: частота электромагнитного поля, объёмная влажность почвы, температура и весовое содержание глинистой фракции.

- Много-релаксационная обобщенная рефракционная диэлектрическая модель, рассчитывающая действительную и мнимую части относительной КДП талых минеральных почв с нормированным значением среднеквадратического отклонения не хуже 10 и 39 %, соответственно, в диапазоне частот электромагнитных волн от 0,04 до 26 ГГц, объёмной влажности от 0,4 до 94 %, содержания глинистой фракции от 7 до 76 %, при температуре 20 °С. Входными параметрами модели являются: частота электромагнитного поля, объёмная влажность почвы и весовое содержание глинистой фракции.

- Одночастотная рефракционная диэлектрическая модель талых минеральных почв, позволяющая рассчитывать комплексную диэлектрическую проницаемость почв на частоте 435 МГц при температуре около 20 °С, с нормированным значением среднеквадратического отклонения 7 % для диэлектрической проницаемости и 13 % для коэффициента потерь. Входными параметрами модели являются: частота электромагнитного поля, объёмная влажность почвы и весовое содержание глинистой фракции.

Научная новизна

- Впервые в мировой практике создана диэлектрическая модель талых, незасоленных минеральных почв, которая обеспечивает наилучшую в мире точность измерения влажности поверхности суши Земли в глобальном масштабе на основе радиометрических данных спутников SMAP, SMOS на частоте 1,4 ГГц.

- Создана новая диэлектрическая модель талых минеральных почв в микроволновом диапазоне частот, все параметры которой имеют физический смысл, позволяющая рассчитывать диэлектрическую проницаемость независимых влажных почв, т.е. тех почв, которые не использовались для построения модели, с большей точностью по сравнению с предшествующими моделями.

- Впервые создана методология построения диэлектрических моделей влажных почв, учитывающих температуру почвы.

- Существенно улучшена точность прогноза диэлектрической проницаемости талых минеральных почв в мегагерцовом диапазоне частот, путем учета нескольких диэлектрических релаксаций воды.

Практическая значимость полученных результатов.

Полученные модели влажных почв позволили повысить точность расчетных значений диэлектрической проницаемости почв, и особенно ее мнимой части. Входными параметрами разработанных моделей, являются объёмная (весовая) влажность, температура и содержание глинистой фракции в почве.

Главным практическим преимуществом созданных диэлектрических моделей, обусловившего её внедрение в информационные спутниковые продукты SMAP и SMOS, является зависимость всех основных параметров модели от единственного параметра, содержания глинистой фракции. Содержание глинистой фракции в почве с достаточной подробностью для спутникового мониторинга приводится в почвенных картах мира (например, Harmonized World Soil Database (HWSD), FAO-UNESCO Soil Map of the World). Разработка микроволновых диэлектрических моделей почв с двумя и более релаксациями позволила расширить частотный диапазон их применения вплоть до десятков мегагерц. Модели, позволяющие рассчитывать диэлектрическую проницаемость почв в мегагерцовом диапазоне, могут быть использованы для калибровки рефлектометров во временной области, использующихся для измерения влажности почв, в приложениях георадиолокации с использованием подповерхностных радаров и каротажного зондирования с использованием высокочастотных электромагнитных зондов, для определения количества связанной воды и гранулометрического состава почв. Созданные диэлектрические модели в ближайшие годы найдут свое применение в перспективных спутниковых радарных и радиометрических системах нового поколения с рабочими частотами в Р-диапазоне частот (225-390 МГц), что в первые позволит измерять влажность почвы непосредственно в корневой зоне растений.

Достоверность результатов. Достоверность предлагаемых автором минералогических диэлектрических моделей влажных почв обеспечивается сравнительным анализом точности восстановленных с их помощью значений КДП влажных почв с точностью аналогичных значений восстановленных с помощью диэлектрических моделей других авторов, широко используемых в задачах восстановления влажности дистанционными методами зондирования. Аналогичные сравнения точностей разных диэлектрических моделей были выполнены сторонними авторами, которые так же подтвердили высокую точность предлагаемых автором моделей.

Апробация результатов. Результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях, семинарах и симпозиумах: 2-6 международные научно-практические конференции «Актуальные проблемы радиофизики» г.Томск (2008-2015гг); Progress In Electromagnetics Research Symposium Пекин (2009г), Сучжоу (2011г); Санкт-Петербург (2017г); IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Мюнхен (2012г); International Siberian Conference on Control and Communications Красноярск (2013г).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 16 работ: 8 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК [1–8], и 8 публикаций в материалах международных и всероссийских конференций [9–16]. Зарегистрировано 2 патента на изобретение.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 154 страницы, включая 52 рисунка и 21 таблицу. Список литературы содержит 100 наименований.

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 вводится понятие диэлектрической проницаемости почвы, рассматриваются изменения комплексной диэлектрической проницаемости почвы в зависимости от ее влажности, температуры, гранулометрического состава, а также от частоты электромагнитного поля, взаимодействующего с ней, описываются наиболее распространенные диэлектрические модели почв.

Во второй главе предложен улучшенный алгоритм поиска параметров обобщенной рефракционной диэлектрической модели смеси (ОРДМС), предложенной в 2004 г. В.Л. Мироновым с соавторами. Суть метода заключается в проведении регрессионного анализа измеренных значений КДП анализируемых почвенных образцов в частотной области с помощью уравнений ОРДМС:

$$\varepsilon' = n^2 - k^2, \quad \varepsilon'' = 2nk \quad (1)$$

$$n = \begin{cases} n_d + (n_b - 1)W, & W \leq W_t \\ n_d + (n_b - 1)W_t + (n_u - 1)(W - W_t) & W > W_t \end{cases} \quad (2)$$

$$\kappa = \begin{cases} \kappa_d + \kappa_b W, & W \leq W_t \\ \kappa_d + \kappa_b W_t + \kappa_u(W - W_t) & W > W_t \end{cases} \quad (3)$$

$$n_p = \frac{\sqrt{\sqrt{(\varepsilon'_p)^2 + (\varepsilon''_p)^2} + \varepsilon'_p}}{\sqrt{2}}, \quad k_p = \frac{\sqrt{\sqrt{(\varepsilon'_p)^2 + (\varepsilon''_p)^2} - \varepsilon'_p}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

$$\varepsilon'_p = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{0p} - \varepsilon_\infty}{1 + (2\pi f \tau_p)^2}, \quad \varepsilon''_p = \frac{\varepsilon_{0p} - \varepsilon_\infty}{1 + (2\pi f \tau_p)^2} \cdot 2\pi f \tau_p + \frac{\sigma_p}{2\pi f \varepsilon_r} \quad (5)$$

где ε' – диэлектрическая проницаемость (ДП), ε'' – коэффициент потерь (КП), n – показатель преломления (ППр), κ – нормированный коэффициент затухания (НКЗ). Подстрочные индексы d , b , и u обозначают сухую почву, связанную и свободную почвенную воду, соответственно. W – объемная влажность, W_t – предельное содержание связанной воды (ПССВ) в данном типе почвы. ε_∞ – высокочастотный предел диэлектрической проницаемости, равный 4,9. ε_r – диэлектрическая проницаемость свободного пространства,

равная $8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. ϵ_0 , τ , и σ – статическая диэлектрическая проницаемость, время релаксации и удельная проводимость для связанной ($p=b$) и свободной ($p=u$) почвенной влаги. f – частота электромагнитного поля. В результате проводимого регрессионного анализа находятся параметры модели n_d , K_d , ϵ_{0b} , τ_b , σ_b , ϵ_{0u} , τ_u , σ_u , W_i . Значения ϵ' , ϵ'' , W и f – известны.

В главе предложено два алгоритма нахождения искомых параметров описываемым методом:

1) по усредненным по влажностям диэлектрическим спектрам для связанной и свободной почвенной влаги. Для демонстрации предложенной методики были взяты измеренные в частотном диапазоне от 0,15 до 10,8 ГГц диэлектрические данные для глинистой почвы, содержащей 12 % песка, 44,9 % ила и 44,1 % глины. Измерения проводились для 31 значения влажности почвенного образца, от практически сухой почвы, до полной полевой влагоемкости образца. Измеренные спектры ППр и НКЗ группировались по наличию только связанного вида почвенной воды, и связанной и свободной почвенной воды. Для этого оценивалась скорость изменения ППр и НКЗ при изменении W . Сгруппированные спектры и значения их влажностей усреднялись (рисунок 1) и подвергались описанному выше регрессионному анализу.

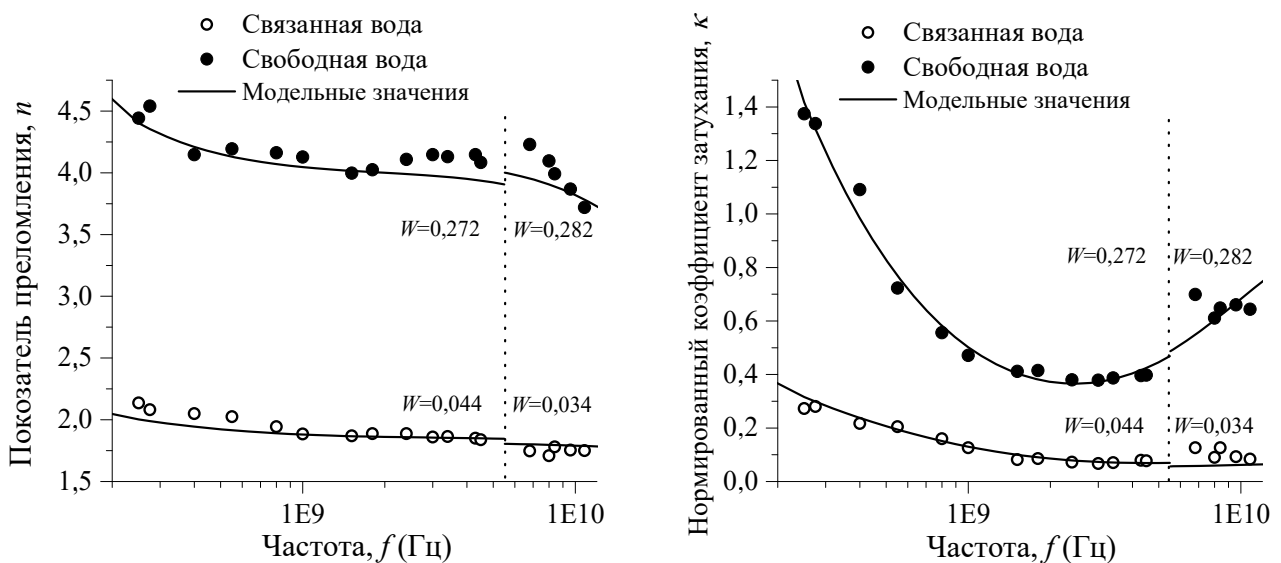


Рисунок 1 – Усредненные измеренные значения ППр и НКЗ (точки). Сплошной линией показаны результаты предсказаний, полученные с использованием параметров ОРДМС.

2) по диэлектрическим спектрам влажной почвы при всех имеющихся значениях влажности почвы. Для демонстрации предложенной методики были взяты диэлектрические данные, измеренные Д.О. Куртисом с соавторами в частотном диапазоне от 45 МГц до 26,5 ГГц для 11 почв с содержанием глинистой фракции от 0 до 76 % и М.С. Добсоном с соавторами, в частотном диапазоне от 1,4 до 18 ГГц для 4 почв с содержанием глинистой фракции от 9 до 47 %. Для каждой из почв доступно от 4 до 9 спектров КДП, влажность которых варьируется от практически сухой почвы, до полной полевой влагоемкости. Описанный выше, регрессионный анализ применялся одновременно

ко всем спектрам КДП, измеренным у конкретного почвенного образца (рисунок 2).

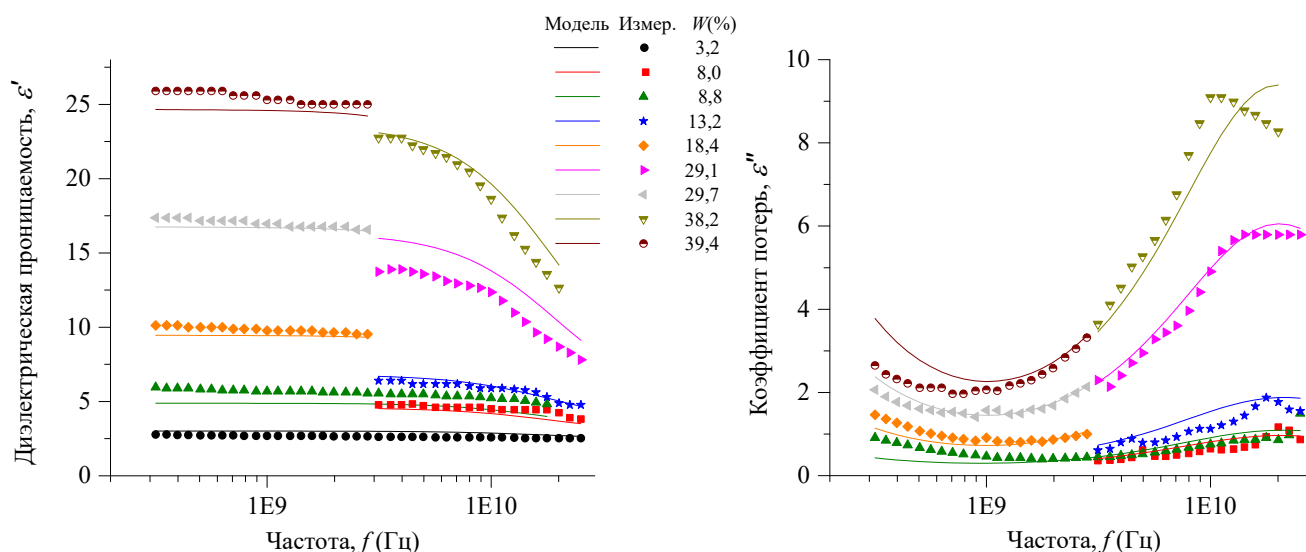


Рисунок 2 – Спектры ДП, ε' и КП, ε'' для почвы содержащей 77 % песка, 9 % ила и 14 % глины. Точки – экспериментальные данные, линии – восстановленные с помощью ОРДМС значения.

Первый метод удобно применять при ограниченном наборе влажностей почвы, особенно для песчаных почв, где диапазон влажностей для связанной воды узкий и ее диэлектрические спектры зачастую сливаются ввиду очень близких значений влажностей. Второй метод, за счет большего количества спектров КДП для фиксированных влажностей, по которым производится поиск параметров модели, является более точным, особенно это проявляется для КП, ε'' . Точность моделей оценивалась с помощью корреляционных зависимостей измеренных значений КДП почвы и восстановленных модельных значений. Для количественной оценки эти зависимости подвергаются линейной регрессии. Найденные, в результате, значения коэффициента детерминации (R^2), среднеквадратического отклонения (СКО), нормированного СКО (нСКО), регрессионного уравнения ($y = A + Bx$) служат параметрами оценки точности модели и занесены в таблицу 1.

Таблица 1 – Параметры корреляционного анализа

Модель	ДП, ε'					КП, ε''				
	$y = A + Bx$		R^2	СКО	нСКО (%)	$y = A + Bx$		R^2	СКО	нСКО (%)
	A	B				A	B			
Зависимые данные										
ПДМС _{F1-F5}	-0,934	1,080	0,974	0,989	9	0,255	1,065	0,917	0,700	25
ОРДМС _{ср.02-5}	0,125	0,986	0,988	0,800	9	0,174	0,904	0,946	0,766	33
ОРДМС _{F1-F5}	-0,231	1,034	0,982	0,820	8	-0,031	0,957	0,971	0,409	14
ОРДМС _{A-L}	-0,275	1,013	0,989	1,038	9	-0,094	1,058	0,978	0,534	17
Независимые данные										
ПДМС _{F1-F5/A-L}	-0,753	0,902	0,833	4,114	36	1,483	0,881	0,643	2,152	68
ОРДМС _{ср.02-5/5-11}	0,221	0,221	0,970	1,457	11	0,590	0,868	0,867	1,237	28

Здесь ПДМС – полуэмперическая диэлектрическая модель смеси (модель Добсона), широко известная и повсеместно применяемая, была выбрана для сравнения в качестве эталона. Подстрочные символы обозначают диапазон частот для первого метода (0,2 до 5 ГГц) или набор почв для второго метода (A-L – измеренные Д.О. Куртисом, F1-F5 – измеренные М.С. Добсоном), по которым создавалась модель. Подстрочные символы, записанные через разделитель (/), указывают на каких почвах (A-L) или частотах (5-11 ГГц) данная модель проходила верификацию.

В третьей главе определены функциональные зависимости параметров ОРДМС от гранулометрического состава почвы, а точнее от количества глинистой фракции в почве, и от температуры почвы. Предложены минералогически-зависимая (МЗ), температурно-зависимая (ТЗ) и температурно- и минералогически-зависимая (Т-МЗ) ОРДМС.

Для создания МЗ ОРДМС использовались параметры ОРДМС (n_d , κ_d , ε_{0b} , τ_b , σ_b , ε_{0u} , τ_u , σ_u , W_t), найденные во второй главе для 15 почв с помощью второго варианта предлагаемого алгоритма поиска параметров ОРДМС, при температуре 20 °С. Регрессионный анализ зависимостей данных параметров от содержания глинистой фракции в почве дал следующие уравнения регрессии:

$$\begin{aligned}
 n_d &= 1,634 - 0,539 \cdot 10^{-2}C + 0,2748 \cdot 10^{-4}C^2, \\
 \kappa_d &= 0,03952 - 0,04038 \cdot 10^{-2}C, \\
 W_t &= 0,02863 + 0,30673 \cdot 10^{-2}C, \\
 \varepsilon_{0b} &= 79,8 - 85,4 \cdot 10^{-2}C + 32,7 \cdot 10^{-4}C^2, \\
 \tau_b &= 1,062 \cdot 10^{-11} + 3,450 \cdot 10^{-14}C, \\
 \sigma_b &= 0,3112 + 0,467 \cdot 10^{-2}C, \\
 \sigma_u &= 0,3631 + 1,217 \cdot 10^{-2}C, \\
 \varepsilon_{0u} &= 100, \\
 \tau_u &= 8,5 \cdot 10^{-12}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Содержание глины, C , дано в процентах, времена релаксации τ_b , τ_u и проводимость σ_b , σ_u выражаются в секундах и См/м, соответственно. Блок регрессионных уравнений (6) совместно с формулами (1-5) представляют собой МЗ ОРДМС, входными параметрами которой являются частота электромагнитного поля, содержание глинистой фракции в почве и ее влажность.

ТЗ ОРДМС создавалась путем повторения, описанной во второй главе, процедуры поиска параметров ОРДМС при 20 °С для остальных положительных температур, по которым имеются данные диэлектрических измерений, это 10, 30 и 40 °С, для 11 почв измеренных Д.О. Куртисом. Диэлектрические параметры сухой почвы n_d , κ_d и значение W_t для конкретной почвы в заданном температурном диапазоне неизменны. Переход от ОРДМС к ТЗ ОРДМС заключается в представлении оставшихся спектроскопических параметров модели (ε_{0p} , τ_p , σ_p), относящихся к связанной ($p = b$) и свободной ($p = u$) почвенной воде, как функции температуры. Для этого строятся температурные зависимости указанных спектроскопических параметров для конкретной почвы,

которые подвергаются регрессионному анализу. Зависимость низкочастотного предела диэлектрической проницаемости от температуры можно представить с помощью уравнения Клаузиуса-Моссоти в виде:

$$\varepsilon_{0p}(t) = \frac{1 + 2 \exp(F_p(t_s) - \beta_p(t - t_s))}{1 - \exp(F_p(t_s) - \beta_p(t - t_s))} \quad (7)$$

где β_p – коэффициент объемного расширения, t и t_s – текущая и начальная температура в градусах Цельсия. Функция $F_p(t)$ может быть выражена уравнением

$$F_p(t) = \ln\left(\frac{\varepsilon_{p0}(t) - 1}{\varepsilon_{p0}(t) + 2}\right) \quad (8)$$

Время релаксации в пикосекундах можно определить по формуле релаксации Дебая, учитывающей температурную зависимость:

$$\tau_p = \frac{48 \times 10^{-1}}{T} \exp\left(\frac{\psi_p}{T} - \theta_p\right) \quad (9)$$

где параметры, $\psi_p = \Delta H_p/R$ и $\theta_p = \Delta S_p/R$, пропорциональны энергии активации, ΔH_p , и энтропии активации, ΔS_p , соответственно, $T = t + 273,15$ – температура в кельвинах, и R – универсальная газовая постоянная.

Наконец, проводимость, σ_p , имеет линейную зависимость от температуры, которая характерна для ионных растворов:

$$\sigma_p(t) = \sigma_p(t_s) + \beta_{\sigma p}(t - t_s) \quad (10)$$

здесь, $\beta_{\sigma p}$ температурный коэффициент приращения проводимости. Тогда как $\sigma_p(t_s)$ – значение проводимости при начальной температуре, t_s . Температура задается в градусах Цельсия. Таким образом ТЗ ОРДМС описывается формулами (1-5) и (7-10) и требует знания 15 параметров модели для конкретного типа почвы: n_d , κ_d , W_t , $\varepsilon_{0b}(t_s)$, β_b , ψ_b , θ_b , $\sigma_b(t_s)$, $\beta_{\sigma b}$, $\varepsilon_{0u}(t_s)$, β_u , ψ_u , θ_u , $\sigma_u(t_s)$, $\beta_{\sigma u}$. В качестве примера, в таблицу 2 сведены параметры ТЗ ОРДМС, найденные для почвы с содержанием 77 % песка, 9 % ила и 14 % глины.

Таблица 2 – Параметры ТЗ ОРДМС при $t_s = 20$ °С.

n_d	κ_d	W_t	$\varepsilon_{0b}(t_s)$	β_b (К ⁻¹)	ψ_b (К ⁻¹)	θ_b	$\sigma_b(t_s)$ (См/м)
1,5	0,03952	0,071	66,5	0	1700,983	1,623	0,2
$\beta_{\sigma b}$ (См/мК)	$\varepsilon_{0u}(t_s)$	β_u (К ⁻¹)	ψ_u (К ⁻¹)	θ_u	$\sigma_u(t_s)$ (См/м)	$\beta_{\sigma u}$ (См/мК)	
0,004	100	0,0001	2227,226	3,634	0,25	0,005	

Для создания Т-МЗ ОРДМС использовались найденные выше параметры ТЗ ОРДМС. Из 11 почв, измеренных Куртисом, были выбраны 5 почв с учетом их равномерного распределения в зависимости от содержания глины, это почвы с массовым содержанием глины 0, 14, 34, 54 и 76 %. Найденные для этих почв параметры ТЗ ОРДМС подверглись регрессионному анализу как

функции от процентного содержания глинистой фракции. В результате получаем следующий набор функциональных зависимостей:

$$n_d(C, t_s) = 1,634 - 0,539 \cdot 10^{-2}C + 0,2748 \cdot 10^{-4}C^2 \quad (11)$$

$$\kappa_d(C, t_s) = 0,03952 - 0,04038 \cdot 10^{-2}C \quad (12)$$

$$W_t(C, t_s) = 0,02863 + 0,30673 \cdot 10^{-2}C \quad (13)$$

$$\varepsilon_{ob}(C, t_s) = 79,8 - 85,4 \cdot 10^{-2}C + 32,7 \cdot 10^{-4}C^2 \quad (14)$$

$$\beta_b(C) = 8,67 \cdot 10^{-19} - 1,26 \cdot 10^{-5}C + 1,84 \cdot 10^{-7}C^2 - 9,77 \cdot 10^{-10}C^3 - 1,39 \cdot 10^{-1} C^4 \quad (15)$$

$$\varepsilon_{ou}(C, t_s) = 100 \quad (16)$$

$$\beta_u(C) = 1,11 \cdot 10^{-4} - 1,603 \cdot 10^{-7}C + 1,239 \cdot 10^{-9}C^2 + 8,33 \cdot 10^{-1} C^3 - 1,007 \cdot 10^{-14}C^4 \quad (17)$$

$$\Delta H_b(C)/R = 1467 + 2697 \cdot 10^{-2}C - 980 \cdot 10^{-4}C^2 + 1,368 \cdot 10^{-10}C^3 - 8,61 \cdot 10^{-13}C^4 \quad (18)$$

$$\Delta S_b(C)/R = 0,888 + 9,7 \cdot 10^{-2}C - 4,262 \cdot 10^{-4}C^2 + 6,79 \cdot 10^{-21}C^3 + 4,263 \cdot 10^{-22}C^4 \quad (19)$$

$$\Delta H_u(C)/R = 2231 - 143,1 \cdot 10^{-2}C + 223,2 \cdot 10^{-4}C^2 - 142,1 \cdot 10^{-6}C^3 + 27,14 \cdot 10^{-8}C^4 \quad (20)$$

$$\Delta S_u(C)/R = 3,649 - 4,894 \cdot 10^{-3}C + 7,63 \cdot 10^{-5}C^2 - 4,859 \cdot 10^{-7}C^3 + 9,28 \cdot 10^{-1} C^4 \quad (21)$$

$$\sigma_b(C, t_s) = 0,3112 + 0,467 \cdot 10^{-2}C \quad (22)$$

$$\beta_{\sigma b}(C) = 0,0028 + 2,094 \cdot 10^{-4}C - 1,229 \cdot 10^{-6}C^2 - 5,03 \cdot 10^{-22}C^3 + 4,163 \cdot 10^{-24}C^4 \quad (23)$$

$$\sigma_u(C, t_s) = 0,05 + 1,4 \cdot (1 - (1 - C \cdot 10^{-2})^{4,664}) \quad (24)$$

$$\beta_{\sigma u}(C) = 0,00108 + 1,413 \cdot 10^{-3}C - 2,555 \cdot 10^{-5}C^2 + 2,147 \cdot 10^{-7}C^3 - 7,11 \cdot 10^{-10}C^4 \quad (25)$$

Блоки формул (1-5), (7-10) и функциональные зависимости (11-25) составляют Т-МЗ ОРДМС, входными параметрами которой являются частота электромагнитного поля, содержание глинистой фракции в почве, ее влажность и температура.

Точность предложенных моделей, как и во второй главе, оценивалась с помощью корреляционного анализа измеренных значений КДП почвы и восстановленных модельных значений, результаты которого приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры корреляционного анализа

Модель	ДП, ε'					КП, ε''				
	$y = A + Bx$		R^2	СКО	нСКО (%)	$y = A + Bx$		R^2	СКО	нСКО (%)
	A	B				A	B			
ПДМС	-0,934	1,080	0,974	0,989	9	0,255	1,065	0,917	0,700	25
ОРДМС	-0,275	1,013	0,989	1,038	9	-0,094	1,058	0,978	0,534	17
МЗ ОРДМС	-0,227	1,007	0,983	1,297	11	-0,009	1,026	0,967	0,657	21
МЗ ОРДМС _{A-L/F1-F5}	-0,106	1,012	0,979	0,879	8	0,101	0,911	0,931	0,63	22
МЗ ОРДМС _{F1-F5/A-L}	-0,027	0,972	0,989	1,353	11	0,190	0,932	0,927	1,275	31
ПДМС ₁₀₋₄₀	-0,953	0,777	0,500	4,950	45	0,776	0,743	0,698	1,146	55
ОРДМС ₁₀₋₄₀	0,320	1,004	0,990	0,704	6	-0,051	1,033	0,962	0,408	20
ТЗ ОРДМС	0,319	1,003	0,990	0,700	6	-0,048	1,033	0,962	0,406	20
Т-МЗ ОРДМС	0,317	0,963	0,980	2,003	12	-0,110	1,073	0,950	1,362	31

Здесь подстрочные символы 10-40 показывают, что модельные значения рассчитаны для конкретных температур из заданного диапазона, значение символов (A-L и F1-F5) такое же, как и во второй главе.

В четвертой главе представлена много релаксационная (МР) ОРДМС с учетом как дипольной, так и ионной релаксации молекул почвенной воды, при температуре почвы 20 °С. При снижении частоты от 1,0 ГГц до 1,0 МГц происходит значительное увеличение диэлектрической проницаемости влажной почвы из-за релаксации Максвелла-Вагнера, возникающей на границе раздела твердых частиц почвы и почвенной воды. Учет которой происходит путем введения дополнительной релаксации в уравнения Дебая (5). В работе представлено два вида МР ОРДМС.

1) двух релаксационная ОРДМС, уравнения Дебая принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_p &= \frac{\varepsilon_{0pL} - \varepsilon_{0pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pL})^2} + \frac{\varepsilon_{0pH} - \varepsilon_{\infty pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pH})^2} + \varepsilon_{\infty pH}, \\ \varepsilon''_p &= \frac{\varepsilon_{0pL} - \varepsilon_{0p}}{1 + (2\pi f \tau_{pL})^2} \cdot 2\pi f \tau_{pL} + \frac{\varepsilon_{0pH} - \varepsilon_{\infty pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pH})^2} \cdot 2\pi f \tau_{pH} + \frac{\sigma_p}{2\pi f \varepsilon_r}, \end{aligned} \quad (26)$$

Здесь подстрочные символы L , H относятся к низкочастотной (ионной) и высокочастотной (дипольной) релаксациям, соответственно. Подстрочный символ p может принимать значения $p = b$ для связанной и $p = u$ для свободной почвенной влаги. $\varepsilon_{\infty b} = \varepsilon_{\infty uH} = 4,9$. Методика определения параметров много релаксационной модели остается такой же, как и для предложенных ранее одно релаксационных моделей. По измеренным спектрам КДП для конкретной почвы производится регрессионный анализ с помощью выражений ОРДМС (1-4), в случае двух релаксационной модели вместо уравнений Дебая (5) используются уравнения (26). При этом предполагается, что свободная вода обладает только дипольной релаксацией, в то время как связанная вода обладает как дипольной, так и ионной релаксацией. В результате находятся параметры двух релаксационной ОРДМС (n_d , κ_d , W_t , ε_{0bL} , ε_{0bH} , τ_{bL} , τ_{bH} , σ_b , ε_{0uH} , τ_{uH} , σ_u) для ряда почв с разным содержанием глинистой фракции, далее строятся зависимости найденных параметров от содержания глинистой фракции и производится регрессионный анализ с целью выявления зависимости данных параметров от содержания глины:

$$n_d = (0,432 - 0,065 \cdot C) \rho_d, \quad (27)$$

$$\kappa_d = (0,008 + 0,011 \cdot C) \rho_d, \quad (28)$$

$$W_t (\text{см}^3/\text{см}^3) = 0,024 + 0,339 \cdot C, \quad (29)$$

$$\varepsilon_{0bL} = 761 - 840 \cdot C, \quad (30)$$

$$\varepsilon_{0b} = 27,18 + 61 \cdot \exp\left(-\frac{C}{0,287}\right), \quad (31)$$

$$\varepsilon_{0uH} = 100, \quad (32)$$

$$\tau_{bL} (\text{нс}) = 2,5, \quad (33)$$

$$\tau_{bH} (\text{пс}) = 12,5, \quad (34)$$

$$\tau_{uH} (\text{пс}) = 10,6, \quad (35)$$

$$\sigma_b (\text{См/м}) = 0,001, \quad (36)$$

$$\sigma_u(\text{См/м}) = 0,097 + 0,69 \cdot C. \quad (37)$$

Таким образом двух релаксационная ОРДМС описывается формулами (1-4), (26) и регрессионными уравнениями (27-37), входными параметрами модели являются частота электромагнитного поля, содержание глинистой фракции в почве и ее влажность.

2) трех релаксационная ОРДМС, уравнения Дебая (5) примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_p &= \frac{\varepsilon_{0pL} - \varepsilon_{0p}}{1 + (2\pi f \tau_{pL})^2} + \frac{\varepsilon_{0pM} - \varepsilon_{0pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pM})^2} + \frac{\varepsilon_{0pH} - \varepsilon_{\infty pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pH})^2} + \varepsilon_{\infty pH} \\ \varepsilon''_p &= \frac{\varepsilon_{0pL} - \varepsilon_{0pM}}{1 + (2\pi f \tau_{pL})^2} 2\pi f \tau_{pL} + \frac{\varepsilon_{0pM} - \varepsilon_{0p}}{1 + (2\pi f \tau_{pM})^2} 2\pi f \tau_{pM} + \frac{\varepsilon_{0pH} - \varepsilon_{\infty pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pH})^2} 2\pi f \tau_{pH} \end{aligned}, \quad (38)$$

Здесь к высокочастотной, H , и низкочастотной, L , релаксациям добавляется еще и среднечастотная, M . Кроме того предполагается, что почвенная влага в данной модели будет складываться из связанной, b , переходной, t , и свободной, u , почвенной влаги, причем, переходная и свободная почвенные воды имеют по одной частоте релаксации. В итоге рефракционная диэлектрическая модель смеси (2) и (3) запишется как:

$$\begin{aligned} \frac{n_s(M, f) - 1}{\rho_d} &= \begin{cases} \frac{n_m - 1}{\rho_m} + (n_b(f) - 1)M, & 0 \leq M \leq M_{t1} \\ \frac{n_s(M_{t1}, f) - 1}{\rho_d} + (n_t(f) - 1)(M - M_{t1}), & M_{t1} \leq M \leq M_{t2} \\ \frac{n_s(M_{t2}, f) - 1}{\rho_d} + (n_u(f) - 1)(M - M_{t2}), & M \geq M_{t2} \end{cases} \\ \frac{\kappa_s(M, f)}{\rho_d} &= \begin{cases} \frac{\kappa_m}{\rho_m} + \kappa_b(f) \cdot M, & 0 \leq M \leq M_{t1} \\ \frac{\kappa_s(M_{t1}, f)}{\rho_d} + \kappa_t(f) \cdot (M - M_{t1}), & M_{t1} \leq M \leq M_{t2} \\ \frac{\kappa_s(M_{t2}, f)}{\rho_d} + \kappa_u(f) \cdot (M - M_{t2}), & M \geq M_{t2} \end{cases} \end{aligned} \quad (39)$$

Здесь вместо объемной влажности почвенного образца, W , используется массовая $M = W/\rho_d$, с целью учета разной плотности набивки почвенных образцов, ρ_d , в измерительную ячейку. M_{t1} и M_{t2} обозначают предельно возможное количество связанной воды и предельно возможное суммарное количество связанной и переходной воды в конкретном типе почвы. Подстрочные индексы s и m обозначают влажную почву и органоминеральную компоненту почвы, соответственно. Так же для улучшения точности модели из мнимой части уравнений (38) была убрана удельная электропроводность почвенной влаги, σ_p , которая теперь будет учитываться в мнимой части КДП влажной почвы:

$$\varepsilon'' = \begin{cases} 2n_s \kappa_s + \frac{\rho_d(M) M \sigma_b(M)}{2\pi f \varepsilon_r}, & 0 \leq M \leq M_{t1} \\ 2n_s \kappa_s + \frac{\rho_d(M) [M_{t1} \sigma_b(M_{t1}) + (M - M_{t1}) \sigma_t(M)]}{2\pi f \varepsilon_r}, & M_{t1} \leq M \leq M_{t2} \\ 2n_s \kappa_s + \frac{\rho_d(M) [M_{t1} \sigma_b(M_{t1}) + (M_{t2} - M_{t1}) \sigma_t(M_{t2}) + (M - M_{t2}) \sigma_u(M)]}{2\pi f \varepsilon_r}, & M \geq M_{t2} \end{cases} \quad (40)$$

Дальнейший алгоритм остался как и у предыдущей модели, по измеренным спектрам КДП конкретных почв, с помощью регрессионного анализа, посредством вышеописанных выражений трех релаксационной ОРДМС, производится поиск ее параметров, из которых строятся зависимости этих параметров от содержащейся в почве глинистой фракции. По найденным зависимостям находятся регрессионные уравнения, записанные в таблицу 4.

Таблица 4 – Минералогически зависимые параметры 3 релаксационной ОРДМС

M_{t1}, M_{t2}	связанная вода	переходная вода	свободная вода
$M_{t1} = 0,016 + 0,332 \cdot C$	$\varepsilon_{0bL} = 806 - 1532 \cdot C$	$\varepsilon_{0t} = 93,50 + 37,86 \cdot C$	$\varepsilon_{0u} = 100$
$M_{t2} = 0,034 + 0,644 \cdot C$	$\varepsilon_{0bM} = 88,81 - 78,40 \cdot C$	$\tau_t(\text{нс}) = 13,02 - 12,55 \cdot C$	$\tau_u(\text{пс}) = 10,6$
	$\varepsilon_{0bH} = 64,79 - 71,62 \cdot C$	$\sigma_t(C/M) = -0,0603 + 1,586 \cdot C$	$\sigma_u(C/M) = 0,159 + 0,377 \cdot C$
	$\tau_{bL}(\text{нс}) = 3,201 + 0,885 \cdot C$		
	$\tau_{bM}(\text{нс}) = 0,0599 + 0,294 \cdot C$		
	$\tau_{bH}(\text{пс}) = 1,597 + 24,95 \cdot C$		
	$\sigma_b(C/M) = 0,001$		

В результате всех изменений трех релаксационная ОРДМС описывается уравнением (1) с заменой мнимой части на уравнение (40), рефракционной диэлектрической моделью смеси (39), уравнениями перехода от КДП к комплексному показателю преломления (КПП) (4), трех релаксационным уравнением Дебая (38) и блоком регрессионных уравнений в таблице 4, описывающих функциональные зависимости параметров модели от содержания глинистой фракции в почве. Как и в предыдущей модели, входными параметрами представленной модели являются частота электромагнитного поля, содержание глинистой фракции в почве и ее влажность.

Так же в данной главе приведена одночастотная рефракционная диэлектрическая модель (ОЧРДМ) для талых минеральных почв на частоте 435 МГц. Модель создавалась для практического использования на спутнике VOIRAS ESA, оснащенный SAR в Р-диапазоне, который планируется к запуску в двадцатых годах текущего столетия. Предлагаемая модель разрабатывалась на основе трех минеральных почв: супесь (песок 41,4 %, ил 49,4 %, глина 9,1 %, □ – рисунок 3), суглинок (песок 40,4 %, ил 39,0 %, глина 20,6 %, ○ – рисунок 3), пылеватая глина (песок 1,6 %, ил 57,1 %, глина 41,3 %, Δ – рисунок 3), образцы которых были взяты с полуострова Ямал, Россия. Модель рассчитана на температуру почвы 20 °С. Переходим от КДП к КПП и строим влажностные зависимости КПП, которые имеют линейный характер, для всех трех почв на одном графике. Из которого делается предположение, что КПП для сухой почвы, связанной и свободной почвенной влаги, на данной частоте, не

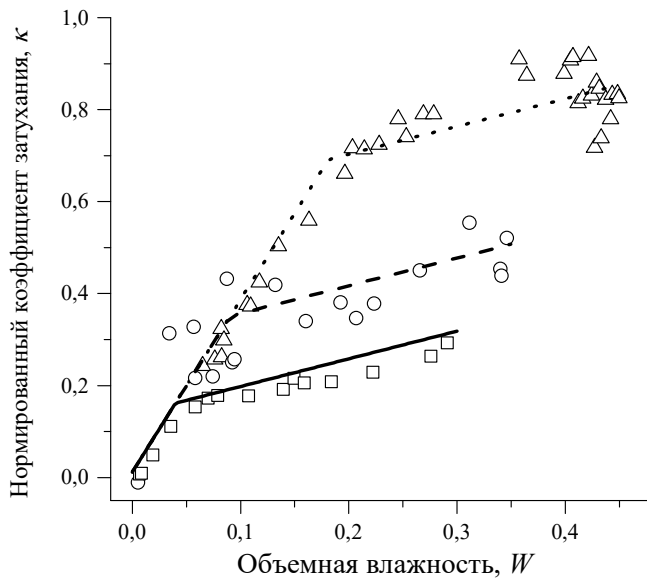


Рисунок 3 – Зависимость НКЗ от влажности почвы, для 3 исследуемых почв.

зависят от типа почвы. Это хорошо видно из графика нормированного коэффициента затухания, рисунок 3, здесь точками обозначены измеренные значения КПП, а линиями модельные значения. Далее проводится регрессионный анализ экспериментальных данных КПП одновременно для трех почв кусочно-линейными функциями (2) и (3). В результате регрессионного анализа найдены следующие значения параметров модели: $n_d = 1,644$; $n_b = 10,021$; $n_u = 8,936$; $k_d = 0,012$; $k_b = 3,751$; $k_u = 0,602$ и функциональная зависимость W_t от величины глинистой фракции почвы $W_t = 4,39 \cdot 10^{-3} C$. Найденные параметры совместно с выражениями (1), (2) и (3) составляют разработанную ОЧРДМ, с помощью которой можно найти КДП для различных минеральных почв на частоте 435 МГц в зависимости от содержащейся в них влаги, либо выполнить обратную задачу по определению влажности почвы по данным ее КДП.

Для всех представленных в данной главе моделей проводилась оценка их точности, которая, как и в предыдущих главах, оценивалась с помощью корреляционного анализа измеренных значений КДП почвы и восстановленных модельных значений, результаты которого приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры корреляционного анализа

Модель	ДП, ε'					КП, ε''				
	$y = A + Bx$		R^2	СКО	нСКО (%)	$y = A + Bx$		R^2	СКО	нСКО (%)
	A	B				A	B			
2Р МЗ ОРДМС	0,100	0,972	0,984	1,005	10	-0,152	0,877	0,886	1,190	39
3Р МЗ ОРДМС	0,003	0,996	0,989	0,822	8	0,016	0,921	0,922	0,983	32
ОЧРДМ	-0,092	1,004	0,987	0,992	7	-0,120	1,015	0,974	0,519	13

Здесь 2Р МЗ ОРДМС – двух релаксационная минералогически-зависимая ОРДМС, 3Р МЗ ОРДМС – трех релаксационная минералогически-зависимая ОРДМС, ОЧРДМ – одночастотная рефракционная диэлектрическая модель.

В заключении сформулированы основные результаты исследований.

1. Найдены детерминированные зависимости между КДП влажной почвы и ее физическими параметрами (гранулометрическим составом, количеством содержащейся в ней воды и ее температурой).

2. Доказано, что зависимость параметров рефракционной модели (n_d , n_b , n_u , K_d , K_b , K_u , W_t) и спектроскопических параметров модели Дебая (ϵ_0 , τ , σ) от гранулометрического состава почвы может быть выражена через общее количество содержащейся в почве одной только глинистой фракции.

3. На основании полученных функциональных выражений созданы спектроскопические, физически обоснованные, минералогически-зависимые диэлектрические модели влажных минеральных почв, с содержанием глинистой фракции от 0 до 76%, влажности от воздушно сухой до минимальной полевой влагоемкости в диапазоне температур от 0 до 40 °С и частот от 0,3 до 26 ГГц.

4. Учет релаксации, возникающей на границе раздела твердых частиц почвы и почвенной воды (Максвелла-Вагнера), на ряду с дипольной релаксацией молекул почвенной воды (Дебая), дал возможность создать много-релаксационную модель, которая позволила расширить диапазон ее применимости в область низких частот вплоть до десятков мегагерц.

5. Предложенные в данной работе диэлектрические модели влажных почв можно эффективно применять в алгоритмах восстановления почвенной влаги из измеряемых данных, полученных с помощью радаров, радиометров, рефлектометров, и емкостных сенсоров, работающих в гигагерцовом и мегагерцовом частотных диапазонах. Созданная температурно- и минералогически-зависимая обобщенная рефракционная диэлектрическая модель в настоящее время успешно применяется в алгоритмах обработки данных спутников SMOS и SMAP для восстановления значений влажности поверхности суши в глобальном масштабе.

Список основных публикаций по теме диссертации:

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. *Миронов, В. Л.* Метод создания спектроскопической базы данных диэлектрических свойств влажных почв в СВЧ диапазоне / В. Л. Миронов, Л. Г. Косолапова, С. В. Фомин // Известия вузов. Радиофизика. – 2007. – Т. 50, № 4. – С. 339–349.
2. *Фомин, С. В.* Тестирование в микроволновом диапазоне спектроскопической диэлектрической модели влажных почв, использующей в качестве входных параметров содержание глинистой фракции и влажность / С. В. Фомин, В. Л. Миронов, Л. Г. Косолапова // Известия вузов. Физика. – 2008. – Т. 51, № 9/2. – С. 93–97.
3. *Mironov, V. L.* Physically and Mineralogically Based Spectroscopic Dielectric Model for Moist Soils / V. L. Mironov, L. G. Kosolapova, S. V. Fomin // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 47, no. 7. – P. 2059–2070.
4. *Миронов, В. Л.* Зависимости диэлектрических спектров связанной и свободной почвенной воды в диапазоне частот от 0,3 до 26,5 ГГц от

минерального состава почв / В. Л. Миронов, С. В. Фомин // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53, № 9/3. – С. 235–240.

5. *Mironov, V. L.* Generalized refractive mixing dielectric model of moist soils considering ionic relaxation of soil water / V. L. Mironov, P. P. Bobrov, S. V. Fomin, A. Y. Karavaiskii // Russian Physics Journal. – 2013. – Vol. 56, no. 3. – P. 319–324.
6. *Mironov, V. L.* Multirelaxation Generalized Refractive Mixing Dielectric Model of Moist Soils / V. L. Mironov, P. P. Bobrov, S. V. Fomin // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2013. – Vol. 10, no. 3, – P. 603–606.
7. *Миронов, В. Л.* Трехрелаксационная обобщенная рефракционная диэлектрическая модель влажных почв / В. Л. Миронов, С. В. Фомин, Ю. И. Лукин // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, №. 8/2. – С. 28–31.
8. *Fomin, S. V.* Dielectric Model for Thawed Mineral Soils at a Frequency of 435 MHz / S. V Fomin, K. V. Muzalevskiy // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2021. – Vol. 18, no. 2. – P. 222–225.

Прочие статьи и тезисы докладов

9. Data processing technique for deriving soil water spectroscopic parameters in microwave / V. L. Mironov [et al.] // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2006, – P. 2957–2961
10. *Mironov, V. L.* Validation of the soil dielectric spectroscopic models with input parameters based on soil composition / V. L. Mironov, L. G. Kosolapova, S. V. Fomin // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2007. – P. 749–753.
11. *Mironov, V. L.* Soil dielectric model accounting for contribution of bound water spectra through clay content / V. L. Mironov, L. G. Kosolapova, S. V. Fomin // Progress in Electromagnetics Research Symposium. – PIERS Online. – 2008. – Vol. 4, no. 1. – P. 31–35.
12. *Mironov, V. L.* Temperature and Mineralogy Dependable Model for Microwave Dielectric Spectra of Moist Soils / V. L. Mironov and S. V. Fomin // PIERS Online. – 2009. – Vol. 5, no. 5, – P. 411–415.
13. *Mironov, V. L.* Temperature dependable microwave dielectric model for moist soils / V. Mironov, S. V. Fomin // PIERS Proceeding. – 2009. – P. 831–835.
14. Error and domain of applicability studies for the Smugge dielectric model of moist soils / V. L. Mironov [et al.] // PIERS Proceeding. – 2009. – P. 962–965.
15. *Миронов, В. Л.* Область применения диэлектрической модели Шмагге для влажных почв / В. Л. Миронов, А. Ю. Анисимова, С. В. Фомин, Л. Г. Косолапова // Материалы XIII Международной научной конференции “Решетневские чтения.” – 2009. – Vol. 1, no. 13. – P. 187–188.
16. *Mironov, V. L.* Dielectric model of moist soils with varying clay content in the 0.04 to 26.5 GHz frequency range / V. L. Mironov, P. P. Bobrov, S. V. Fomin // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2013. – P. 1–4.

Зарегистрированные патенты

1. Патент РФ на изобретение №2467314, МПК G01N22/04. Радиофизический способ определения содержания физической глины в почвах. / Миронов В.Л., Бобров П.П., Фомин С.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН). – №2011125772; заявл. 22.06.2011; опубл. 20.11.2012. – 4 с.
2. Патент РФ на изобретение №2741013, МПК G01N22/04. Радиоволновой способ дистанционного определения содержания глинистой фракции в почвогрунтах. / Музалевский К.В., Фомин С.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Федеральный исследовательский центр “Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук” (ФИЦ КНЦ СО РАН, КНЦ СО РАН). – №2020117380; заявл. 15.05.2020; опубл. 22.01.2021. – 7 с.