

На правах рукописи



Фомин Сергей Викторович

Модели комплексной диэлектрической проницаемости минеральных
почв для радиоволновых методов исследования Земли

Специальность 1.3.2 — приборы и методы
экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск – 2023

Работа выполнена в Институте физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН) – 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, главный научный сотрудник лаборатории радиофизики дистанционного зондирования ИФ СО РАН.

Официальные
оппоненты: Чимитдоржиев Тумэн Намжилович, доктор технических наук, профессор РАН, заведующий сектором оптико-микроволновой диагностики и обработки космической информации, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

Ященко Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, и.о. зав. лаб. радиофизического материаловедения и излучающих систем Института радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Омский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук.

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

Защита состоится «08» декабря 2023 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета 24.1.228.02 при 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 официальном сайте ИФ СО РАН <http://www.kirensky.ru>

Автореферат разослан «09» октября 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.1.228.02,
доктор физико-математических наук



Втюрин
Александр Николаевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Важнейшей задачей современности становится изучение, мониторинг и прогнозирование климата, опасных стихийных явлений, катастроф и чрезвычайных ситуаций, влияния человеческой деятельности на состояние окружающей среды и гидрометеорологические процессы. Одной из актуальных проблем в рамках данной задачи является получение информации о влажности почвенного покрова. 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. Информация о влажности почв необходима для таких целей, как предсказания погоды в климатологии, пожароопасной и паводковой обстановки для МЧС, прогноза и улучшения урожайности в сельском и лесном хозяйстве, в военном аспекте – для загоризонтной радиолокации. 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.

К сожалению, российская группировка спутников метеорологического и природно-ресурсного назначения, которая на сегодняшний день включает в себя одиннадцать космических аппаратов: два геостационарных спутника - "Электро-Л" №2, №3, один спутник на высокоэллиптической орбите типа «Молния» - "Арктика-М" № 1 и восемь полярно-орбитальных спутников - "Метеор-М" №2, №2-2 "Ресурс-П" №1, "Канопус-В-ИК", "Канопус-В №3, №4, №5 и №6, 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.

Созданная за последние десятилетия спутниковая группировка ДЗЗ послужила технологической основой для создания новых микроволновых

методов и алгоритмов зондирования влажности почвы в глобальном масштабе. В основном это аппараты, работающие в гигагерцовом диапазоне частот: 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, Метеор-М – 10,6 - 183,3 ГГц. В ближайшее время планируется запуск спутника BIOMASS, который будет впервые оснащен радаром с синтезированной апертурой на рабочей частоте 435 МГц. 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.

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 наборов минеральных почв, не позволяли физически обоснованно учесть взаимное количество связанной и свободной почвенной воды, что создавало принципиальные ограничения в точности расчета комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) почв широкого гранулометрического состава при различных положительных температурах почвы. Наличие в данных моделях эмпирических параметров, найденных для конкретных групп почвенных образцов так же усложняло их практическое применение для почв иного гранулометрического состава. Поэтому к началу данного исследования, особую актуальность приобрела задача разработки более точных, физически-обоснованных диэлектрических моделей талых минеральных не засоленных почв широкого гранулометрического состава.

Целью диссертации является разработка физически обоснованных рефракционных моделей комплексной диэлектрической проницаемости талых минеральных не засоленных почв, корректно учитывающих взаимное количество связанной и свободной воды в зависимости от гранулометрического состава, температуры и влажности почв, в широком диапазоне частот, включая диапазоны существующих и перспективных микроволновых спутниковых радарных и радиометрических систем.

Для достижения данной цели в работе решались следующие **задачи**:

- Провести классификацию и анализ существующих обширных данных диэлектрических измерений почвенных образцов пригодных для построения рефракционной модели КДП талых минеральных почв;
- Разработать методику определения спектроскопических параметров рефракционной диэлектрической модели на основе экспериментальных

спектров КДП почвенных образцов в зависимости от содержания глинистой фракции и температуры.

- Создать минералогически-зависимую, минералогически- и температурно-зависимую рефракционные диэлектрические модели талых минеральных почв на основе разработанной методики определения спектроскопических параметров;
- Создать рефракционную спектроскопическую модель комплексной диэлектрической проницаемости талых минеральных почв, учитывающую низкочастотные релаксационные процессы почвенной воды в мегагерцовом диапазоне частот.

Объектом исследования являются естественные минеральные не засоленные, талые почвы с различным гранулометрическим составом.

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

Методология и методы исследования. Для разработки диэлектрических моделей талых почв в радиоволновом диапазоне частот применялись методы диэлектрической спектроскопии, методы решения обратных задач, проводился регрессионный анализ спектров КДП почв, в результате которого определялись параметры рефракционной модели КДП в зависимости от содержания глинистой фракции и температуры. Для определения погрешностей разрабатываемых моделей применялись методы статистической обработки данных.

Положения, выносимые на защиту

- Минералогически-зависимая обобщенная рефракционная диэлектрическая модель смеси, позволяющая рассчитывать комплексную диэлектрическую проницаемость талых минеральных почв с нормированным значением среднеквадратического отклонения 11 % и 21 % для действительной и мнимой частей КДП, соответственно, при температуре 20 °С, в диапазоне частот электромагнитных волн от 0,3 до 26 ГГц, для почв с содержанием глинистой фракции по весу от 0 до 76 %.
- Температурно- и минералогически-зависимая обобщенная рефракционная диэлектрическая модель смеси, позволяющая рассчитывать комплексную диэлектрическую проницаемость талых почв с нормированным значением среднеквадратического отклонения 12 % и 31 % для действительной и мнимой частей КДП, соответственно, в диапазоне температур от 10 до 40 °С, и в диапазоне частот электромагнитных волн от 0,3 до 26 ГГц, для почв с содержанием глинистой фракции по весу от 0 до 76 %.
- Много-релаксационная обобщенная рефракционная диэлектрической модель смеси, позволяющая рассчитывать комплексную диэлектрическую проницаемость талых почв с нормированным значением среднеквадратического отклонения 10 % и 39 % для действительной и мнимой частей КДП, соответственно, при температуре 20 °С, в диапазоне частот

электромагнитных волн от 0,04 до 26 ГГц, для почв с содержанием глинистой фракции по весу от 7 до 76 %.

Научная новизна

- Предложен новый способ нахождения спектроскопических параметров рефракционной модели талых минеральных почв с использованием всего диапазона измеренного спектра КДП индивидуальных почвенных образцов для всех измеренных значений влажности.
- Впервые установлены взаимосвязи между спектроскопическими параметрами рефракционной диэлектрической модели и гранулометрическим составом (весовое содержание глинистой фракции), положительной температурой большого набора естественных почв. Показано, что вариации спектроскопических параметров рефракционной диэлектрической модели в зависимости от различных типов минеральных почв могут быть описаны с использованием одного лишь параметра - содержания глинистой фракции по весу.
- Предложена методика учета низкочастотных релаксаций почвенной воды, позволяющая расширить частотный диапазон применимости рефракционной диэлектрической модели почв в область низких частот, вплоть до десятков МГц, без существенного ухудшения точности модели и увеличения количества ее входных параметров.

Практическая значимость полученных результатов.

Созданные минералогически-зависимая, температурно- и минералогически-зависимая диэлектрические модели используются в алгоритмах восстановления влажности суши Земли на метеорологических спутниках SMOS (с 2011 г) и SMAP (с 2015 г), оснащенных микроволновыми радиометрами в L-диапазоне частот.

Нахождение функциональных зависимостей всех основных параметров модели только от содержания глинистой фракции в почве позволило использовать в качестве входных параметров разработанных моделей только частоту электромагнитного поля, объемную влажность, температуру и количество глины в почве. 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). Точность, простота и удобство использования разработанных моделей стали причиной их внедрения в алгоритмы обработки данных метеорологических спутников SMOS (спутник европейского космического агентства) и SMAP (спутник национального аэрокосмического агентства США).

Разработка много-релаксационных диэлектрических моделей почв с двумя и более релаксациями позволила расширить частотный диапазон применения обобщенной рефракционной диэлектрической модели смеси вплоть до десятков мегагерц. Модели, позволяющие рассчитывать диэлектрическую проницаемость почв в мегагерцовом диапазоне, 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.

Наработки, полученные в ходе выполнения данной работы, позволили предложить два способа определения содержания физической глины в почвах. Радиофизический способ определения массовой доли физической глины в почве на основе измерения разности показателей преломления почвенного образца на двух частотах позволяет повысить производительность измерений путем сокращения времени. Радиоволновой способ позволяет определить массовую долю физической глины в почве из измерения в надир на частоте 433 МГц коэффициента отражения от почвы, что позволяет упростить процедуры измерения естественно сложенных почв в полевых условиях без необходимости отбора образцов почвенного покрова, а также повысить производительность измерений. Оба способа защищены патентами изобретений РФ.

Достоверность результатов. Достоверность созданных автором диэлектрических моделей обеспечивается использованием спектров КДП почв различного гранулометрического состава, измеренных различными авторами на различных диэлькометрических установках. Построение диэлектрических моделей осуществлялась с использованием широко используемых и верифицированных методик регрессионного и статистического анализа. Погрешность созданных диэлектрических моделей оценивалась относительно измеренных спектров КДП почвенных образцов, в том числе включая независимые данные, которые не использовались в ходе регрессионного анализа при построении моделей. Минералогически-зависимая, температурно- и минералогически-зависимая обобщенные рефракционные диэлектрические модели смеси получили дополнительное тестирование в ходе валидации алгоритмах восстановления влажности почв спутников SMOS и SMAP различными зарубежными исследователями.

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 17 работ: 9 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК [1–9], и 8 публикаций в материалах международных и всероссийских конференций [10–17]. Зарегистрировано 2 патента на изобретение.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 166 страниц, включая 56 рисунков и 22 таблицы. Список литературы содержит 104 наименования.

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 рассказывается о микроволновых методах дистанционного зондирования влажности почв, 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[1; 2; 15–16].

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 данной почве.

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 воды. 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_t . 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 [10]. Для демонстрации предложенной методики были взяты измеренные в частотном диапазоне от 0,15 до 10,8 ГГц спектры КДП для глинистой почвы, содержащей 12 % песка, 44,9 % ила и 44,1 % глины. Измерения проводились для 31 значения влажности почвенного образца, от воздушно сухой, до полной влагоемкости почвы. Измеренные спектры ППр и НКЗ группировались по наличию только связанной 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.

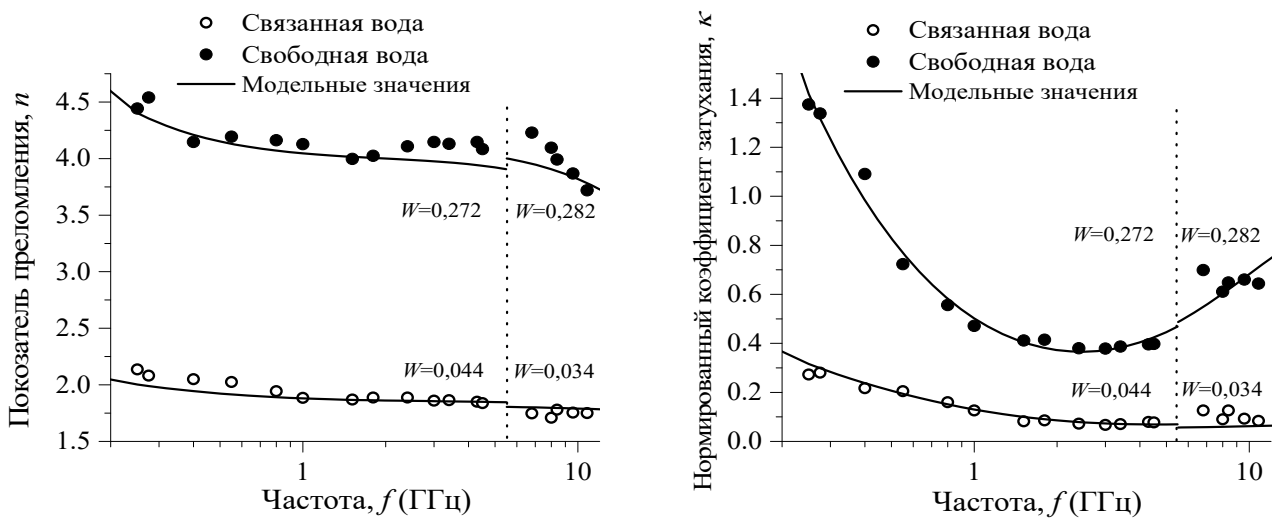


Рисунок 1 – Усредненные измеренные значения ППр и НКЗ (точки). Сплошной линией показаны результаты предсказаний, полученные с использованием параметров ОРДМС.

2) по диэлектрическим спектрам влажной почвы при всех имеющихся значениях влажности почвы [11]. 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 глины 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 воздушно сухой почвы, до полной влагоемкости. Описанный выше,

регрессионный анализ применялся одновременно ко всем спектрам КДП, измеренным у конкретного почвенного образца (рисунок 2).

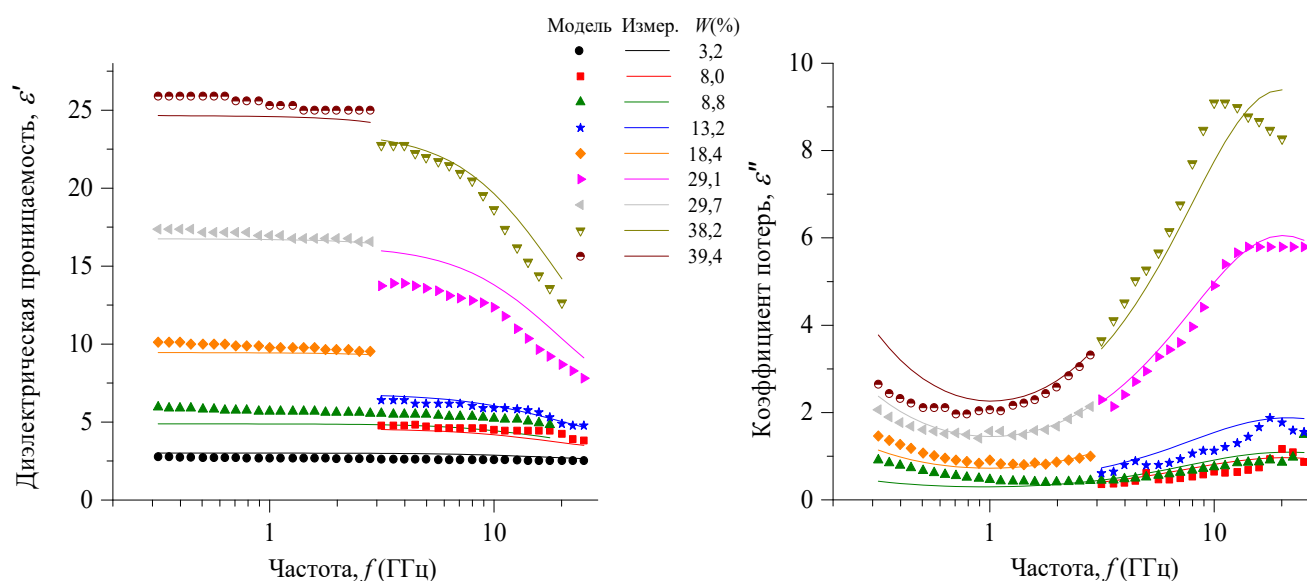


Рисунок 2 – Спектры ДП, ε' и КП, ε'' для почвы содержащей 77 % песка, 9 % ила и 14 % глины. Точки – экспериментальные данные, линии – восстановленные с помощью ОРДМС значения.

Первый метод удобно применять при ограниченном наборе влажностей почвы, особенно для песчаных почв, где диапазон влажностей для связанной воды мал 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 между измеренными значениями КДП почвы и восстановленными модельными значениями. 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 (А-L – измеренные Д.О. Куртисом, F1-F5 – измеренные М.С. Добсоном), по которым создавалась модель. Подстрочные символы, записанные через разделитель (/), указывают на каких почвах (А-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 глины в почве, и от температуры почвы [3; 4; 12]. Предложены минералогически-зависимая (МЗ) [3], температурно-зависимая (ТЗ) [14] и температурно-и минералогически-зависимая (Т-МЗ) [13] 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:

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

Весовое 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. Вследствие высокой точности и простоты применения данная модель была выбрана в качестве основной диэлектрической модели почв в алгоритмах обработки радиометрических данных спутников SMAP и SMOS. Преимущество предлагаемой модели хорошо видно из сравнения карт влажностей почв территории Австралии, построенных по данным спутника SMOS (рисунок 3) [18].

На рисунке 3а применялся алгоритм обработки данных, использующий для восстановления модель Добсона (ПДМС). На рисунке 3б применялся алгоритм обработки данных, использующий для восстановления модель Мирнова (МЗ ОРДМС). Черным цветом обозначены области, где модели не

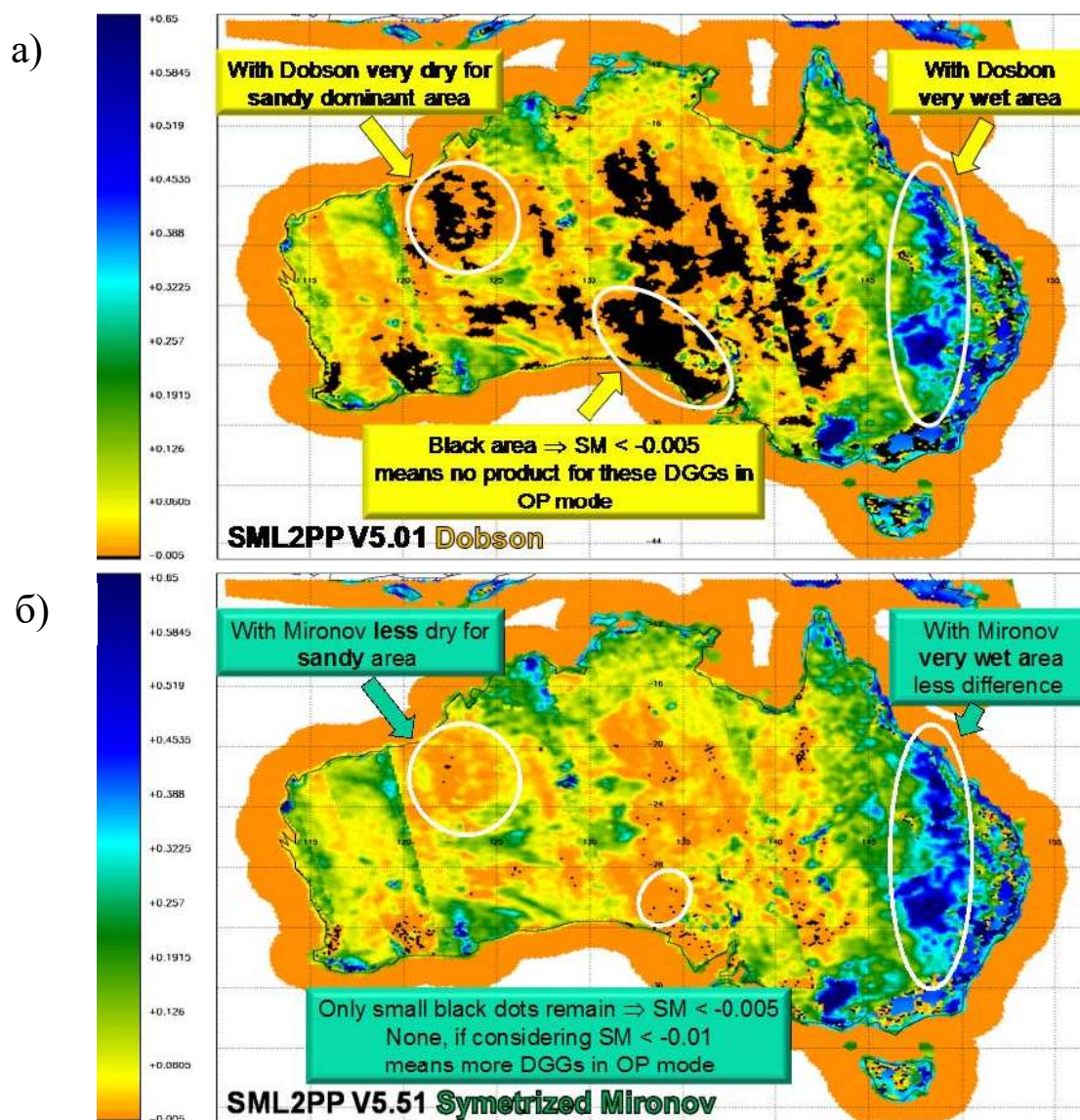


Рисунок 3 – Карты восстановленных влажностей, с помощью ПДМС (а) и МЗ ОРДМС (б), почв территории Австралии по данным спутника SMOS.

смогли восстановить влажность. Как видно на рисунке (б) таких областей меньше и сами они не такие обширные. Из цветовой шкалы слева от карт видно, что области, где модели не смогли восстановить значения влажности соответствуют почвам с малым содержанием влаги. Точность восстановленных значений влажности почвы, представленная картами (см. Рисунок 3), сопоставлялась с данными наземных измерений почвенных метеостанций [19]. Применяв к спутниковым данным модель Добсона получим коэффициент корреляции $R = 0,63$ и $СКО = 0,041 \text{ м}^3/\text{м}^3$ для восходящих орбит и $R = 0,56$ и $СКО = 0,107 \text{ м}^3/\text{м}^3$ для нисходящих орбит. С использованием МЗ ОРДМС получим коэффициент корреляции $R = 0,63$ и $СКО = 0,062 \text{ м}^3/\text{м}^3$ для восходящих орбит и $R = 0,57$ и $СКО = 0,101 \text{ м}^3/\text{м}^3$ для нисходящих орбит. Таким образом точность восстановления влажности обоими моделями примерно одинакова, а преимущества МЗ ОРДМС заключаются в возможности восстановления влажности для почв с меньшим содержанием влаги.

ТЗ ОРДМС создавалась путем повторения, описанной во второй главе, методики 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:

$$\tau_p = \frac{48 \times 10^{-12}}{T} \exp\left(\frac{\psi_p}{T} - \theta_p\right) \quad (9)$$

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 . Здесь 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. Данная модель так же нашла применение в алгоритмах обработки радиометрических данных спутника SMOS.

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

n_d	κ_d	W_t	$\varepsilon_{ob}(t_s)$	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)	$\varepsilon_{ou}(t_s)$	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 весовым 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:

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

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

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

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

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

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

$$\beta_u(C) = 1,11 \cdot 10^{-4} - 1,603 \cdot 10^{-7}C + 1,239 \cdot 10^{-9}C^2 + 8,33 \cdot 10^{-13}C^3 - 1,007 \cdot 10^{-14}C^4 \quad (17)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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 [5–7; 17]. При снижении частоты от 1,0 ГГц до 1,0 МГц происходит значительное увеличение диэлектрической проницаемости влажной почвы из-за релаксации Максвелла-Вагнера на межфазных границах. Главной особенностью предложенной методики является то, что учет низкочастотных релаксаций производится непосредственно в рефракционной модели, путем введения дополнительных релаксации в уравнения Дебая (5). В работе представлено два вида МР ОРДМС.

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

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

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

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. $\varepsilon_{\infty b} = \varepsilon_{\infty u} = 4,9$. 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 применяется предложенная ранее методика определения зависимости параметров модели от содержания глинистой фракции талых почв, результатом ее применения будут следующие функциональные выражения:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

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:

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

$$\frac{\kappa_s(M, f)}{\rho_d} = \begin{cases} \frac{\kappa_m}{\rho_m} + \kappa_b(f) \cdot M, & 0 \leq M \leq M_{t1} \\ \frac{\kappa_s(M_{t1}, f)}{\rho_d} + \kappa_t(f) \cdot (M - M_{t1}), & M_{t1} \leq M \leq M_{t2} \\ \frac{\kappa_s(M_{t2}, f)}{\rho_d} + \kappa_u(f) \cdot (M - M_{t2}), & M \geq M_{t2} \end{cases}$$

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.

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.

Таблица 4 – Минералогически зависимые параметры 3-х релаксационной ОРДМС

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

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 описана созданная одночастотная рефракционная диэлектрическая модель (ОЧРДМ) [9] для талых минеральных почв на частоте 435 МГц. Данная модель создавалась для практического использования в алгоритмах спутника BIOMAS ESA, оснащенного радаром с синтезированной апертурой (SAR), работающим в Р-диапазоне, который планируется к запуску в двадцатых годах. Предлагаемая модель разрабатывалась на основе трех минеральных почв: супесь (песок 41,4 %, ил 49,4 %, глина 9,1 %, □ – рисунок 4), суглинок (песок 40,4 %, ил 39,0 %, глина 20,6 %, ○ – рисунок 4), пы-

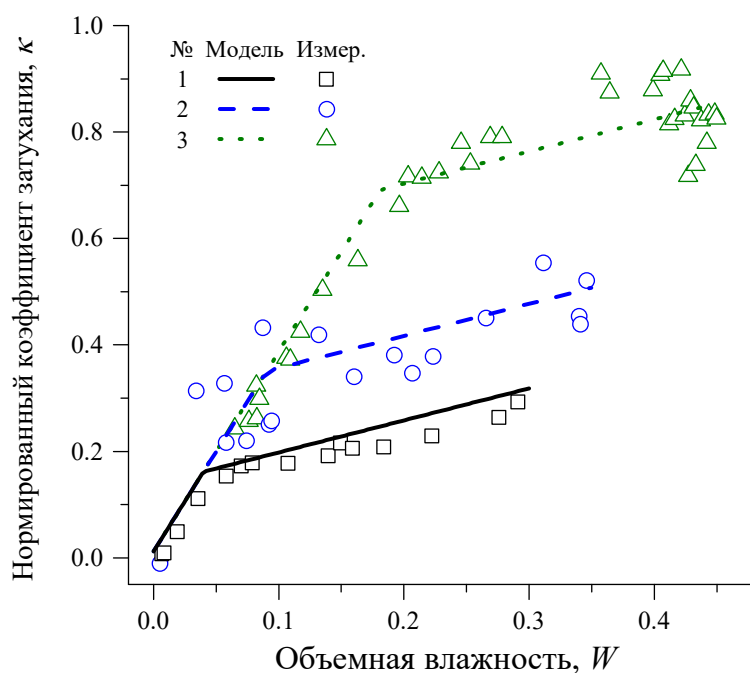


Рисунок 4 – Зависимость НКЗ от влажности почвы, для 3 исследуемых почв.

леватая глина (песок 1,6 %, ил 57,1 %, глина 41,3 %, △ – рисунок 4), образцы которых были взяты с полуострова Ямал, Россия. Модель создана для температуры почвы 20 °С. В отличие от ранее применяемых подходов в данном случае предполагается, что КДП связанной и свободной воды не зависят от гранулометрического состава различных почвенных образцов. Это хорошо видно из

графика нормированного коэффициента затухания, рисунок 4, здесь точками обозначены измеренные значения НКЗ, а линиями модельные значения. Далее проводится регрессионный анализ экспериментальных данных НКЗ и ПП 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. Предложены уравнения регрессии, описывающие измеренные значения КДП влажных минеральных почв, все параметры которых имеют физический смысл. Предложены методики определения параметров диэлектрической модели на основе физических характеристик почв (гранулометрического состава, температуры, влажности).

2. Показано, что для описания зависимости 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 достаточно использовать только содержание глинистой фракции.

3. На основании полученных функциональных зависимостей созданы спектроскопические, физически обоснованные, минералогически-зависимые диэлектрические модели влажных минеральных почв, с вариацией содержания глинистой фракции от 0 до 76%, в диапазоне изменений

влажностей от воздушно сухой до минимальной полевой влагоемкости, температур от 0 до 40 °С и частот от 0,3 до 26 ГГц.

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

5. Предложенные в данной работе диэлектрические модели талых почв могут быть применены в алгоритмах восстановления почвенной влаги из данных, измеренных 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 // Изв 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. *Mironov V.L.* Experimental analysis and empirical model of the complex permittivity of five organic soils at 1.4 GHz in the temperature range from -30 °C to 25 °C / V.L. Mironov, L.G. Kosolapova, S.V. Fomin, I.V. Savin // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2019. – Т. 57, № 6. – С. 3778–3787.
9. *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

10. 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
11. *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.
12. *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.
13. *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.
14. *Mironov, V. L.* Temperature dependable microwave dielectric model for moist soils / V. Mironov, S. V. Fomin // PIERS Proceeding. – 2009. – P. 831–835.
15. *Mironov, V. L.* 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.
16. *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.
17. *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.

Список цитируемой литературы

18. Центр дистанционного зондирования биосферы (CESBIO) Французское Космическое Агентство (CNES) [Electronic resource]. URL: <https://labo.obs-mip.fr/smos-blog/>.
19. *Mialon A.* Comparison of Dobson and Mironov dielectric models in the SMOS soil moisture retrieval algorithm / A. Mialon et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2015. – Vol. 53, no. 6. – P. 3084–3094.

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.

Отпечатано в типографии Института физики им. Л.В. Киренского
Сибирского отделения Российской академии наук —
обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН.
Тираж 80 экз. Заказ № 13. Объём 1,2 усл. печ. л. Формат 60×84/16.
660036, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 38