

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук»
Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской
академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

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

Миронов Валерий Леонидович

Красноярск – 2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТАЛЫХ ПОЧВ.....	17
1.1 Микроволновые методы дистанционного зондирования влажности почв.....	17
1.2 Диэлектрическая проницаемость почв.....	19
1.3 Диэлектрическое поведение талых почв в микроволновом диапазоне	22
1.3.1 Зависимость КДП почвы от ее влажности.....	23
1.3.2 Зависимость КДП почвы от частоты электромагнитного поля.....	27
1.3.3 Зависимость КДП почвы от температуры	33
1.3.4 Влияние типа почвы на ее КДП.....	38
1.4 Обзор наиболее распространенных диэлектрических моделей талых почв.....	41
1.4.1 Модель Ванга-Шмагге.....	42
1.4.2 Модель Добсона	44
1.4.3 Обобщенная рефракционная диэлектрическая модель смеси.	48
1.5 Выводы к главе 1	53
Глава 2. МЕТОДЫ ПОИСКА СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОРДМС.....	55
2.1 Метод определения параметров ОРДМС по спектрам КДП талых почв	55
2.1.1 Метод определения параметров ОРДМС по усредненным влажностным спектрам КДП почв.....	55
2.1.2 Метод определения параметров ОРДМС по индивидуальным влажностным спектрам КДП почв	64
2.2 Ошибки значений КДП талых почв, предсказанных диэлектрическими моделями ПДМС и ОРДМС, по отношению к зависимым и независимым данным измерений	67
2.3 Выводы к главе 2	80
Глава 3. МИНЕРАЛОГИЧЕСКИ- И ТЕМПЕРАТУРНО-ЗАВИСИМАЯ ОРДМС.....	81
3.1 Минералогически-зависимая ОРДМС.....	81
3.2 Температурно-зависимая ОРДМС	99
3.3 Температурно- и минералогически-зависимая ОРДМС.....	107
3.4 Выводы к главе 3	111
Глава 4. ОРДМС в мегагерцовом диапазоне частот	113
4.1 Двух релаксационная ОРДМС	113
4.2 Двух-релаксационная минералогически-зависимая ОРДМС	126
4.3 Трех-релаксационная ОРДМС	134

4.4	Одночастотная рефракционная диэлектрическая модель	143
4.5	Выводы к главе 4	150
	Заключение	151
	Список сокращений и условных обозначений	153
	Список литературы	156

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. 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 [1]. 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, поскольку наземная наблюдательная сеть охватывает не более 30% территории Земли [2]. 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) [3] и федерального государственного бюджетного учреждения "Научно-исследовательского центра космической гидрометеорологии "Планета" (ФГБУ "НИЦ "Планета") [4], являющихся ведущими организациями по эксплуатации и использованию национальной космической системы ДЗЗ.

Созданная за последние десятилетия международная 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 [5] и радиометрических данных спутников GCOM-W1/AMSR-2, SMAP, SMOS [6].

Диэлектрическая проницаемость почвенного покрова является ключевым элементом алгоритмов восстановления влажности почв на основе физических моделей микроволнового радиотеплового излучения и радарного рассеивания [7]. К началу представленных в данной работе исследований в алгоритмах восстановления влажности минеральных талых почв, использовались диэлектрические модели Добсона (M.C. Dobson) [8], Ванга-Шмагге (J.R. Wang, T.J. Schmugge) [9], Халикайнена (M.T. Hallikainen) [10]. 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 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 более точной, физически обоснованной модели КДП минеральных почв, пригодной для практического использования в алгоритмах восстановления влажности существующих и перспективных микроволновых спутниковых радарных и радиометрических систем. Вновь создаваемая диэлектрическая модель талых почв должна корректно учитывать взаимное количество связанной и свободной воды в зависимости от гранулометрического состава естественных минеральных талых почв, их плотности, температуры и влажности в широком диапазоне частот.

Степень разработанности. Физической основой для дистанционного микроволнового зондирования влажности почв служит большой контраст между диэлектрическими проницаемостями жидкой воды (~ 80) и сухой почвы (< 4). Первые диэлектрические модели смеси, описанные в литературе [11–15] с начала 20-го века и примерно до 70-х годов, имели дело, в большинстве случаев, только со смесью двух составляющих. Они представляли собой различные комбинации диэлектрических проницаемостей компонентов смеси и их объемных долей, и были верифицированы на небольшом количестве отрывочных измерений. В 70-х годах прошлого века проводились масштабные измерения диэлектрических проницаемостей почв в зависимости от содержания влаги на отдельных частотах в СВЧ диапазоне [16–20]. В работе [9] была проведена проверка большинства известных к тому времени диэлектрических формул на новых экспериментальных данных. Рассчитанные вариации диэлектрической проницаемости разных типов почв во всем диапазоне измеренных влажностей с использованием этих формул не дали хорошего описания результатов измерений.

Проведенные в 70-х годах измерения диэлектрических свойств почв показали, что вариации диэлектрической проницаемости с изменением содержания влаги зависят от типа почвы. Песчаные почвы имеют более высокие значения диэлектрической проницаемости, чем глинистые почвы при той же самой влажности. Первая

диэлектрическая модель талых почв, учитывающая влияние типа почвы, была разработана Вангом и Шмагге в 1980 г. [9]. Ими была предложена простая эмпирическая четырёхкомпонентная модель смеси твердой фазы почвы, воздуха, связанной и свободной воды, для описания диэлектрической проницаемости в зависимости от объемной влажности и гранулометрического состава (содержание глинистой фракции и песка) почвенных образцов. Входными параметрами данной модели являются объемная влажность и пористость почвы, количество связанной воды, содержания глинистой фракции и песка. Диэлектрическая проницаемость связанной воды в данной модели постепенно увеличивается от КДП льда до некоторой промежуточной величины между КДП льда и свободной воды с ростом влажности от нуля до точки перехода к свободной воде, которая зависит от типа почвы (содержания песчаной и глинистой фракции в почве). Модель строилась на основе данных, полученных для двух частот 1,4 ГГц и 5 ГГц. Причем для 5 ГГц было доступно только 5 почвенных образцов.

Следующая диэлектрическая модель почв, получившая наиболее широкое распространение, – это модель Добсона с соавторами 1985 г. [8]. Этим коллективом была поставлена цель провести собственные измерения диэлектрической проницаемости с высокой степенью точности и достоверности в диапазоне частот от 1,4 до 18 ГГц для нескольких типов почвы и разработать модель диэлектрической проницаемости талых почв, основанную на известных физических характеристиках почвы. Разработанная этими авторами модель позволяет рассчитывать диэлектрическую проницаемость минеральных почв в зависимости от влажности с учетом типа почвы при температуре близкой к комнатной в диапазоне частот от 1,4 до 18 ГГц. Входными параметрами данной модели являются плотность сухого сложения и минерального скелета почвы, объемная влажность почвы, частота электромагнитного поля, содержание глинистой фракции и песка. В данной модели связанная и свободная вода определены в виде смеси, КДП которой описывается на основе КДП свободной воды и объемной влажности почвы, степенной показатель которой зависит от содержания глинистой фракции и песка в почве. Позднее, Пеплинским (N.R. Peplinski) с соавторами [21] диапазон применимости модели

Добсона был расширен в мегагерцовую область путем корректировки некоторых формул, полученных из регрессионного анализа измерений, проведенных в диапазоне 0,3–1,3 ГГц.

Интерес к дистанционному зондированию из космоса возник в середине 1970-х годов в связи с созданием и запуском первых искусственных спутников Земли. Первый алгоритм восстановления влажности почв [22] был разработан для космического аппарата Aqua (NASA), (2002–2011 гг.), который содержит 12-канальный на 6-ти частотах в диапазоне от 6,9 ГГц до 89 ГГц радиометр AMSR-E. В этом алгоритме не использовались диэлектрические модели почв. Влажность почвы рассчитывалась согласно линейной регрессионной зависимости от поляризационного индекса для трех групп почвенного покрова: почв без растительности, с редкой (низкой) и густой (высокой) растительностью. На нескольких экспериментальных площадках было показано, что алгоритм [22] вполне способен измерять значение влажности почвы с коэффициентом корреляции $R = 0,65$ и стандартной ошибкой $SE = 5,8$ относительно наземных наблюдений. Из-за ограниченного поля обзора для Aqua требуется приблизительно 16 дней, чтобы нанести на карту всю поверхность планеты с разрешением 60 км [23].

Аппарат SMOS Европейского космического агентства (ESA) (2009 г. – по настоящее время) – это первый в мире спутник, предназначенный непосредственно для наблюдения за влажностью почвы. Штатный алгоритм спутника SMOS осуществляет инверсию измеренных радиометром Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis (MIRAS) на частоте 1,4 ГГц на горизонтальной и вертикальной поляризации угловых зависимостей радиояркостной температуры в значения влажности верхнего слоя (0–5 см) почвенного покрова. Первоначально базовым элементом этого алгоритма являлась диэлектрическая модель почв, созданная Добсоном [8]. Однако, как было показано в [24], модель Добсона имеет существенно большую ошибку прогноза на независимых почвах, т. е. почвах которые не были использованы для построения модели, по сравнению с ошибкой прогноза модели для тех почв, которые использовались для создания модели. Более того, в частотном диапазоне от 1,4 до 5,0 ГГц прогнозные значения коэффициента потерь иногда дают

отрицательные значения, что противоречит физическому смыслу этой величины. В 2009 году, после опубликования представляемой в данной диссертационной работе минералогически-зависимой Обобщенной Рефракционной Диэлектрической Модели Смеси (МЗ ОРДМС) [24], в алгоритме обработки данных спутника SMOS, наряду с моделью Добсона, в тестовом режиме стала использоваться и МЗ ОРДМС. А с 2011 года и по сей день МЗ ОРДМС применяется в качестве основного элемента этого алгоритма [25], позволяя SMOS создавать карты влажности один раз в три дня с разрешением 40 км со стандартной ошибкой $0,04 \text{ см}^3/\text{см}^3$. Кроме того, после запуска в 2015 году спутника SMAP, данная диэлектрическая модель стала применяться и в его алгоритмах обработки данных.

Цель работы и задачи исследований. 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:

1. Провести классификацию и анализ существующих обширных данных диэлектрических измерений почвенных образцов пригодных для построения рефракционной модели КДП талых минеральных почв;
2. Разработать методику определения спектроскопических параметров рефракционной диэлектрической модели на основе экспериментальных спектров КДП почвенных образцов в зависимости от содержания глинистой фракции и температуры.
3. Создать минералогически-зависимую, минералогически- и температурно-зависимую рефракционные диэлектрические модели талых минеральных почв на основе разработанной методики определения спектроскопических параметров;

4. Создать рефракционную спектроскопическую модель комплексной диэлектрической проницаемости талых минеральных почв, учитывающую низкочастотные релаксационные процессы почвенной воды в мегагерцовом диапазоне частот.

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.

Теоретическая и практическая значимость работы. 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 КДП почв в мегагерцовом диапазоне, могут быть использованы для калибровки рефлектметров 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 [26–31]. Созданные диэлектрические модели в ближайшие годы найдут свое применение в перспективных спутниковых радарных и радиометрических системах нового поколения с рабочими частотами в Р-диапазоне (225–390 МГц) частот [32; 33], что впервые 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

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:

1. 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 %.
2. 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 %.
3. 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 %.

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 независимы 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). По результатам практического применения, предлагаемая в данной работе модель [24] признана лучшей и применяется в качестве основного элемента алгоритма обработки данных спутников SMOS и SMAP [34]. Получено 2 патента на изобретение способов определения содержания физической глины в почвах [35; 36].

Объём и структура работы.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Она содержит 56 рисунков, 22 таблицы, список литературы составляет 104 наименования. Общий объём работы составляет 166 страниц.

Глава 1 является обзорной, в ней рассказывается о микроволновых методах дистанционного зондирования влажности почв, вводится понятие диэлектрической проницаемости почвы, рассматриваются изменения КДП почвы в зависимости от ее влажности, температуры, гранулометрического состава, а также от частоты электромагнитного поля, взаимодействующего с ней, описываются наиболее распространенные диэлектрические модели почв. Вторая, третья и четвёртая главы являются оригинальными.

В главе 2 представлены два новых метода нахождения спектроскопических параметров обобщенной рефракционной диэлектрической модели смеси (ОРДМС), оцениваются ошибки диэлектрических предсказаний, сделанных предложенными моделями, проводится сравнительный анализ точности предложенных моделей с наиболее широко используемой диэлектрической моделью Добсона.

В главе 3 предложены методики определения функциональных зависимостей параметров ОРДМС от гранулометрического состава почвы, а точнее от количества глинистой фракции в почве, и от температуры почвы. По результатам найденных закономерностей предложены три модификации обобщенной рефракционной диэлектрической модели смеси: минералогически-зависимая, температурно-зависимая и температурно-минералогически-зависимая. Оцениваются точности предложенных моделей и производится сравнительный анализ их точностей с точностью наиболее широко используемой диэлектрической модели.

В главе 4 представлена методика учета низкочастотных релаксаций в много-релаксационной ОРДМС, с учетом как дипольной, так и ионной релаксации молекул почвенной воды, при температуре почвы 20 °С. В результате чего представлены диэлектрические модели с двумя и тремя релаксациями, позволяющие прогнозировать значения КДП для талых почв одновременно, как в гигагерцовом, так и в мегагерцовом диапазонах частот. Так же представлена одночастотная

диэлектрическая модель, рассчитанная для практического использования на конкретной частоте 435 МГц. Проведена оценка точности разработанных моделей.

В заключении сформулированы основные выводы по проделанной работе.

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

1. Грант РФФИ+ККФН № 05-02-97712-р-енисей-а «Изучение релаксационных процессов в незамёрзшей почвенной и растительной влаге», 2005–2006 гг.
2. Грант РФФИ-Франция 09-05-91061-НЦНИ-а «Разработка модели диэлектрической постоянной почвы», 2009–2011 гг.
3. Базовый бюджетный проект СО РАН. Приоритетное направление 2.5. Современные проблемы радиофизики и акустики.
Программа 2.5.1. Радиофизические методы диагностики окружающей среды.
Проект. 2.5.1.1. Диэлектрическая спектроскопия природных сред в радиоволновом диапазоне частот, 2009 г.
4. Базовый бюджетный проект СО РАН. Направление II.10. Современные проблемы радиофизики и акустики, в том числе фундаментальные основы радиофизических и акустических методов связи, локации и диагностики, изучение нелинейных волновых явлений.
Программа II.10.1. Радиофизические методы дистанционной диагностики окружающей среды.
Название проекта: «Диэлектрическая спектроскопия и дистанционная диагностика почвенного покрова и горных пород в радиоволновом диапазоне частот», 2010–2012 гг.
5. Грант РФФИ №13-05-00502 «Много релаксационная диэлектрическая модель влажных почв при положительных и отрицательных температурах», 2013–2015 гг.
6. Грант РФФИ №16-05-00572 «Одночастотные диэлектрические модели талых и мерзлых минеральных и органических почв», 2016–2018 гг.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 17 работ: 9 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, и 8 публикаций в материалах международных и всероссийских конференций. Получено 2 патента России на изобретение.

Личный вклад автора заключался в анализе экспериментальных данных, разработке алгоритмов извлечения из них значений параметров моделей, получения функциональных зависимостей этих параметров с целью создания универсальной и удобной в использовании минералогической диэлектрической модели (МДМ).

Автор выражает глубокую благодарность всем соавторам, без помощи которых решение поставленных задач было бы невозможным. Особую благодарность хочу выразить научному руководителю член-корреспонденту РАН, доктору физико-математических наук, профессору Миронову В.Л. за постоянное внимание и помощь, оказанную при анализе и интерпретации экспериментальных данных.

Глава 1. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТАЛЫХ ПОЧВ

1.1 Микроволновые методы дистанционного зондирования влажности почв

Методы дистанционного зондирования основаны на том, что любой объект излучает и отражает электромагнитную энергию в соответствии с особенностями его природы. Различия в длинах волн и интенсивности излучения могут быть использованы для изучения свойств удаленного объекта без непосредственного контакта с ним. В радиодиапазоне используются радарный (активный) и радиометрический (пассивный) методы зондирования.

При радарном методе, измеряемое спутником сечение обратного радарного рассеивания σ в приближении, метода малых возмущений, зависит от значения КДП почвы, ε_s :

$$\sigma_{H,V} = \frac{k_0^4 |\varepsilon_s - 1|^2}{4\pi} \alpha_{H,V} (R_{H,V}(\theta, \varepsilon_s)) \cdot K(-2k_0 \sin \theta) \quad (1.1)$$

где k_0 – волновое число, $\alpha_{H,V} (R_{H,V}(\theta, \varepsilon_s))$ – функция от коэффициентов отражения Френеля на горизонтальной (H) и вертикальной (V) поляризации $R_{H,V}(\theta, \varepsilon_s)$, $K(-2k_0 \sin \theta)$ – пространственный спектр высот неровностей поверхности почвы, θ – угол зондирования.

В настоящее время на основе радарных данных Sentinel-1, METOP/ASCAT в С-диапазоне частот (5,4 ГГц) измерение влажности почвы проводится на основе эмпирического метода, основанного на сезонной калибровке значений сечения рассеивания при максимальной $\sigma(W_{\max})$ и минимальной $\sigma(W_{\min})$ влажности для основных ландшафтных ключевых участков, затем текущее значение сечения рассеивания переводят во влажность $W(t)$ на основе этой калибровки.

$$W(t) = A \frac{\sigma(t) - \sigma(W_{\min})}{\sigma(W_{\max}) - \sigma(W_{\min})} \quad (1.2)$$

где A – калибровочная константа.

При радиометрическом методе, измеряемая спутником радиояркостьная температура $T_{B\ H,V}(\theta)$, в приближении полуэмпирической тау-омега модели, так же является функцией КДП почвы:

$$T_{B\ H,V}(\theta) = \eta \cdot T_s, \quad \eta = \left(1 - |R_{H,V}(\theta, \varepsilon_s)|^2 \cdot \exp(-H_r \cos^2 \theta - b \cdot VWC / \cos \theta)\right) \quad (1.3)$$

где T_s – физическая температура почвы, H_r – параметр, учитывающий степень шероховатости поверхности почвы, VWC – содержание воды в растительности (vegetation water content), b – значение пропорциональности, которое зависит как от структуры растительности, так и от частоты волны. Поскольку b связано со структурой вышележащей растительности, вполне вероятно, что b будет также изменяться в зависимости от поляризации микроволн, по крайней мере, для некоторых типов растительности. В модели (1.3) пренебрегается рассеянием волны на элементах растительности, а температура почвы и растительного покрова считается одинаковой. В настоящее время на спутниках GCOM-W1, SMAP, SMOS реализованы алгоритмы зондирования влажности почвы, основанные на модели (1.3). Параметры модели (1.3) H_r , b калибруются для набора ключевых участков, выбранных на различных ландшафтах. Параметр VWC дополнительно измеряют с использованием мультиспектральных радиометров в ИК диапазоне. Физическую температуру почвы, T_s , определяют на основе данных метеостанций или глобальных моделей климата.

Алгоритм создания физической модели радиотеплового излучения (1.3), составляющий основу радиометрических методов дистанционного зондирования влажности почвы, состоит из следующих этапов [37]:

- нормируют радиояркостьную температуру по коэффициенту излучения

$$\eta = T_{B\ H,V}(\theta) / T_s,$$

- устраняют влияние растительности и шероховатости поверхности почвы

$$|R_{H,V}(\theta, \varepsilon_s)|^2 = (1 - \eta) \cdot \exp(H_r \cos^2 \theta + b \cdot VWC / \cos \theta),$$

- связывают измерение коэффициента излучения с диэлектрическими свойствами

$$\text{почвы } |R_H(\theta, \varepsilon_s)|^2 = \left| \frac{\cos\theta - \sqrt{\varepsilon_s - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\varepsilon_s - \sin^2\theta}} \right|^2 \text{ и } |R_V(\theta, \varepsilon_s)|^2 = \left| \frac{\varepsilon_s \cos\theta - \sqrt{\varepsilon_s - \sin^2\theta}}{\varepsilon_s \cos\theta + \sqrt{\varepsilon_s - \sin^2\theta}} \right|^2,$$

– связывают диэлектрические свойства, ε_s , почвы с ее влажностью, W .

Диэлектрическая проницаемость почвы, ε_s , представляет собой совокупность значений ее компонентов — воздуха, почвы и воды, которые имеют сильно различающиеся значения. Для связи расчетной диэлектрической проницаемости с количеством влаги в почве используются диэлектрические модели смеси. В ДЗЗ из космоса рассматриваются три диэлектрические модели смеси (Ванга и Шмагге [9], Добсона и др. [8] и Миронова и др. [24]).

1.2 Диэлектрическая проницаемость почв

Дистанционное зондирование – это способ получения физической информации о физическом объекте на расстоянии от него при помощи целенаправленной обработки принятого электромагнитного поля, которое, в свою очередь, провзаимодействовало с исследуемым объектом. Энергия электромагнитного поля может принадлежать как собственному излучению физического тела, так и быть отражённой от тела энергией постороннего источника (например, Солнца). Дистанционное зондирование осуществляется в различных диапазонах длин волн (оптическом, тепловом ИК-диапазоне, радиодиапазоне). Наиболее перспективным для дистанционного зондирования земной поверхности является радиодиапазон. Так как наблюдения в нем характеризуются полной независимостью от времени суток (освещения), практически не зависят от наличия облачности и аэрозолей.

Законы возбуждения и распространения электромагнитных волн описываются уравнениями Максвелла (J.K. Maxwell), являющимися фундаментальным законом природы и прямым следствием (с точки зрения современной геометрии) фундаментальных свойств пространства – времени [38]. Уравнения Максвелла позволяют определить основные характеристики поля (напряжённость электрического E и магнитного H поля, электрическая D и магнитная B индукция) в каждой точке пространства в любой момент времени, если известны источники поля (плотность

электрического тока j и объёмная плотность заряда ρ), как функции координат и времени t :

$$\operatorname{rot} \bar{H} = j + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}, \quad \operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \bar{B} = 0, \quad \operatorname{div} \bar{D} = \rho. \quad (1.4)$$

Физический смысл первого уравнения заключается в обобщении Максвеллом на переменные поля эмпирического закона Био-Савара (J.B. Biot, F. Savart) о возбуждении магнитного поля как электрическими токами проводимости, так и токами смещения. Второе уравнение является математической формулировкой закона электромагнитной индукции Фарадея (M. Faraday). Третье уравнение отражает опытные данные об отсутствии магнитных зарядов (магнитное поле порождается только электрическими токами). Четвёртое представляет собой обобщение закона взаимодействия неподвижных электрических зарядов — закона Кулона.

В быстропеременных полях, характерных микроволновому диапазону, в котором осуществляется дистанционное зондирование, возникают дисперсионные явления. Которые заключаются в том, что поляризация диэлектрика при наложении электрического поля происходит не мгновенно, а в течение вполне определённого времени, называемого временем релаксации τ . Временной характер процесса релаксации жёстко связан с физико-химическими свойствами и структурой вещества. И в этом случае значения D и B в данный момент времени зависят от значений функций $E(t)$ и $H(t)$ во все предыдущие моменты времени. Поскольку в задачах дистанционного зондирования речь идёт о достаточно слабых значениях электрических полей, то связь между индукцией и электрическим полем остаётся линейной. В указанных физических ограничениях наиболее общий вид соотношения между индукцией и электрическим полем во все предыдущие моменты времени может быть представлен следующим интегральным соотношением [39]:

$$D(t) = \varepsilon_{\infty} E(t) + \int_0^{\infty} f(\tau) E(t - \tau) d\tau \quad (1.5)$$

где $f(\tau)$ — функция времени, зависящая от свойств среды, ε_{∞} — диэлектрическая проницаемость среды на высоких частотах.

Всякое переменное поле может быть сведено (путём использования преобразования Фурье) к совокупности монохроматических компонент, в которых зависимость от времени даётся множителем $e^{-i\omega t}$, где ω – циклическая частота, связь между D и E , в этом случае, запишется в следующем виде:

$$D = \dot{\varepsilon}(\omega)\varepsilon_{ov}E \quad (1.6)$$

где ε_{ov} – электрическая постоянная вакуума, $\dot{\varepsilon}(\omega)$ – комплексная диэлектрическая проницаемость, однозначно связанная с процессом установления равновесия в диэлектрике и определяемая как:

$$\dot{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \int_0^{\infty} f(\tau)e^{j\omega\tau}d\tau \quad (1.7)$$

Таким образом, для периодических полей может быть введено понятие о диэлектрической проницаемости как о коэффициенте пропорциональности между D и E , причем этот коэффициент зависит не только от свойств среды, но и от частоты поля. О зависимости $\dot{\varepsilon}$ от частоты говорят как о законе её дисперсии или её дисперсионных свойствах. Так как функция $\dot{\varepsilon}$ комплексная, будем обозначать ее вещественную и мнимую части как ε' и ε'' :

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (1.8)$$

Квадратный корень из комплексной диэлектрической проницаемости $\sqrt{\dot{\varepsilon}}$ называется комплексным показателем преломления (КПП), а его вещественная и мнимая части определяют показатель преломления (ППр) n и нормированный коэффициент затухания (НКЗ) κ вещества:

$$\sqrt{\dot{\varepsilon}} = n + i\kappa \quad (1.9)$$

Согласно [40], ППр среды, n , равен отношению фазовых скоростей плоской волны в вакууме и среде. НКЗ этой среды, κ , равен величине, обратной набегу фазы плоской волны, выраженному в радианах, при распространении ее в вакууме на такое расстояние, при прохождении которого в поглощающей среде амплитуда плоской волны уменьшается в e раз.

Зная, как влияют на диэлектрическую проницаемость почвенного покрова такие факторы как ее состав, плотность, влажность, температура [41; 42], можно анализировать спутниковые данные зондирования Земли.

1.3 Диэлектрическое поведение талых почв в микроволновом диапазоне

Методы измерения влажности почв и других геофизических характеристик почвенного покрова, основанные на физических принципах обработки данных микроволнового радарного и радиометрического ДЗЗ, нуждаются в физических моделях, описывающих диэлектрические свойства почвы в зависимости от ее влажности, температуры, плотности и частоты электромагнитного поля. Почва представляет собой смесь, состоящую из твердой фазы – минеральных частиц различного состава, жидкой фазы – воды, обволакивающей почвенные частицы и заполняющей поровое пространство, и газообразной фазы – воздуха, находящегося в свободных от воды порах почвы. Каждая из фаз – твердая, жидкая и газообразная, входя в различных соотношениях в общий объем почвы, вносит свой вклад в величину КДП почвы. Некоторое представление о диапазоне возможных значений КДП почвы дают значения диэлектрической проницаемости ее отдельных компонентов. Так, для частиц твердой фазы в зависимости от типа почвы действительная часть КДП, ϵ' , в диапазоне частот 1–50 ГГц имеет величину ~ 3 –6, а мнимая часть в этом же диапазоне $\sim 0,05$ –0,25 [43; 44]. КДП, ϵ' воздуха равна 1, а мнимая часть, ϵ'' равна 0. Действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости воды (имеется в виду диэлектрическая проницаемость воды, которая не взаимодействует с частицами почвы) в диапазоне частот от 1 до 40 ГГц имеют сильно выраженную частотную и температурную зависимость. Действительная часть на частоте 1 ГГц изменяется от ~ 87 при 0 °С до ~ 80 при 20 °С и на частоте 40 ГГц от ~ 9 при 0 °С до ~ 16 при 20 °С. Мнимая часть изменяется при 0 °С от ~ 9 (1 ГГц) до ~ 17 (40 ГГц), проходя через максимум ~ 41 в области 9 ГГц, а при температуре 20 °С от ~ 5 (1 ГГц) до 27 (40 ГГц), проходя через максимум ~ 37 в области 17 ГГц [45; 46]. Поэтому для реальных почв значение КДП будет изменяться в довольно широких пределах, и

наибольшее влияние на формирование КДП почвы оказывает количество содержащейся в ней влаги.

1.3.1 Зависимость КДП почвы от ее влажности

Наиболее хорошо изучена зависимость КДП почв от влажности. Содержание влаги в почве обычно выражается в гравиметрических (весовая влажность, m_g) или объемных (объемная влажность, W) единицах.

Объемная влажность, W , или объемное содержание жидкости, численно равно отношению объема воды (жидкости) в почве, V_w , к объему всей почвы, V_s :

$$W = (V_w/V_s)100\% \quad (1.10)$$

Эта величина измеряется в % или в долях единицы и может меняться от нуля для абсолютно сухой почвы до 100 % (или 1) для полностью насыщенной почвы [47].

Весовая влажность, m_g , или весовое (массовое) содержание жидкости, численно равно отношению массы воды (жидкости) в почве, m_w , к массе твердой фазы почвы, m_s :

$$m_g = (m_w/m_s)100\% \quad (1.11)$$

Эта величина также измеряется в % или в долях единицы. Однако в отличие от объемной влажности имеет только нижнее ограничение – 0 % для абсолютно сухой почвы [47]. Объемная и весовая влажности связаны между собой соотношением:

$$W = m_g \cdot \rho_d \quad (1.12)$$

где ρ_d – плотность сухой почвы.

В диэлектрических измерениях предпочтительнее использовать объемную влажность. Это преимущество хорошо заметно на рисунке 1.1, где приведены зависимости действительной и мнимой частей КДП почвы от весовой и объемной влажностей [10]. Здесь видно, что коэффициент корреляции, R , между действительной частью КДП почвы, ε' , и объемной влажностью существенно выше, чем между ε' и гравиметрической влажностью (0,996 против 0,975), а разброс экспериментальных точек вокруг линии регрессии в несколько раз меньше. Стандартная ошибка

измерения, *SEE* (standard error of the estimate), для гравиметрической влажности составляет 1,58, а для объемной влажности всего 0,23.

Экспериментальные данные авторов [10; 17; 18; 20; 48; 49] свидетельствуют о том, что существует участок медленного роста КДП талых почв (как для действительной, так и для мнимой частей КДП) при малых влажностях и участок быстрого роста КДП при больших влажностях. Типичная зависимость КДП почвы от влажности имеет вид, представленный на рисунке 1.2. Наличие участков быстрого и медленного роста КДП объясняется тем, что вода в почве энергетически неоднородна: молекулы воды в непосредственной близости от минеральной поверхности испытывают силы притяжения, которые искажают ее структуру [47].

В почвах могут быть выделены различные категории воды, отличающиеся по природе и условиям образования, структуре, свойствам и др. С середины 30-х гг. до нашего времени было предложено много различных классификаций воды в почвах, но наиболее обоснованной в настоящее время является классификация Р.И.Золочевской [50], согласно которой вода в почвах подразделяется на три категории: связанная, переходная и свободная.

Связанная вода возникает, когда первые порции воды, попадая на сухую почву, связываются с помощью электростатических и водородных связей с поверхностью минеральных частиц, в результате чего полярные молекулы воды теряют возможность свободной ориентации. Связанная вода удерживается в почве за счет химических и физических сил связи с энергией 0,1–800 кДж/моль, действующих со стороны поверхности минералов и изменяющих структуру и свойства воды. Она образующаяся за счет адсорбционного «притяжения» молекул воды к активным адсорбционным центрам поверхности минералов. Среди нее выделяются две разновидности: 1) с наибольшей энергией притяжения к поверхности (около 40–120 кДж/моль) – вода островной или мономолекулярной адсорбции, 2) с меньшей энергией связи (менее 40 кДж/моль) – вода полимолекулярной (полислойной) адсорбции. Связанная вода образует адсорбционные пленки толщиной в один или

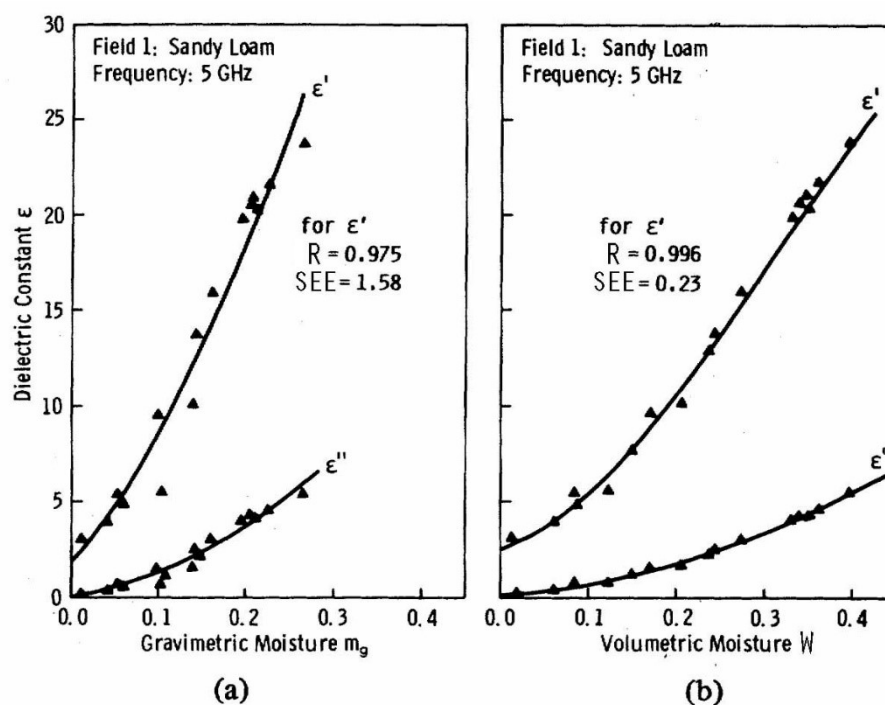


Рисунок 1.1– Сравнение двух зависимостей КДП почвы от влажности:
(а) гравиметрическая влажность, г/г; (б) объемная влажность, $\text{см}^3/\text{см}^3$.

Рисунок взят из работы [10]

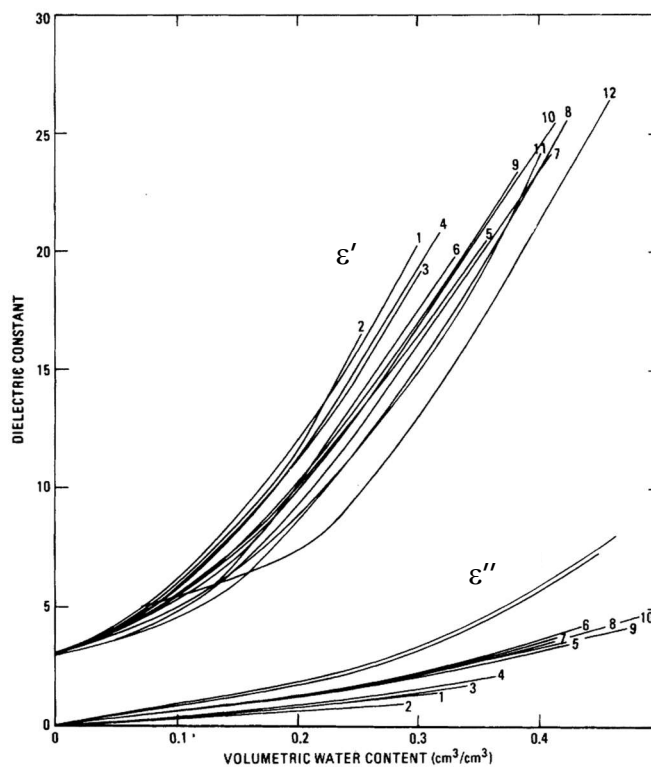


Рисунок 1.2 – Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости почвы от объемной влажности для 12 типов почв, измеренных на частоте 1,412 ГГц. ϵ' – действительная часть КДП почв, ϵ'' – мнимая часть КДП почв. Рисунок взят из работы [9]

несколько молекулярных слоев и в почвах содержится в порах или микротрещинах размером менее 0,001 мкм. У воды этой категории физические свойства в наибольшей степени отличаются от свободной. Эти отличия объясняются искажением и перестройкой структуры связанной воды вблизи поверхности, изменением и искривлением сетки межмолекулярных водородных связей в ее структуре под влиянием поля поверхностных сил. Молекулы воды, представляющие собой диполи, под действием электростатического притяжения, приобретают перпендикулярную ориентацию к твердой поверхности, что обуславливает некоторое повышение плотности воды (на 1,5 % по сравнению со свободной водой) и снижение тангенциальной (вдоль поверхности) подвижности ее молекул в слоях толщиной в несколько нанометров. Это также сказывается на увеличении ее вязкости и уменьшении растворяющих свойств, по сравнению со свободной водой [47]. Диэлектрическая проницаемость связанной воды в несколько раз ниже диэлектрической проницаемости свободной воды. Так в работе [51] приводятся результаты исследований, согласно которым, действительная часть диэлектрической проницаемости связанной воды в гигагерцовом диапазоне частот составляет $\sim 2,2$.

При добавлении воды, пока все молекулы воды связываются с частицами почвы, наблюдается медленный рост КДП. Когда все связи заняты, в следующих порциях, молекулы воды так же связываются поверхностями минеральных частиц, но располагаются они уже в последующих молекулярных слоях вокруг частиц. Связи здесь уже значительно слабее, молекулы частично восстанавливают подвижность, соответственно КДП растет быстрее. Такая вода называется переходной (от связанной к свободной). Толщина пленки переходной воды может достигать до 10 молекулярных слоев. Отличия в физических свойствах по сравнению со свободной водой менее значительны или почти несущественны [47].

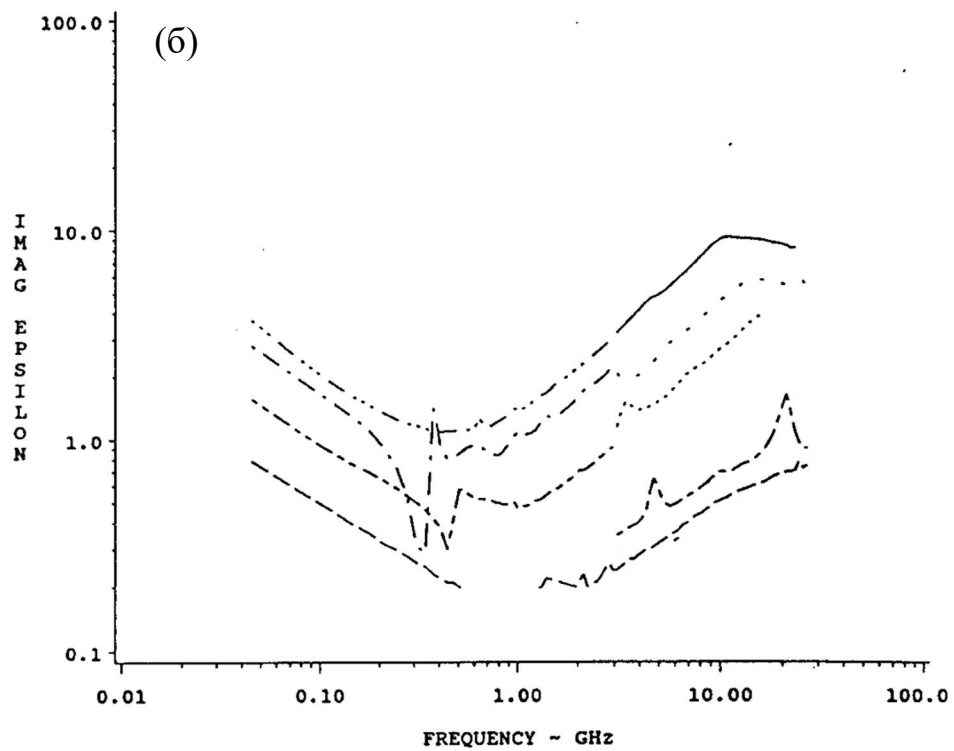
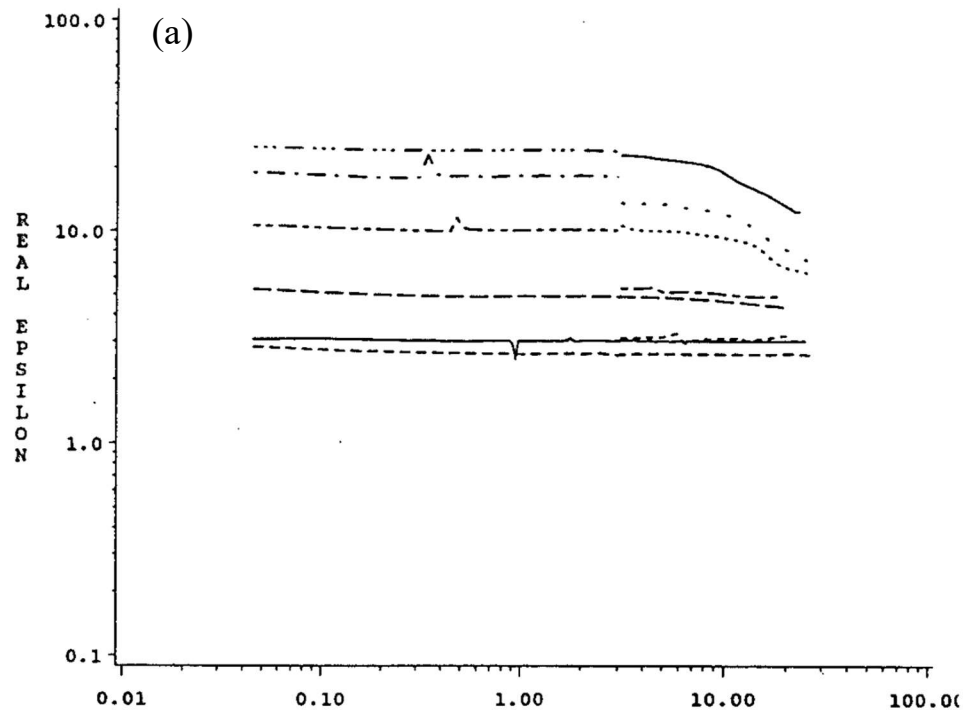
При дальнейшем добавлении воды частицы почвы уже не в состоянии связать молекулы воды. Эти порции воды остаются в жидко-капельном состоянии, заполняя пустоты между частицами почвы. Такая вода называется свободной (не связанной). Ее КДП соответствует КДП обычной воды (воды, не взаимодействующей с частицами почвы).

В связи с тем, что в минеральных почвах свойства свободной воды значительно отличаются от свойств связанной воды и почти не отличаются от свойств переходной воды, при создании диэлектрических моделей минеральных почв в данной диссертационной работе, в основном, будут рассматриваться только две категории почвенной воды: связанная (с медленным ростом КДП) и свободная (с быстрым ростом КДП). Влажность, W_t , при которой фаза медленного роста КДП переходит в фазу быстрого роста, называется переходной влажностью [9] или максимальным количеством связанной воды [52].

1.3.2 Зависимость КДП почвы от частоты электромагнитного поля

Наиболее обширные исследования диэлектрических свойств почв были проведены Куртисом (J.O. Curtis) с соавторами и представлены в отчете 1995 г. [53]. В этом исследовании проведены измерения КДП для 12 типов почв с широким спектром физических и химических свойств. Содержание воды в почвах изменялось от 0 до полного влагонасыщения, температура принимала значения 10 °С, 20 °С, 30 °С и 40 °С. Все измерения были проведены в диапазоне частот от 45 МГц до 26,5 ГГц. Результаты этих измерений в зависимости от частоты электромагнитного поля представлены на рисунках 1.3 и 1.4 для двух типов почв: песка (содержание песка 98 %, ила – 0 %, глины – 2 %) и глины (содержание песка 2 %, ила – 64 %, глины – 34 %), соответственно.

При малых влажностях (0,53–7 %) ϵ' песка почти не зависит от частоты. При больших влажностях (16,7–37,4 %) в диапазоне частот от 45 МГц до 6 ГГц действительная часть КДП песка мало зависит от частоты, а в диапазоне частот от 6 ГГц до 26,5 ГГц ϵ' песка заметно уменьшается с увеличением частоты (рисунок 1.3а). Мнимая часть КДП песка в начале уменьшается с увеличением частоты от 45 до 700 МГц, в районе 700 МГц имеет минимум, а затем возрастает с увеличением частоты (рисунок 1.3б).



% MOISTURE	— 0.53	- - - 1.90	- - - 2.10	- - - 5.80
	- - - 7.00	- - - 16.70	- - - 18.70	- - - 24.10
	- - - 27.50	- - - 36.60	- - - 37.40	

Рисунок 1.3 – Зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей КДП песка от частоты. Температура равна 20 °С. Рисунки взяты из работы [53]

Что касается глины, то в диапазоне частот от 45 МГц до 6 ГГц наблюдается заметное уменьшение действительной части КДП с увеличением частоты, затем скорость уменьшения с ростом частоты резко возрастает (рисунок 1.4а). Мнимая часть КДП глины ведет себя также как и мнимая часть КДП песка, только минимум сдвигается в сторону более высокой частоты (2 ГГц).

В работе Халликайнена с соавторами [10] получены зависимости действительной и мнимой частей КДП в диапазоне частот от 1,4 ГГц до 14 ГГц для четырех типов почв. На рисунке 1.5 представлен только один тип почвы (суглинок с содержанием песка 41,9 % и глины 8,53 %) при различных объемных влажностях (изменяющихся от 2,3 % до 37,4 %) при температуре 23 °С. Аналогичное поведение в зависимости от частоты имеют и другие типы почв: действительная часть КДП почв уменьшается с увеличением частоты от 1,4 ГГц, а мнимая часть в начале уменьшается, в районе 2–4 ГГц имеет минимум, а затем увеличивается с ростом частоты. На этом же рисунке пунктирной линией представлена КДП чистой воды, вычисленная по модели Дебая. Следует обратить внимание, что модель Дебая не описывает минимум мнимой части КДП и ее рост ниже минимума.

Согласно измерениям Ньёку (E.G. Njoku) и Конга (J. Kong) [54] действительная часть КДП песка не зависит от частоты электромагнитного поля в диапазоне от 500 МГц до 5 ГГц.

Сложный характер зависимости значений КДП от частоты электромагнитного поля объясняется тем, что частотная дисперсия КДП почв обусловлена несколькими типами релаксаций. В гигагерцовом диапазоне частот спектр КДП определяется дипольной релаксацией почвенной воды, не связанной с поверхностью минеральных частиц, которая хорошо описывается уравнением Дебая. С понижением частоты в мегагерцовую область и ниже решающее влияние на формирования спектра КДП переходит к межслойным релаксациям Максвелла-Вагнера, обусловленным поляризацией границ, разделяющих фазы с разными значениями КДП. Модели для описания данных релаксаций в общем случае нет, но используются различные частные модели Коула-Коула, Гавриляка-Негами, и др. [55–58].

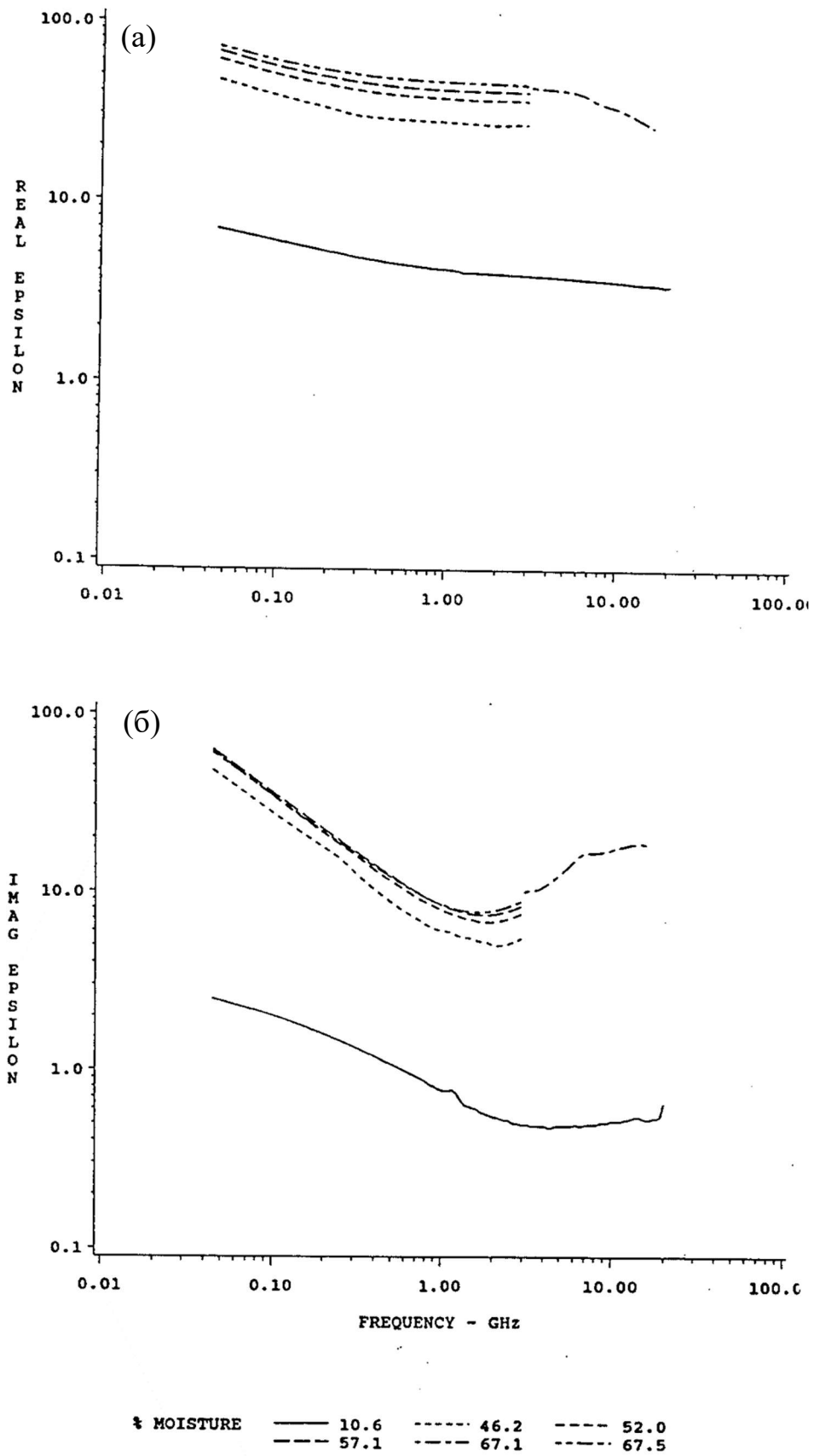
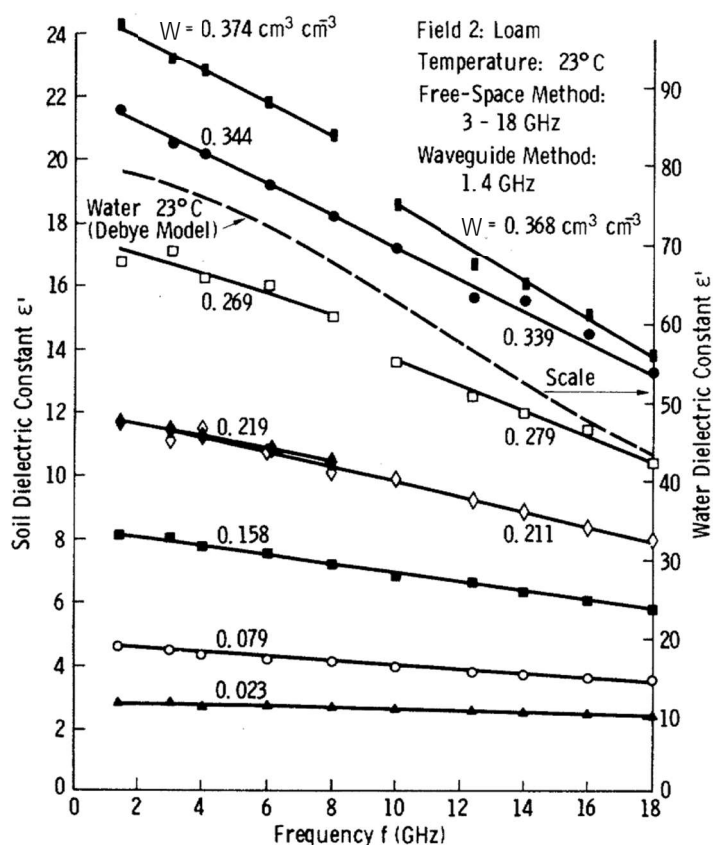
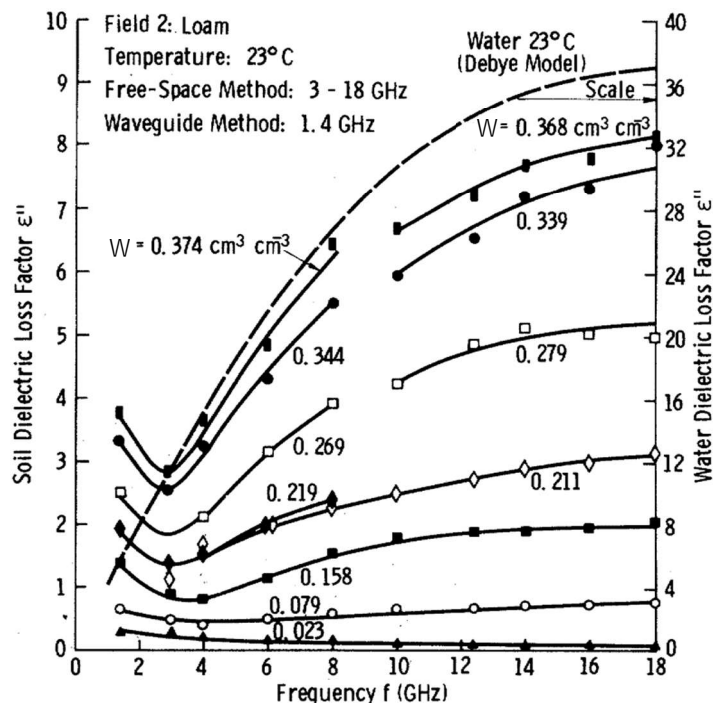


Рисунок 1.4 – Зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей КДП глины от частоты. Температура равна 20 °С. Рисунки взяты из работы [53]



(a)



(b)

Рисунок 1.5 – Зависимости действительной части КДП, ϵ' , (a) и мнимой части КДП, ϵ'' , (b) для одного типа почвы (Field 2) от частоты при фиксированных влажностях, W . Рисунки взяты из работы [10]

Релаксации Максвелла-Вагнера вызванные поляризацией межфазных границ хорошо показаны в работе Боброва П.П. и др. (рисунок 1.6) [59]. Экспериментальные измерения КДП на рисунке 1.6 выполнены для суглинка с объемной влажностью $0,229 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Здесь надо отметить, что в данной работе используются модели, минимальная рабочая частота которых не опускается ниже 40 МГц. Неиспользуемая область на рисунке 1.6 закрашена серым цветом. Таким образом в данной работе будет задействована лишь незначительная часть низкочастотных релаксационных процессов.

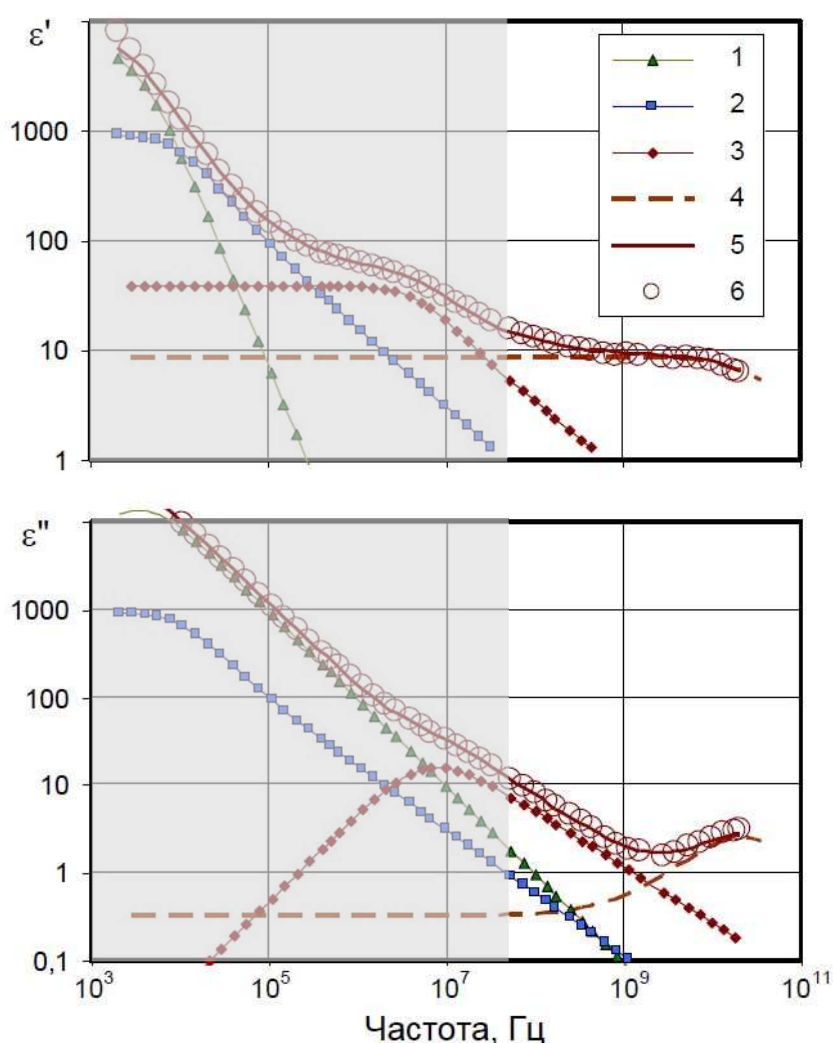


Рисунок 1.6 – Иллюстрация влияния релаксационных процессов на формирование спектра КДП почвы. 1–3 вклады низкочастотных релаксационных процессов; 4 – вклад высокочастотной релаксации; 5 – результирующая кривая; 6 – экспериментальные данные

1.3.3 Зависимость КДП почвы от температуры

Температура оказывает меньшее влияние на величину диэлектрической проницаемости талых почв, поэтому исследований, посвященных этому вопросу, гораздо меньше, чем исследований зависимости КДП почв от влажности и частоты. Наиболее масштабные измерения зависимости диэлектрической проницаемости незамерзших почв от температуры проведены также Куртисом [53]. Он провел эти измерения для 12 типов почв на нескольких влажностях во всем измеряемом им диапазоне частот от 45 МГц до 26,5 ГГц для четырех значений температур: 10 °С, 20 °С, 30 °С и 40 °С.

Для анализа из всего набора данных измерений Куртиса были выбраны три характерных типа почв: песок ($S = 98 \%$, $C = 0 \%$), илистый песок ($S = 77 \%$, $C = 14 \%$) и глина ($S = 2 \%$, $C = 34 \%$). Так же из всего набора влажностей, измеренных для каждой почвы, постарались выбрать по одному значению из области низких и из области высоких влажностей. Однако для глины в области низких влажностей данных не оказалось, а для песка присутствовали данные только для действительной части КДП. В области высоких влажностей, чтобы перекрыть весь исследуемый диапазон частот, измерения проводились в два этапа с разными измерительными ячейками, в результате взяты две наиболее близкие по значению влажности. Выбранные спектры действительной и мнимой части КДП для разных влажностей и температур представлены на рисунке 1.7. Сравнивая поведение кривых действительной части КДП на рисунке 1.7 для различных типов почв при различных температурах, можно выделить три диапазона частот, в которых поведение кривых в зависимости от температуры различается. В низком диапазоне частот действительная часть КДП почв возрастает с увеличением температуры, затем в диапазоне частот 1–6 ГГц наблюдается обратная зависимость ϵ' от температуры и в диапазоне высоких частот (выше 5–6 ГГц) опять наблюдается прямо пропорциональная зависимость. Для почвы с содержанием глины 14 % и влажностью 8,8 % аномальная зона находится в районе 1–5 ГГц, а для влажности порядка 40% этот диапазон составляет 0,1–6 ГГц.

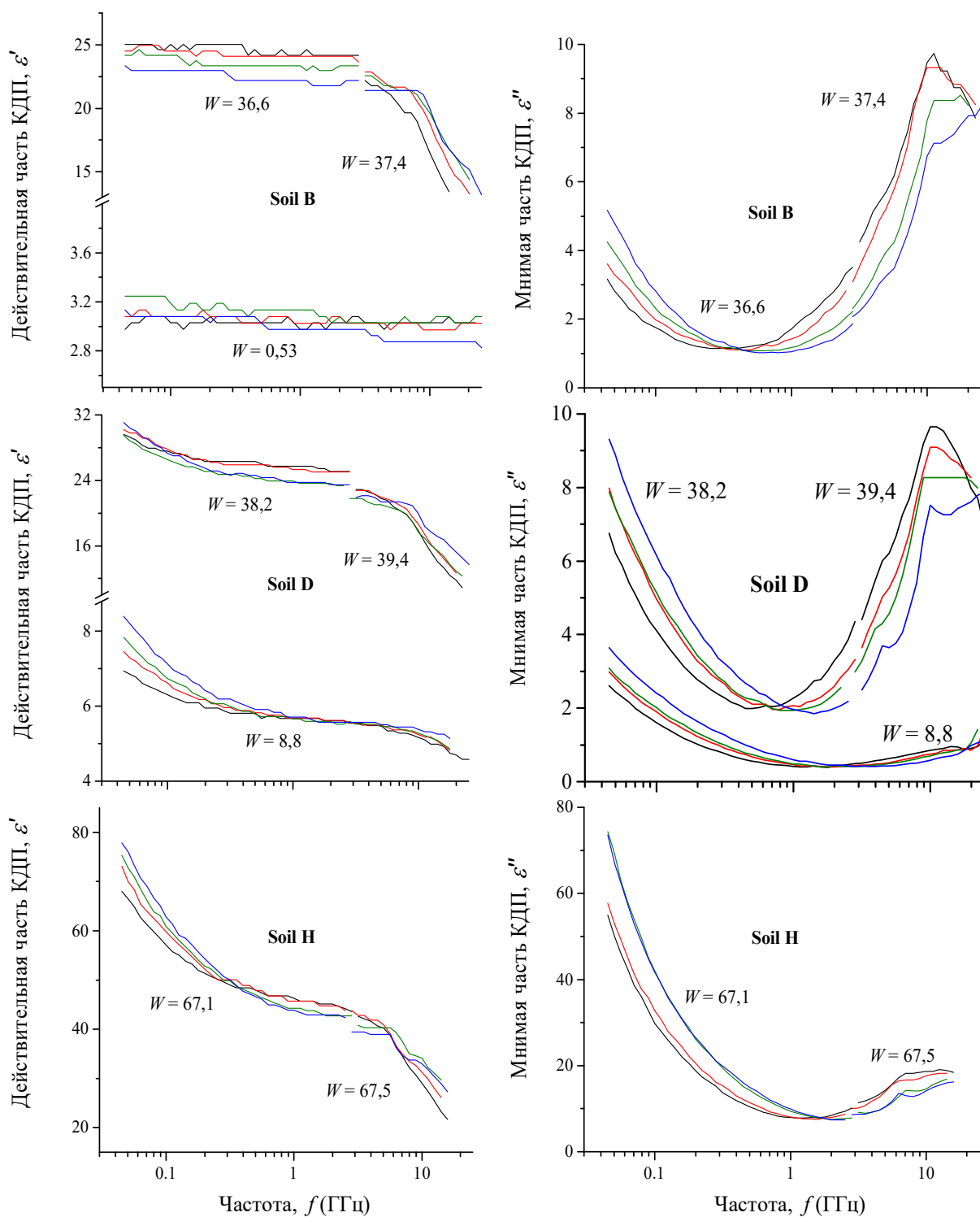


Рисунок 1.7 – Зависимость действительной (с лева) и мнимой (с права) части КДП для трех типов почв (см. табл.1.1) от частоты, при температурах: 10 °С (черная кривая), 20 °С (красная кривая), 30 °С (зеленая кривая) и 40 °С (синяя кривая)

Для почвы с содержанием глины 34 % и влажностью 67 % обратно пропорциональная зависимость ε' от температуры наблюдается в диапазоне частот 400 МГц – 6 ГГц. Изменение действительной части КДП почв в зависимости от температуры наиболее велико в диапазоне высоких и низких частот. На частоте 100 МГц разность между $\varepsilon'(40\text{ }^{\circ}\text{C})$ и $\varepsilon'(10\text{ }^{\circ}\text{C})$, деленная на среднее значение ε' , составляет 2 % (при маленьких влажностях) и увеличивается до 14 % (при больших влажностях) (Таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Величина относительного изменения ε при изменении температуры почвы от 10 °C до 40 °C в трех диапазонах частот

Почва	Влажность, W , %	Относительное изменение ε , %					
		0,1 ГГц		1 ГГц		10 ГГц	
		ε'	ε''	ε'	ε''	ε'	ε''
Soil B C = 0 %	0,53	1,6		3,7		5,4	
	36,6; 37,4	8,8	43	9,1	75,0	18,0	27
Soil D C = 14 %	8,8	6,4	40	$\approx 0,0$	20,0	4,7	42
	38,2; 39,4	3,7	20	8,5	12,5	12,2	27
Soil H C = 34 %							
	67,1; 67,5	13,6	40	3,0	33,0	16,1	35
Все почвы		2–14	20–40	<10	10–70	5–18	30–40

На частоте 10 ГГц изменение ε' при изменении температуры от 10 до 40 °C составляет от 5 % (при маленьких влажностях) до 16–18 % при больших влажностях (Таблица 1.1). В зоне обратно пропорциональной зависимости относительное изменение ε' несколько меньше и составляет не более 10 % в почвах, измеренных Куртисом [53].

Для мнимой части КДП почв можно выделить две области частот, где ε'' ведет себя по-разному в зависимости от температуры. В области более низких частот ε'' увеличивается с увеличением температуры, а в области более высоких частот (в пределах измеряемой области) эта зависимость обратная. Точка перегиба меняется в зависимости от типа почвы и от влажности. При малых влажностях (8,8 %) прямо пропорциональная зависимость ε'' от температуры меняется на обратно

пропорциональную зависимость на частоте 2,3 ГГц, а при больших влажностях (38,2 %; 39,4 %) перегиб происходит на частоте 800 МГц. Чем выше влажность почвы, тем раньше происходит смена зависимости. В зависимости от типа почвы (содержания глинистой фракции в почве) можно отметить следующее: чем выше содержание глинистой фракции в почве, тем позднее происходит смена зависимости ϵ'' от температуры с прямо пропорциональной на обратно пропорциональную.

Для проверки сделанных наблюдений была взята независимая почва (содержание песка 19,9 %, ила 49,8 %, глины 29,7 %), измеренная Вагнером и др. [55]. Измерения проводились для трех температур (5 °С, 20 °С и 40 °С) и четырех влажностей (3,2 %, 17,4 %, 34,4 % и 46,2 %) в частотном диапазоне от 100 МГц до 10 ГГц. Спектры КДП представлены на рисунке 1.8. Результаты анализа согласуются с результатами анализа данных Куртиса. По которым можно прийти к выводу, что изменение температуры оказывает различное влияние на связанную и свободную воду в почве в области частот 100 МГц – 6 ГГц.

Действительная часть КДП связанной воды увеличивается с ростом температуры, а действительная часть КДП свободной воды уменьшается с ростом температуры в результате чего:

- если в общем количестве влаги в почве преобладает связанная вода, то аномальной зоны (зоны обратно пропорциональной зависимости ϵ' от температуры) не наблюдается;
- если количество связанной воды приближается к количеству свободной воды, то изменение ϵ' от температуры стремится к нулю;
- чем больше свободной воды в общем количестве влаги в почве, тем ярче выражена зона аномалии (тем сильнее выражена обратно пропорциональная зависимость ϵ' от температуры).

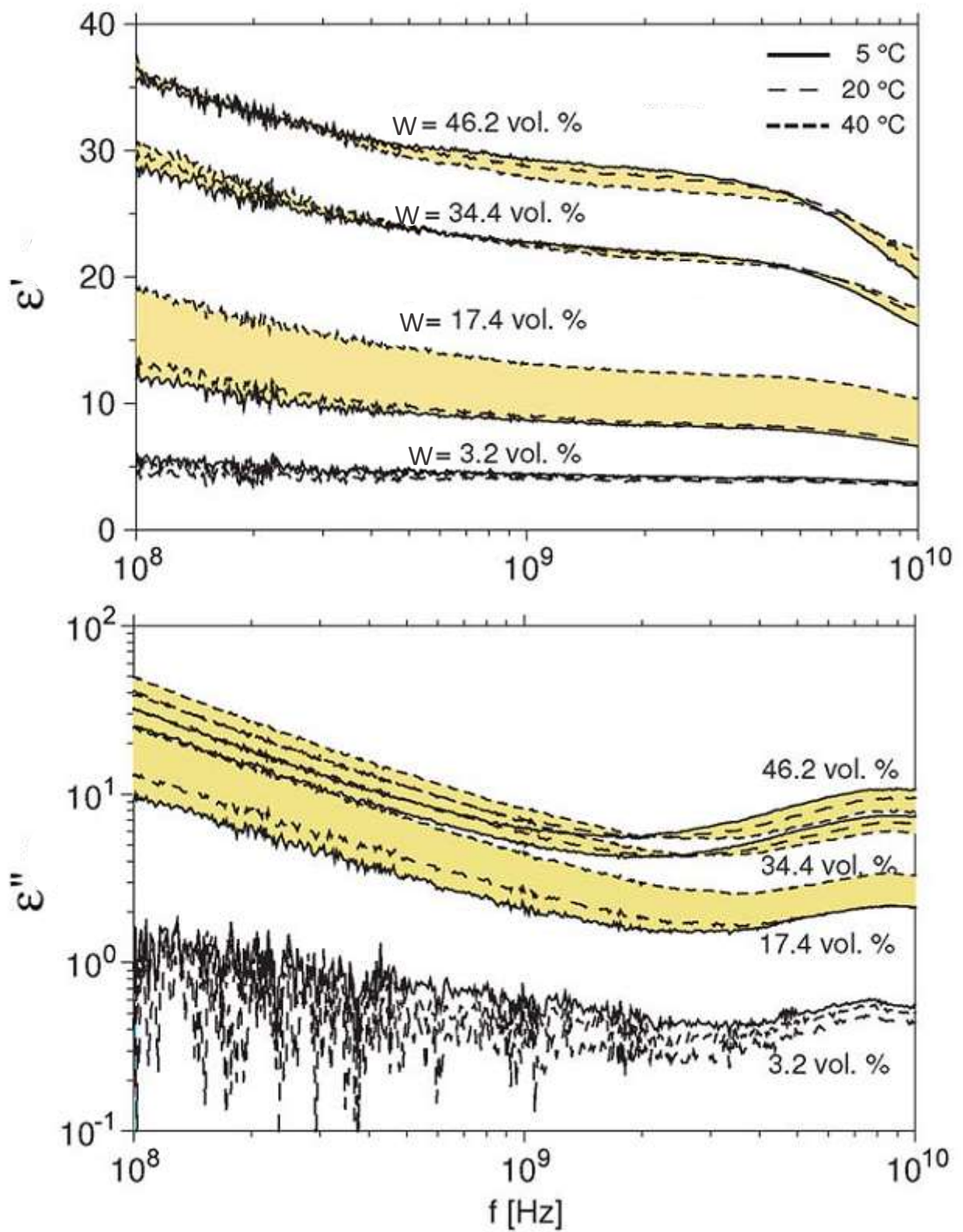


Рисунок 1.8 – Спектры КДП почвы для разных влажностей и температур.
Рисунки взяты из работы [54]

1.3.4 Влияние типа почвы на ее КДП

В рефлектометрии широко используется эмпирическое уравнение Топпа (G.C. Topp) [60]:

$$K_a = 3,03 + 9,3 \cdot W + 146,0 \cdot W^2 - 76,7 \cdot W^3 \quad (1.13)$$

K_a – кажущаяся диэлектрическая проницаемость, W – объемная влажность почвы. Топп полагает, что это уравнение справедливо для всех типов почв от супеси до почв с высоким содержанием глинистой фракции и не зависит от температуры, солености и плотности почв в широком диапазоне частот от 20 МГц до 1 ГГц.

Смит-Роуз (R.L. Smith-Rose) в статье 1935 г. [61] пишет, что на частотах ниже 50 МГц диэлектрическая константа талых почв строго зависит от типа почвы. Курт Рот (K. Roth) с соавторами [62] полагают, что уравнение Топпа не было верифицировано на почвах с высокой пористостью и при больших влажностях и предлагает для калибровки TDR (Time Domain Reflectometer) использовать рефракционную модель [16], которая требует дополнительных измерений диэлектрической проницаемости твердой фазы почвы, пористости и позволяет учитывать влияние температуры. Для минеральных почв он полагает значение диэлектрической проницаемости твердого скелета почвы равное 3,9, а для органических почв – 5. Дирксен (C. Dirksen) и Дасберг (S. Dasberg) [63] проверяли уравнение Топпа на 11 типах почв и пришли к заключению, что оно справедливо лишь для 4 типов минеральных почв плотностью выше 1,3 г/см³.

В работе П.П. Боброва с соавторами [58] рассмотрены способы измерения влажности почв диэлектрическим методом. Измерения КДП проводились для шести образцов: речного песка, бентонита, трех образцов чернозема обыкновенного (Haplic Chernozem (Loamic)) Омской области и смеси чернозема и речного песка. Содержание физической глины (частиц размером менее 0,01 мм) в образцах изменялось от 1,7 до 72 %, содержание органического углерода – от 0 до 4,12 %. Измерения КДП производились при разных значениях влажности в диапазоне частот от 10 кГц до 4–8 ГГц. Показано, что спектры КДП почв существенным образом

зависят от содержания глины и гумуса. Диэлектрическая проницаемость сухой естественной почвы (объемная влажность 0,6 %) очень слабо зависит от частоты, возрастая от 2,5 на частоте 8,5 ГГц до 3 на частоте 100 кГц. Диэлектрическая проницаемость сухого бентонита изменяется от 2,6 на частоте 4 ГГц до 6,5 на частоте 100 кГц. При увеличении влажности диэлектрическая проницаемость почв возрастает, но в диапазоне частот примерно от 0,5 до 2 ГГц от частоты почти не зависит. Исключением являются почвы с большой удельной поверхностью (бентонит). Выявлено, что на частотах ниже 20–30 МГц сильное влияние на КДП оказывают процессы межслойной диэлектрической релаксации и проводимость почвенного раствора, вследствие чего диэлектрическая проницаемость является неоднозначной функцией влажности. В диапазоне от 0,3 до 1–3 ГГц частотная зависимость вещественной части КДП выражена слабо, а мнимая часть КДП в диапазоне частот 2–4 ГГц имеет наименьшие значения.

В работе Халикайнена с соавторами [10] изучена зависимость комплексной диэлектрической проницаемости 4 типов почв от песчаного суглинка (песок = 51,51 %, ил = 35,06 %, глина = 13,43 %) до илистой глины (песок = 5,02 %, ил = 47,6 %, глина = 47,38 %) в диапазоне частот 1,4–18 ГГц. Результаты этих измерений представлены на рисунке 1.9. Из рисунка видно, что тип почвы влияет на диэлектрическую проницаемость талых почв и особенно велико это влияние на частоте 1,4 ГГц, а именно на этой частоте работает аппарат европейского космического агентства SMOS, направленный на измерение влажности земли и солености океана [64]. Кроме того, можно отметить, что чем больше песка в гранулометрическом составе почвы, тем выше действительная часть КДП этой почвы и ниже мнимая часть КДП. Глинистые почвы имеют большую поверхность частиц, составляющих твердую фазу почвы, и, следовательно, большее количество связанной воды, а связанная вода имеет меньшую диэлектрическую проницаемость. Поэтому кривая зависимости ε' от влажности для почв, содержащих значительное количество глинистой фракции, всегда располагается ниже аналогичной кривой для песчаных почв.

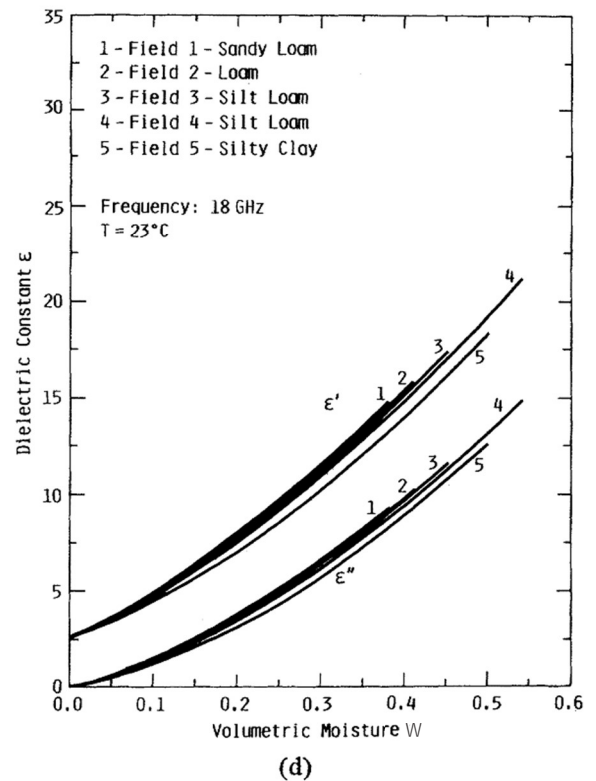
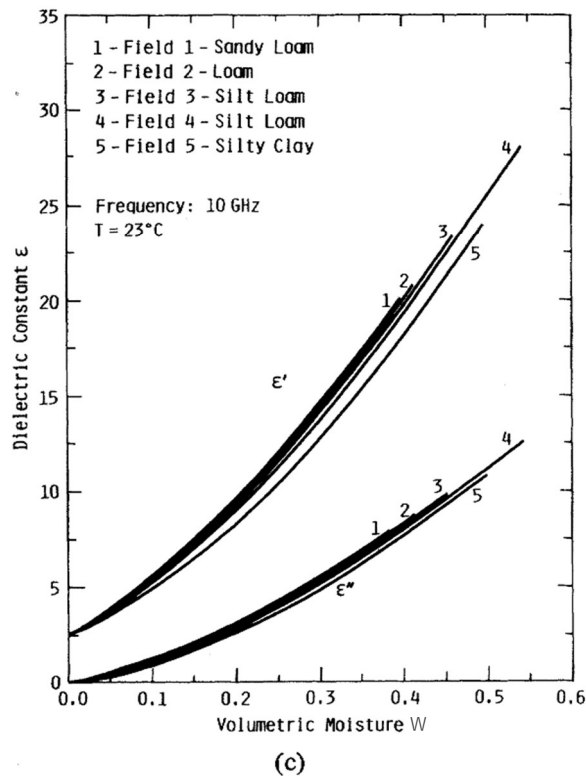
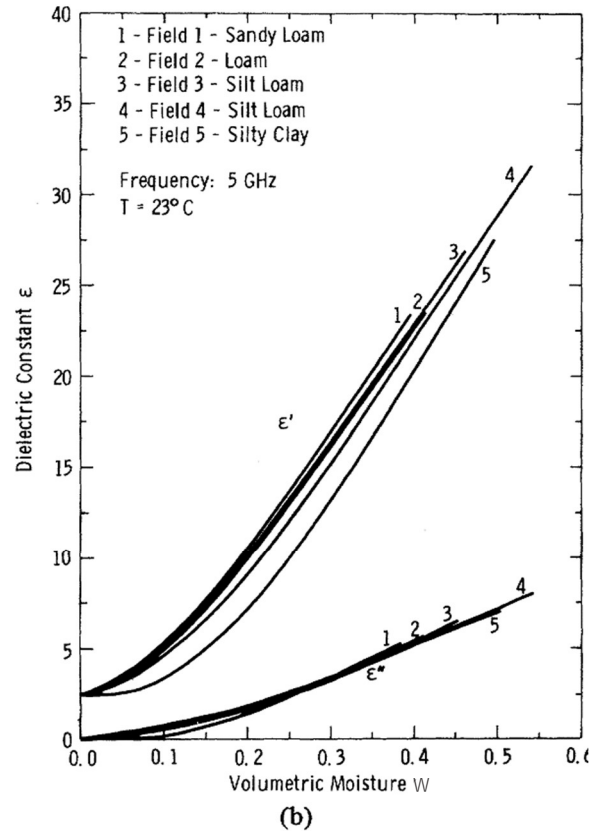
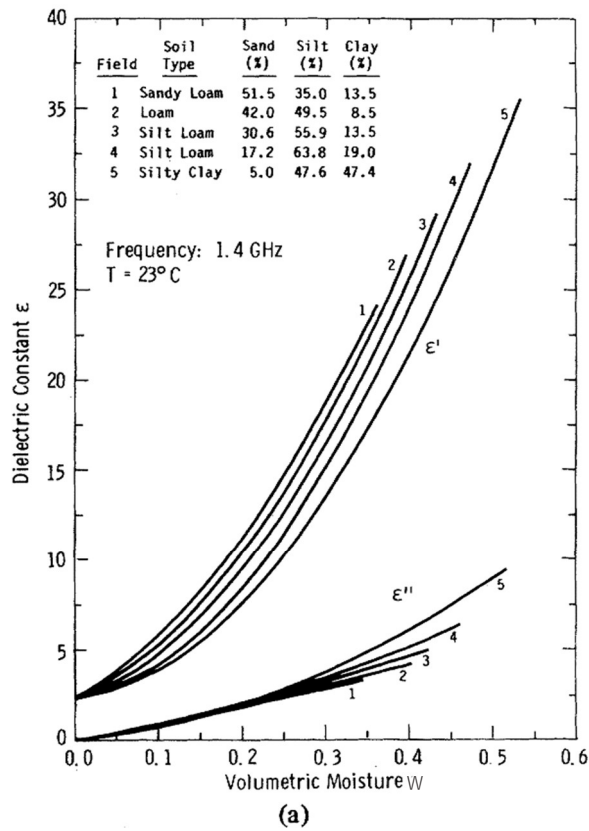


Рисунок 1.9 – Зависимость действительной части ϵ' и мнимой части ϵ'' КДП для пяти типов почв различного гранулометрического состава на частотах (a) 1,4 ГГц, (b) 5 ГГц, (c) 10 ГГц, и (d) 18 ГГц.

Рисунки взяты из работы [10]

Таким образом можно сделать следующие выводы:

- диапазон частот ниже 20–30 МГц непригоден для измерения влажности диэлектрическим методом из-за сильного влияния процессов диэлектрической релаксации и высоких значений мнимой части КДП. Измерения влажности лучше всего проводить в диапазоне частот 0,5–3 ГГц, где влияние межслойной релаксации и проводимости почвенного раствора на КДП незначительно;
- при одинаковой увлажненности почв, в диапазоне влажностей, характерных для свободной почвенной воды, действительная часть КДП почв с высоким содержанием песка всегда выше КДП почв с высоким содержанием глинистой фракции, а мнимая часть наоборот – всегда ниже;
- почвы, содержащие повышенное количество органики, и, следовательно, большую поверхность, адсорбирующую на себе воду, содержат большее количество связанной воды и имеют меньшую ε' , чем минеральные почвы с более плотным скелетом.

Рассмотрены экспериментальные данные, на основе которых выявлены закономерности изменения КДП талых почв в зависимости от частоты воздействующего электромагнитного поля, влажности, температуры и типа почвы. Далее рассмотрим, как обстоят дела с моделированием этих зависимостей, и какие модели диэлектрической проницаемости талых почв считаются наиболее приемлемыми в настоящее время.

1.4 Обзор наиболее распространенных диэлектрических моделей талых почв

Рассматриваемые ниже широко известные и применяемые на практике диэлектрические модели, предложенные Вангом и Шмагге [9], Добсоном с соавторами [8]

и рефракционная диэлектрическая модель смеси (РДМС) [65], являются дальнейшим развитием модели смеси (степенная модель) [66]:

$$\varepsilon^\alpha = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i^\alpha V_i \quad (1.14)$$

где m – число компонентов смеси, ε_i – диэлектрическая проницаемость i -ой компоненты, V_i – относительный объем i -ой компоненты, α – показатель степени, принимает значения от -1 до 1.

1.4.1 Модель Ванга-Шмагге

Модель Ванга-Шмагге [9] является эмпирической диэлектрической моделью смеси. Она основана на формуле смеси (1.14) при показателе степени α равном 1. Построена модель на основе измерений комплексной диэлектрической проницаемости 18 типов почв на частотах 1,4 ГГц [17; 20] и 5 ГГц [49]. Содержание глинистой фракции в этих образцах почв варьировалось в пределах 0–62 %, содержание песка изменялось от 0 до 100 %, илистая фракция менялась от 0 до 70 %. В модели впервые использована формула четырехкомпонентной смеси для вычисления КДП влажной почвы, состоящей из твердых частиц, воздуха, связанной и свободной воды. Выражение для КДП почвы выглядит следующим образом:

$$\varepsilon = \begin{cases} W\varepsilon_b + (P - W)\varepsilon_a + (1 - P)\varepsilon_r, & W \leq W_t \\ W_t\varepsilon_b + (W - W_t)\varepsilon_w + (P - W)\varepsilon_a + (1 - P)\varepsilon_r, & W > W_t \end{cases} \quad (1.15)$$

здесь P – пористость сухой почвы, ε_b , ε_a , ε_w , ε_r , ε_i – диэлектрические проницаемости связанной воды, воздуха, воды, минерала и льда, соответственно, W – объемное содержание влаги в почве, и W_t – максимальное содержание переходной влажности.

Пористость сухой почвы определяется выражением $P = 1 - \rho_s/\rho_r$, где ρ_s – плотность сухого сложения, для выбранных образцов почв она лежит в пределах 1,1–1,7 г/см³, ρ_r – плотность минерала, варьируется между 2,6 и 2,757 г/см³ и для

простаты принимается равной $\approx 2,65 \text{ г/см}^3$. Диэлектрическая проницаемость воздуха берется равной 1 для ε'_a и 0 для ε''_a . Диэлектрическая проницаемость минерала берется равной 5,5 для ε'_r и 0,2 для ε''_r . Относительно диэлектрической проницаемости связанной воды ε_b постулируются следующие утверждения:

- в начальный момент времени, когда первая порция воды попадает в сухую почву, диэлектрическая проницаемость связанной воды равна диэлектрической проницаемости льда, которая составляет $\approx 3,2$ для ε'_i и 0,1 для ε''_i , и не зависит от частоты на частотах больше 1 ГГц;
- при добавлении следующих порций воды, до момента, пока влажность почвы не достигнет предельного количества содержания связанной воды W_t в данном типе почвы, диэлектрическая проницаемость связанной воды ε_b имеет линейную зависимость от влажности:

$$\varepsilon_b = \varepsilon_i + (\varepsilon_w - \varepsilon_i) \frac{W}{W_t} \gamma \quad (1.16)$$

где γ – параметр, подбираемый путем регрессионного анализа экспериментальных данных функцией (1.15).

- при влажности почвы, превышающей значение W_t , диэлектрическая проницаемость связанной воды ε_b принимает следующее значение:

$$\varepsilon_b = \varepsilon_i + (\varepsilon_w - \varepsilon_i) \gamma \quad (1.17)$$

Диэлектрическая проницаемость свободной воды ε_w соответствует диэлектрической проницаемости объемной воды (воды вне почвы).

На низких частотах для вычисления мнимой части диэлектрической проницаемости необходимо добавить потери, связанные с проводимостью:

$$\varepsilon''_t = \varepsilon'' + \varepsilon''_\sigma = \varepsilon'' + 60\lambda\sigma = \varepsilon'' + \alpha W^2 \quad (1.18)$$

где ε''_t – общий фактор потерь, ε''_σ принимаем пропорциональной W^2 , σ – ионная проводимость, λ – длина волны. ε'' представляет собой мнимую часть диэлектрической проницаемости почвы, α – параметр, подбираемый путем регрессионного анализа экспериментальных данных функцией (1.18).

С помощью регрессионного анализа экспериментальных зависимостей действительной и мнимой частей КДП почвенных образцов от их объемной влажности для каждого типа почв были определены подгоночные параметры W_t , γ и α . Затем путем регрессионного анализа были получены линейные зависимости W_t и γ от влажности устойчивого увядания WP :

$$\gamma = -0,57 \cdot WP + 0,481 \quad (1.19)$$

$$W_t = 0,49 \cdot WP + 0,165 \quad (1.20)$$

с коэффициентами корреляции равными 0,79 для γ и 0,91 для W_t . А влажность устойчивого увядания в единицах объемной влажности ($\text{см}^3/\text{см}^3$) ранее [67] была определена в зависимости от гранулометрического состава почвы:

$$WP = 0,6774 - 0,00064 \cdot S + 0,00478 \cdot C \quad (1.21)$$

где S – содержание песка, а C – содержание глинистой фракции в процентах от сухого веса почвы.

Рассматриваемая модель интересна тем, что в ней (в отличие от большинства других моделей) сделана попытка учесть связанную воду в почве, диэлектрические свойства которой изменяются в зависимости от влажности и структуры почвы. Также к достоинствам модели можно отнести то, что на частотах выше 5 ГГц она позволяет рассчитать КДП почвы, зная только ее гранулометрический состав. Как показано в [9; 68–70] эта модель хорошо описывает зависимость диэлектрической проницаемости разных почв от влажности на частотах 1,4 и 5 ГГц. Недостатком модели является необходимость учитывать потери, связанные с проводимостью, для чего необходимо определять из экспериментальных данных параметр α на частоте 1,4 ГГц и ниже.

1.4.2 Модель Добсона

В 1985 году Халикайненом, Улаби и Добсоном [8; 10] была проведена серия измерений диэлектрической проницаемости на пяти образцах почв с содержанием

глинистой фракции от 8,5 до 47,4 % и содержанием песка от 5 до 51,5 %, в широком диапазоне частот 1,4–18 ГГц. По данным этих измерений была создана полуэмпирическая диэлектрическая модель смеси (ПДМС или Модель Добсона). Она основана на формуле смеси (1.14), которую Добсон представил в виде:

$$\varepsilon^\alpha = V_s \varepsilon_s^\alpha + V_a \varepsilon_s^\alpha + V_b \varepsilon_b^\alpha + V_u \varepsilon_u^\alpha \quad (1.22)$$

где подстрочными символами s , a , b и u обозначены компоненты твердой (сухой) почвы, воздуха, связанной и свободной почвенной воды, соответственно. Но, поскольку КДП связанной воды не известна, а ее объемная доля доступна только после длительных вычислений, Добсон сделал следующее приближение:

$$W^\beta \varepsilon_u^\alpha = V_b \varepsilon_b^\alpha + V_u \varepsilon_u^\alpha \quad (1.23)$$

где эмпирическая постоянная β зависит от минерального состава почвы. Подставив это приближение в уравнение (1.22) и оптимизировав его для измеренных во всем частотном диапазоне значений КДП всех имеющихся почв, Добсон получил показатель степени модели смеси α равным 0,65. А окончательное выражение для полуэмпирической диэлектрической модели смеси примет следующий вид:

$$\varepsilon^\alpha = 1 + \frac{\rho_b}{\rho_r} (\varepsilon_s^\alpha - 1) + W^\beta \varepsilon_u^\alpha - W \quad (1.24)$$

где ρ_b – объемная плотность почвы, ε_s – диэлектрическая проницаемость сухой почвы получена эмпирическим путем для почв из [10] с чрезвычайно низким содержанием влаги:

$$\varepsilon_s = (1,01 + 0,44\rho_r)^2 - 0,062 \quad (1.25)$$

Для расчета спектров КДП свободной воды ε_u используется уравнение Дебая предложенное в [71], которое было модифицировано Добсоном к следующему виду:

$$\varepsilon_u = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + j2\pi f\tau} - j \frac{\sigma_{eff}}{2\pi f \varepsilon_r} \cdot \frac{\rho_r - \rho_b}{\rho_r W} \quad (1.26)$$

где ε_∞ – высокочастотный предел диэлектрической проницаемости почвенной

воды, равный 4,9, ε_0 – статическая диэлектрическая проницаемость воды, $\varepsilon_r = 8,854 \times 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проводимость свободного пространства, τ – время релаксации почвенной воды, σ_{eff} – эффективная проводимость.

Эмпирически определяемые параметры модели находятся отдельно для вещественной и отдельно для мнимой части. Компоненты модели (1.24), так же для обеих частей суммируются раздельно. Аналитическое представление полуэмпирической диэлектрической модели смеси, записанное отдельно для вещественной и мнимой части, выглядит следующим образом:

$$\varepsilon' = \left[1 + \frac{\rho_b}{\rho_r} (\varepsilon'_s{}^\alpha - 1) + W^{\beta'} \varepsilon'_u{}^\alpha - W \right]^{1/\alpha}, \quad \varepsilon'' = [W^{\beta''} \varepsilon''_u{}^\alpha]^{1/\alpha} \quad (1.27)$$

где ε' – действительная часть КДП или диэлектрическая проницаемость (ДП) и ε'' – мнимая часть КДП или коэффициент потерь (КП) влажной почвы. Модифицированное уравнение Дебая для ДП, ε'_u , и КП, ε''_u , свободной воды примут следующий вид:

$$\varepsilon'_u = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + (2\pi f\tau)^2}, \quad \varepsilon''_u = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + (2\pi f\tau)^2} \cdot 2\pi f\tau + \frac{\sigma_{eff}}{2\pi f\varepsilon_r} \cdot \frac{\rho_r - \rho_b}{\rho_r W} \quad (1.28)$$

Используя $\alpha = 0,65$ и уравнения (1.27), (1.28), по пяти исследуемым почвам [8], были найдены эмпирически определяемые величины β' , β'' и эффективная проводимость, σ_{eff} :

$$\beta' = (127,48 - 0,519 \cdot S - 0,152 \cdot C)/100 \quad (1.29)$$

$$\beta'' = (133,797 - 0,603 \cdot S - 0,166 \cdot C)/100 \quad (1.30)$$

$$\sigma_{eff} = (-164,5 + 193,9 \cdot \rho_b - 2,25622 \cdot S + 1,594 \cdot C)/100 \quad (1.31)$$

Спектроскопические параметры ε_0 , τ , σ_{eff} имеют температурную зависимость. Для комнатной температуры (20 °С) статическая диэлектрическая проницаемость и время релаксации почвенной воды имеют следующие значения: $\varepsilon_0 = 80,1$ и $2\pi\tau = 0,58 \times 10^{-10}$ сек. Эффективная проводимость почвенной воды, зависящая, так же, от плотности почвы и ее минерального состава находится по формуле

(1.31). Значение этих параметров на других температурах, в положительной области значений, рассчитывается по эмпирическим зависимостям, полученным Стогриным [46].

Позднее эта модель была расширена на область частот от 300 МГц до 1,3 ГГц [21]. Это потребовалось в связи с тем, что возникла необходимость анализировать данные радарных наблюдений на частоте 440 МГц, полученные JPL (Jet Propulsion Laboratory) AIRSAR (Airborne Synthetic Aperture Radar) системой (летающая лаборатория представляет собой модифицированный NASA самолет DC-8). Были проведены дополнительные измерения на 4 типах почв в диапазоне частот 0,3–1,3 ГГц и подкорректированы выражения для ε' и σ_{eff} . В области частот $0,3 < f < 1,3$ ГГц диэлектрическая проницаемость влажной почвы вычисляется по формуле $\varepsilon'_{(0,3-1,3)} = 1,15 \cdot \varepsilon' - 0,68$, где ε' определяется выражением (1.27) на частоте 1,4 ГГц, а $\sigma_{eff(0,3-1,3)} = (4,76 + 22,04 \cdot \rho_b - 0,4111 \cdot S + 0,6614 \cdot C)/100$. Мнимая часть КДП, ε'' , осталась такой же, как и для частотного диапазона 1,4–18 ГГц.

Таким образом, модель Добсона позволяет рассчитывать значения КДП влажной почвы в зависимости от влажности и частоты. Причем все входные параметры ПДМС определяются из известных характеристик почвы, а именно: гранулометрического состава и плотности почвы. Это является основным преимуществом ПДМС перед другими моделями, и этим объясняется ее широкое применение в радарном и радиометрическом дистанционном зондировании поверхности суши. Так же, достоинством модели является широкий диапазон ее применимости, от 300 МГц до 18 ГГц. Недостатком модели является то, что она не разделяет почвенную влагу на свободную и связанную воду, что заставляет авторов вводить не имеющие физического смысла коэффициенты α и β' , β'' . Если коэффициенты β' и β'' в дальнейшем определяются исходя из типа почвы, то коэффициент α остается зависимым от того набора почв, из аппроксимации которых он определялся.

1.4.3 Обобщенная рефракционная диэлектрическая модель смеси.

Рефракционная модель, как и две предыдущих, так же основана на формуле смеси (1.14) при показателе степени α равном $1/2$. Шутко А.М. совместно с Башариновым Е.М. [72] и Реутовым Е.А. [65] провели анализ применимости 13 наиболее известных формул смеси для описания диэлектрических свойств почв в СВЧ-диапазоне. По результатам анализа был сделан вывод, что рефракционная модель обеспечивает наилучшее соответствие расчетных значений КДП экспериментальным данным и достаточно обоснована физически. Следующий шаг сделали Бобров П.П. [73], Миронов В.Л. и Комаров С.А. [74], которые провели ряд исследований по содержанию количества связанной воды в почвах различного механического состава и влиянию связанной воды на диэлектрические свойства модельных почв. В качестве образцов были взяты песок, каолинитовые, бентонитовые и монтмориллиновые глины. Измерения проводились в частотном диапазоне от 400 МГц до 10,5 ГГц. По итогам исследований была предложена интерпретация результатов экспериментов в виде зависимости показателя преломления, n , и нормированного коэффициента затухания, κ , почвы от объемной влажности, W , а не как традиционно было принято до этого: зависимости действительной, ε' , и мнимой, ε'' , частей КДП от W . Формулы перехода выглядят следующим образом:

$$\varepsilon' = n^2 - \kappa^2, \quad \varepsilon'' = 2n\kappa \quad (1.32)$$

здесь n – ППр и κ – НКЗ, последний представляет собой отношение коэффициента затухания к постоянной распространения волны в свободном пространстве.

Необходимость такого шага обуславливается тем, что ход зависимости КДП от влажности в области перехода от связанной воды к свободной очень сглажен (рисунки 1.1 и 1.2), и точку перехода, W_t определить достаточно сложно. Однако, если те же самые экспериментальные данные представить в виде зависимостей ППр и НКЗ от объемной влажности, то они могут быть аппроксимированы кусочно-ломанными линиями с четко просматривающейся точкой изгиба, соответствующей значению W_t (рисунок 1.10).

Рефракционная модель смеси, выраженная через ППр и НКЗ почвы от ее объемной влажности W , примет следующий вид:

$$n_s = \begin{cases} n_d + (n_b - 1)W, & W \leq W_t \\ n_d + (n_b - 1)W_t + (n_u - 1)(W - W_t) & W > W_t \end{cases} \quad (1.33)$$

$$\kappa_s = \begin{cases} \kappa_d + \kappa_b W, & W \leq W_t \\ \kappa_d + \kappa_b W_t + \kappa_u(W - W_t) & W > W_t \end{cases} \quad (1.34)$$

Подстрочные индексы s , d , b , и u относятся к влажной почве (смеси), сухой почве, связанной и свободной влаги в почве соответственно, а W_t обозначает предельное содержание связанной влаги (ПССВ) в данном типе почвы.

Таким образом, для каждого конкретного типа почвы строятся графики зависимости ППр и НКЗ выбранного образца почвы от влажности при фиксированной температуре почвы и частоте электромагнитной волны, аналогичные изображенным на рисунке 1.10 (точки). По данным зависимостям проводится регрессионный анализ для n_s и κ_s с использованием уравнений (1.33) и (1.34), соответственно (сплошные линии), из которого находятся значения, n_d , n_b , n_u , κ_d , κ_b , κ_u и W_t . Графически (см. рисунок 1.10) все это выглядит так: точка излома регрессионной линии соответствует значению W_t , угол наклона регрессионной линии до точки W_t относится к значениям n_b и κ_b – соответственно, угол наклона регрессионной линии после точки W_t относится к значениям n_u и κ_u – соответственно, точка пересечения регрессионной линии с осью ординат показывает значения n_d и κ_d – соответственно. Данный подход позволяет путем регрессионного анализа экспериментальных данных определить все параметры рефракционной модели для одной почвы на одной частоте при фиксированной температуре. При этом, все параметры модели имеют понятный физический смысл. Такая модель позволяет оценить точное количество связанной воды содержащийся в конкретном типе почвы и рассчитать влияние как свободной, так и связанной почвенной воды на КДП влажной почвы.

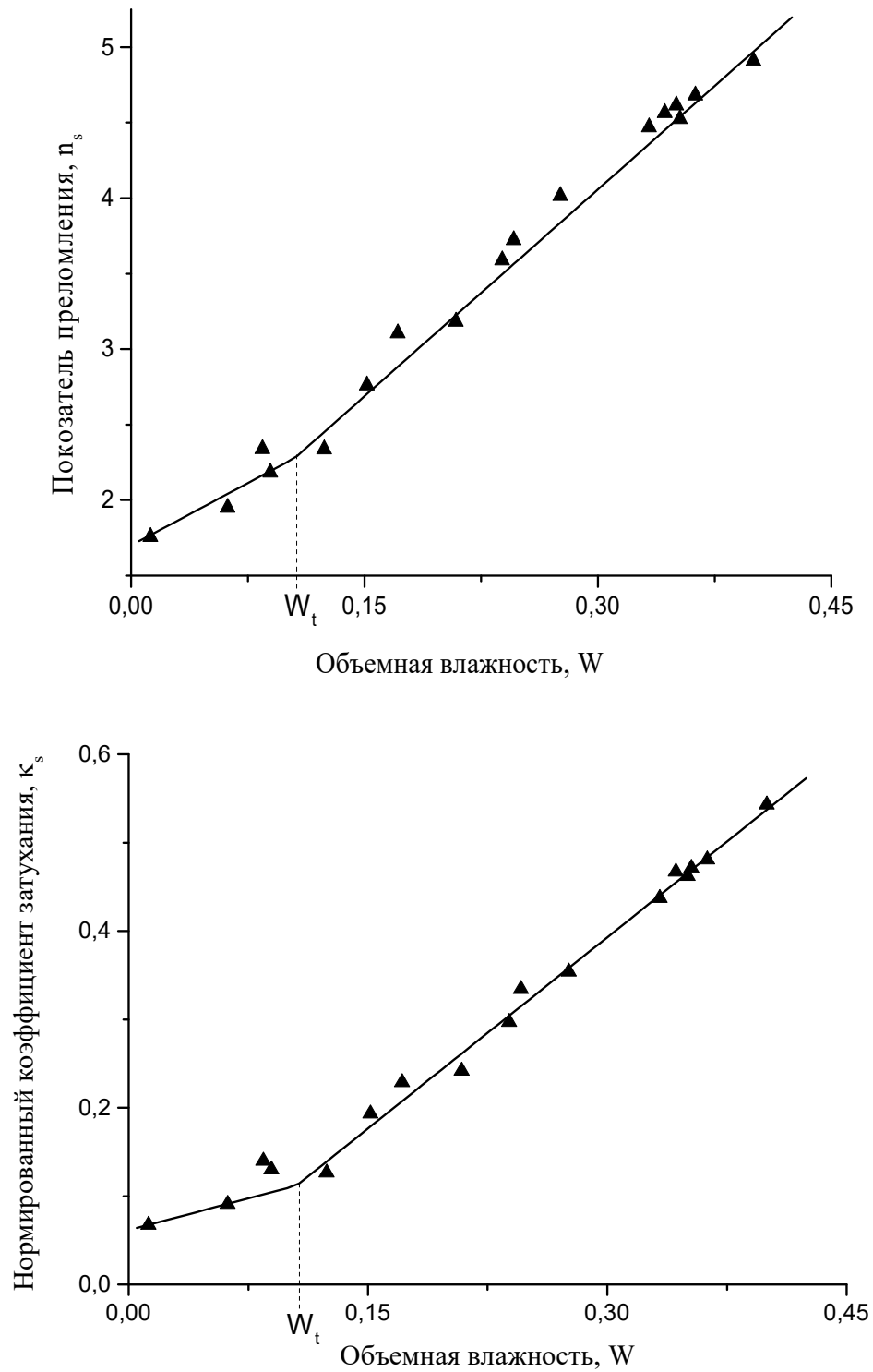


Рисунок 1.10 – Показатель преломления (ППр) и нормированный коэффициент затухания (НКЗ), пересчитанные из КДП почвы, изображенной на рисунке.1.1(б)

Следующим шагом в развитии нового подхода к созданию диэлектрической модели было введение зависимости КДП влажной почвы от частоты. В 2004 г. В.Л. Мироновым с соавторами [75] была опубликована спектроскопическая рефракционная диэлектрическая модель смеси, которая получила название обобщенной рефракционной диэлектрической модели смеси (ОРДМС). В которой КПП сухой почвы и предельное содержание связанной воды не зависят от частоты и находятся, как и было описано выше. А вот КПП почвенной влаги являются частотно зависимыми. Чтобы описать эту зависимость, предложено использовать уравнения Дебая, которые отлично описывают спектры КДП свободной почвенной воды. Переход от ДП и КП к ПП_р и НКЗ выполняется по следующим формулам:

$$n_p = \frac{\sqrt{\sqrt{(\varepsilon'_p)^2 + (\varepsilon''_p)^2} + \varepsilon'_p}}{\sqrt{2}}, \quad k_p = \frac{\sqrt{\sqrt{(\varepsilon'_p)^2 + (\varepsilon''_p)^2} - \varepsilon'_p}}{\sqrt{2}} \quad (1.35)$$

1.35 где p – может принимать значения: d – сухая почва, b , u – связанная и свободная почвенная влага, соответственно.

Так же, в рамках поставленной задачи было сделано предположение, что уравнения Дебая справедливы не только для свободной воды, но и для всей почвенной влаги. Релаксационные формулы Дебая для связанной и свободной почвенной влаги имеют следующий вид:

$$\varepsilon'_p = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{0p} - \varepsilon_\infty}{1 + (2\pi f \tau_p)^2}, \quad \varepsilon''_p = \frac{\varepsilon_{0p} - \varepsilon_\infty}{1 + (2\pi f \tau_p)^2} \cdot 2\pi f \tau_p + \frac{\sigma_p}{2\pi f \varepsilon_r} \quad (1.36)$$

В формулах (1.36) величина f обозначает частоту электромагнитного поля, ε_0 , τ , и σ – статическая диэлектрическая проницаемость, время релаксации и удельная проводимость для связанной ($p = b$) и свободной ($p = u$) почвенной влаги. Величина ε_r обозначает диэлектрическую проницаемость свободного пространства, которая равна $8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, ε_∞ – высокочастотный предел диэлектрической проницаемости, равный 4,9.

Из уравнений Дебая можно вывести соотношения между значениями КДП почвенной воды, найденными на двух частотах: $\varepsilon'_1 = \varepsilon'(f_1)$, $\varepsilon'_2 = \varepsilon'(f_2)$ и $\varepsilon''_1 = \varepsilon''(f_1)$, $\varepsilon''_2 = \varepsilon''(f_2)$, и значениями τ , ε_0 и σ :

$$\sigma_p = 2\pi\varepsilon_r f_1 \cdot \left(\varepsilon''_{p1} - \varepsilon''_{p2} \cdot \frac{f_1}{f_2} \cdot \frac{\varepsilon'_{p1} - \varepsilon_\infty}{\varepsilon'_{p2} - \varepsilon_\infty} \right) / \left(1 - \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 \cdot \frac{\varepsilon'_{p1} - \varepsilon_\infty}{\varepsilon'_{p2} - \varepsilon_\infty} \right) \quad (1.37)$$

$$\tau_p = \frac{1}{2\pi f_1} \cdot \frac{\varepsilon''_{p1} - \sigma_p / (2\pi\varepsilon_r f_1)}{\varepsilon'_{p1} - \varepsilon_\infty} = \frac{1}{2\pi f_2} \cdot \frac{\varepsilon''_{p2} - \sigma_p / (2\pi\varepsilon_r f_2)}{\varepsilon'_{p2} - \varepsilon_\infty} \quad (1.38)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{0p1} &= \varepsilon_\infty + (\varepsilon'_{p1} - \varepsilon_\infty) \left(1 + (2\pi f_1 \tau_p)^2 \right) \\ \varepsilon_{0p2} &= \varepsilon_\infty + (\varepsilon'_{p2} - \varepsilon_\infty) \left(1 + (2\pi f_2 \tau_p)^2 \right) \end{aligned} \quad (1.39)$$

Уравнения (1.38) и (1.39) инвариантны относительно f_1 и f_2 . И теоретически, значения ε_{0p1} и ε_{0p2} должны быть равны, однако, на практике они могут незначительно различаться из-за погрешности оценки значений ε'_1 , ε'_2 и ε''_1 , ε''_2 . Для минимизации ошибки оценки величины ε_{0p} , значения ε_{0p1} и ε_{0p2} усредняются.

Таким образом для ОРДМС необходимо найти 9 входных параметров, это: ε'_d и ε''_d – ДП и КП сухой почвы, W_t – предельное содержание связанной воды в почве, ε_{0b} – статическую диэлектрическую проницаемость, τ_b – время релаксации, σ_b – удельную проводимость связанной почвенной влаги, а так же ε_{0u} – статическую диэлектрическую проницаемость, τ_u – время релаксации, σ_u – удельную проводимость свободной почвенной влаги.

Метод определения этих величин включает следующие операции:

- проведение измерений значений ППР и НКЗ почвы для ряда значений объемной влажности, измеренных у конкретного типа почвы при фиксированной температуре на двух или более частотах;
- определение значений n_d , κ_d ; W_t ; $n_b(f_1)$, $n_b(f_2)$; $n_u(f_1)$, $n_u(f_2)$; $\kappa_b(f_1)$, $\kappa_b(f_2)$; $\kappa_u(f_1)$, $\kappa_u(f_2)$ путем линейного регрессионного анализа, используя соотношения (1.33) и (1.34);
- вычисление величин ДП и КП для связанной $[\varepsilon'_b(f_1)$, $\varepsilon'_b(f_2)$, $\varepsilon''_b(f_1)$, $\varepsilon''_b(f_2)]$ и свободной $[\varepsilon'_u(f_1)$, $\varepsilon'_u(f_2)$, $\varepsilon''_u(f_1)$, $\varepsilon''_u(f_2)]$ почвенной влаги;

- расчет величин релаксационных параметров Дебая σ_b , σ_u , τ_b , τ_u , ε_{0b} , ε_{0u} для связанной (σ_b , τ_b , ε_{0b}) и свободной (σ_u , τ_u , ε_{0u}) почвенной влаги используя формулы (1.37–1.39)

Точность модели проверялась на ряде почв как измеренных самими авторами [76; 77], так и взятых из литературных источников [10]. Используемые экспериментальные данные находились в частотном диапазоне от 600 МГц до 18 ГГц. Влажность почвенных образцов лежала в пределах от абсолютно сухой почвы до почвы с предельным влагонасыщением. Точность значений КДП почвы, рассчитанной с помощью ОРДМС, имеет тот же порядок, что и измеренные значения КДП почвы.

Недостатком модели является то, что точность восстановленных модельных параметров ε_0 , τ , σ для связанной и свободной почвенной влаги сильно зависит от выбранных частот f_1 и f_2 . Для повышения точности можно не ограничиваться лишь одной парой частот, однако, чем больше пар частот вовлечены в обработку, тем сложнее становятся вычисления. Такая модель имеет ограниченное применение (изучение диэлектрических свойств данной почвы) и носит скорее методологический характер.

1.5 Выводы к главе 1

В данной главе сделан обзор литературы по вопросам дистанционного исследования верхнего слоя талых почв земной поверхности при положительных температурах. Из которого видно, что:

- КДП почвы тесно связана с такими ее физическими характеристиками как плотность сухого сложения, влажность, температура, гранулометрический состав почвы. В связи с чем, создание диэлектрической модели влажной почвы, наиболее точно описывающей КДП почвы от геофизических параметров, является актуальной задачей для интерпретации данных дистанционного зондирования.
- Основным параметром, влияющим на КДП почвы, является ее влажность. Причем почвенная влага неоднородна по своей структуре и разделяется на две

наиболее существенных категории (связанная и свободная), которые вносят разный вклад в общее значение КДП почвы.

- В связи с меньшим, по сравнению с влажностью, влиянием температуры почвы на ее КДП, данная зависимость не учитывалась в ранее созданных моделях.
- Используемые на сегодняшний момент диэлектрические модели талых почв имеют ряд недостатков. Модель Ванга-Шмагге рассматривает в основном влажностную зависимость, частотная зависимость напрямую не входит в уравнения модели. Но, так как для определения параметров модели использовались данные измерений, проведенные на частотах 1,4 ГГц и 5 ГГц, то и область применимости этой модели лежит в этом диапазоне частот.
- Модель Добсона, в отличие от модели Ванга-Шмагге, является спектроскопической. Эта модель стала наиболее широко используемой благодаря тому фактору, что ее входные параметры могут быть легко определены из известного гранулометрического состава почвы (содержания песка и глины). Недостатком, ПДМС является тот факт, что в ней связанная вода не рассматривается как отдельный компонент системы почва-вода, а спектроскопические свойства почвенной влаги не рассматриваются как нечто отличное от свойств жидкой воды.

Глава 2. МЕТОДЫ ПОИСКА СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОРДМС

2.1 Метод определения параметров ОРДМС по спектрам КДП талых почв

Как видно из предыдущей главы наиболее перспективной, по мнению автора, для дальнейшего развития, из широко известных на сегодняшний день МДМ, является предложенная В.Л. Мироновым и др. ОРДМС [75]. В данной главе приводятся улучшенные методы поиска параметров модели. Предлагаемая в ОРДМС методика [75;78] использовалась для подбора данных КДП измеренных в области объемных влажностей, что предполагает проведение довольно большого количества лабораторных измерений при разных влажностях. Здесь предлагается другая процедура поиска параметров с использованием формул ОРДМС, где измеренные значения КДП представляются в зависимости от частоты электромагнитного поля [52]. Этот метод специально разработан для обработки данных КДП, полученных с помощью векторных сетевых анализаторов, которые позволяют получать большой объем данных КДП влажной почвы, как функции от частоты, при этом количество измеряемых влажностей можно значительно сократить.

2.1.1 Метод определения параметров ОРДМС по усредненным влажностным спектрам КДП почв

Для демонстрации предложенной методики были взяты измеренные диэлектрические данные для глинистой почвы [79], содержащей 12 % песка, 44,9 % ила и 44,1 % глины. Применяемый метод измерения экспериментальных значений КДП аналогичен используемому в [10]. Измеренные зависимости КДП от влаги представлены на рисунках 2.1 и 2.2 для показателя преломления, n , и нормированного коэффициента затухания, k , которые связаны с комплексной диэлектрической проницаемостью ϵ согласно формулам (1.32). Данные были отсортированы по двум группам: первая группа (рисунки 2.1a и 2.2a) состояла из данных, относящихся к

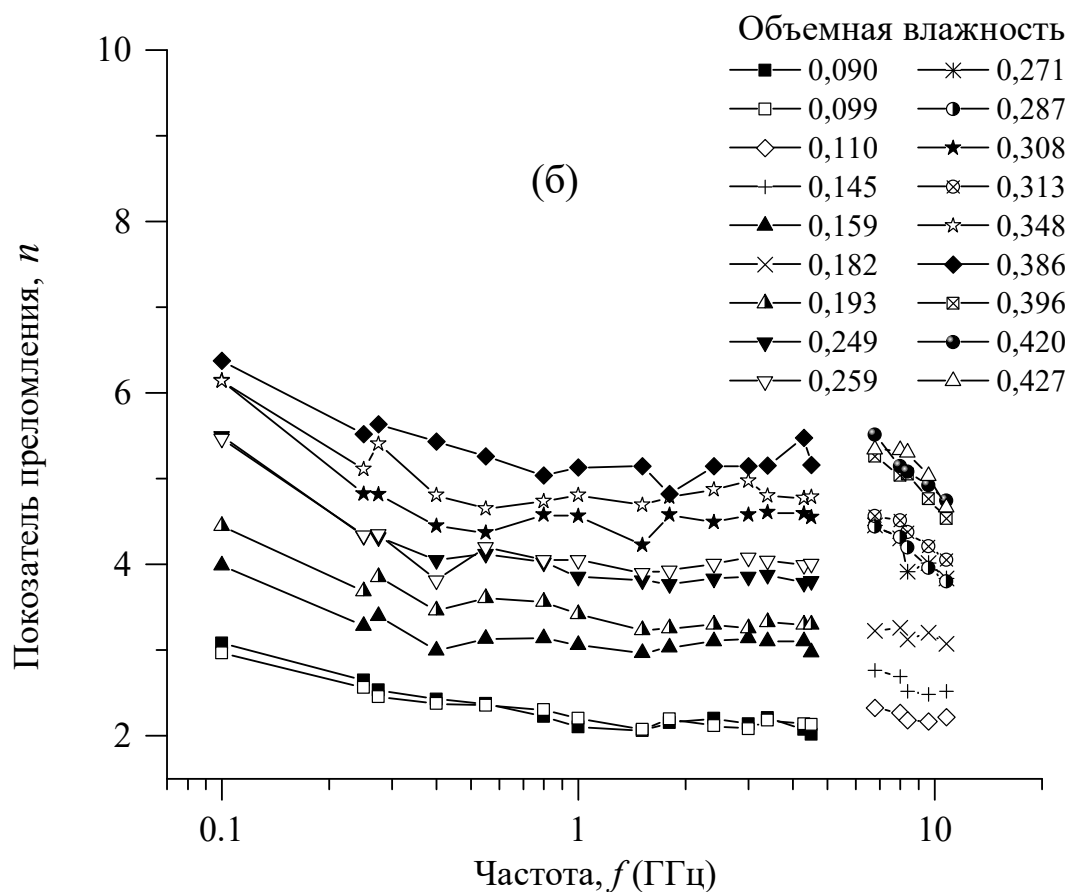
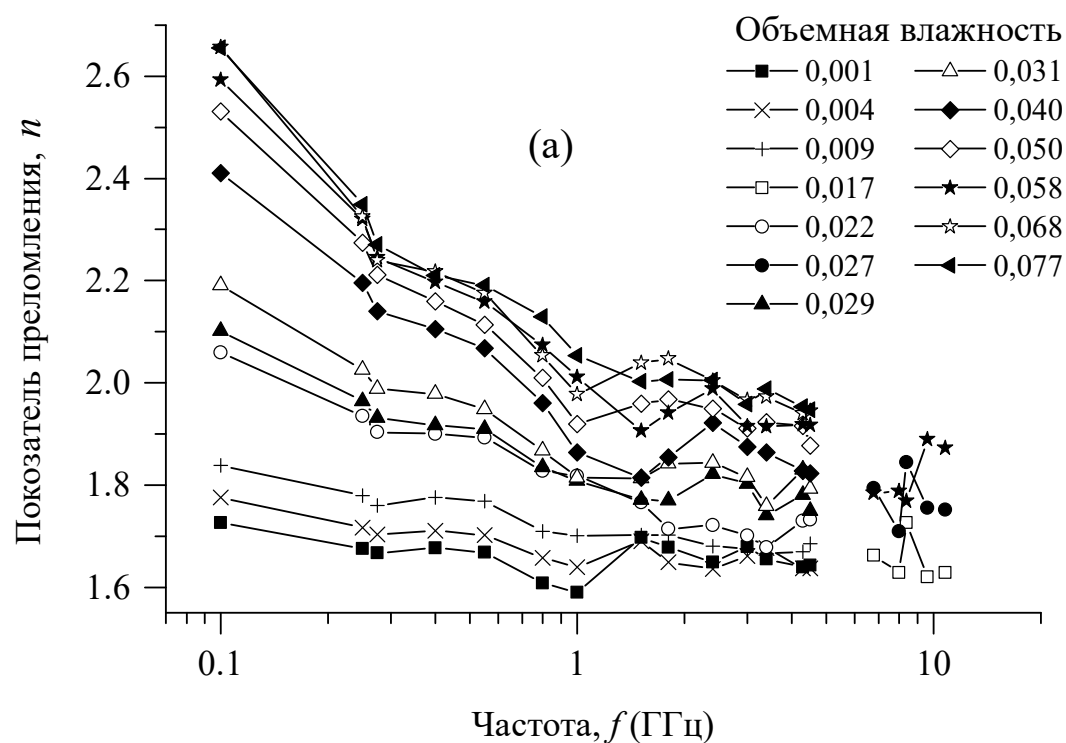


Рисунок 2.1 – Показатель преломления глинистой почвы в зависимости от частоты на фиксированных влажностях, указанных в легендах.

а) диапазон связанной почвенной влаги

б) диапазон связанной и свободной почвенной влаги

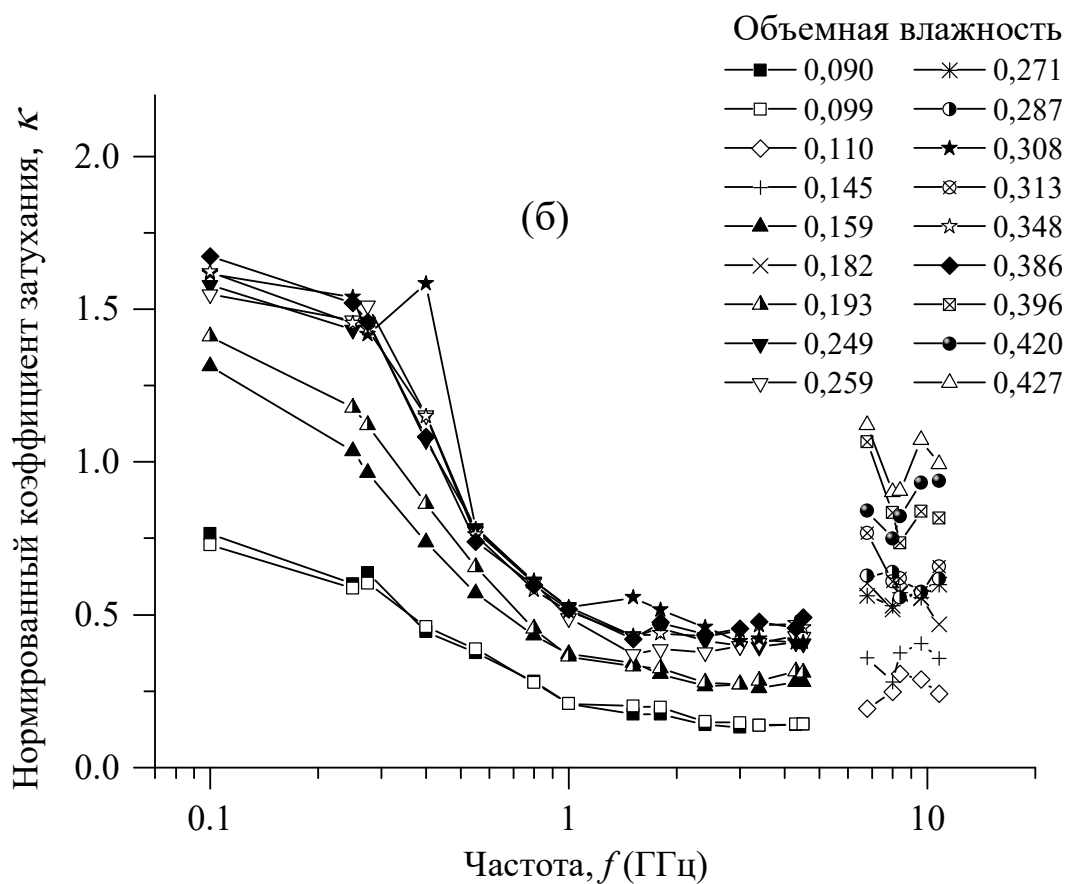
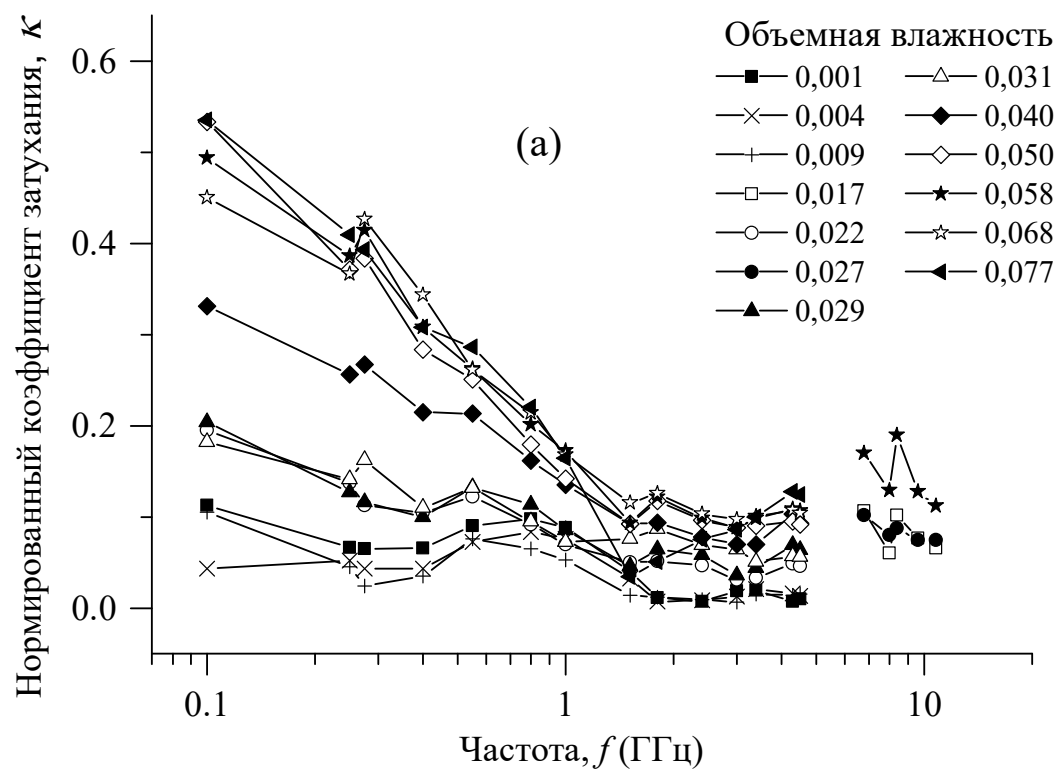


Рисунок 2.2 – Нормированный коэффициент затухания глинистой почвы в зависимости от частоты на фиксированных влажностях, указанных в легендах.

а) диапазон связанной почвенной влаги

б) диапазон связанной и свободной почвенной влаги

случаям, когда в почве содержалась только связанная вода, а во второй группе (рисунки 2.1 б и 2.2 б) присутствовали обе категории почвенной влаги: связанная и свободная. Граничная объемная влажность, разделяющая эти две группы, предварительно оценивалась исходя из гранулометрического состава исследуемой почвы. Для рассматриваемого типа почвы W_t была принята равной 0,08 [79]. Разброс данных, показанных на рисунках 2.1 и 2.2 следует отнести, наряду с другими причинами, к разным плотностям сухой почвы, которые возникают из-за различной плотности утрамбовки образца в измерительной ячейке, вызванной разной влажностью. В результате, после сушки почвенного образца наблюдались изменения плотности сухой почвы в зависимости от влажности. Чтобы дать представление о величине изменения плотности высушенных образцов почвы, последние приведены на рисунке 2.3 в зависимости от объемных влажностей этих почв до сушки.

Как видно из рисунков 2.1 и 2.2, как ППр, так и НКЗ имеют заметные отклонения от регулярных зависимостей. Чтобы получить данные с меньшим разбросом, первичные данные были усреднены по объемной влажности и плотности. Результаты такого усреднения ППр и НКЗ почвы показаны на рисунке 2.4.

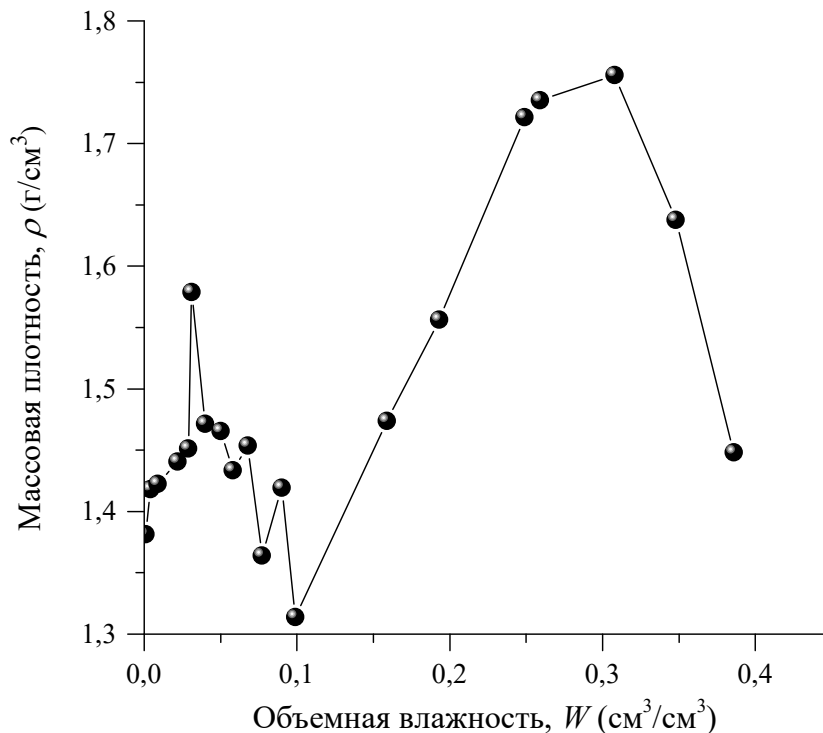


Рисунок 2.3 – Плотность сухого сложения почвы как функция от объемной влажности

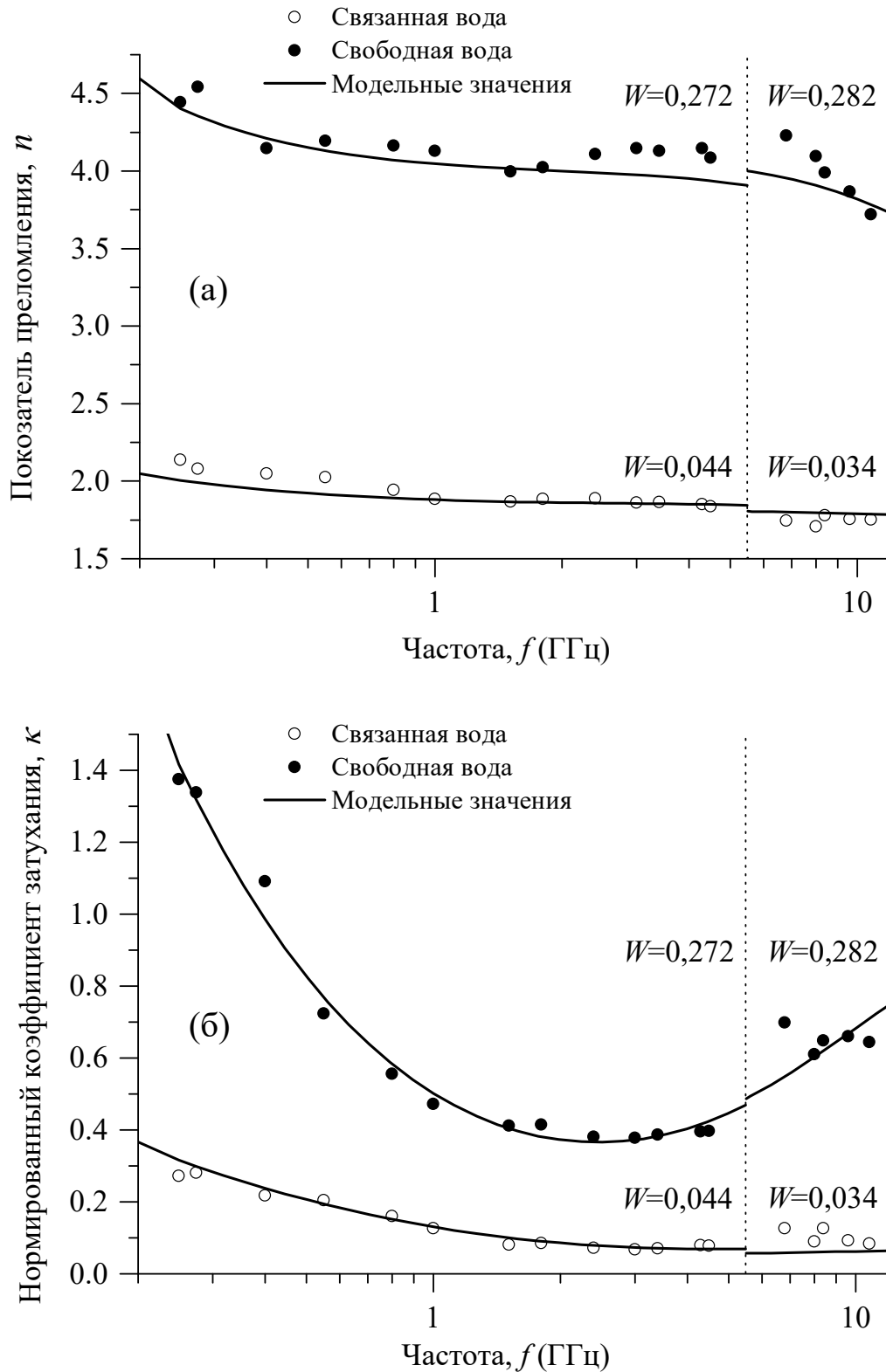


Рисунок 2.4 – Измеренные значения ППр (а) и НКЗ (б). Точками представлены усредненные диэлектрические данные, приведенные на рисунках 2.1 и 2.2. Сплошной линией показаны результаты предсказаний, полученные с использованием параметров ОРДМС, которые рассчитывались по формулам (2.1) и (2.2) и данным из таблицы 2.1.

Таким образом, усредненные измеренные данные могут быть привязаны к усредненным уравнениям (1.33) и (1.34), которые имеют следующий вид:

$$\bar{n}_s(\bar{W}, f) = \begin{cases} 1 + \frac{n_m - 1}{\rho_m} \bar{\rho}_d(\bar{W}) + (n_b(f) - 1)\bar{W}, & \bar{W} \leq W_t \\ \bar{n}_s(W_t, f) + (n_u(f) - 1)(\bar{W} - W_t) & \bar{W} > W_t \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\bar{\kappa}_s(\bar{W}, f) = \begin{cases} \frac{\kappa_m}{\rho_m} \bar{\rho}_d(\bar{W}) + \kappa_b(f)\bar{W}, & \bar{W} \leq W_t \\ \bar{\kappa}_s(W_t, f) + \kappa_u(f)(\bar{W} - W_t) & \bar{W} > W_t \end{cases} \quad (2.2)$$

Здесь переменные, подчеркнутые сверху, обозначают средние значения, соответствующих величин. Вместе с усредненными данными (рисунок 2.4, точки) сплошными линиями представлены результаты предсказаний, рассчитанные с помощью уравнений (2.1), (2.2) параметры которых были получены путем регрессионного анализа усредненных данных. Процедура анализа состояла из нескольких этапов, которые изложены ниже.

Сначала, используя формулы (2.1) и (2.2) для данных ППр и НКЗ на рисунках 2.1 а и 2.2 а, измеренных с наименьшей объемной влажностью, $W = 0,001$, были найдены значения органо-минеральной компоненты $(n_m - 1)/\rho_m$ и κ_m/ρ_m , и записаны в таблицу 2.1. В этих расчетах значение объемной влаги принималось равным нулю. Далее по усредненным спектрам ППр, $\bar{n}_s(\bar{W}, f)$, и НКЗ, $\bar{\kappa}_s(\bar{W}, f)$, лежащим в области связанной воды, со средней влажностью $\bar{W} = 0,044$, в частотном диапазоне от 0,15 до 4,5 ГГц (рисунок 2.4, выколотые точки) был проведен регрессионный анализ. В качестве регрессионных уравнений использовались формулы (2.1) и (2.2) при $\bar{W} \leq W_t$. Значения констант, $(n_m - 1)/\rho_m$ и κ_m/ρ_m , брались из таблицы 2.1. Параметры n_b и κ_b , выражались через уравнения (1.35) и (1.36). В результате были получены параметры диэлектрической релаксации (ϵ_{0b} , τ_b , σ_b) для связанной воды в почве, которые занесены в таблицу 2.1. На заключительном этапе с помощью функций $\bar{n}_s(\bar{W}, f)$ и $\bar{\kappa}_s(\bar{W}, f)$, записанных в формулах (2.1) и (2.2), в сочетании с уравнениями (1.35) – (1.36), был проведен регрессионный анализ по усредненным ППр, $\bar{n}_s(\bar{W}, f)$ и НКЗ, $\bar{\kappa}_s(\bar{W}, f)$, как показано на рисунке 2.4 (заполненные точки), при объемной влажности $W = 0,272$, в частотном диапазоне от 0,15 до 4,5 ГГц. Исходные данные для сухой почвы и связанной воды брались из

таблицы 2.1. В результате получены значения предельного содержания связанной воды (ПССВ), W_t , и параметры диэлектрической релаксации (ε_{0u} , τ_u , σ_u) для свободной воды в почве, которые представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Входные параметры ОРДМС

Входные параметры почвы	Значения	
$(n_m - 1)/\rho_m$	0,470	
κ_m/ρ_m	0,008	
W_t (см ³ /см ³)	0,064	
Входные параметры почвенной влаги	Тип почвенной влаги	
	связанная	свободная
ε_0	27,00	117,90
τ (пс)	11,80	9,28
σ (С/м)	1,65	1,50

В итоге все входные параметры ОРДМС стали доступны для прогнозирования диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь влажной почвы. Прогнозы для ППр и НКЗ почвы, относящиеся к усредненным измеренным данным, были рассчитаны с использованием (1.33) – (1.36). Результаты расчетов, проведенных для объемных влажностей, лежащих в диапазонах связанной воды $W = 0,044$ и свободной воды $W = 0,272$, показаны на рисунке 2.4 (сплошные линии). Несмотря на то, что измеренные данные для ППр и НКЗ почвы, показанные на рисунке 2.4 на частотах 6,8; 8,0; 8,4; 9,6 и 10,8 ГГц, и влажностях 0,034 и 0,282 не были использованы в процессе подгонки, они оказались в хорошем согласии с предсказаниями во всем диапазоне частот, как видно из данного рисунка. Этот факт доказывает, что данная процедура определения параметров в частотной области, является достаточно эффективной для получения спектроскопических параметров ОРДМС. По найденным параметрам ОРДМС были восстановлены спектры ДП и КП для выбранных влажностей, охватывающих как область связанной воды, так и область свободной воды. На полученные спектры нанесены экспериментальные данные для соответствующих влажностей (см. рисунки 2.5 и 2.6). Как видно из этих

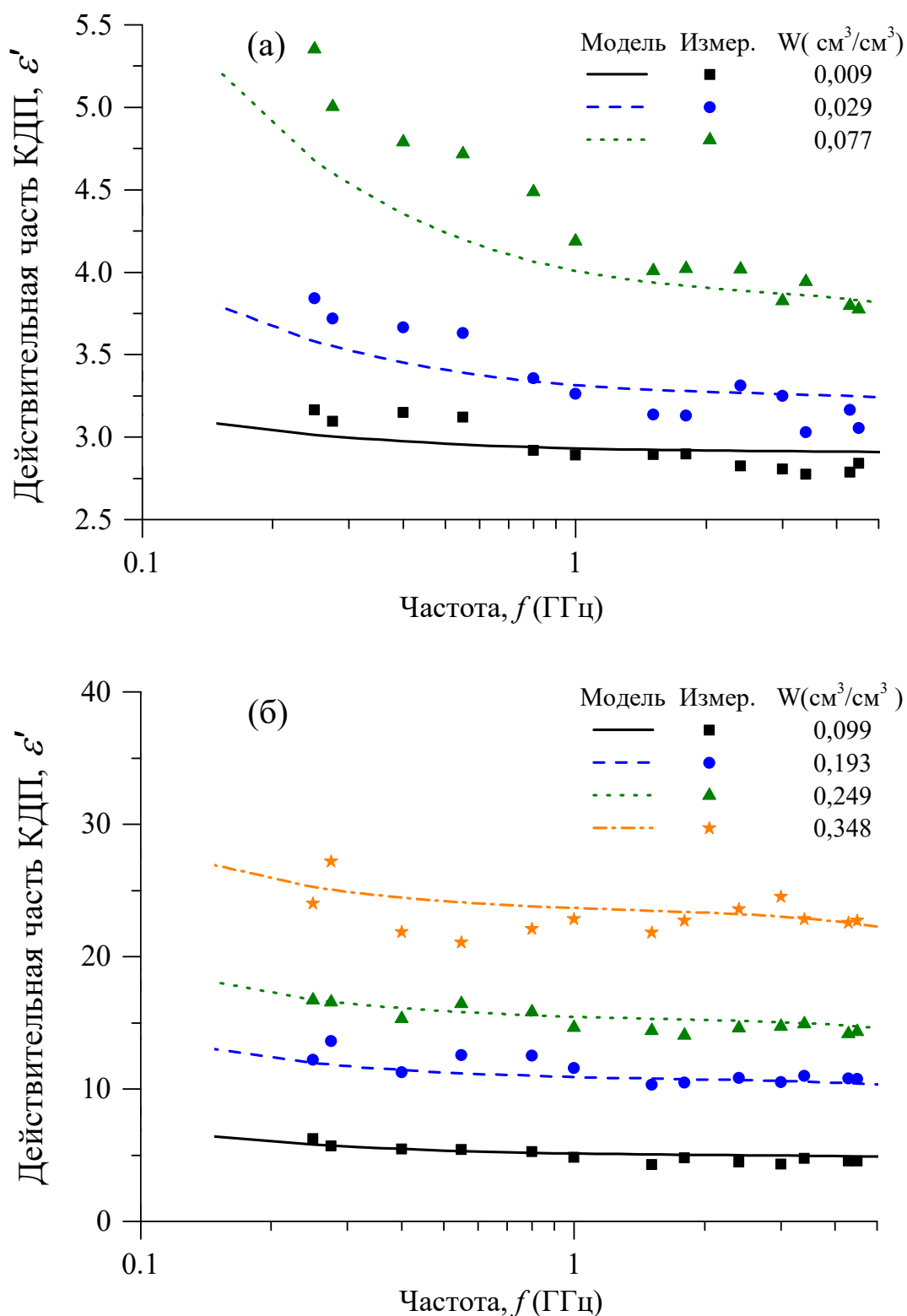


Рисунок 2.5 – Измеренные (точки) и рассчитанные (линии) действительной части КДП в зависимости от частоты для фиксированных значений W . Значения W показаны в легендах. а) и б) относятся к диапазонам связанной и свободной почвенной воды, соответственно

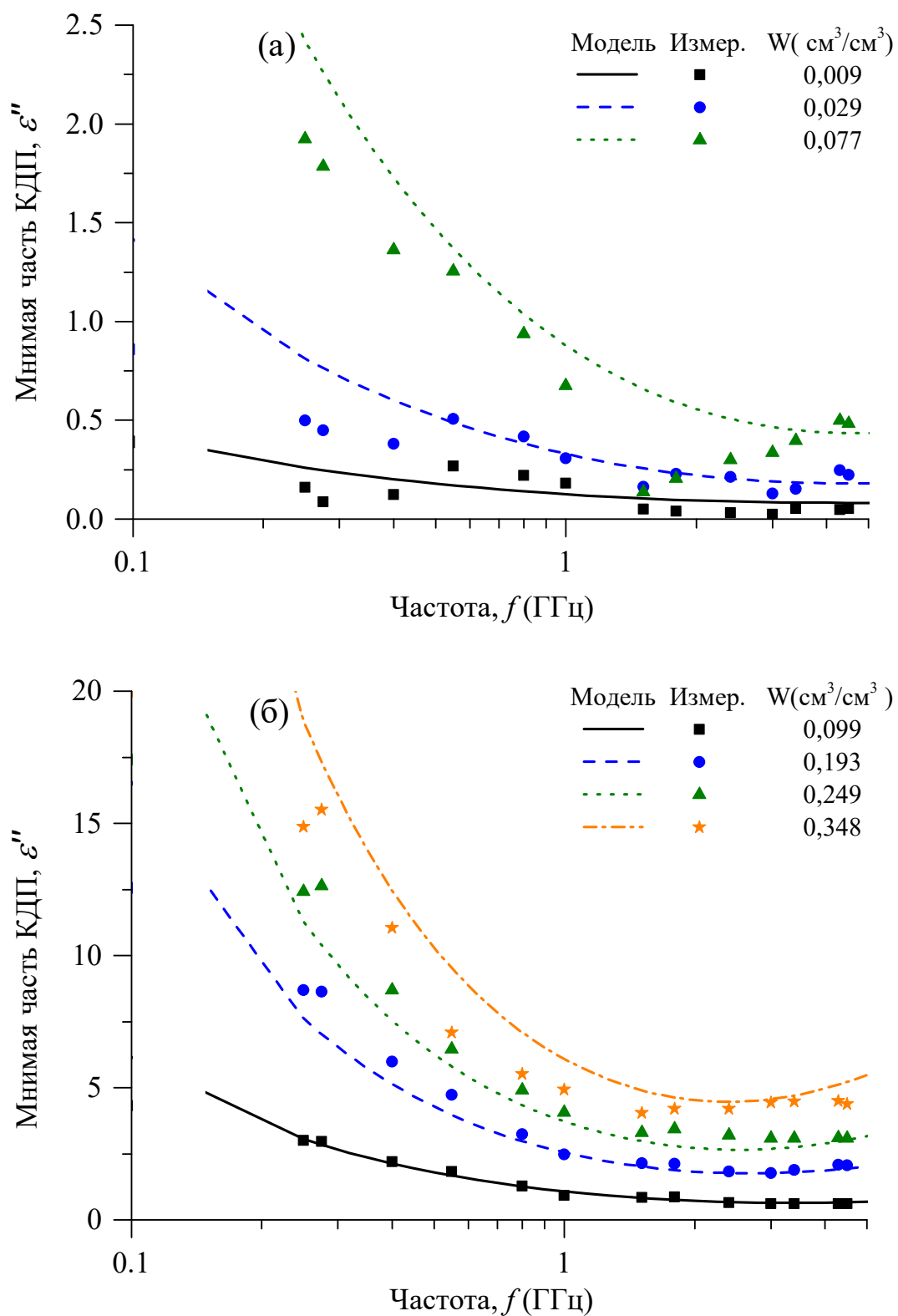


Рисунок 2.6 – Измеренные (точки) и рассчитанные (линии) мнимой части КДП в зависимости от частоты для фиксированных значений W . Значения W показаны в легендах. а) и б) относятся к диапазонам связанной и свободной почвенной влаги, соответственно

рисунков, была достигнута хорошая корреляция между предсказанными и измеренными значениями, при этом отклонение измеренных данных от предсказанных такое же, как и дисперсия измеренных данных.

2.1.2 Метод определения параметров ОРДМС по индивидуальным влажностным спектрам КДП почв

В другом методе определения параметров ОРДМС в частотной области [80] использовался набор из 15 почв, наименования и физические характеристики которых показаны в таблице 2.2. Почвы от А до L соответствуют набору почв измеренных в [53], и от F1* до F5* соответствуют ансамблю почв, названных полями (Field) 1, 2, 3 и 5 в [8] и [10]. В таблицу 2.2 были включены только те почвы из [8; 10] и [53], которые имеют достаточные диэлектрические данные для проведения анализа. Измерения проводились в диапазоне температур от 20 до 22 °С и диапазоне частот от 1,4 до 18 ГГц в [8] и [10], и от 45 МГц до 26,5 ГГц в [53].

Для каждой из почв, приведенных в таблице 2.2, доступно от 4 до 9 спектров КДП, влажность которых варьируется от практически сухой почвы, до полного полевого влагонасыщения. В данном случае процедура подгонки параметров по формулам (1.33) – (1.36) применялась одновременно ко всем спектрам ДП и КП, соответствующим всему набору влажностей, доступных для каждого конкретного типа почв, представленных в таблице 2.2. Для регрессионного анализа со множеством данных использовался программный продукт OriginPro. На первом этапе регрессионного анализа использовались спектры с малыми значениями влажности, причем почвенная вода заведомо состояла только из связанной воды, что соответствует диапазону влаги $W < W_t$. На втором этапе регрессионного анализа диэлектрические данные, используемые на первом этапе, дополнялись данными, оставшихся влажностей почвы, чтобы в конечном итоге получить значение ПССВ, W_t , и проводимости свободной воды, σ_u . Как показано в [81], низкочастотный предел ДП и время релаксации свободной воды незначительно меняются с изменением минерального состава почвы. Поэтому на втором этапе регрессионного анализа эти

значения были взяты равными статистическим средним, $\varepsilon_{0u} = 100$ и $\tau_u = 8,5$ пс, определенным на основе данных, доступных в [81]. В результате для каждой из почв, приведенных в таблице 2.2, были найдены все входные параметры ОРДМС, необходимые для прогнозирования диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь влажной почвы. В качестве примера процедуры регрессионного анализа на рисунке 2.7 показаны графики экспериментальных данных и восстановленные по ним спектры для почвы D, выполненные в работе [80].

Таблица 2.2 – Физические и минералогические характеристики почв

№	Образец почвы	Описание (унифицированная система классификации почв)	Песок %	Ил %	Глина %	удельный вес	удельная по- верхность, м ² /г
1	A	Глина (CH), Светло-серая	2	22	76	2,34	25,97
2	B	Песок (SP), Светло-серый	98	2	0	2,62	0,66
3	C	Илистый песок (SM), коричневый	88	8	4	2,64	3,64
4	D	Илистый песок (SM), красноватый коричневый	77	9	14	2,66	15,01
5	E	Глинистый ил (ML), коричневый	TR	93	7	2,59	13,89
6	G	Глинистый песок (SC), Темно-коричневый	55	32	13	2,66	33,18
7	H	Глина (CH), серая	2	64	34	2,74	40,49
8	I	Песок (SP), белый	100	0	0	2,67	0,03
9	J	Ил (ML), белый	0	46	54	2,61	9,29
10	K	Глинистый ил (ML), коричневый; незначительное количество песка	4	89	7	2,71	12,5
11	L	Песок (SP), коричневый	99	1	0	2,66	0,31
12	F1*	Песчаный суглинок	51,5	35	13,4	2,66	52
13	F2*	Суглинок	42	49,5	8,53	2,70	49
14	F3*	Иловый суглинок	30,6	55,9	13,5	2,59	66
15	F5*	Иловая глина	5,02	47,6	47,4	2,56	252

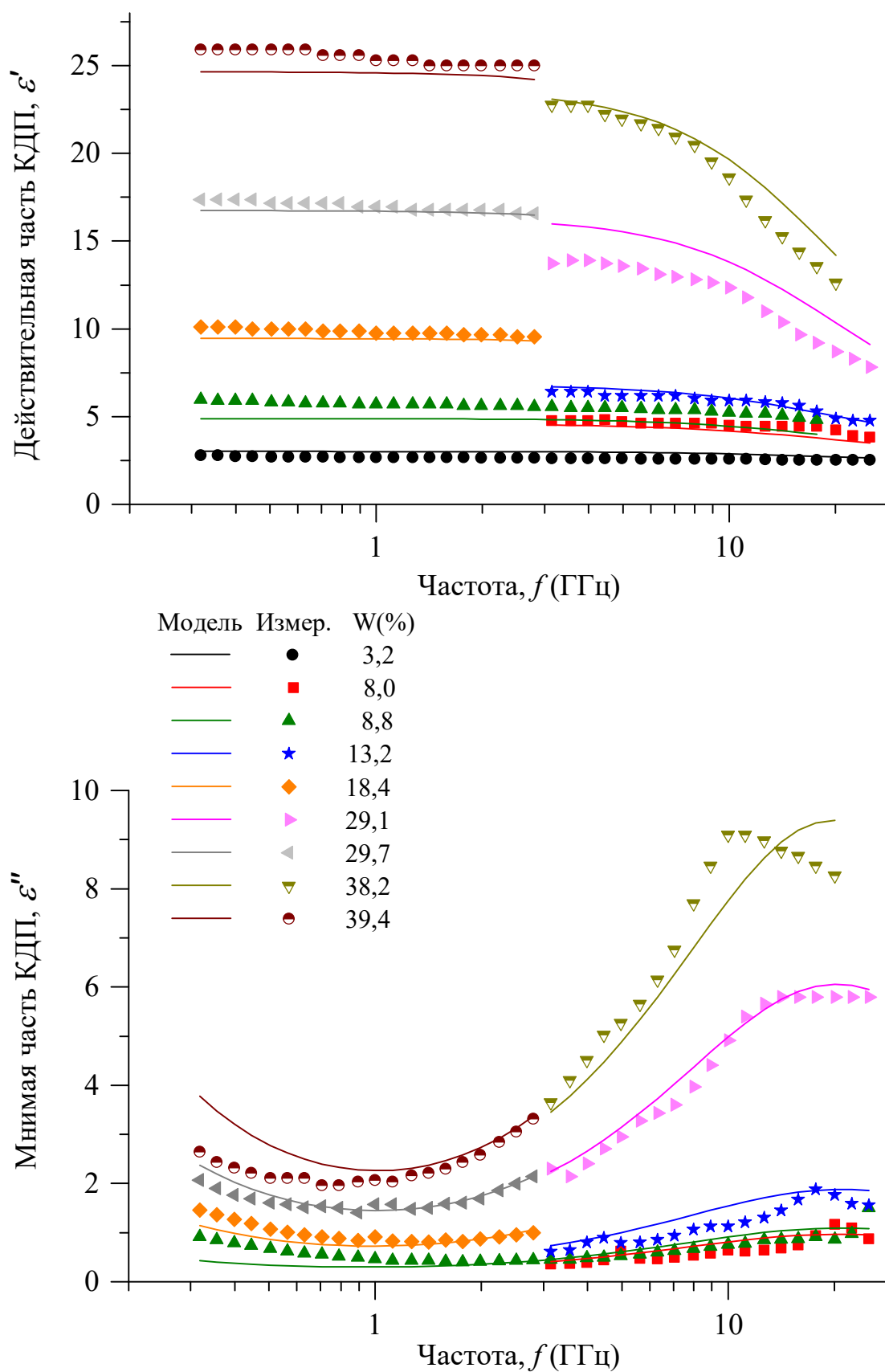


Рисунок 2.7 – Спектры ε' и ε'' для почвы D. Точки – экспериментальные данные, линии – восстановленные с помощью ОРДМС значения. Значения объемной влажности, $W(\%)$ указаны в легенде к рисункам

2.2 Ошибки значений КДП талых почв, предсказанных диэлектрическими моделями ПДМС и ОРДМС, по отношению к зависимым и независимым данным измерений

В начале определимся какие данные измерений КДП мы называем зависимыми, а какие – независимыми. *Зависимыми данными* мы считаем те данные измерений, которые использовались для построения модели. *Независимые данные* – данные измерений, которые не использовались для построения модели. Оценка точности моделей будет проводиться 1) на зависимых данных и 2) на независимых данных. Для оценки точности моделей будут строиться зависимости измеренных значений ДП и КП (ε'_m и ε''_m) талых почв от предсказанных с помощью МДМ значений ДП и КП (ε'_p и ε''_p). Подобная зависимость отображена точками на рисунке 2.8, и далее на однотипных рисунках. Оценить точность МДМ по этим рисункам можно визуально, в идеальном случае все точки должны находиться на прямой линии – биссектрисе угла ($y = x$), которая на рисунке показана пунктирной линией. Чем больше разброс точек и уход их от биссектрисы, тем хуже модель. Для количественной оценки эти зависимости подвергаются линейной регрессии. Найденные, в результате, значения коэффициента детерминации, R^2 , среднеквадратического отклонения, СКО, и параметры регрессионного уравнения, и будут служить критериями оценки точности МДМ.

Коэффициент детерминации вычислялся по следующей формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - x_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.3)$$

где x_i , y_i , \bar{y} – рассчитанные с помощью модели значения КДП почвы, измеренные значения КДП и среднее измеренное значение КДП, соответственно. Коэффициент детерминации модели показывает, насколько велика связь между измеренной и рассчитанной величиной. Идеальная модель имеет коэффициент детерминации 1.

Выражение для расчёта СКО имеет следующий вид:

$$\text{СКО} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 / n} \quad (2.4)$$

где n – объём выборки (количество измеренных значений КДП почвы). Для простоты сравнения будут использоваться нормированные значения СКО:

$$\text{нСКО} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 / n}}{\bar{y}} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

Так как для оценки точности МДМ используется линейная регрессия, то уравнение регрессии будет описываться уравнением прямой:

$$y = A + Bx \quad (2.6)$$

здесь y – измеренные значения КДП почвы, x – рассчитанные с помощью модели значения КДП, A и B – рассчитываемые параметры. В идеальном случае линия регрессии (на рисунке 2.8, и далее на однотипных рисунках, показана в виде сплошной прямой линии) должна совпадать с биссектрисой угла. Таким образом для идеального случая параметр $A \rightarrow 0$, а параметр $B \rightarrow 1$. Для удобства сравнения точности разных МДМ, параметры A , B , R^2 , СКО и нСКО будут сводиться в таблицы.

В качестве точки отсчета была оценена точность наиболее распространенной до сегодняшнего дня ПДМС, предложенной Добсоном и др. Прежде всего, была оценена ошибка предсказаний ПДМС относительно почв, диэлектрические данные которых использовались для разработки модели. На рисунке 2.8 измеренные значения ДП и КП для почв из [8] и [10], т. е. почв F1*, F2*, F3* и F5*, согласно таблице 2.2, показаны как функции от их восстановленных с помощью ПДМС значений. Результаты, показанные на рисунке 2.8, относятся к частотному диапазону от 1,4 до 18 ГГц. Эти данные были подвергнуты регрессионному анализу, в ходе которого было обнаружено, что для данного набора почв ПДМС обеспечивает диэлектрическое предсказание, с коэффициентами детерминации 0,97 и 0,92 для ДП и КП, соответственно, нСКО составили 9 % и 25 % для ДП и КП, соответственно, параметры уравнений регрессии A близки к 0 (–0,934 и 0,255 для ДП и КП, соответственно), а параметры B близки к 1 (1,08 и 1,065 для ДП и КП, соответственно). Найденные значения сведены в таблицу 2.3, в поле, обозначенное как ПДМС_{F1-F5}.

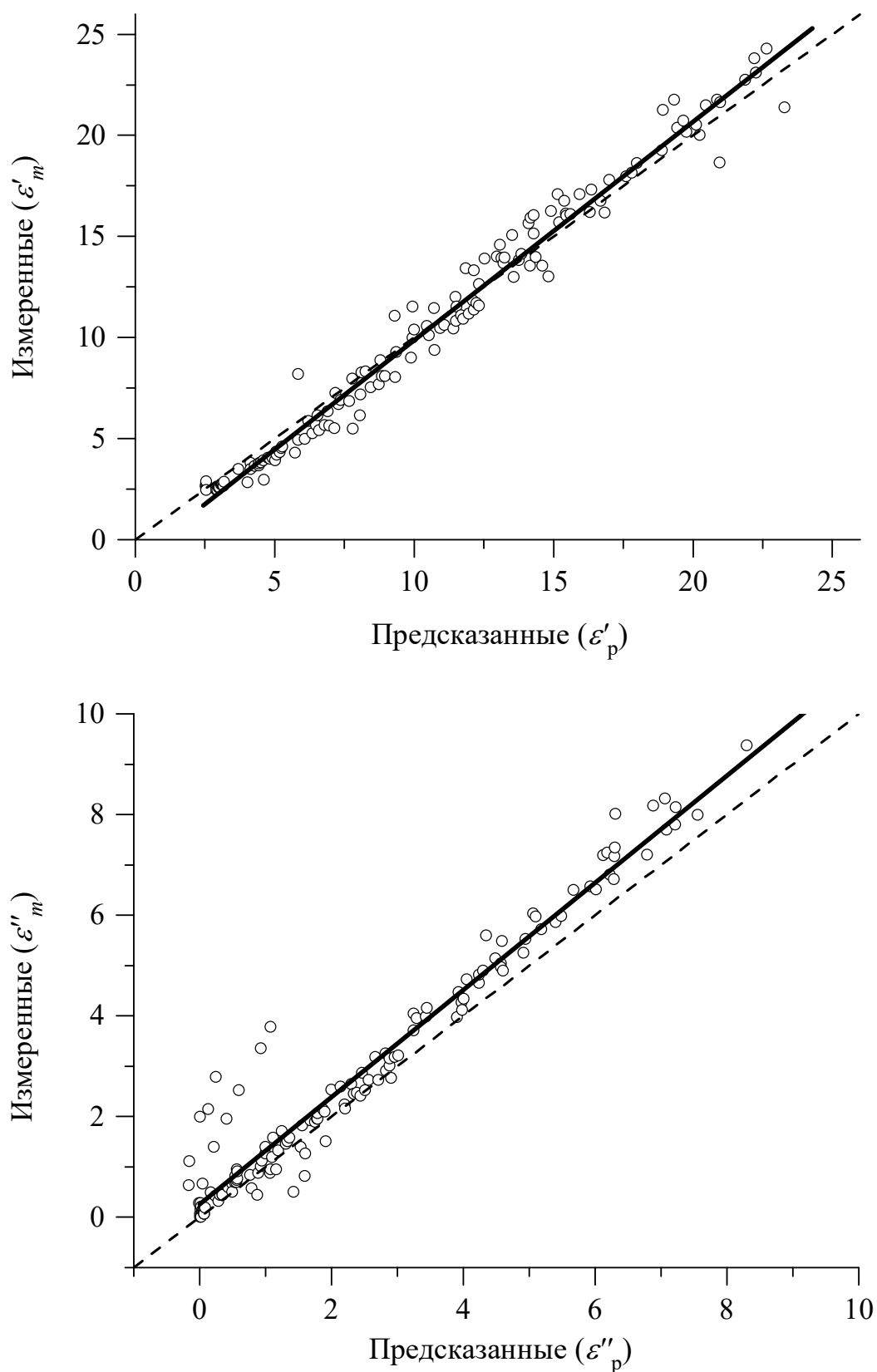


Рисунок 2.8 – Корреляция предсказанных с помощью ПДМС значений ДП, ε'_p и КП, ε''_p , с измеренными, ε'_m и ε''_m , для почв, которые использовались для построения модели [8] и [10]. Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии соответственно

В дальнейшем эти значения, характеризующие ошибку предсказаний ПДМС, будут приняты в качестве контрольных величин для сравнения с результатами анализа других диэлектрических моделей. На рисунке 2.8 предсказания ПДМС были проверены относительно почв, диэлектрические данные которых были использованы для ее разработки. В качестве следующего шага проверим эту модель с диэлектрическими данными из [53], которые можно рассматривать как независимые по отношению к версии ПДМС, применяемой для расчетов.

Результаты такого теста для набора данных, относящихся к почвам, измеренным в [53], показаны на рисунке 2.9. Данные, представленные на рисунке 2.9 соответствуют температуре 20 °С. Согласно [8; 21; 82] расчеты ДП и КП проводились в двух частотных диапазонах, а именно от 300 МГц до 1,3 ГГц и от 1,4 до 18 ГГц, используя (1.24) – (1.31). Как видно из рисунка 2.9, измеренные и предсказанные значения демонстрируют меньшие коэффициенты детерминации ($R^2 = 0,833$ для ДП и $R^2 = 0,643$ для КП) по сравнению с данными [8] и [10], которые показаны на рисунке 2.8, значения нСКО так же ухудшились (нСКО = 36 % для ДП и нСКО = 68 % для КП). Стали хуже и параметры уравнений регрессии $A = -0,753$ для ДП, $A = 1,483$ для КП и $B = 0,902$ для ДП, $B = 0,881$ для КП. Найденные значения сведены в таблицу 2.3, в поле, обозначенное как ПДМС_{F1-F5/A-L}. Здесь следует отметить, что, как видно из рисунка 2.9 (б), используемая линейная регрессия не является лучшим видом регрессии для данного случая, поскольку измеренные данные отчетливо демонстрируют нелинейную статистическую зависимость от предсказанных. Причина использования линейных зависимостей заключается в том, что основная цель нашего регрессионного анализа состоит в том, чтобы получить не наилучшую погрешность, а ошибку линейной регрессии, которая дает ошибку диэлектрических предсказаний относительно строгих зависимостей $\varepsilon'_m = \varepsilon'_p$ и $\varepsilon''_m = \varepsilon''_p$. Кроме того, в диапазоне частот от 1,4 до 5,0 ГГц предсказанные КП оказались отрицательными, что не соответствует физическому смыслу этого параметра.

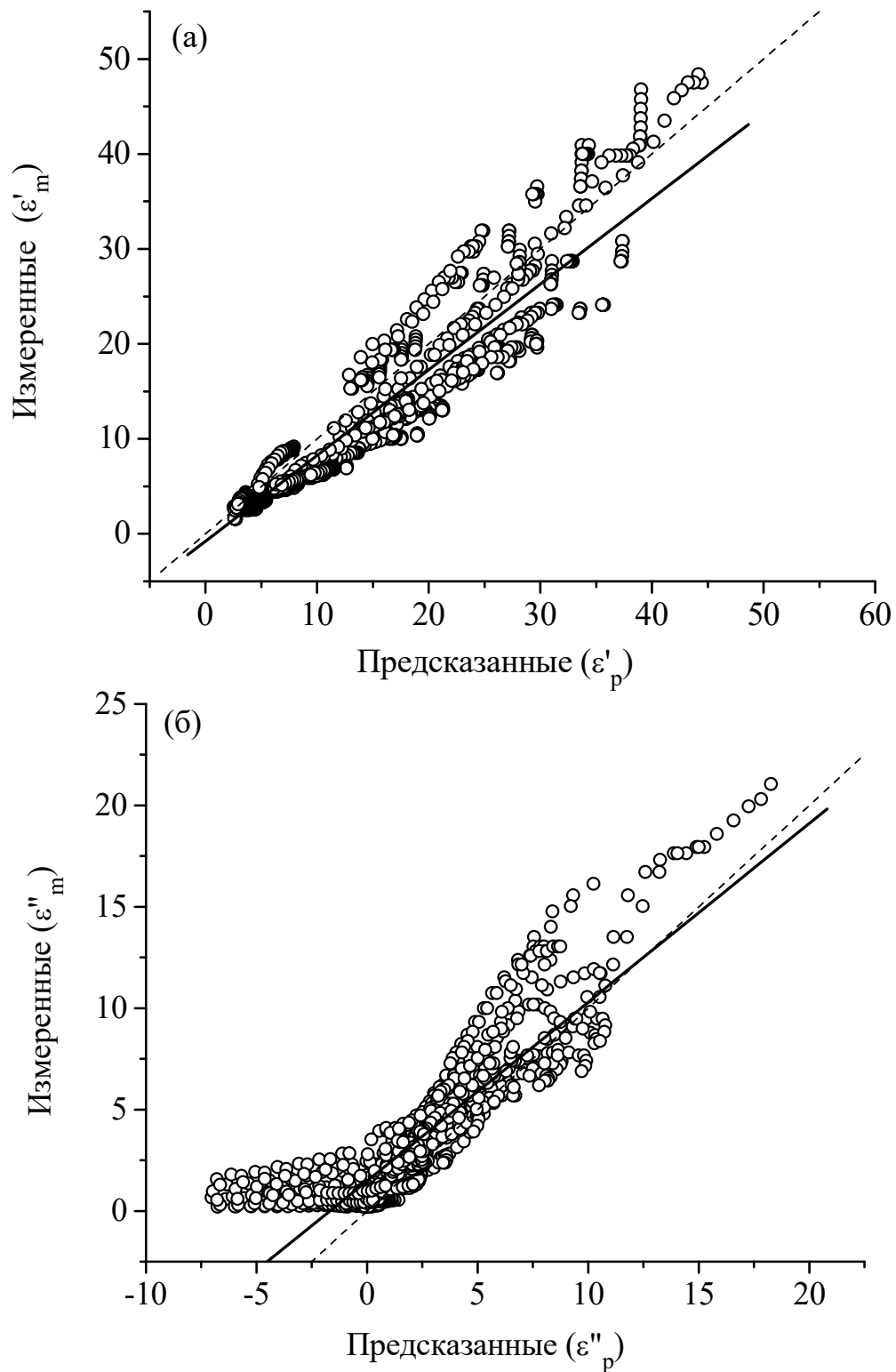


Рисунок 2.9 – Корреляция предсказанных с помощью ПДМС значений ДП, ϵ'_p и КП, ϵ''_p , с измеренными, ϵ'_m и ϵ''_m , для почв, которые не использовались для построения модели [53]. Сплошной и пунктирной линиями представлены биссектриса и линия регрессии соответственно

Иллюстративный пример количественного сравнения предсказанных и измеренных спектров для отдельной почвы, обозначенной буквой D в таблице 2.2, показан на рисунке 2.10, который позволяет увидеть, как не равномерно ПДМС предсказывает измеренные данные в частотной области [80]. Как видно из результатов, показанных на рисунке 2.9, в случае некоторых влажностей обнаружено, что ошибки прогнозирования превышают величины самих измеренных значений.

В целом, из рисунков 2.9 и 2.10, следует, что ПДМС показывает существенно большие ошибки предсказаний ДП и КП для почв, выпадающих за пределы набора почв, используемых для разработки этой модели. Наибольшие ошибки в предсказаниях ПДМС, показанные на рисунке 2.9, не могут быть отнесены только к конкретным типам почв. Они встречаются для каждого типа почв в соответствующем частотном диапазоне, тем самым раскрывая тот факт, что ПДМС моделирует диэлектрические спектры во всей полосе частот не равномерно, что хорошо видно на рисунке 2.10. С таким результатом тестов ПДМС поиск альтернативной модели, способной обеспечивать диэлектрические предсказания по отношению к почвам, диэлектрические данные которых не были использованы для ее развития, представляется оправданным.

Следующими будут определяться ошибки восстанавливаемых с помощью ОРДМС спектров КДП почвы в случае, когда алгоритм обработки предусматривает усреднение экспериментальных спектров КДП почвы по влажности, W (см. раздел 2.1.1). Механизм определения точности модели аналогичен описанному выше. На рисунках 2.11 и 2.12 показаны измеренные ДП и КП почвы как функции от их восстановленных с помощью ОРДМС значений. Разница между этими рисунками заключается в том, что на рисунке 2.11 приведены экспериментальные значения ДП и КП почвы, участвовавшие в создании данного алгоритма ОРДМС, а на рисунке 2.12 значения ДП и КП почвы взяты на частотах, лежащих выше частотного диапазона в котором этот алгоритм разрабатывался. Данные на обоих рисунках были подвергнуты линейной регрессии, с целью определения значений характеризующих ошибку предсказания ОРДМС: коэффициенты детерминации, n СКО и параметры регрессионных уравнений, которые приведены в таблице 2.3.

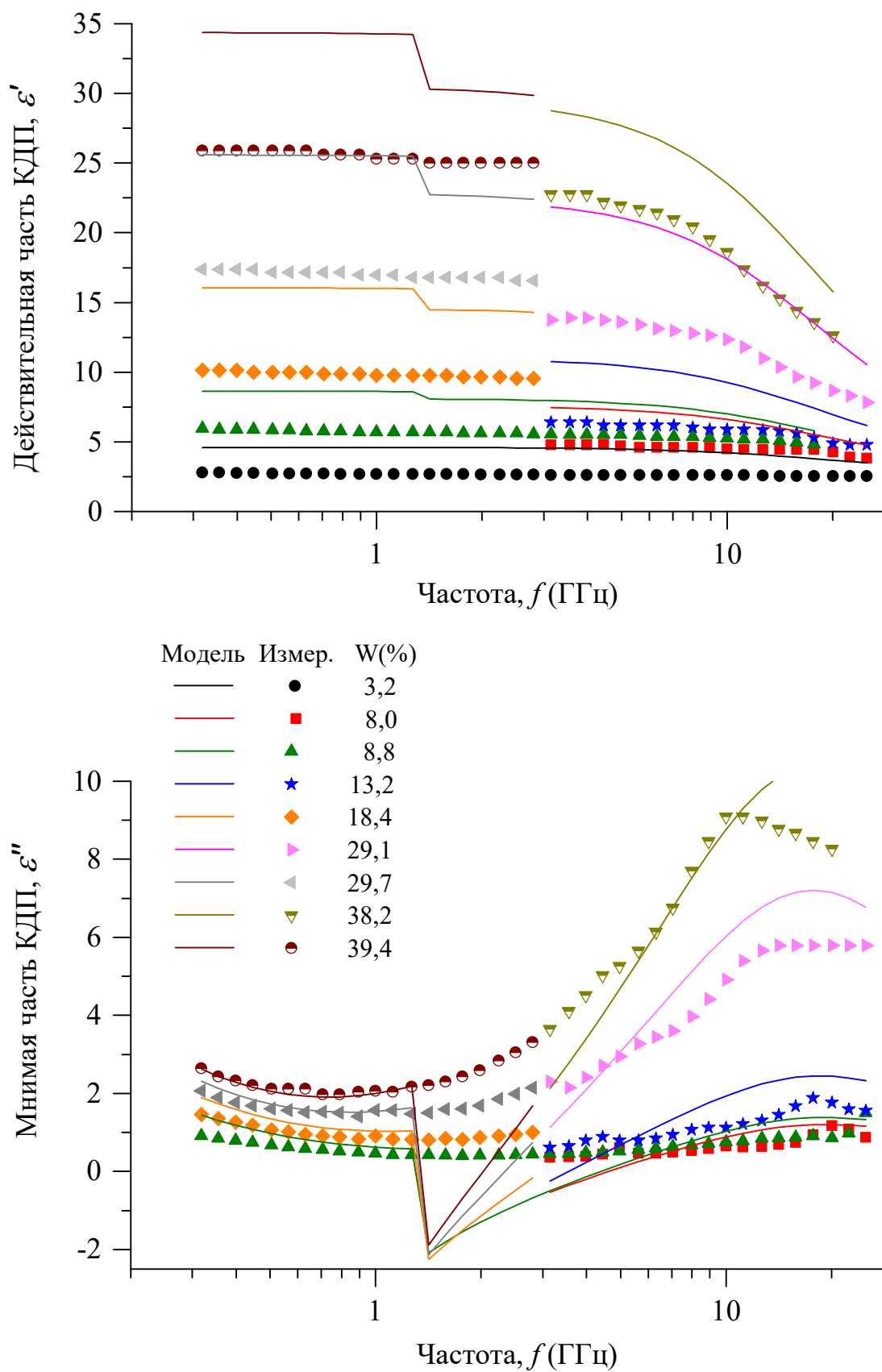


Рисунок 2.10 – Спектры ϵ' и ϵ'' для почвы D. Точки – экспериментальные данные, линии – восстановленные с помощью ПДМС значения. Значения объемной влажности, $W(\%)$ указаны в легенде к рисункам

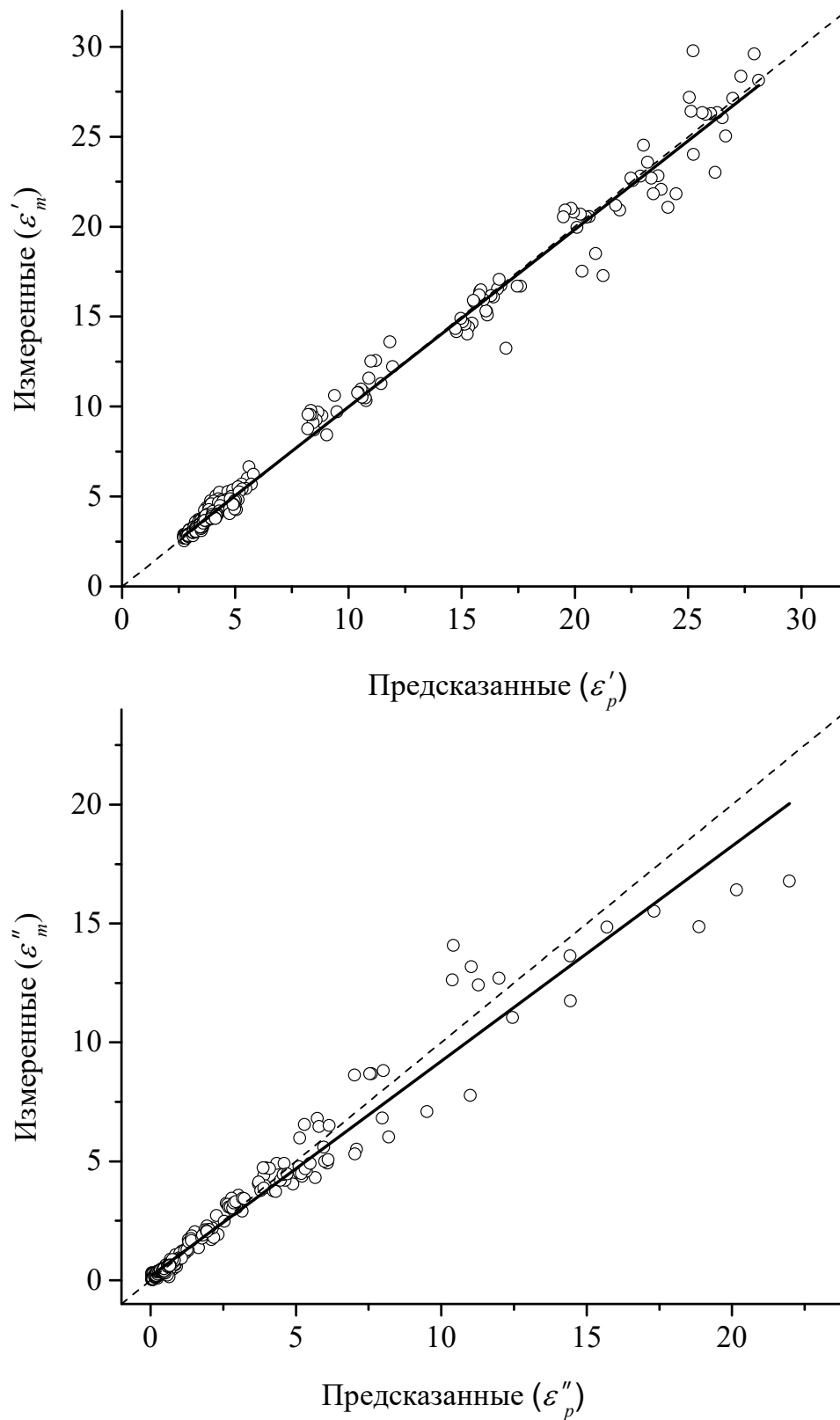


Рисунок 2.11 – Корреляция предсказанных с помощью ОРДМС значений ДП, ε'_p и КП, ε''_p , с измеренными, ε'_m и ε''_m , в частотном диапазоне от 0,2 до 5 ГГц, для почвы, представленной в [79]. Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии соответственно

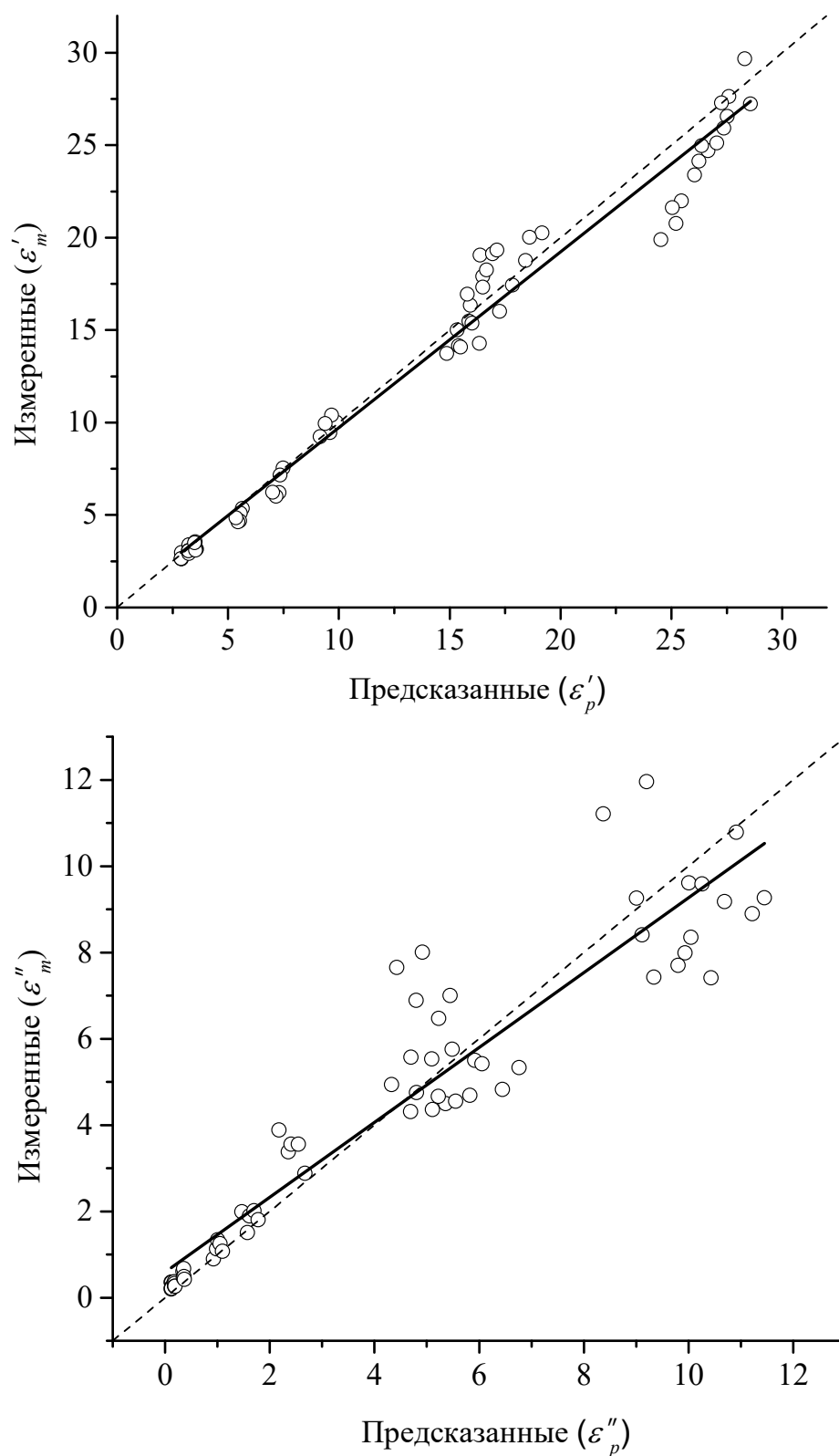


Рисунок 2.12 – Корреляция предсказанных с помощью ОРДМС значений ДП, ϵ'_p и КП, ϵ''_p , с измеренными, ϵ'_m и ϵ''_m , в частотном диапазоне от 5 до 11 ГГц, для почвы, представленной в [79]. Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии соответственно

Поля таблицы, соответствующие этому алгоритму, обозначаются как $\text{ОРДМС}_{\text{ср.хххх}}$, где подстрочные цифры обозначают частотный диапазон в ГГц, для которого применялся данный алгоритм. Так $\text{ОРДМС}_{\text{ср.02-5}}$ означает, что спектры КДП почвы восстановлены с помощью данного алгоритма в частотном диапазоне от 0,2 до 5 ГГц, то есть для тех же экспериментальных данных, которые участвовали в создании алгоритма (см. рисунок 2.11). А $\text{ОРДМС}_{\text{ср.02-5/5-11}}$ – спектры КДП почвы восстановлены с помощью данного алгоритма в частотном диапазоне от 5 до 11 ГГц, то есть для независимых экспериментальных данных (см. рисунок 2.12).

Из сравнения рисунков 2.8, 2.9 и 2.11, 2.12, и соответствующих им результатов корреляционного анализа (таблица 2.3) видно, что точность моделей ПДМС и ОРДМС в случае, когда анализируемые экспериментальные данные участвовали в создании моделей, практически одинаковы. В случае же, когда анализируемые экспериментальные данные не участвовали в создании моделей, точность обеих моделей падает, но точность ОРДМС снижается заметно меньше, а восстановленные ею значения КП не уходят в отрицательную область.

И, наконец, оценим ошибки восстанавливаемых с помощью ОРДМС спектров КДП почвы в случае, когда алгоритм обработки предусматривает подбор спектроскопических параметров модели по экспериментальным данным КДП почвы одновременно на всех доступных для нее влажностях, W (см. раздел 2.1.2). Чтобы сравнить точности предсказаний ОРДМС и ПДМС, предсказания ОРДМС были рассчитаны для группы почв, представленных в [8] и [10]. График зависимости измеренных диэлектрических данных от восстановленных с помощью ОРДМС приведен на рисунке 2.13, количественные значения проведенного корреляционного анализа записаны в таблицу 2.3. Следуя выбранной методике, поле с данными записями обозначим как $\text{ОРДМС}_{\text{F1-F5}}$. Как следует из сравнения результатов, изображенных на рисунках 2.8 и 2.13 для ПДМС и ОРДМС, соответственно, ошибки предсказаний с точки зрения коэффициента детерминации, $n\text{СКО}$ и смещения линии регрессии очень близки друг к другу. Следовательно, в отношении почв, диэлектрические данные которых использовались для разработки как ПДМС, так и ОРДМС, эти модели восстанавливают значения ДП примерно с одной и той же ошибкой.

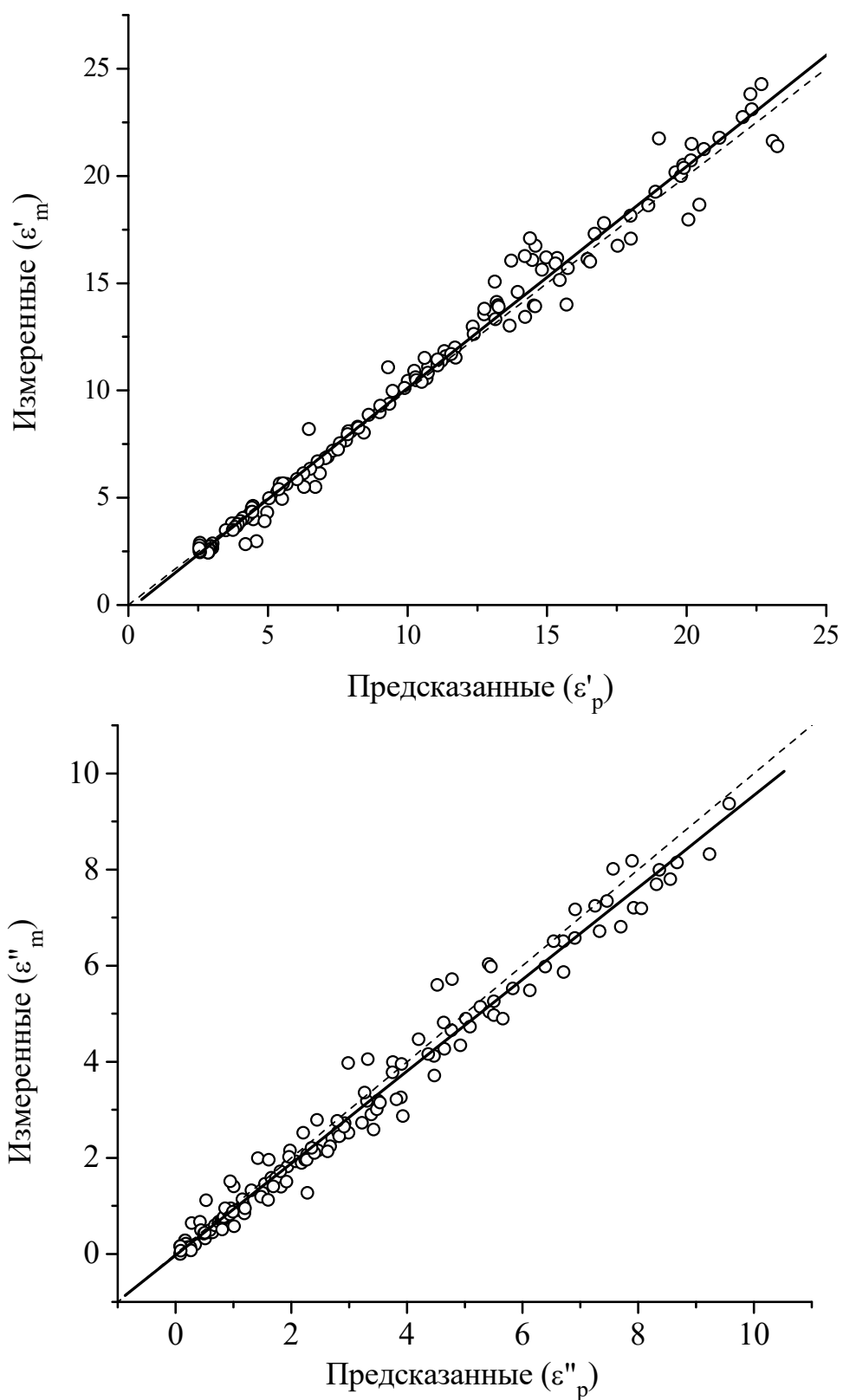


Рисунок 2.13 – Корреляция предсказанных с помощью ОРДМС значений ДП, ϵ'_p и КП, ϵ''_p , с измеренными, ϵ'_m и ϵ''_m , для почв, представленных в [8] и [10]. Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии соответственно

Принимая во внимание тот факт, что разнообразие минеральных почв, измеренных в [53], намного больше, чем набор почв, измеренных в [8] и [10] (см. таблицу 2.2), так же проверим ОРДМС на почвах [53]. Результаты корреляционного анализа изображены на рисунке 2.14 и занесены в таблицу 2.3, в поле обозначенное как ОРДМС_{A-L}. Как видно из рисунка 2.14, относящегося к почвам [53], ОРДМС в этом случае восстанавливает диэлектрические параметры с той же ошибкой, что и в случае почв [8] и [10]. Обобщая на основе вышесказанного, можно утверждать, что ОРДМС, настраивается на каждую конкретную почву, и как было установлено, для почв, на которых она создана, восстанавливает диэлектрические параметры для любой отдельной группы почв с такой же маленькой ошибкой, как и ПДМС.

Таблица 2.3 – Параметры корреляционного анализа, характеризующие точность МДМ

Модель	ДП, ε'					КП, ε''					Рис.
	$y = A + Bx$		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	2.8
ОРДМС _{ср.02-5}	0,125	0,986	0,988	0,800	9	0,174	0,904	0,946	0,766	33	2.11
ОРДМС _{F1-F5}	-0,231	1,034	0,982	0,820	8	-0,031	0,957	0,971	0,409	14	2.13
ОРДМС _{A-L}	-0,275	1,013	0,989	1,038	9	-0,094	1,058p	0,978	0,534	17	2.14
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	2.9
ОРДМС _{ср.02-5/5-11}	0,221	0,221	0,970	1,457	11	0,590	0,868	0,867	1,237	28	2.12

В последнем столбце таблицы 2.3 указан номер рисунка, где изображена соответствующая корреляционная зависимость. Подстрочные символы в обозначении модели говорят на каких почвах (F1–F5, A–L) или в каком диапазоне частот (0,2–5 ГГц) разрабатывалась модель. Для независимых данных подстрочные символы состоят из двух групп, записанных через разделитель (/), смысл первой группы символов не изменился, а вторая группа символов указывает на каких почвах (A–L) или частотах (5–11 ГГц) данная модель проходила верификацию.

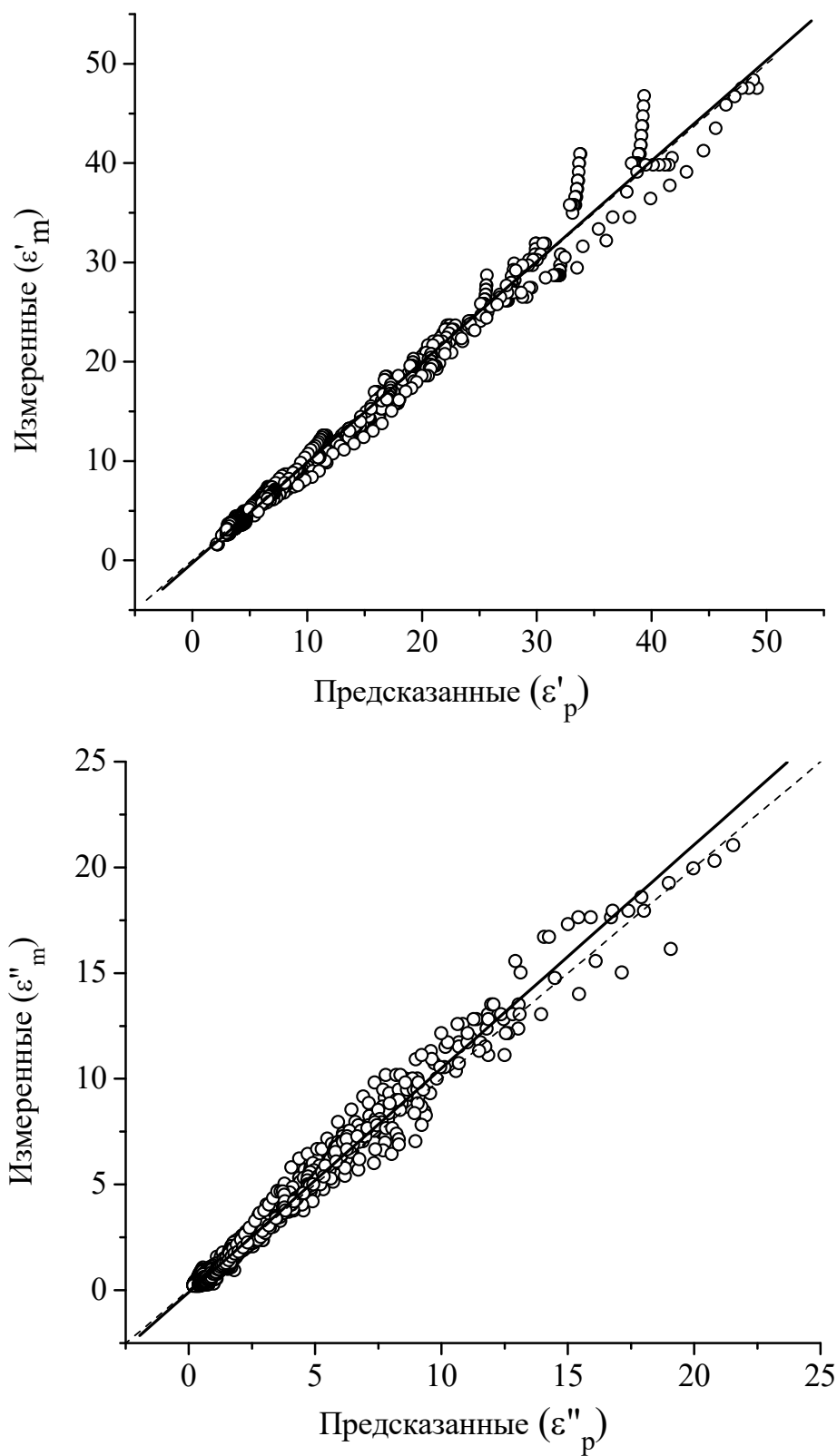


Рисунок 2.14 – Корреляция предсказанных с помощью ОРДМС значений ДП, ϵ'_p и КП, ϵ''_p , с измеренными, ϵ'_m и ϵ''_m , для почв, представленных в [53].

Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии соответственно

2.3 Выводы к главе 2

- Получены два разных метода определения спектроскопических параметров ОРДМС: 1) по диэлектрическим спектрам почвы, усредненным по влажностям, отдельно для связанной, и свободной почвенной влаги, и 2) по диэлектрическим спектрам почвы при всех имеющихся значениях влажностей почвы. 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'' .
- Оценены точности ПДМС и ОРДМС на зависимых и независимых данных измерений КДП талых почв. Точности обеих моделей для *зависимых данных*, т.е. для измеренных значений КДП почв, на которых они разрабатывались, практически одинаковы. Ошибки восстановления диэлектрических спектров талых почв не превышают ошибок их измерений. Однако, если данные диэлектрических измерений выходят из диапазона значений, по которым строилась модель, то ошибки предсказаний для таких *независимых данных* у ОРДМС будут значительно меньше по сравнению с ПДМС (моделью Добсона).
- Большое влияние на точность моделей оказывает непрерывность диапазона частот, в рамках которого применяется модель. Так, за счет того, что диапазон применения ПДМС разбит на два поддиапазона (0,3–1,3 ГГц и 1,4–18 ГГц), на их стыке заметна значительная разница в величине прогнозируемых значений КДП, а также большое отличие этих значений от реально измеренных экспериментальных данных. В свою очередь ОРДМС, имеющая единую функциональную зависимость на протяжении всего частотного диапазона, в рамках которого она применяется, имеет меньшее расхождение измеренных и прогнозируемых значений КДП талых почв.

Глава 3. МИНЕРАЛОГИЧЕСКИ- И ТЕМПЕРАТУРНО-ЗАВИСИМАЯ ОРДМС

3.1 Минералогически-зависимая ОРДМС

В данной главе устанавливается связь параметров ОРДМС с характеристиками состава почвы, чтобы достичь основного преимущества ПДМС. Предполагается, что при этом будет одновременно достигнута и высокая точность предсказаний и преимущество предсказания диэлектрических спектров для талых почв на основе их стандартных физических характеристик.

Основной характеристикой, определяющей тип почвы, является гранулометрический состав почвы, то есть процентное содержание песка, ила и глины. Фактически, только два из них независимы согласно уравнению сохранения массы: $\text{Clay \%} + \text{Sand \%} + \text{Silt \%} = 100 \%$. Чтобы принять решение о том, какое из трех слагаемых больше всего влияет на параметры ОРДМС, последние, найденные для почв из таблицы 2.2, были обработаны линейными и полиномиальными одномерными функциями, причем независимые переменные представляли собой последовательно глинистую, песчаную и иловую фракцию. Результаты этой регрессии показали, что параметры ОРДМС в наибольшей степени зависят от процентного содержания глины [24]. Параметры ОРДМС, найденные для почв из таблицы 2.2, как функции от содержания глины, показаны на рисунке 3.1. Здесь они отображены в виде пронумерованных квадратов, где номер квадрата соответствует порядковому номеру почвы из таблицы 2.2, найденные по ним регрессионные зависимости показаны в виде сплошных линий.

В то же время в наиболее распространенных диэлектрических моделях [8–10] в качестве независимых переменных соответствующих аналитических регрессионных выражений используются как процентное содержание глины, так и песка. Поэтому стоит прояснить, насколько уменьшатся погрешности определения параметров модели, полученных для каждой отдельной почвы, как функций от типа почвы путем их аппроксимации одномерными функциями с использованием в качестве независимой переменной только содержание глинистой фракции по

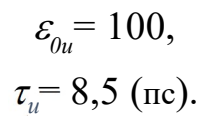


Рисунок 3.1 – Параметры ОРДМС, найденные для почв из таблицы 2.2, как функции от процентного содержания глинистой фракции в почве

сравнению с их аппроксимацией двумерными функциями с двумя независимыми переменными, а именно содержанием песка и глинистой фракции. Для этой цели, параметры ОРДМС, изображенные на рисунке 3.1, были подвергнуты регрессионному анализу с использованием формулы $P_j = A_j + B_{cj}C + B_{sj}S$, где ($j = n_d, \kappa_d, W_t, \varepsilon_0, \tau_b, \sigma_b$, и σ_u) [83].

На рисунке 3.2 показаны результаты регрессионного анализа значений ПССВ, W_t , как одномерным (содержание глины), так и двумерным (содержание глины и песка) аналитическими выражениями. Пронумерованными квадратами на рисунке обозначены значения W_t для почв из таблицы 2.2, где номер квадрата соответствует порядковому номеру почвы в таблице, прямой линией отображен результат одномерного регрессионного анализа, звездочками – результат двумерного регрессионного анализа. Как видно из рисунка 3.2, с введением процентного содержания песка в качестве второй переменной произошло незначительное улучшение коэффициента корреляции ($R = 0,94$ против $R = 0,92$). По аналогии с W_t (рисунок 3.2), были обработаны все другие параметры ОРДМС, где так же не наблюдалось значительного улучшения их корреляционных характеристик из-за введения процентного содержания песка в качестве второй переменной.

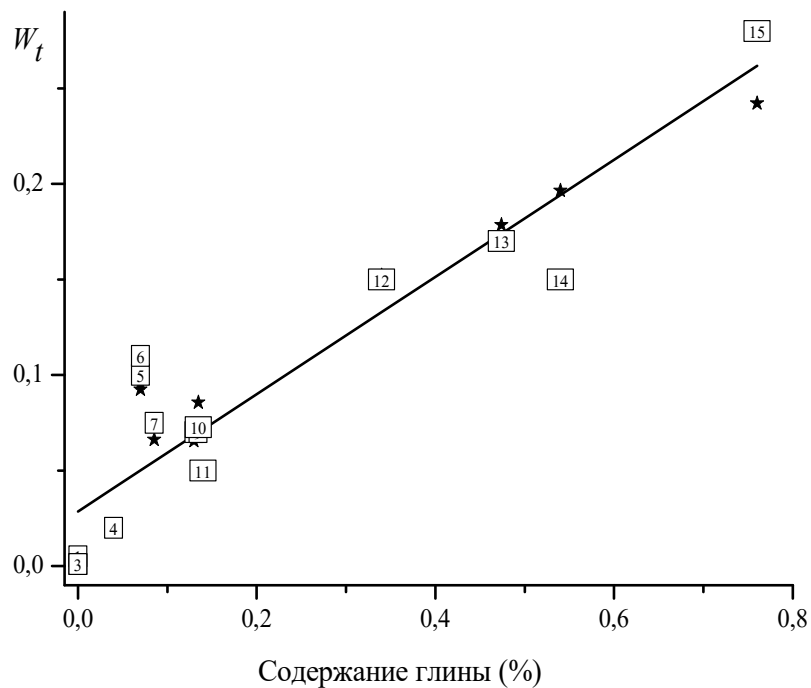


Рисунок 3.2 – График зависимости W_t от глины, найденной для почв из таблицы 2.2, как функции от процентного содержания глины в почве

Поэтому, для перехода от ОРДМС к МЗ ОРДМС, будут использоваться одномерные регрессионные уравнения параметров ОРДМС, с использованием в качестве входного параметра МЗ ОРДМС только процентного содержания глинистой фракции в почве, которое будет характеризовать конкретный тип почвы. Соответствующие им уравнения регрессий приведены ниже:

$$\begin{aligned} n_d &= 1,634 - 0,539 \cdot 10^{-2}C + 0,2748 \cdot 10^{-4}C^2, \\ R_{nd} &= 0,535 \quad SD_{nd} = 0,0821 \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \kappa_d &= 0,03952 - 0,04038 \cdot 10^{-2}C, \\ R_{\kappa d} &= -0,798 \quad SD_{\kappa d} = 0,00724 \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} W_t &= 0,02863 + 0,30673 \cdot 10^{-2}C, \\ R_{Wt} &= 0,922 \quad SD_{Wt} = 0,03049 \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{0b} &= 79,8 - 85,4 \cdot 10^{-2}C + 32,7 \cdot 10^{-4}C^2, \\ R_{\varepsilon 0b} &= 0,716 \quad SD_{\varepsilon 0b} = 9,87 \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \tau_b &= 1,062 \cdot 10^{-11} + 3,450 \cdot 10^{-14}C, \\ R_{\tau b} &= 0,785 \quad SD_{\tau b} = 6,46 \cdot 10^{-13} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_b &= 0,3112 + 0,467 \cdot 10^{-2}C, \\ R_{\sigma b} &= 0,4039 \quad SD_{\sigma b} = 0,2528 \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \sigma_u &= 0,3631 + 1,217 \cdot 10^{-2}C, \\ R_{\sigma u} &= 0,562 \quad SD_{\sigma u} = 0,4255 \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_{0u} = 100 \quad (3.8)$$

$$\tau_u = 8,5 \cdot 10^{-12} \quad (3.9)$$

Содержание глины, C , и времена релаксации τ_b и τ_u в (3.1) – (3.7) выражаются в процентах и секундах соответственно. R_j и SD_j обозначают коэффициент корреляции и стандартное отклонение, соответственно, связанные с определенным параметром ОРДМС ($j = n_d, \kappa_d, W_t, \varepsilon_0, \tau_b, \sigma_b, \sigma_u$). Значения, вычисленные с помощью регрессионных зависимостей (3.1) – (3.9), определяют все параметры минералогически-зависимой (МЗ) ОРДМС. А значения КДП, рассчитанные с

помощью (1.32) – (1.36) и (3.1) – (3.9), будут идентифицированы как диэлектрические предсказания МЗ ОРДМС.

Кроме того, эффективность одномерного регрессионного анализа (3.1) – (3.7) будет подтверждена путем сравнения погрешностей диэлектрических предсказаний, полученных с использованием ОРДМС и МЗ ОРДМС.

Оценка точности диэлектрических предсказаний **МЗ ОРДМС** по данным измерений, на которых она создавалась. Для оценки корреляции между диэлектрическими предсказаниями МЗ ОРДМС и измеренными значениями ДП и КП, на рисунке 3.3 показаны зависимости измеренных значений ДП и КП от предсказанных, для объединенного ансамбля из 15 почв, представленных в [8; 10; 53]. Корреляционный анализ, показанный на рисунке 3.3, означает, что по всему разнообразию типов почв, влажностей и частот, измеренных в [8; 10; 53], МЗ ОРДМС способна прогнозировать ДП и КП с такой же точностью, что и ОРДМС (см. рисунки 2.13 и 2.14), с точки зрения коэффициента детерминации и среднеквадратического отклонения. Значения параметров корреляционного анализа занесены в таблицу 3.1, структура которой аналогична таблице 2.3, в поле обозначенное как МЗ ОРДМС. Стоит также отметить, что эта ошибка оказалась того же порядка, что и ошибка ПДМС, показанная на рисунке 2.8. Этот результат косвенно оправдывает использование регрессионных зависимостей одномерной МЗ ОРДМС, определяемых формулами (3.1)–(3.9). Тот факт, что ошибки предсказаний МЗ ОРДМС и ОРДМС были найдены одного порядка, следует отнести к довольно хорошей корреляции наиболее важных регрессионных зависимостей МЗ ОРДМС с соответствующими спектроскопическими параметрами ОРДМС, на которые диэлектрические предсказания должны влиять больше всего. Как следует из регрессионных зависимостей (3.1) – (3.7), это ПССВ, W_t , низкочастотный предел ДП, ϵ_{0b} , и время релаксации, τ_b , для связанной воды. Несмотря на то, что остальная часть регрессионных зависимостей, не показывает существенной корреляции со спектроскопическими параметрами ОРДМС, их влияние на диэлектрические предсказания МЗ ОРДМС оказалось незначительным.

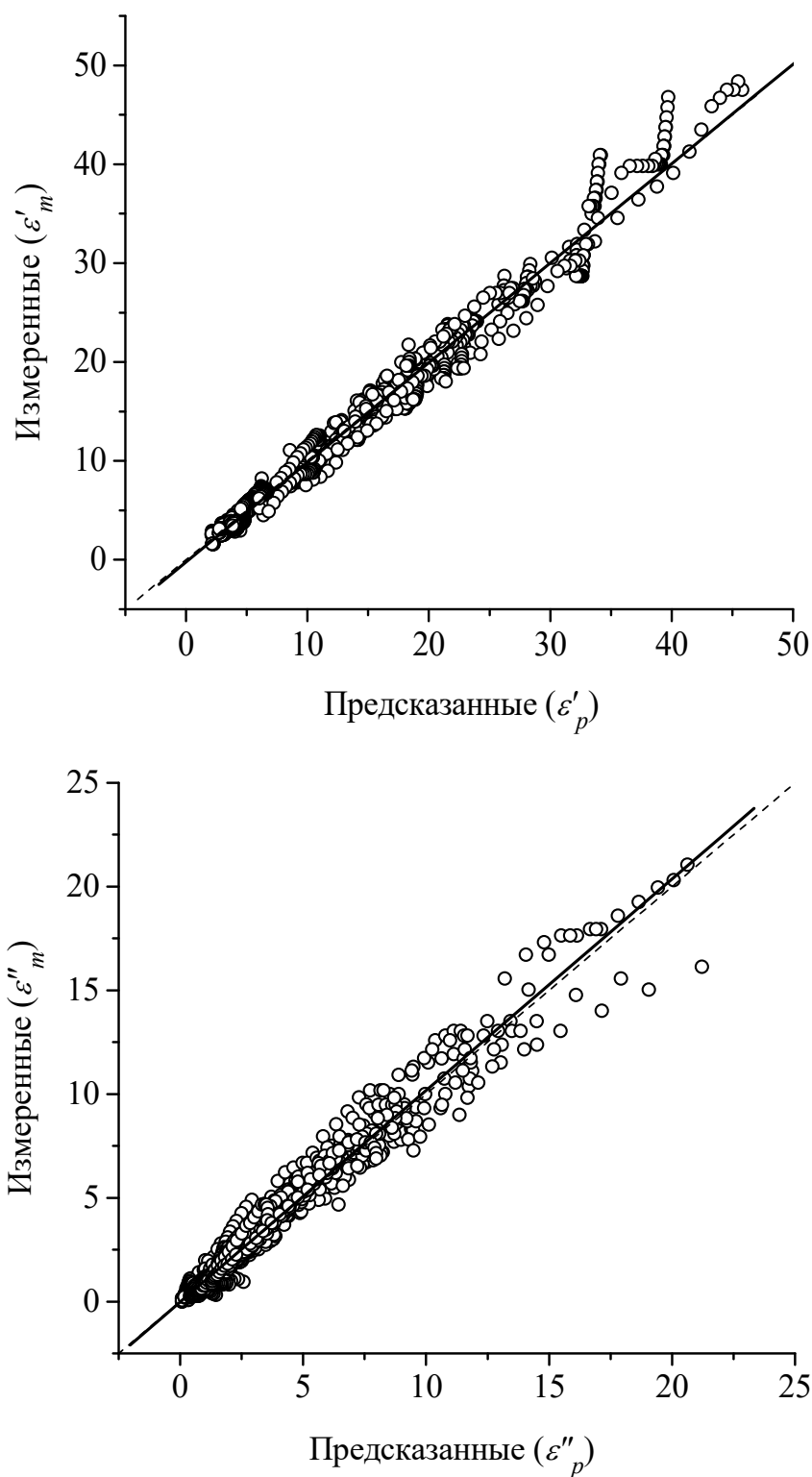


Рисунок 3.3 – Корреляция предсказанных с помощью МЗ ОРДМС значений ДП, ε'_p и КП, ε''_p , с измеренными, ε'_m и ε''_m , для почв, представленных в [8], [10] и [53]. Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии соответственно

Действительно, соответствующие характеристики ошибок, показанные на рисунках 2.13, 2.14 и 3.3, для ОРДМС и МЗ ОРДМС, соответственно, очень близки друг к другу. В результате, когда процентное содержание глины стало единственным минералогическим параметром, МЗ ОРДМС не только сохранила точность предсказания КДП талых почв сопоставимую с точностью ОРДМС, но и дополнила это простотой ее применения, которая так же проста, как и для ПДМС.

Таблица 3.1 – Параметры корреляционного анализа, характеризующие точность МЗ ОРДМС в сравнении с ОРДМС и ПДМС, по зависимым данным

Модель	ДП, ε'					КП, ε''					Рис.
	$y = A + Bx$		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	2.8
ОРДМС	-0,275	1,013	0,989	1,038	9	-0,094	1,058	0,978	0,534	17	2.14
МЗ ОРДМС	-0,227	1,007	0,983	1,297	11	-0,009	1,026	0,967	0,657	21	3.3

Тем не менее, стоит упомянуть, что точность МЗ ОРДМС до сих пор была протестирована (см. рисунок 3.3) только по диэлектрическим данным, используемым для ее разработки.

Валидация предсказаний МЗ ОРДМС по независимым диэлектрическим данным. Ранее было показано, что как ПДМС, так и МЗ ОРДМС, продемонстрировали хорошую способность к прогнозированию КДП влажной почвы при сравнении с диэлектрическими данными, которые были использованы для их разработки (см. таблицу 3.1). В этом разделе будет проведена оценка точности прогноза МЗ ОРДМС в сравнении с данными диэлектрических измерений почв, которые не использовались для создания моделей, т.е. на независимых почвах. И, как и ранее, полученная точность прогноза МЗ ОРДМС по независимым почвам будет сравниваться с точностью прогноза ПДМС, полученной так же по независимым почвам.

Как видно из рисунка 2.9 и таблицы 2.3, ошибка прогноза ПДМС на независимых почвах оказалась примерно в три раза больше, чем ошибка прогноза для зависимых почв, по крайней мере, с точки зрения среднеквадратического отклонения.

Как и для ПДМС (см. рисунок 2.9), точность прогноза МЗ ОРДМС должна быть проверена по набору диэлектрических данных, отличному от того, который используется для определения ее параметров (3.1) – (3.7).

Для выполнения такой проверки, регрессионные зависимости МЗ ОРДМС (3.1) – (3.7) были получены с использованием спектроскопических параметров, относящихся к почвам, изученным только в [53] или только в [8] и [10]. Это дало две новые версии МЗ ОРДМС, которые содержали регрессионные зависимости, отличные от зависимостей (3.1) – (3.7), и могли рассматриваться как независимые по отношению к диэлектрическим данным из [8] и [10] или из [53]. На рисунке 3.4, предсказания для почв F1–F5, взятых из [8; 10], сделанные МЗ ОРДМС_{A–L}, построенной на почвах A–L [53], сравниваются с данными измерений почв F1–F5. В свою очередь, на рисунке 3.5 рассчитанные значения ДП и КП для почв A–L, с помощью МЗ ОРДМС_{F1–F5}, созданной на почвах F1–F5, сравниваются с измеренными значениями для почв A–L. Значения параметров корреляционного анализа занесены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры корреляционного анализа, характеризующие точность МЗ ОРДМС по независимым данным

Модель	ДП, ε'					КП, ε''					Рис.
	$y = A + Bx$		R^2	СКО	нСКО (%)	$y = A + Bx$		R^2	СКО	нСКО (%)	
	A	B				A	B				
МЗ ОРДМС _{A-L/F1-F5}	-0,106	1,012	0,979	0,879	8	0,101	0,911	0,931	0,630	22	3.4
МЗ ОРДМС _{F1-F5/A-L}	-0,027	0,972	0,989	1,353	11	0,190	0,932	0,927	1,270	31	3.5

Таким образом, здесь, так же, как и в таблице 2.3, первая группа подстрочных символов, до разделителя (/), обозначает группу почв, на которых определялись параметры модели, вторая группа, после разделителя (/), определяет группу почв, для которых прогнозировались модельные значения КДП.

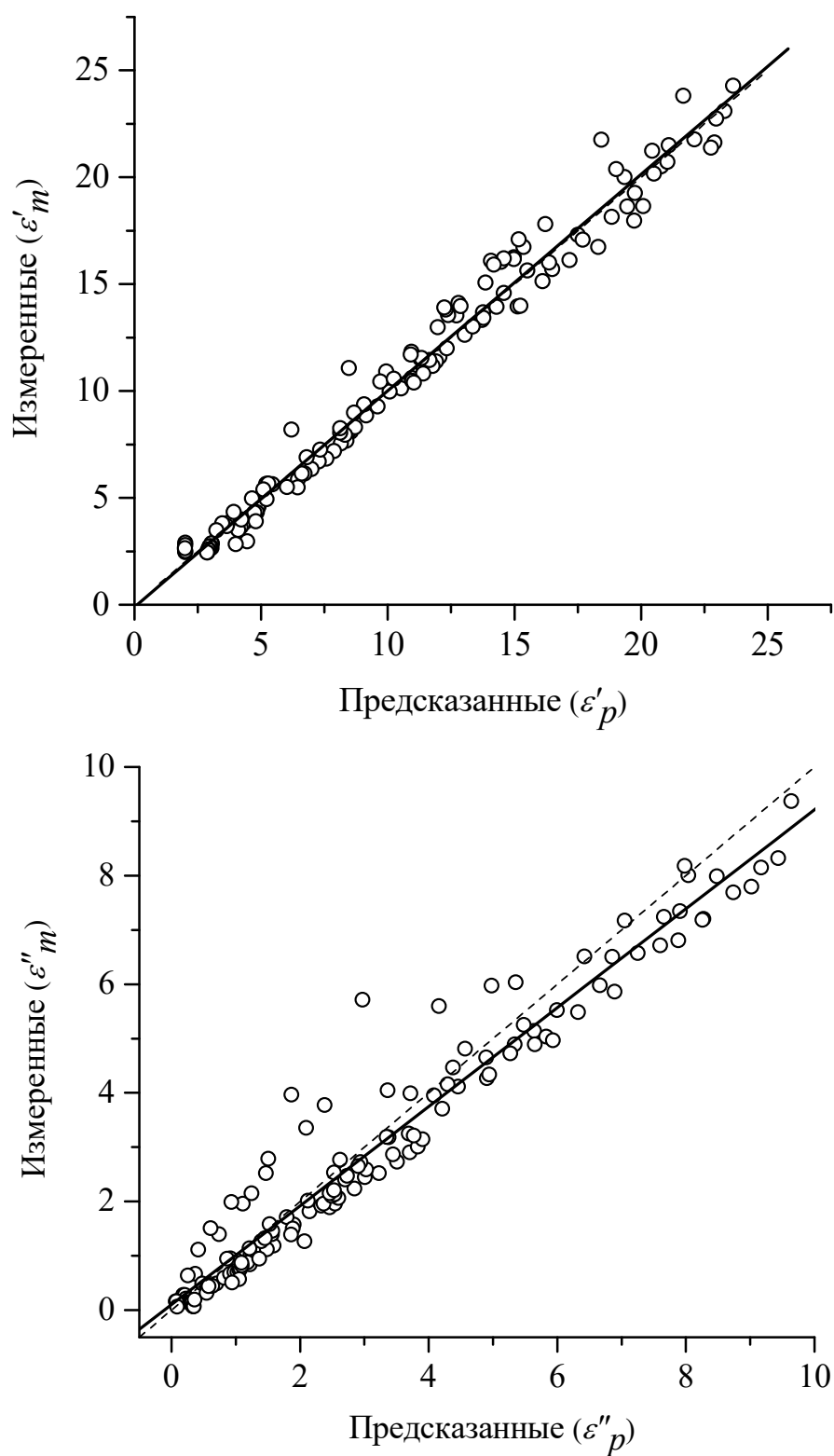


Рисунок 3.4 – Корреляция предсказанных с помощью МЗ ОРДМС_{A-L} значений ДП, ε'_p и КП, ε''_p с измеренными в [8] и [10] значениями ε'_m и ε''_m (точки). Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии соответственно

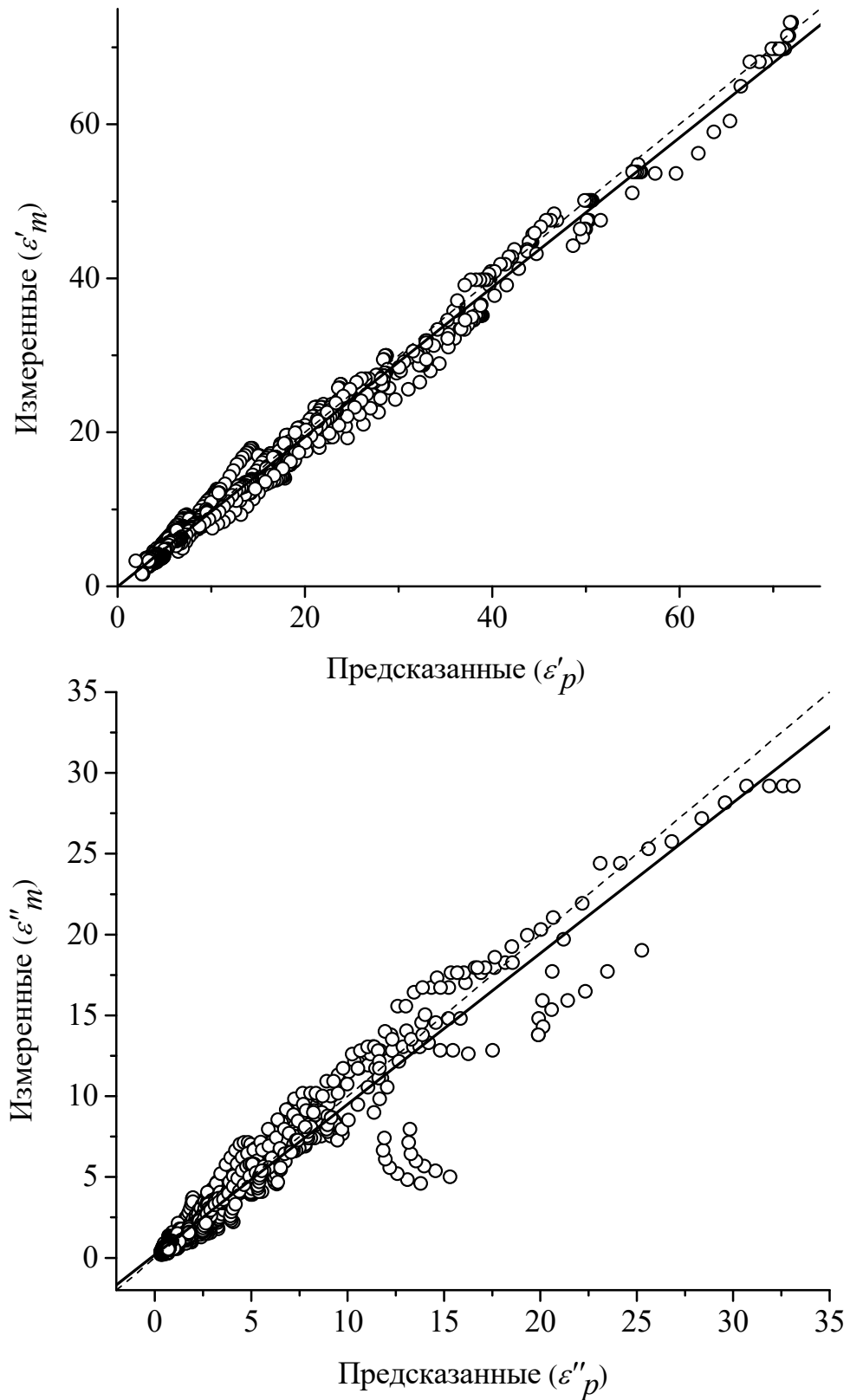


Рисунок 3.5 – Корреляция предсказанных с помощью МЗ ОРДМС_{F1-F5} значений ДП, ε'_p и КП, ε''_p с измеренными в [53] значениями ε'_m и ε''_m (точки). Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии соответственно

Сравнивая результаты испытаний, показанные на рисунках 3.4–3.5 (таблица 3.2), можно отметить, что ошибка предсказания МЗ ОРДМС на независимых почвах зависит от набора диэлектрических данных, используемых для ее разработки. Чем шире набор почв, используемых для определения параметров модели, тем выше точность прогноза на независимых данных, т.е. на тех почвах, данные измерений которых не использовались для построения модели.

На рисунке 3.4 представлены результаты прогноза МЗ ОРДМС, созданной на основе измерений 11 типов почв с содержанием глинистой фракции от 0 до 76 %, а на рис. 3.5 представлены предсказания МЗ ОРДМС, созданной на основе измерений 5 типов почв с содержанием глинистой фракции от 8,5 до 47 %. Следовательно, версия МЗ ОРДМС, используемая на рисунке 3.5, была создана по более бедному разнообразию почв с точки зрения минерального содержания, чем та, для которой она генерировала диэлектрические предсказания.

Ошибка прогнозирования, наблюдаемая на рисунке 3.4, почти такая же, как и на рисунке 3.3. Эта ситуация может быть связана с тем, что версия МЗ ОРДМС, используемая на рисунке 3.4, была создана по столь же широкому разнообразию типов почв, с точки зрения их минерального содержания, как вариант, используемый на рисунке 3.3. Действительно, диапазон содержания глины от 0 до 76 % оказался одинаковым как для набора из 11 почв, измеренных в [53], так и для набора из 15 почв, измеренных в [8; 10; 53] (см. таблицу 2.2). В то же время, в отношении данных, показанных на рисунках 2.9 и 3.5, следует отметить, что МЗ ОРДМС, используемая на рисунке 3.5, была создана на малом количестве почв, измеренных в [8] и [10], как и ПДМС. Тем не менее, эта версия МЗ ОРДМС обеспечивала диэлектрические предсказания для более широкого разнообразия типов почв [53] с существенно меньшей погрешностью (см. рисунок 3.5) по сравнению с теми, которые были рассчитаны с помощью ПДМС (см. рисунок 2.9).

Здесь стоит отметить, что методика, применяемая для разработки МЗ ОРДМС, основана на двух ключевых элементах. Первым из них является ОРДМС, которая обеспечивает точные предсказания диэлектрической проницаемости с использованием совокупности параметров ОРДМС, характерных для каждого конкретного

типа почвы с определенным содержанием минералов, как показано на рисунках 2.13, 2.14, 3.1. Второй ключевой элемент – это полнота ансамбля таких наборов параметров с точки зрения разнообразия минерального состава вовлеченных почв. Пример такого ансамбля показан на рисунке 3.1. В рамках методики МЗ ОРДМС ансамбль параметров ОРДМС, относящийся к определенной группе почв, превращается в конкретный набор регрессионных уравнений, таких как (3.1) – (3.9), которые представляют собой конкретную версию МЗ ОРДМС, созданную по этой группе почв. Чем шире группа почв, с точки зрения минерального состава, тем меньше ошибка предсказания соответствующей версии МЗ ОРДМС может быть достигнута, особенно в отношении почв, отличных от тех, которые использовались для создания этой версии модели.

Следовательно, ошибка прогнозирования МЗ ОРДМС, относящаяся ко всему разнообразию природных почв, зависит как от прогнозирующей способности ОРДМС, являющейся основой МЗ ОРДМС, так и от полноты группы используемых почв с точки зрения разнообразия их минерального состава, которое является блоком структурного регрессионного анализа соответствующей версии МЗ ОРДМС. С использованием более полного набора данных можно получить меньшую ошибку регрессионного анализа в уравнениях, (3.1) – (3.9), что обеспечивает меньшую погрешность предсказаний, связанных с соответствующей версией МЗ ОРДМС. Однако использовать чрезмерно большое количество почв для построения МЗ ОРДМС не имеет смысла. В работе [84] для создания МЗ ОРДМС использовалась 71 почва с содержанием глинистой фракции от 0 до 76 %, при этом у многих почвенных образцов содержание глинистой фракции либо было одинаковым, либо различалось не существенно. А в итоге, точность представленной в [84] МЗ ОРДМС, основанной на 71 почве и точность представленной здесь МЗ ОРДМС, основанной на 15 почвах, практически идентичны.

Необходимо обсудить еще одну проблему, связанную с ошибкой предсказания МЗ ОРДМС. Речь идет о том, способна ли МЗ ОРДМС, созданная на определенном наборе почв, обеспечить предсказания диэлектрических спектров для отдельной почвы, которая может принадлежать или выпадать из этого набора. Последнее

справедливо для предсказаний ПДМС, показанных на рисунке 2.9. Рассмотрим обе ситуации. На рисунках 3.6 и 3.7, экспериментальные ДП и КП для почвы D показаны совместно с восстановленными с помощью МЗ ОРДМС спектрами ДП и КП для этих же данных (см. таблицу 2.2). При этом на рисунке 3.6 была использована МЗ ОРДМС созданная на основе объединенной группы почв, измеренных в [8; 10; 53], а на рисунке 3.7 использована МЗ ОРДМС созданная на основе почв, измеренных только в [8] и [10].

Как видно из рисунков 2.7 и 3.6, ошибка предсказания МЗ ОРДМС для конкретной почвы D, созданной на объединенной группе почв, измеренных в [8; 10; 53], почти такого же порядка, как и ошибка, полученная ОРДМС, созданная для этой почвы (рисунок 2.7). Наибольшие отклонения наблюдаются в нижнем частотном диапазоне только для КП в случае почв с заметным количеством свободной воды (рисунки 2.7 и 3.6), что можно объяснить довольно низкой корреляцией регрессионной зависимости МЗ ОРДМС для проводимости свободной воды с соответствующими значениями параметров ОРДМС (см. рисунок 3.1 и выражение (3.7)). Ошибка предсказаний МЗ ОРДМС для каждой отдельной почвы из [53] того же порядка, что и на рисунке 3.6. В этом отношении рисунок 3.7 аналогичен рисунку 2.10, где показаны предсказания ПДМС для почв D [53], притом, что ПДМС создавалась с использованием диэлектрических данных для почв из [8] и [10].

Следует отметить, что диэлектрические данные, представленные в [8] и [10], касаются только диапазона частот от 1,4 до 18 ГГц. Кроме того, представленные в [21] оригинальные диэлектрические данные, используемые для разработки ПДМС в диапазоне частот от 0,3 до 1,3 ГГц, не являются достаточными, чтобы эффективно строить МЗ ОРДМС в этом диапазоне. Поэтому частоты, показанные на рисунке 3.7, ограничены в диапазоне частот от 1,4 до 18 ГГц. Как видно из рисунков 2.10 и 3.7, МЗ ОРДМС делает гораздо более точные предсказания ДП и КП, для конкретной почвы D, чем ПДМС, причем обе модели были созданы на одном и том же наборе почв.

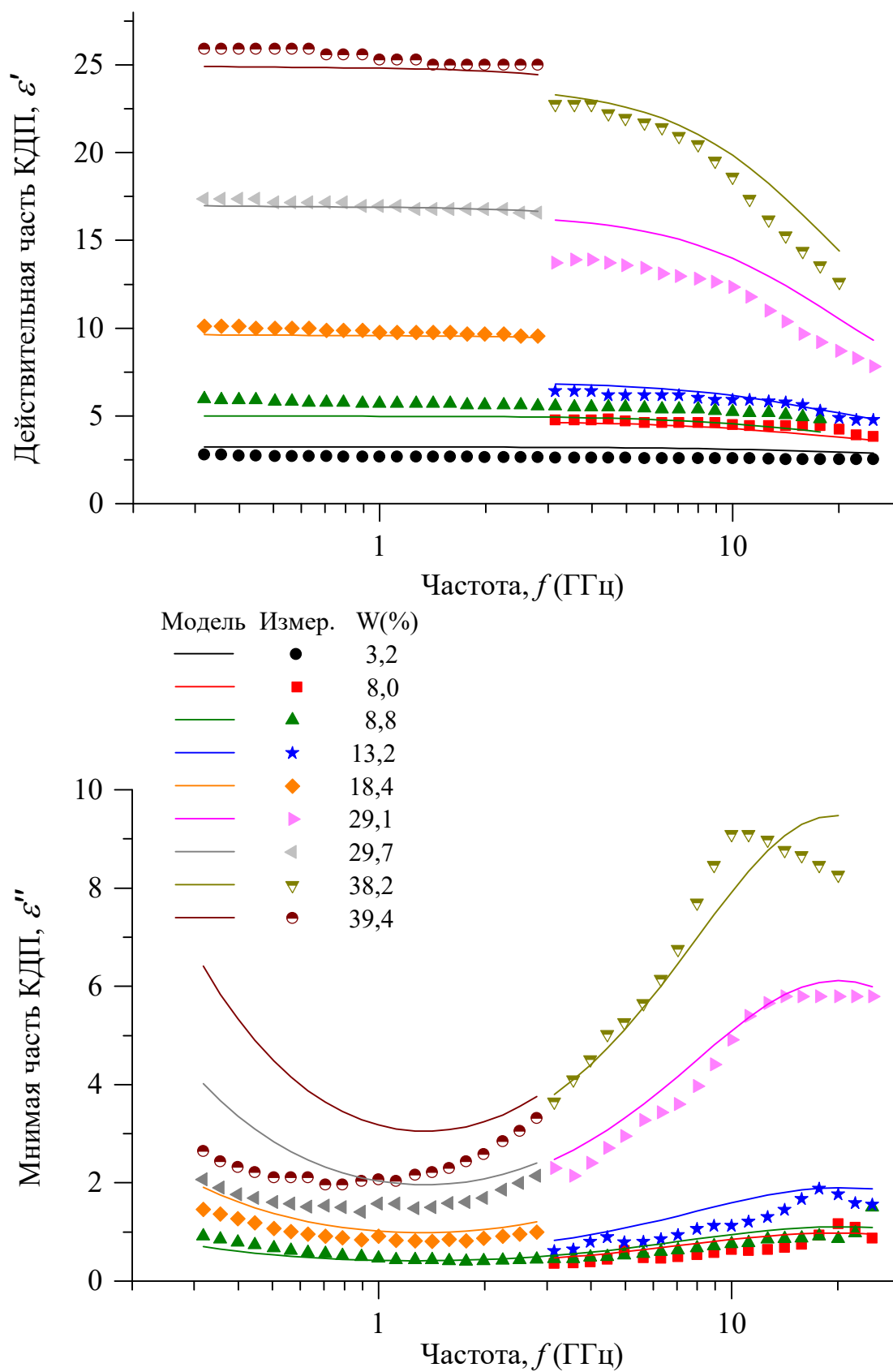


Рисунок 3.6 – Спектры ε' и ε'' для почвы D. Точки – экспериментальные данные, линии – восстановленные с помощью МЗ ОРДМС значения. Значения объемной влажности, $W(\%)$ указаны в легенде к рисункам

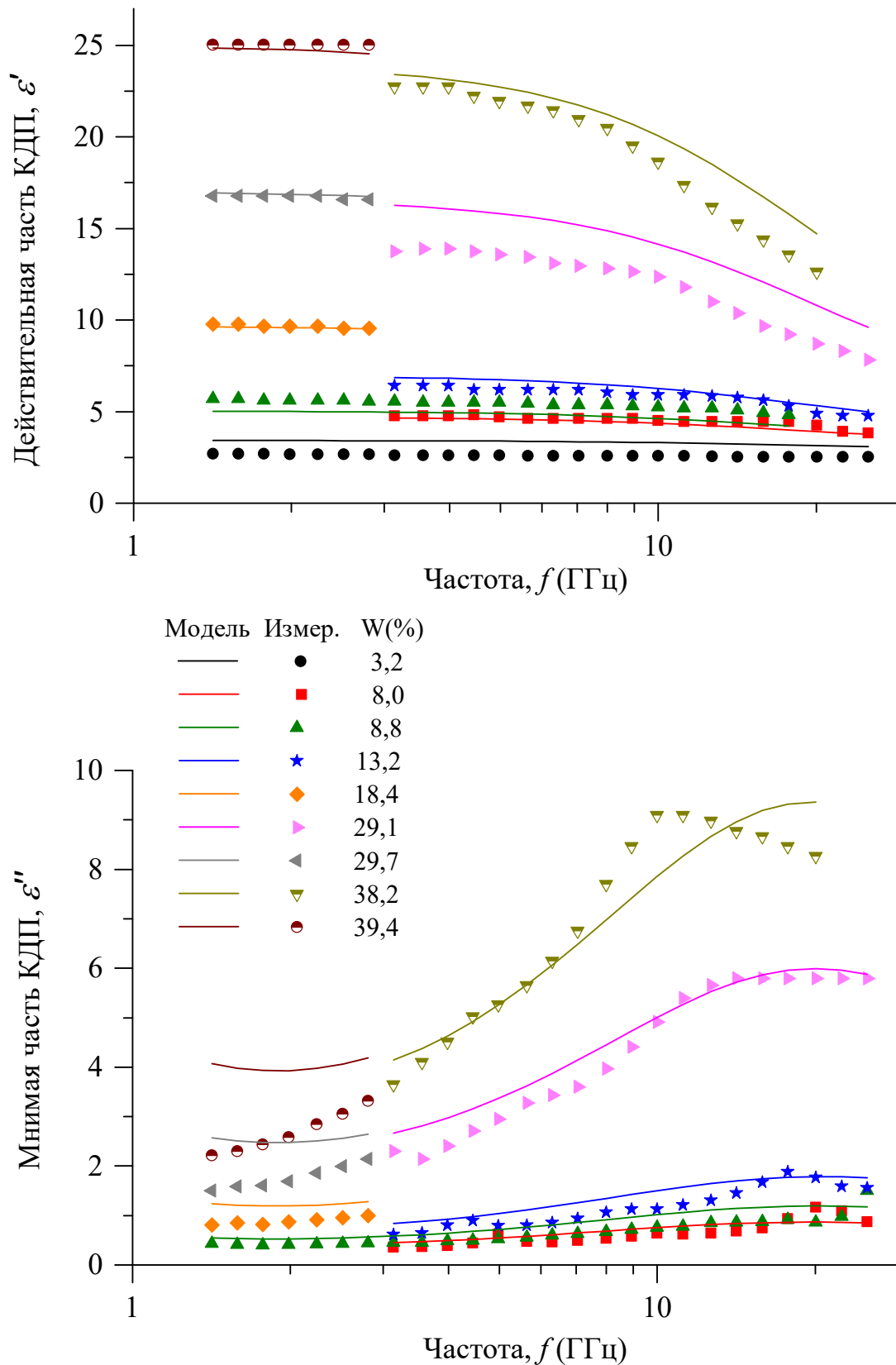


Рисунок 3.7 – Спектры ϵ' и ϵ'' для почвы D. Точки – экспериментальные данные, линии – восстановленные с помощью МЗ ОРДМС_{F1-F5} значения.

Значения объемной влажности, $W(\%)$ указаны в легенде к рисункам

В результате можно заявить, что МЗ ОРДМС продемонстрировала заметно меньше ошибки прогнозирования по сравнению с ПДМС в случае группы почв или отдельных почв, выпавших из набора почв, используемых для разработки соответствующих моделей.

Так же точности данных моделей были оценены и сравнены группой независимых экспертов (рисунок 3.8). Анализ спутниковых данных выполнен в лаборатории экспертной поддержки (ESL) центра дистанционного зондирования биосферы (CESBIO) французского космического агентства (CNES) [25]. На рисунке 3.8 изображены карты влажностей почв территории Австралии, восстановленных по данным спутника SMOS. На рисунке 3.8а применялся алгоритм обработки данных версии V5.01(V5.00), использующий для восстановления модель Добсона (ПДМС). На рисунке 3.8б применялся алгоритм обработки данных версии V5.51(V5.50), использующий для восстановления МЗ ОРДМС. Черным цветом обозначены области, где модели не 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 восстановления карт влажности оценена с помощью корреляционного анализа значений влажности, восстановленных из спутниковых данных, и значений влажности, измеренных на месте [85]. При использовании модели Добсона для обработки спутниковых данных получаются следующие значения: 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: 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. Начиная с версии алгоритма обработки данных V5.51(V5.50) и в последующих, в качестве основной диэлектрической модели почв выступает МЗ ОРДМС.

На рисунке 3.9 приведены карты влажности почв Красноярского края.

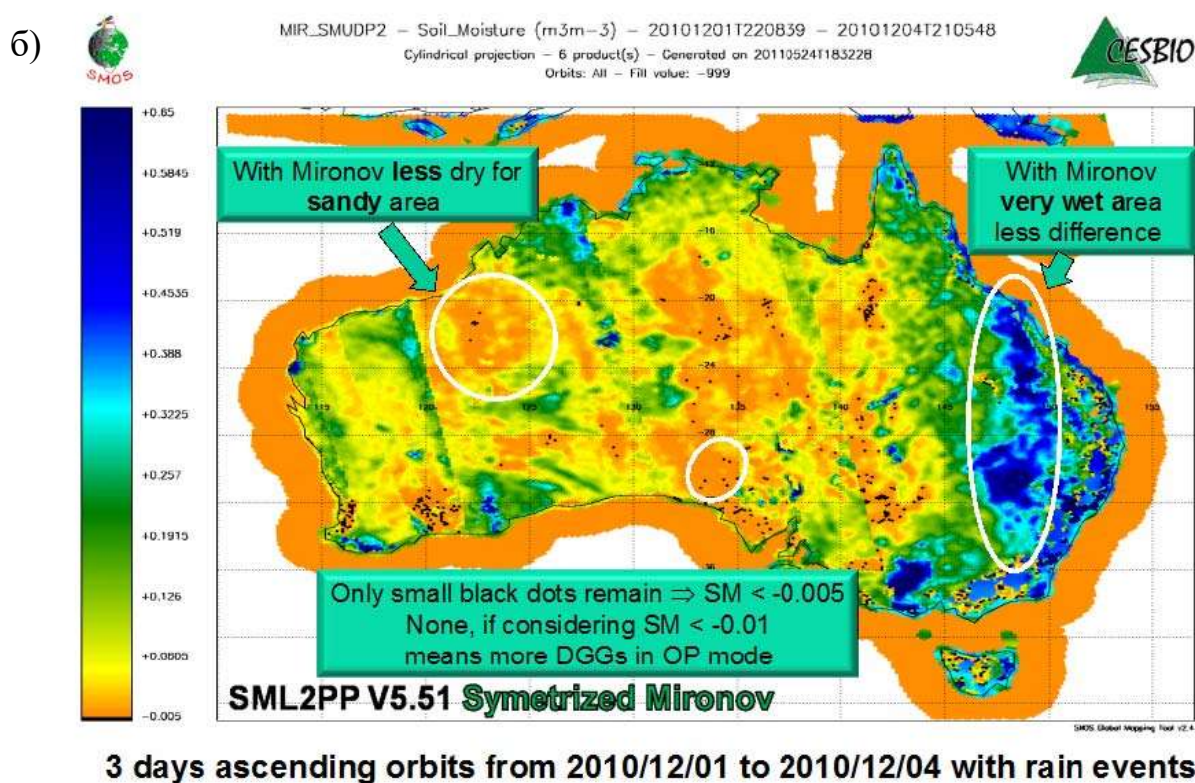
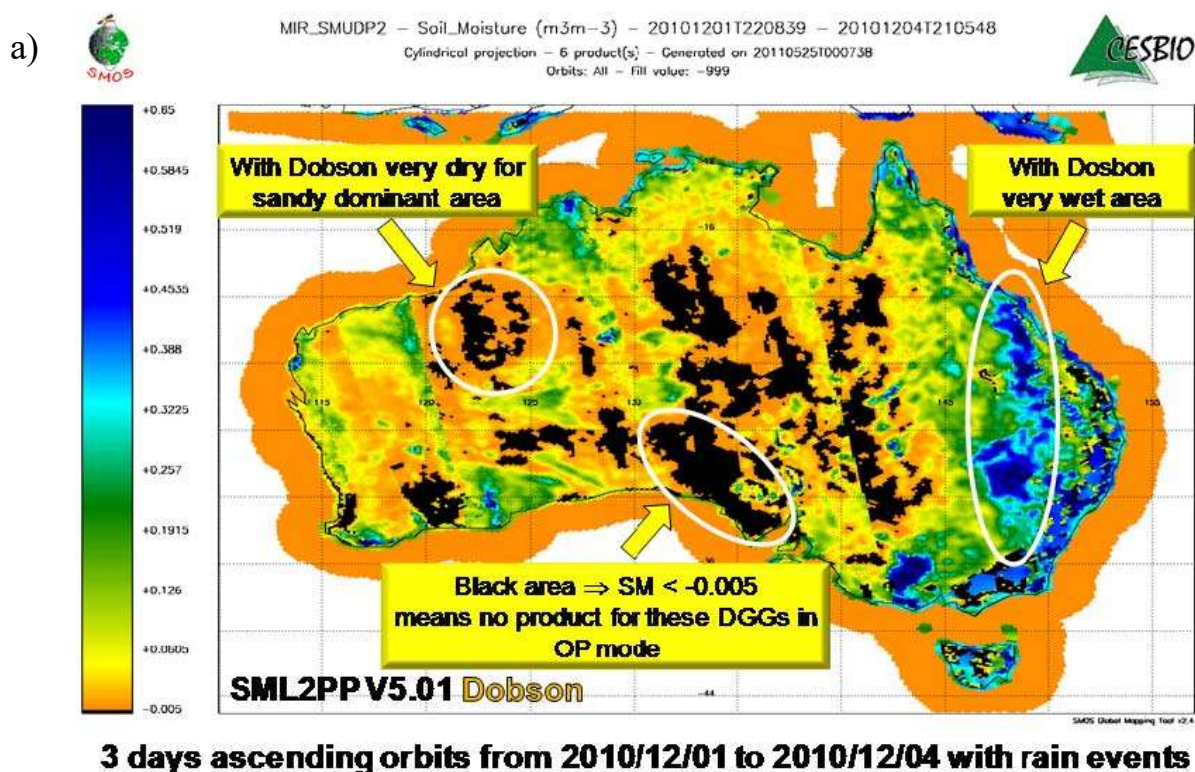


Рисунок 3.8 – Карты восстановленных влажностей, с помощью ПДМС (а) и МЗ ОРДМС (б), почв территории Австралии по данным спутника SMOS

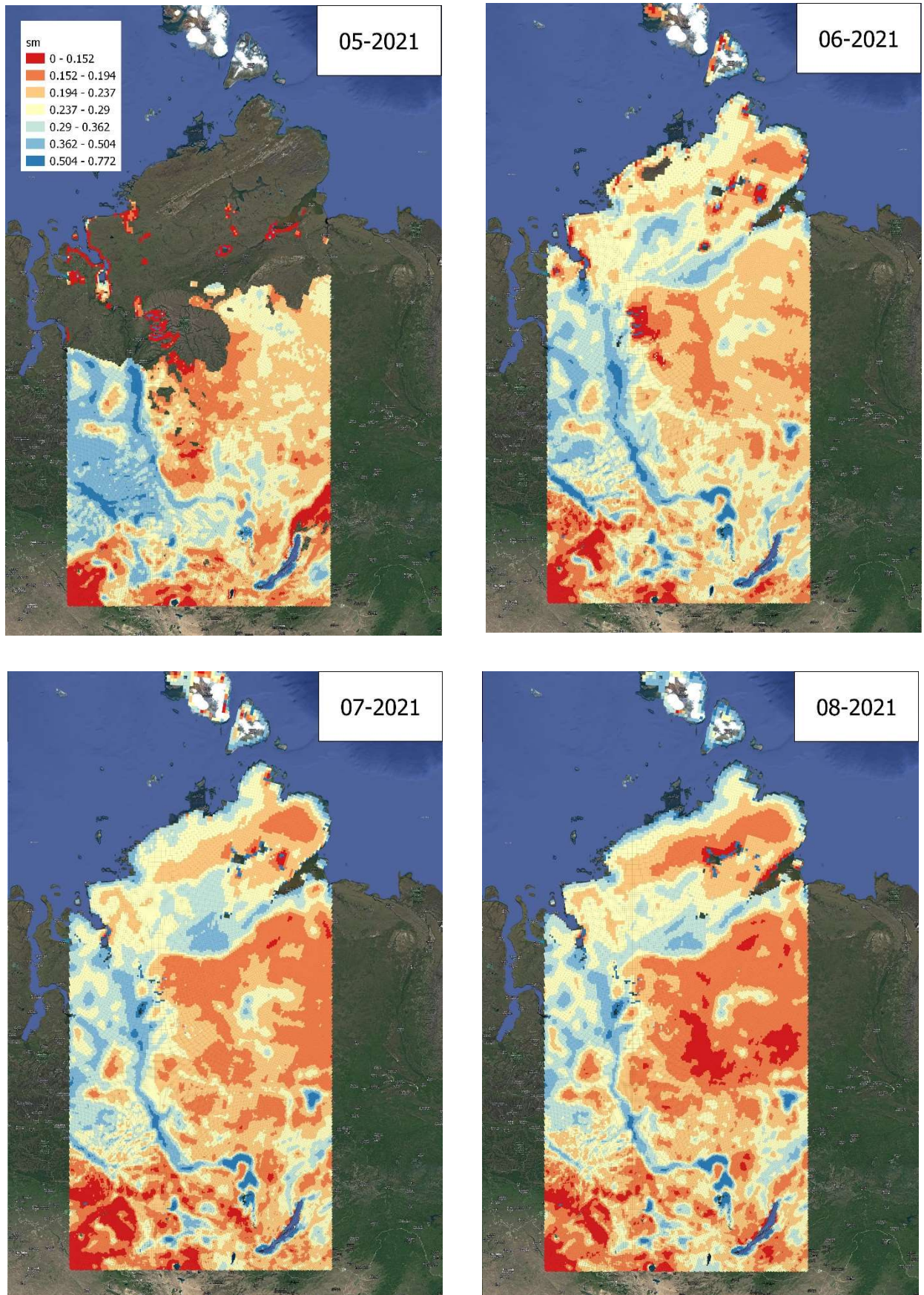


Рисунок 3.9 – Карты восстановленных влажностей, с помощью МЗ ОРДМС, почв территории Красноярского края по данным спутника SMAP

Для демонстрации восстановления влажности почв Красноярского края, с применением предлагаемой МЗ ОРДМС, на рисунке 3.9 приведены карты влажности для 4 месяцев (май-август). Анализ данных для построения карт влажности проводился в национальном центре данных по снегу и льду США (NSIDC) [86], для чего использовались данные получаемые со спутника SMAP. При рассмотрении рисунка 3.9 стоит учесть, что в обработке данных использовалась не только МЗ ОРДМС, в ходе анализа спутниковой информации, в зависимости от местности, применялись флаги открытой воды, замершей земли, леса, горной местности и др., при которых влажность не определялась вовсе (случаи с открытой водой) или использовались соответствующие диэлектрические модели для учета влияния растительности, шероховатости и т.д. Таким образом точность показанных карт влажности зависит не только от точности МЗ ОРДМС, но и от правильного учета внешних факторов.

Так же стоит отметить, что предложенный здесь способ определения параметров модели комплексной диэлектрической проницаемости для минеральных почв стал основой для разработки аналогичной процедуры определения параметров диэлектрической модели, учитывающей присутствие в почве органического вещества [87].

3.2 Температурно-зависимая ОРДМС

Представленные выше ОРДМС и МЗ ОРДМС разрабатывались на основе данных диэлектрических измерений, проведенных в узком диапазоне температур почв 20–25 °С. То есть температуру почвы можно было считать постоянным параметром. В реальных условиях температура изменяется в более широком диапазоне. В данной работе будет анализироваться только положительная часть температурного диапазона от 0 до 40 °С, так как при отрицательных температурах почвенная вода изменяет свое состояние и переходит в лед, диэлектрические свойства которого кардинально отличаются от диэлектрических свойств воды.

Для того, чтобы представить ОРДМС, выраженную формулами (1.32) – (1.36), как температурно-зависимую (ТЗ) диэлектрическую модель, некоторые из спектроскопических параметров ОРДМС должны быть представлены как функция температуры. Зависимость низкочастотного предела диэлектрической проницаемости от температуры можно представить с помощью уравнения Клаузиуса-Моссоти [88] в виде:

$$\varepsilon_{0p}(t) = \frac{1 + 2\exp\left(F_p(t_s) - \beta_p(t - t_s)\right)}{1 - \exp\left(F_p(t_s) - \beta_p(t - t_s)\right)} \quad (3.10)$$

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

$$F_p(t) = \ln\left(\frac{\varepsilon_{p0}(t) - 1}{\varepsilon_{p0}(t) + 2}\right) \quad (3.11)$$

Время релаксации в пикосекундах можно определить по формуле релаксации Дебая [88], учитывающей температурную зависимость:

$$\tau_p = \frac{48 \times 10^{-12}}{T} \exp\left(\frac{\psi_p}{T} - \theta_p\right) \quad (3.12)$$

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 $R = 8,31$ Дж/(моль · К) – универсальная газовая постоянная.

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

$$\sigma_p(t) = \sigma_p(t_s) + \beta_{\sigma p}(t - t_s) \quad (3.13)$$

здесь, $\beta_{\sigma p}$ температурный коэффициент приращения проводимости. Тогда как $\sigma_p(t_s)$ – значение проводимости при начальной температуре, t_s . Температура в (3.13) задается в градусах Цельсия. В результате, для расчетов с ТЗ ОРДМС требуются входные параметры, показанные в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры температурно-зависимой ОРДМС

№	Обозначение	Расшифровка
1	n_d	ППр сухой почвы
2	κ_d	НКЗ сухой почвы
3	W_t	ПССВ
4	$\varepsilon_{0b}(t_s)$	Низкочастотный предел ДП для связанной почвенной влаги при начальной температуре t_s
5	$\beta_b, (K^{-1})$	Коэффициент объемного расширения для связанной почвенной влаги
6	$\psi_b, (K)$	Коэффициент энергии активации для связанной почвенной влаги
7	θ_b	Энтропия коэффициента активации для связанной почвенной влаги
8	$\sigma_b(t_s), (Cm/m)$	Значение проводимости для связанной почвенной влаги при начальной температуре t_s
9	$\beta_{\sigma b}, (Cm/m K)$	Температурный коэффициент приращения проводимости для связанной почвенной влаги
10	$\varepsilon_{0u}(t_s)$	Низкочастотный предел ДП для свободной почвенной влаги при начальной температуре t_s
11	$\beta_u, (K^{-1})$	Коэффициент объемного расширения для свободной почвенной влаги
12	$\psi_u, (K^{-1})$	Коэффициент энергии активации для свободной почвенной влаги
13	θ_u	Энтропия коэффициента активации для свободной почвенной влаги
14	$\sigma_u(t_s), (Cm/m)$	Значение проводимости для свободной почвенной влаги при начальной температуре t_s
15	$\beta_{\sigma u}, (Cm/m K)$	Температурный коэффициент приращения проводимости для свободной почвенной влаги

В качестве примера нахождения параметров температурно-зависимой ОРДМС воспользуемся экспериментальными данными по почве D (см. таблицу 2.2), измеренными в [53]. Первым шагом будет нахождение спектроскопических параметров ОРДМС для фиксированной температуры. В работе [53] приведены экспериментальные данные диэлектрических измерений минеральных почв при фиксированных температурах 10, 20, 30 и 40 градусах Цельсия. Спектроскопические параметры модели для 20 °C нами уже найдены (см. рисунок 3.1), согласно таблице 2.2 почве D соответствуют квадратики с порядковым номером 11. Процедура нахождения этих параметров описана в пункте 2.1.2. Аналогичная процедура проводится для оставшихся температур: 10, 30 и 40 °C. Результаты проделанной работы сведены в таблицу 3.3. Следующим шагом является получение из данных таблицы 3.3

непосредственно самих параметров ТЗ ОРДМС. Для этого строятся температурные зависимости спектроскопических параметров ОРДМС по имеющимся значениям температуры (см. таблицу 3.3), которые подвергаются регрессионному анализу с применением формул (3.10) – (3.13), при этом начальная температура t_s считается равной 20 °С. Полученные в результате такого анализа параметры ТЗ ОРДМС сведены в таблицу 3.4).

Таблица 3.3 – Спектроскопические параметры ОРДМС для почвы D при различных температурах

Спектроскопические параметры	Температуры, °С			
	10	20	30	40
n_d	1,5			
κ_d	0,03952			
W_t	0,071			
ε_{0b}	66,5			
τ_b (пс)	13,8	10,5	8,4	7,04
σ_b (См/м)	0,160	0,200	0,243	0,290
ε_{0u}	103,9	100	96,4	93,1
τ_u (пс)	11,8	8,5	6,4	5,04
σ_u (См/м)	0,200	0,250	0,304	0,363

Таблица 3.4 – Параметры ТЗ ОРДМС для почвы D при начальной температуре 20 °С.

n_d	κ_d	W_t	$\varepsilon_{0b}(t_s)$	$\beta_b(K^{-1})$	$\psi_b(K^{-1})$	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)	$\varepsilon_{0u}(t_s)$	$\beta_u(K^{-1})$	$\psi_u(K^{-1})$	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	

В итоге, чтобы описать КДП минеральной почвы в положительном диапазоне температур с помощью ТЗ ОРДМС необходимо найти 15 входных параметров данной модели для конкретного типа почвы, перечисленных в таблице 3.2, и воспользоваться выражениями (1.32) – (1.36) и (3.10) – (3.13).

Оценка точности температурно-зависимой ОРДМС. Для определения точности ТЗ ОРДМС возьмем уже примененный выше алгоритм определения корреляции предсказанных с помощью диэлектрической модели значений КДП с экспериментально измеренными. В качестве эталона рассчитаем корреляцию между прогнозируемыми с помощью ОРДМС и измеренными значениями ДП и КП, взятыми из [53] для почвы D, на температурах 10, 20, 30 и 40 °С. Входные параметры ОРДМС для этой почвы, на указанных температурах, возьмем из таблицы 3.3. Входные параметры ТЗ ОРДМС для этой же почвы рассчитаем с использованием формул (1.32) – (1.36), (3.10) – (3.13) и параметров, приведенных в таблице 3.4. И, для контроля, рассчитаем корреляцию измеренных значений КДП, выбранной нами почвы D, и значений КДП, восстановленных с помощью ПДМС. Входные параметры ПДМС в зависимости от температуры рассчитывались в соответствии с диэлектрическими данными и формулами, приведенными в [46]. Результаты проведенных корреляционных анализов сведены в таблицу 3.5 и показаны на рисунках 3.10 и 3.11.

Таблица 3.5 – Параметры корреляционного анализа, характеризующие точность ТЗ ОРДМС в сравнении с ОРДМС и ПДМС

Модель	ДП, ε'					КП, ε''					Рис.
	$y = A + Bx$		R^2	СКО	нСКО (%)	$y = A + Bx$		R^2	СКО	нСКО (%)	
	A	B				A	B				
ПДМС ₁₀₋₄₀	-0,953	0,777	0,500	4,950	45	0,776	0,743	0,698	1,146	55	3.11
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	3.10

Подстрочные символы, 10–40, для ОРДМС и ПДМС символизируют, что предсказание значений КДП, с помощью этих моделей, производилось для температур из указанного диапазона. В связи с практически идентичными результатами корреляционных анализов для ОРДМС и ТЗ ОРДМС, график зависимости измеренных значений КДП от предсказанных показан только для ТЗ ОРДМС (рисунок 3.10).

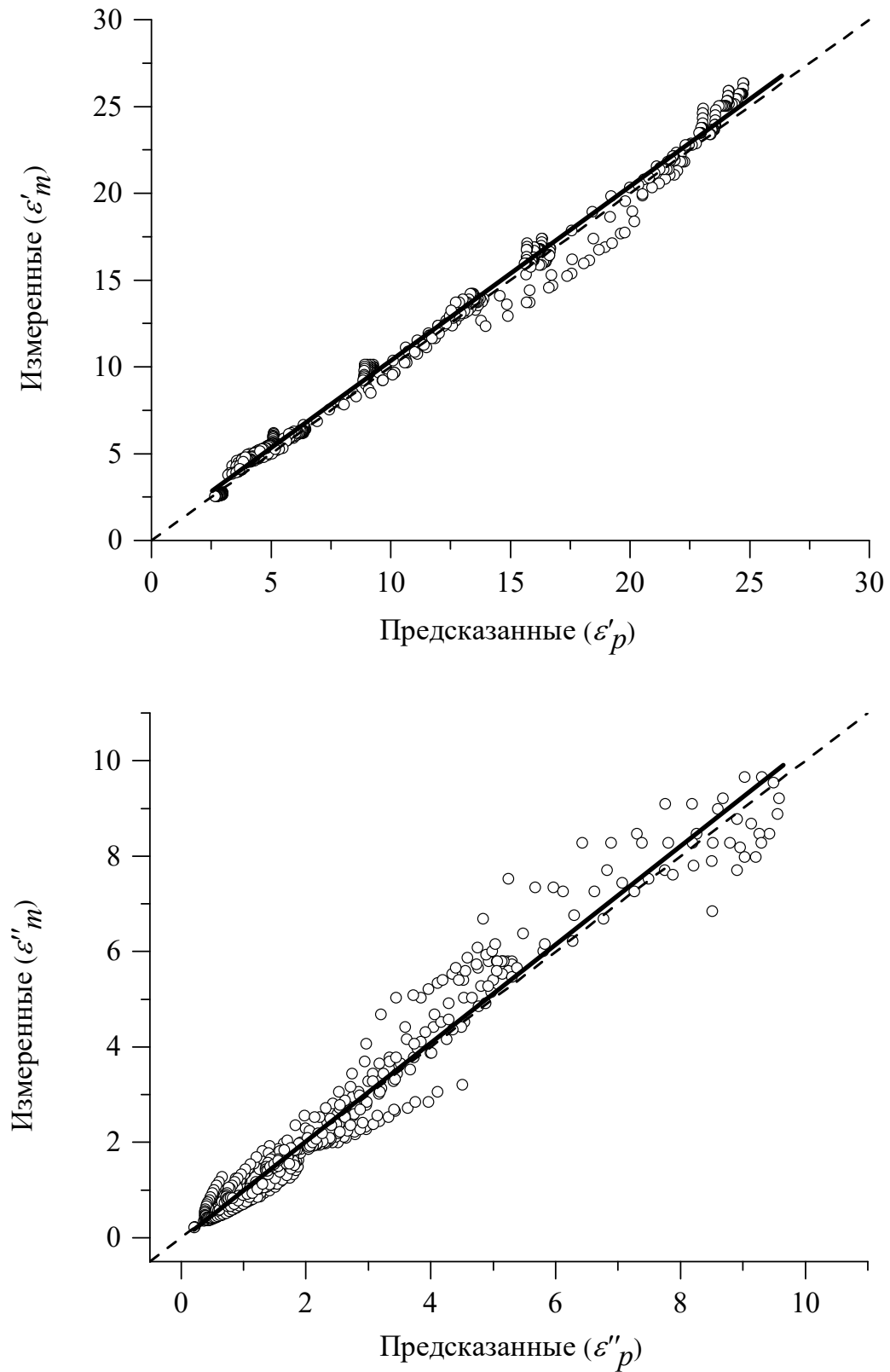


Рисунок 3.10 – Корреляция предсказанных с помощью ТЗ ОРДМС значений ДП, ε'_p и КП, ε''_p , с измеренными в [53] значениями ε'_m и ε''_m . Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии соответственно

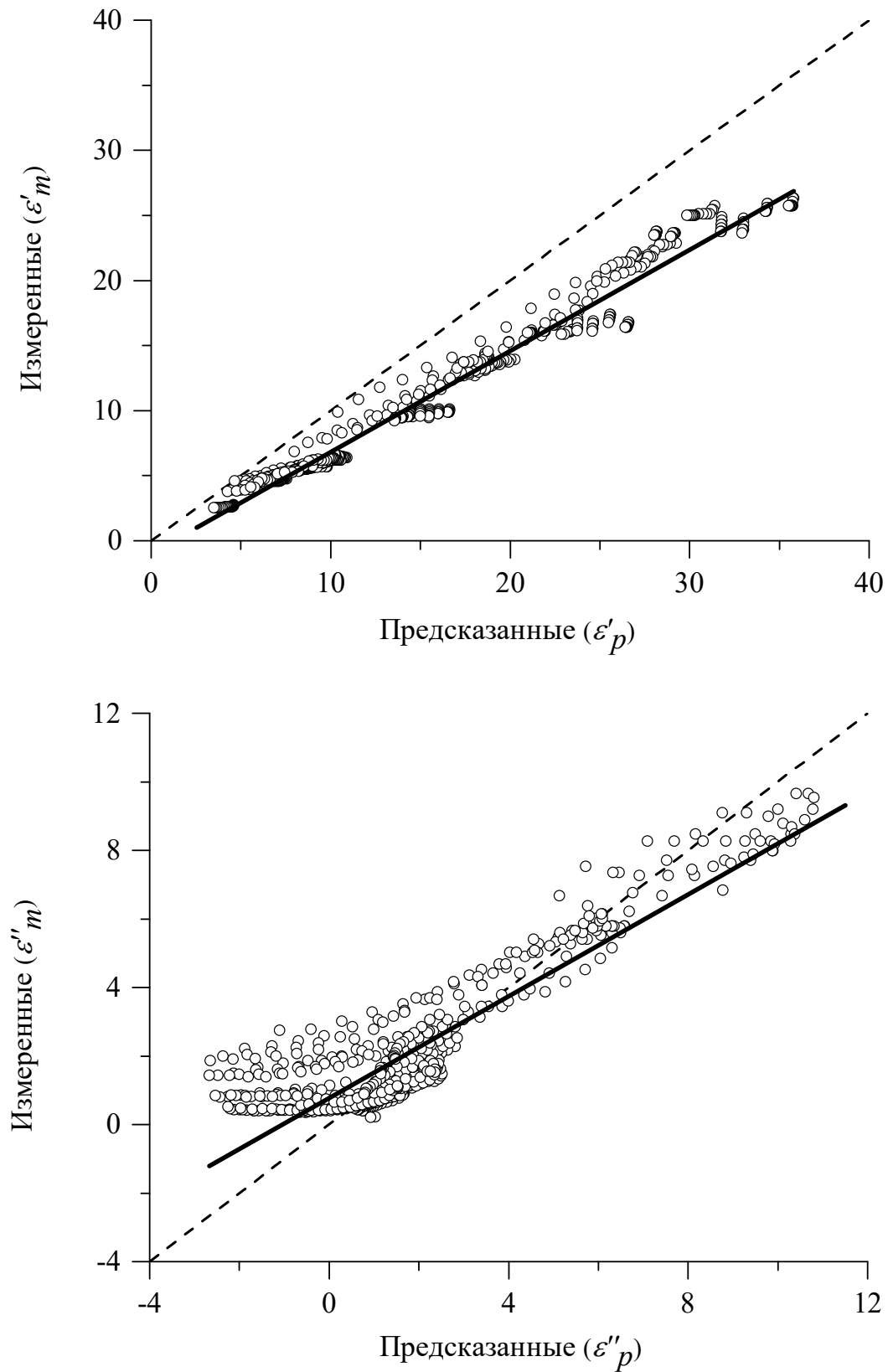


Рисунок 3.11 – Корреляция предсказанных с помощью ПДМС значений ДП, ϵ'_p и КП, ϵ''_p , с измеренными в [53] значениями ϵ'_m и ϵ''_m . Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии соответственно

В случае с ПДМС, хоть измеренные и прогнозируемые значения КДП демонстрируют довольно высокую степень корреляции (таблица 3.5), следует отметить, что прогнозы имеют заметное смещение относительно измеренных значений, см. уравнения регрессий (таблица 3.5) и отклонение линии регрессии от биссектрисы (рисунок 3.11). И, во-вторых, некоторые прогнозируемые значения КП принимают отрицательные величины в диапазоне измеренных значений КП от 0,5 до 3.

В целом, из проведенных анализов видно, что ТЗ ОРДМС обеспечивает диэлектрические предсказания в диапазоне температур от 10 до 40 °С, с той же точностью, что и ОРДМС, рассчитанная для конкретных температур из заданного диапазона. Стоит отметить, что напрямую сравнивать параметры точности моделей ОРДМС и ПДМС, показанных в таблице 3.5, будет некорректно, так как значения диэлектрических измерений почвы D, для которых проводились расчеты модельных значений КДП, являются зависимыми данными в случае использования ОРДМС и независимыми в случае использования ПДМС. Здесь стоит сравнить на сколько меняется точность модели при переходе предсказания модельных значений КДП для единичного значения температуры к предсказанию модельных значений КДП для ряда температур из заданного диапазона. Так, в случае ПДМС при переходе от предсказания модельных значений КДП для температуры 20 °С (см. строка ПДМС_{F1-F5/A-L} таблица 2.3) к их предсказанию для ряда температур из диапазона 10–40 °С (см. строка ПДМС₁₀₋₄₀ таблица 3.5) нСКО изменяется примерно на 10 %, а в случае ОРДМС при переходе от предсказания модельных значений КДП для температуры 20 °С (см. строка ОРДМС_{A-L} таблица 2.3) к их предсказанию для ряда температур из диапазона 10–40 °С (см. строка ОРДМС₁₀₋₄₀ таблица 3.5) нСКО изменяется на 3 %.

3.3 Температурно- и минералогически-зависимая ОРДМС

Представленная в предыдущем разделе модель носит скорее методологический, чем практический характер. Разработана методология введения температурной зависимости в расчет КДП для конкретного типа влажной почвы. Для того, чтобы модель имела практическое значение, необходимо найти зависимости параметров ТЗ ОРДМС от априори известного содержания глинистой фракции в почве. В данном разделе будет представлена температурно- и минералогически-зависимая (Т-МЗ) ОРДМС, которая объединит основные преимущества ТЗ ОРДМС и МЗ ОРДМС. Для этого будет анализироваться совместное влияние структуры почвы и ее температуры на диэлектрические спектры талых почв. В этом анализе участвовали только 5 образцов почв [53], с массовым содержанием глины 0, 14, 34, 54 и 76 % (см. таблицу 2.2, почвы В, D, Н, J и А). Значения параметров ОРДМС: ε'_d , ε''_d , W_t , ε_{ob} , ε_{ou} , τ_b , τ_u , σ_b и σ_u , при температурах 10, 20, 30 и 40°C, были получены путем регрессионного анализа спектров ДП и КП, измеренных для каждого типа почв, посредством функции КДП, рассчитанной по формулам (1.32) – (1.36), анализ производился для данных лежащих в частотном диапазоне от 0,3 до 26,5 ГГц и для всех доступных влажностей. Ранее эта методология была применена в [88; 24]. Далее, согласно методике ТЗ ОРДМС [90], параметры ОРДМС были подвергнуты регрессионному анализу с применением формул (3.10) – (3.13) для нахождения параметров ТЗ ОРДМС для каждого типа почвы, которые дополняют параметры ОРДМС относительно стартовой температуры ($t_s = 20$ °C) следующими переменными: β_b , β_u , ψ_b , θ_b , ψ_u , θ_u , $\beta_{\sigma b}$, $\beta_{\sigma u}$. Следующий этап, проведение регрессионного анализа параметров ТЗ ОРДМС как функции от процентного содержания глины (рисунок 3.12). Результатом проведенного анализа является набор функциональных зависимостей (3.14) – (3.28).

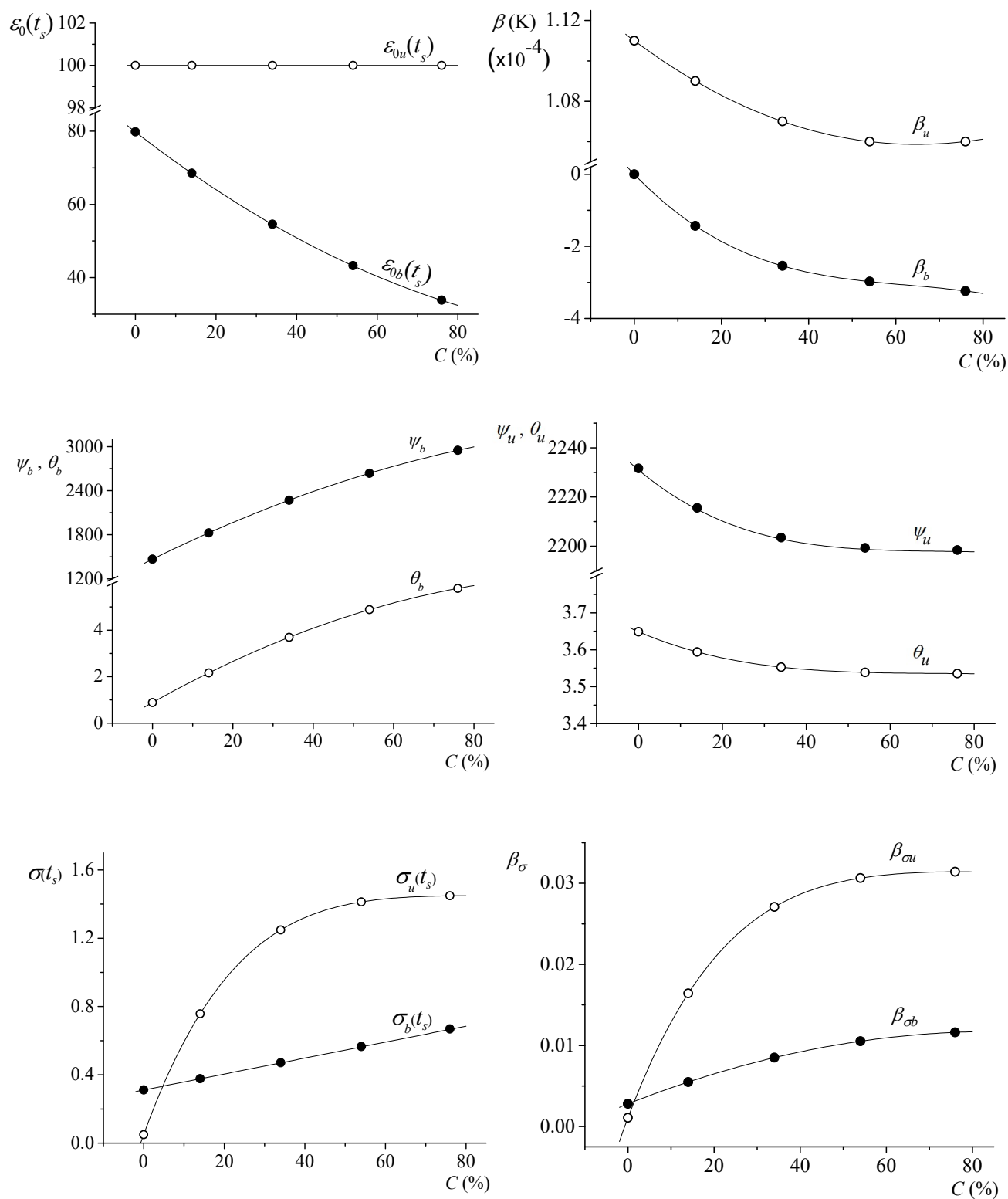


Рисунок 3.12 – Графики зависимостей температурно-зависимых параметров β_p , ψ_p , θ_p , $\beta_{\sigma p}$ связанной ($p = b$) и свободной ($p = u$) почвенной воды от процентного содержания глинистой фракции для почв В, D, Н, J, А из таблицы 2.2

$$n_d(C, t_s) = 1,634 - 0,539 \cdot 10^{-2}C + 0,2748 \cdot 10^{-4}C^2 \quad (3.14)$$

$$\kappa_d(C, t_s) = 0,03952 - 0,04038 \cdot 10^{-2}C \quad (3.15)$$

$$W_t(C, t_s) = 0,02863 + 0,30673 \cdot 10^{-2}C \quad (3.16)$$

$$\varepsilon_{ob}(C, t_s) = 79,8 - 85,4 \cdot 10^{-2}C + 32,7 \cdot 10^{-4}C^2 \quad (3.17)$$

$$\beta_b(C) = 8,67 \cdot 10^{-1} - 1,26 \cdot 10^{-5}C + 1,84 \cdot 10^{-7}C^2 - 9,77 \cdot 10^{-10}C^3 - 1,39 \cdot 10^{-1}C^4 \quad (3.18)$$

$$\varepsilon_{ou}(C, t_s) = 100 \quad (3.19)$$

$$\beta_u(C) = 1,11 \cdot 10^{-4} - 1,603 \cdot 10^{-7}C + 1,239 \cdot 10^{-9}C^2 + 8,33 \cdot 10^{-13}C^3 - 1,007 \cdot 10^{-14}C^4 \quad (3.20)$$

$$\Delta H_b(C)/R = 1467 + 2697 \cdot 10^{-2}C - 980 \cdot 10^{-4}C^2 + 1,368 \cdot 10^{-10}C^3 - 8,61 \cdot 10^{-13}C^4 \quad (3.21)$$

$$\Delta S_b(C)/R = 0,888 + 9,7 \cdot 10^{-2}C - 4,262 \cdot 10^{-4}C^2 + 6,79 \cdot 10^{-21}C^3 + 4,263 \cdot 10^{-22}C^4 \quad (3.22)$$

$$\Delta H_u(C)/R = 2231 - 143,1 \cdot 10^{-2}C + 223,2 \cdot 10^{-4}C^2 - 142,1 \cdot 10^{-6}C^3 + 27,14 \cdot 10^{-8}C^4 \quad (3.23)$$

$$\Delta S_u(C)/R = 3,649 - 4,894 \cdot 10^{-3}C + 7,63 \cdot 10^{-5}C^2 - 4,859 \cdot 10^{-7}C^3 + 9,28 \cdot 10^{-10}C^4 \quad (3.24)$$

$$\sigma_b(C, t_s) = 0,3112 + 0,467 \cdot 10^{-2}C \quad (3.25)$$

$$\beta_{ob}(C) = 0,0028 + 2,094 \cdot 10^{-4}C - 1,229 \cdot 10^{-6}C^2 - 5,03 \cdot 10^{-22}C^3 + 4,163 \cdot 10^{-24}C^4 \quad (3.26)$$

$$\sigma_u(C, t_s) = 0,05 + 1,4 \cdot (1 - (1 - C \cdot 10^{-2})^{4,664}) \quad (3.27)$$

$$\beta_{ou}(C) = 0,00108 + 1,413 \cdot 10^{-3}C - 2,555 \cdot 10^{-5}C^2 + 2,147 \cdot 10^{-7}C^3 - 7,11 \cdot 10^{-10}C^4 \quad (3.28)$$

Совокупность формул (1.32) – (1.36) и (3.10) – (3.28) представляет собой температурно- и минералогически-зависимую ОРДМС, которая обеспечивает восстановление спектров КДП талых почв как функцию от частоты электромагнитного поля, содержания глинистой фракции, влажности и температуры почвы.

Оценка точности Т-МЗ ОРДМС. Для оценки точности Т-МЗ ОРДМС был проведен корреляционный анализ на основе всех диэлектрических данных, доступных в [53], включая данные по 6 почвам (см. таблицу 2.2, почвы С, Е, G, I, K, L), которые не использовались для получения уравнений (3.14) – (3.28). Графики полученных корреляционных зависимостей показаны на рисунке 3.13.

Параметры оценки получились следующие: $R^2 = 0,98$; СКО = 2,003; нСКО = 12 % для ДП, и $R^2 = 0,95$; СКО = 1,362; нСКО = 31 % для КП. При этом уравнения линейной регрессии имеют следующий вид: $\varepsilon'_m = 0,317 + 0,963 \cdot \varepsilon'_p$ для ДП, и $\varepsilon''_m = -0,11 + 1,073 \cdot \varepsilon''_p$ для КП, где ε'_m и ε''_m измеренные значения КДП, а ε'_p и ε''_p предсказанные с помощью модели значения КДП. Полученные значения оценки точности Т-МЗ ОРДМС очень близки с значениями оценки точности для МЗ ОРДМС по независимым данным на температуре 20 °С (см. таблицу 3.2).

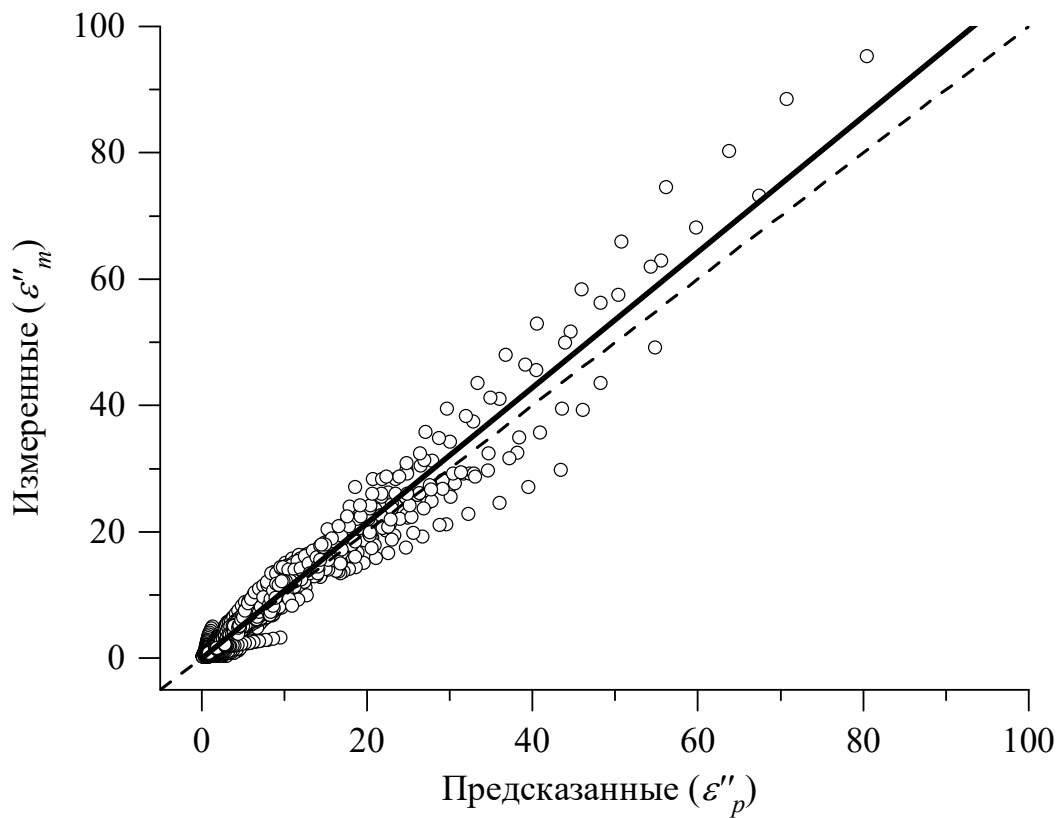
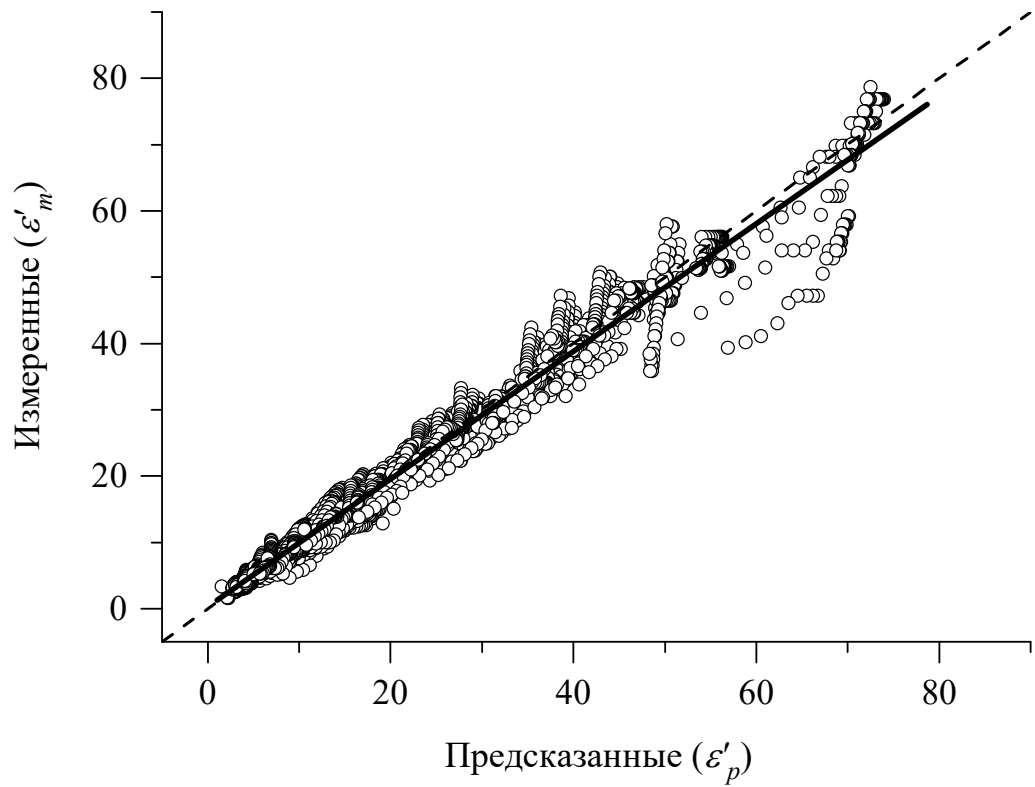


Рисунок 3.13 – Корреляция предсказанных с помощью Т-МЗ ОРДМС значений ДП, ε'_p и КП, ε''_p , с измеренными в [53] значениями ε'_m и ε''_m . Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии, соответственно

3.4 Выводы к главе 3

- Разработана МЗ ОРДМС, спектроскопические параметры которой находятся в функциональной зависимости от гранулометрического состава почвы. Кроме того, выдвинутое предположение, что основное влияние на КДП почвы оказывает процентное содержание в ней глинистой фракции, позволило сократить количество входных параметров, по сравнению с ПДМС, которой так же требуются значения песка и плотности сухого сложения. Тем самым исключаются ошибки вносимые этими дополнительными входными параметрами, что так же было отмечено сторонними авторами [85]. Входными параметрами предложенной модели являются: частота электромагнитной волны, влажность почвы и количество содержащейся в ней глины.
- Для талых почв, отличных от тех, чьи диэлектрические данные использовались для разработки МЗ ОРДМС, она демонстрирует заметно меньшую погрешность диэлектрических предсказаний, по сравнению с ошибками, наблюдаемыми в такой же ситуации для ПДМС.
- Индивидуальные для каждой почвы спектроскопические параметры ОРДМС, такие как низкочастотный предел диэлектрической проницаемости, время релаксации, и омическая проводимость, как для связанной, так и для свободной почвенной влаги, были установлены как функции от температуры с помощью уравнений Клаузиуса-Моссотти, Эйринга и линейных зависимостей, соответственно. В результате был получен набор физических параметров для ТЗ ОРДМС, состоящий из коэффициентов объемного расширения, энергий активации, энтропии активации и температурных коэффициентов изменения проводимости для различных компонентов почвенной воды.
- Доказано, что созданная ТЗ ОРДМС обеспечивает диэлектрические предсказания КДП почвы в диапазоне температур от 10 до 40 °C, с той же точностью, что и ОРДМС, использующая спектроскопические параметры, рассчитанные для конкретной температуры и почвы. С точки зрения среднеквадратичного

отклонения, погрешность предсказаний ТЗ ОРДМС оказалась в два раза меньше, чем с использованием ПДМС.

- Параметры ТЗ ОРДМС были подвергнуты регрессионному анализу как функции гравиметрического содержания глины с целью получения набора полиномиальных формул, которые, в сочетании с ТЗ ОРДМС представляют собой Т-МЗ ОРДМС. Таким образом, Т-МЗ ОРДМС обеспечивает восстановление КДП талых почв в зависимости от влажности, частоты, температуры и содержания глины, что до этого никогда не делалось ни одной из ранее существующих моделей.
- Ошибки предсказаний, полученных с помощью Т-МЗ ОРДМС, оказались того же порядка, что и предсказания полученные с помощью МЗ ОРДМС.

Глава 4. ОРДМС в мегагерцовом диапазоне частот

Представленная выше ОРДМС и разработанные на ее основе МЗ ОРДМС, ТЗ ОРДМС и Т-МЗ ОРДМС разрабатывались для прогнозирования диэлектрических спектров талых почв в частотном диапазоне от 0.3 до 26.5 ГГц. Однако, ошибки в диэлектрических прогнозах с помощью этих моделей [24], [91–93] заметно возрастают с уменьшением частоты, ниже примерно 1,0 ГГц. Это происходит из-за значительного увеличения диэлектрической проницаемости влажной почвы (как измерено в [53; 55; 94; 95]), особенно в случае почв богатых глинами, при снижении частоты от 1,0 ГГц до 1,0 МГц, что происходит из-за релаксации Максвелла-Вагнера [96]. В то время как диэлектрические модели на основе ОРДМС прогнозируют насыщение диэлектрической проницаемости до постоянного значения, т.к. они учитывают только дебаевскую, т.е. дипольную релаксацию молекул воды (высоко-частотную релаксацию). В данной главе разработаны много-релаксационные (МР) ОРДМС, учитывающие как высокочастотную, так и низкочастотные релаксации (Максвелла-Вагнера). Главным отличием предлагаемых моделей является то, что они учитывают низкочастотные релаксационные процессы в рамках рефракционной модели, в отличие от комбинированных моделей других авторов [59], где учет низкочастотных релаксаций производится путем добавления их к рефракционной модели. Такой подход упрощает практическое применение предлагаемых много-релаксационных моделей и стал возможен вследствие того, что практическое применение данных моделей на частотах ниже десятков мегагерц, где нет линейной зависимости КПП от влажности, не предполагается.

4.1 Двух релаксационная ОРДМС

Согласно описанной в главах 1 и 2 концепции ОРДМС [75; 79], диэлектрическая проницаемость ε'_m и коэффициент потерь ε''_m талых почв как функция объемной влажности W могут быть представлены в виде рефракционной диэлектрической модели смеси (1.33) – (1.34), которая состоит из диэлектрической

проницаемости почвы сухого сложения и диэлектрической проницаемости почвенной влаги (связанного и свободного типа). КДП почвы сухого сложения от частоты не зависит и находится, как описано в пункте 1.3.3. А вот КДП почвенной влаги являются частотно зависимыми. В ранее предложенных ОРДМС [79; 80] данная зависимость описывалась одно-релаксационными уравнениями Дебая (1.36). В предлагаемой много-релаксационной ОРДМС, вследствие расширения ее диапазона применимости в МГц область, мы встречаемся с дополнительной низкочастотной релаксацией, учет которой происходит путем преобразования выражений (1.36) в двух-релаксационные уравнения Дебая:

$$\begin{aligned}\varepsilon'_p &= \frac{\varepsilon_{0pL} - \varepsilon_{0pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pL})^2} + \frac{\varepsilon_{0pH} - \varepsilon_{\infty pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pH})^2} + \varepsilon_{\infty pH}, \\ \varepsilon''_p &= \frac{\varepsilon_{0pL} - \varepsilon_{0pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pL})^2} \cdot 2\pi f \tau_{pL} + \frac{\varepsilon_{0pH} - \varepsilon_{\infty pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pH})^2} \cdot 2\pi f \tau_{pH} + \frac{\sigma_p}{2\pi f \varepsilon_r}\end{aligned}\quad (4.1)$$

Здесь ε_{0p} и $\varepsilon_{\infty pq}$ – низкочастотный и высокочастотный пределы диэлектрической постоянной для ионной ($q = L$) и дипольной ($q = H$) релаксаций, соответственно, где $\varepsilon_{\infty p} = \varepsilon_{0pH}$. В то время как τ_{pL} и τ_{pH} , обозначают времена релаксации, также для ионной ($q = L$) и дипольной ($q = H$) релаксаций. Все эти параметры должны быть отнесены к связанной ($p = b$) или свободной ($p = u$) воде в почве; $\varepsilon_r = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость свободного пространства. Предполагается, что связанная вода имеет два типа релаксации: дипольную и ионную. В то время как свободная вода обладает только дипольной релаксацией. Формулы Дебая для одиночной релаксации в свободной почвенной влаге следуют из (4.1), при $\varepsilon_{0uL} = \varepsilon_{0uH}$. Как видно из уравнений (1.32) – (1.35) и (4.1), в контексте много-релаксационной ОРДМС, диэлектрический спектр определенного типа влажной почвы может быть рассчитан через следующий набор параметров:

- 1) показатель преломления, n_d и нормированный коэффициент затухания κ_d для сухой почвы;
- 2) максимальная доля связанной воды, W_t ;
- 3) низкочастотный, ε_{0pq} , ε_{0pL} и высокочастотный, $\varepsilon_{\infty pq}$ пределы диэлектрической постоянной для связанной ($p = b$) и свободной ($p = u$) воды в почве,

касающиеся как ионной ($q = L$), так и дипольной ($q = H$) релаксации;

- 4) времена релаксации для ионной, τ_{pL} и дипольной, τ_{pH} , релаксации, связанной ($p = b$) и свободной ($p = u$) воды в почве;
- 5) омическая проводимость для связанной, σ_b и свободной σ_u воды в почве.

Вышеперечисленные параметры были найдены для трех почв, взятых из работ [53; 55]. Методика определения расчетных значений диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь к измеренным была взята из работы [79]. Для анализа использовались данные, измеренные при температуре 20 °С для нескольких типов почв, а именно: 1 – илистый песок [53]; 2 – пылеватый суглинок [55]; 3 – серая глина [53], показанные на рисунках 4.1–4.3 (точки). Структурный состав этих почв представлен в таблице 4.1. Заметное увеличение измеренной диэлектрической проницаемости наблюдается на рисунках 4.1–4.3, когда частота снижается в МГц диапазон частот, что указывает на наличие релаксации Максвелла-Вагнера.

На первом этапе подбора были рассчитаны значения n_d , κ_d и W_t , а также параметры дипольной релаксации ε_{0pH} , $\varepsilon_{\infty pH}$, τ_{pH} и омическая проводимость, σ_p , связанной ($p = b$) и свободной ($p = u$) почвенной воды, соответственно. Для этого были использованы функциональные зависимости МЗ ОРДМС и значения содержания глины, приведенные в таблице 4.1. Затем были получены параметры ионной релаксации ε_{0b} , τ_{bL} и σ_b . При этом значения n_d , κ_d , W_t , ε_{0pH} , $\varepsilon_{\infty pH}$, τ_{pH} , σ_p , рассчитанные на первом этапе, использовались в качестве начальных значений для уточнения на втором этапе регрессионного анализа. Все параметры, полученные этим методом, сведены в таблице 4.1. Эти параметры совместно с формулами (1.32–1.35) и (4.1) представляют много-релаксационную ОРДМС. На рисунках 4.1–4.3 представлены графики для спектров ДП и КП, рассчитанных с использованием формул (1.32–1.35), (4.1), и спектроскопических параметров из таблицы 4.1 (сплошные линии). Как видно из этих графиков спектры, соответствующие МР ОРДМС (сплошные линии), очень хорошо соответствуют измеренным значениям (точкам) во всем представленном диапазоне частот. Это стало возможным благодаря одновременному учету как дипольной, так и ионной релаксации связанной почвенной воды.

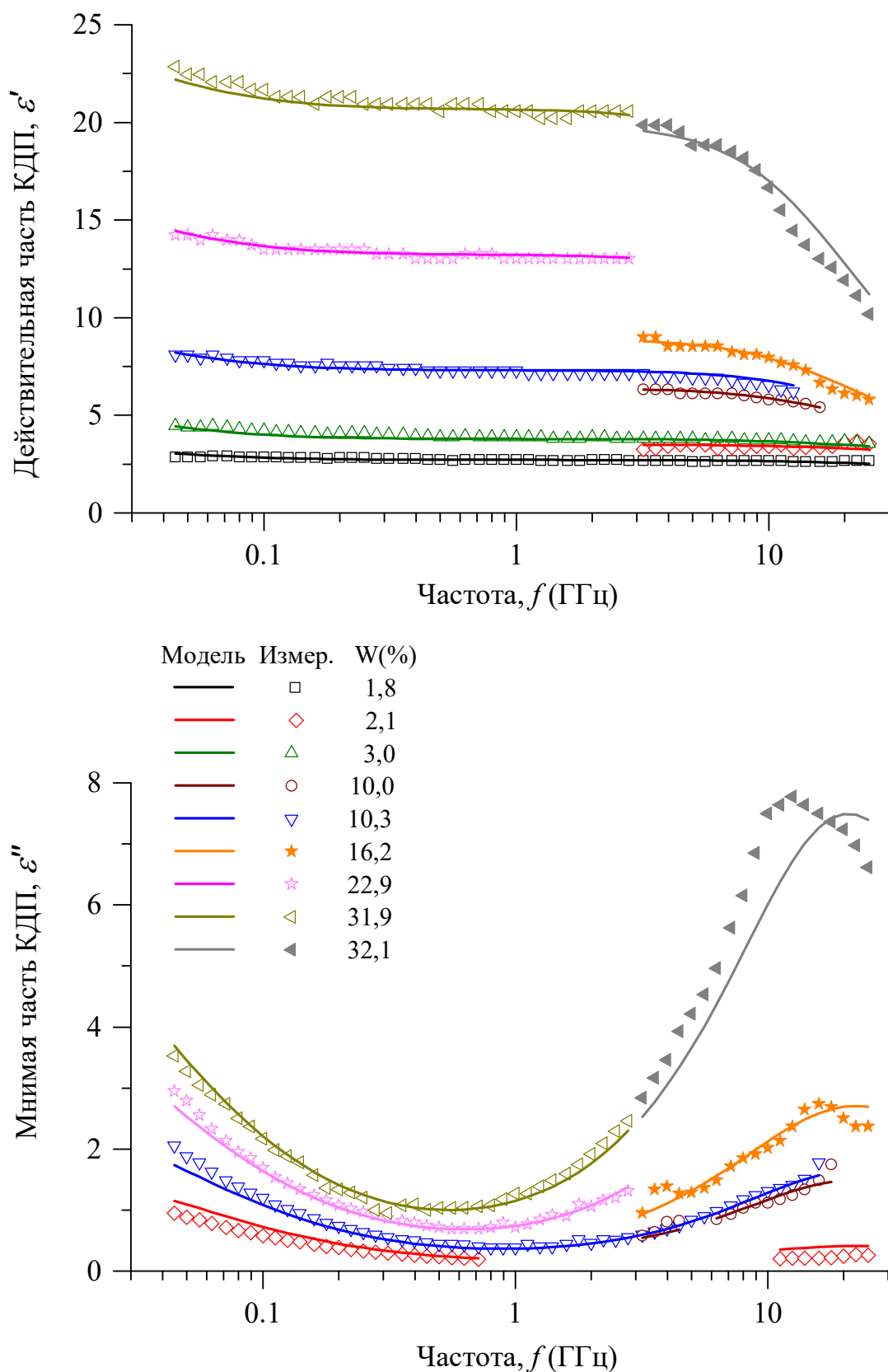


Рисунок 4.1 – Спектры ε' и ε'' для почвы №1 (таблица 4.1). Точки – экспериментальные данные, линии – восстановленные с помощью МР ОРДМС значения. Значения объемной влажности, $W(\%)$ указаны в легенде к рисункам

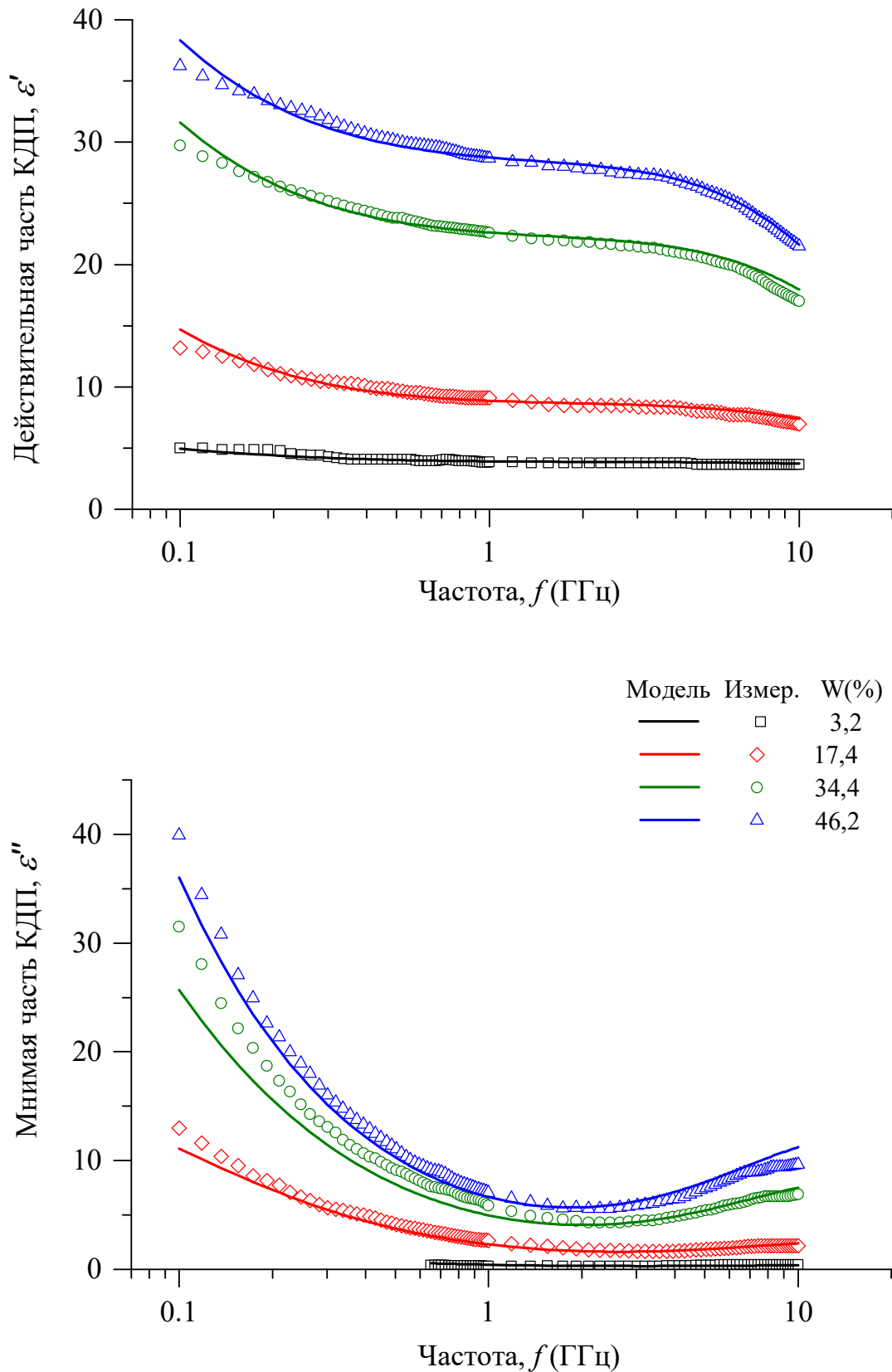


Рисунок 4.2 – Спектры ε' и ε'' для почвы №2 (таблица 4.1). Точки – экспериментальные данные, линии – восстановленные с помощью МР ОРДМС значения. Значения объемной влажности, $W(\%)$ указаны в легенде к рисункам

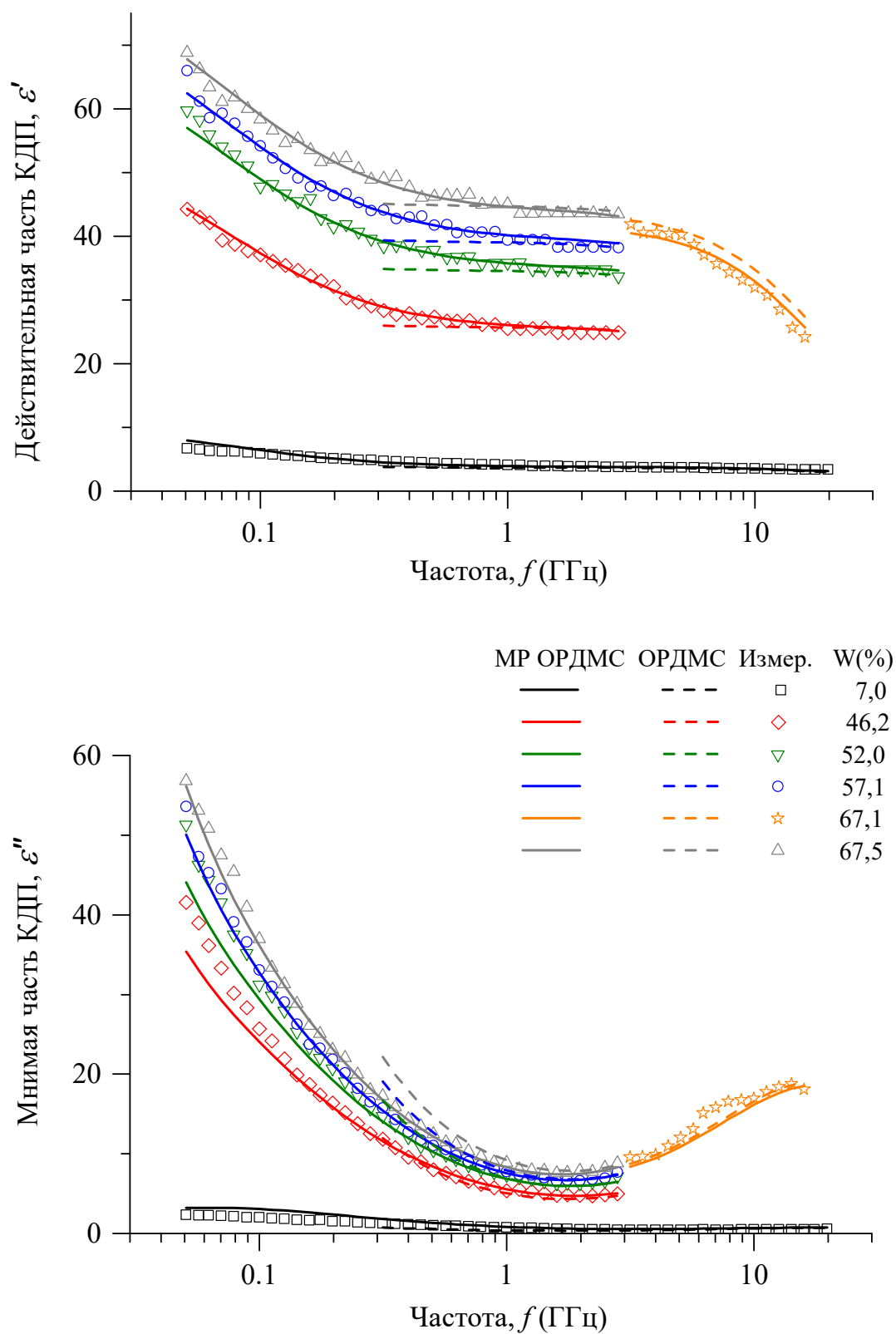


Рисунок 4.3 – Спектры ϵ' и ϵ'' для почвы №3 (таблица 4.1). Точки – экспериментальные данные, линии – восстановленные с помощью MR ОРДМС значения, пунктирные линии – восстановленные с помощью ОРДМС значения. Значения объемной влажности, $W(\%)$ указаны в легенде к рисункам

Таблица 4.1 – Параметры МР ОРДМС для исследуемых почв

Источник данных	№1 Д.О. Куртис [53]		№2 Н. Вагнер [55]		№3 Д.О. Куртис [53]	
Физические параметры почв	Песок = 88 % Ил = 8 % Глина = 4 %		Песок = 19,9 % Ил = 49,8 % Глина = 29,7 %		Песок = 2 % Ил = 64 % Глина = 34 %	
Спектроскопические параметры						
W_t (см ³ /см ³)	0,030		0,123		0,133	
№ п/п	W (см ³ /см ³)	n_d	W (см ³ /см ³)	n_d	W (см ³ /см ³)	n_d
1	0,018	1,50	0,032	1,75	0,070	1,48
2	0,021	1,70	0,174	1,65	0,462	1,20
3	0,030	1,70	0,344	1,90	0,520	1,55
4	0,100	1,65	0,462	1,45	0,571	1,45
5	0,103	1,80			0,620	1,25
6	0,162	1,55			0,610	1,35
7	0,229	1,60				
8	0,319	1,70				
9	0,321	1,60				
κ_d	0,020		0,027		0,020	
ε_{0bL}	1000		518		518	
ε_{0bH}	85		60		60	
ε_{0uH}	100		100		100	
$\varepsilon_{\infty pH}$	4,9		4,9		4,9	
τ_{bL} (нс)	12,0		2,5		2,1	
τ_{bH} (пс)	10		12		12	
τ_{uH} (пс)	8,5		10,6		8,5	
σ_b (См/м)	0,010		0,500		0,306	
σ_u (См/м)	0,020		0,550		0,269	

На рисунке 4.3 добавлены графики спектров диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь, рассчитанных с использованием ОРДМС, имеющей одну релаксацию (пунктирные линии). Так как частотный диапазон применимости

данной модели лежит в пределах от 0,3 до 26,5 ГГц, то восстановленные спектры рассчитывались, так же, в этом диапазоне. Из рисунка 4.3 хорошо видно, что при снижении частоты ниже 1 ГГц экспериментальные данные (точки) и восстановленные с помощью одно-релаксационной ОРДМС спектры КДП (пунктирные линии) начинают расходиться. И чем больше уменьшается частота, тем сильнее возрастает расхождение.

Оценка точности диэлектрических предсказаний двух-релаксационной ОРДМС. Для оценки точности МР ОРДМС измеренные значения КДП были сопоставлены с предсказанными посредством данной модели значениями, и рассчитаны коэффициент корреляции и стандартное отклонение, соответствующие линейной регрессии (см. рисунки 4.4, 4.5, 4.6). Кроме того, чтобы оценить ошибку, смещения линейной регрессии от соответствующих биссектрис, были получены уравнения линейной регрессии. Рассчитанные значения коэффициента детерминации, СКО и уравнений линейной регрессии приведены в таблице 4.2. Как видно из этих оценок, погрешность много-релаксационной ОРДМС в мегагерцовом и гигагерцовом диапазонах частот является такого же порядка, что и соответствующие ей диэлектрические измерения, как и в случае одно-релаксационной ОРДМС в гигагерцовом диапазоне частот.

Так же проведено сравнение точности МР ОРДМС с ПДМС для ряда почв [21] в диапазоне частот от 0,3 до 1,3 ГГц. Структурный состав почв из [21] приведен в таблице 4.3. Данные измерены при температуре 20 °С, в диапазоне влажностей от 5 до 25 %. Всего получилось 126 экспериментальных точек, для которых были восстановлены значения КДП с помощью МР ОРДМС и ПДМС. Результаты корреляции экспериментальных данных и восстановленных значений сведены в таблицу 4.4, графические зависимости отображены на рисунках 4.7, 4.8.

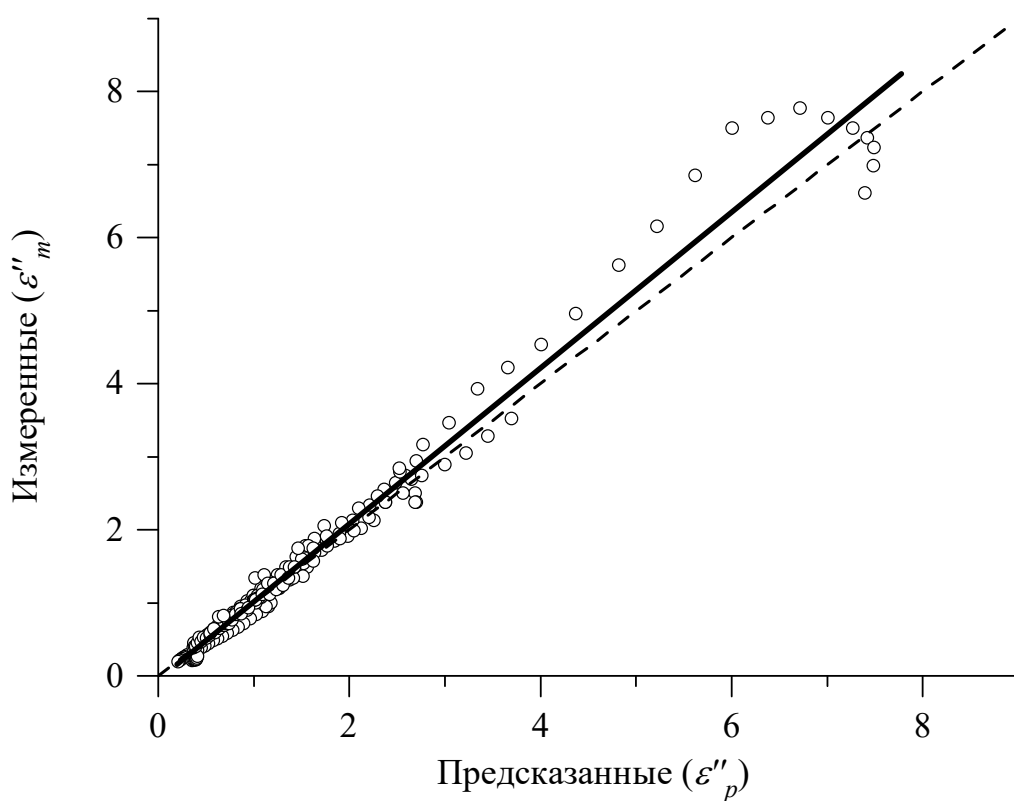
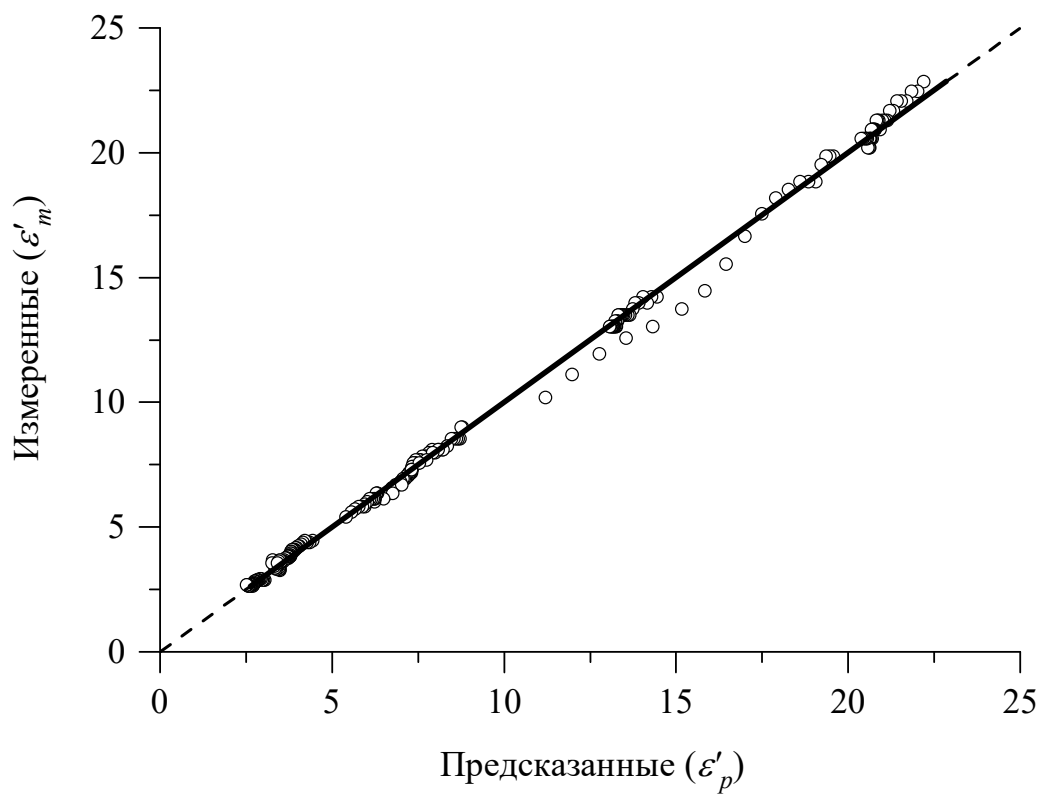


Рисунок 4.4 – Корреляция предсказанных с помощью МР ОРДМС значений ДП, ε'_p и КП, ε''_p , с измеренными для почвы №1 (таблица 4.1) значениями ε'_m и ε''_m . Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии, соответственно

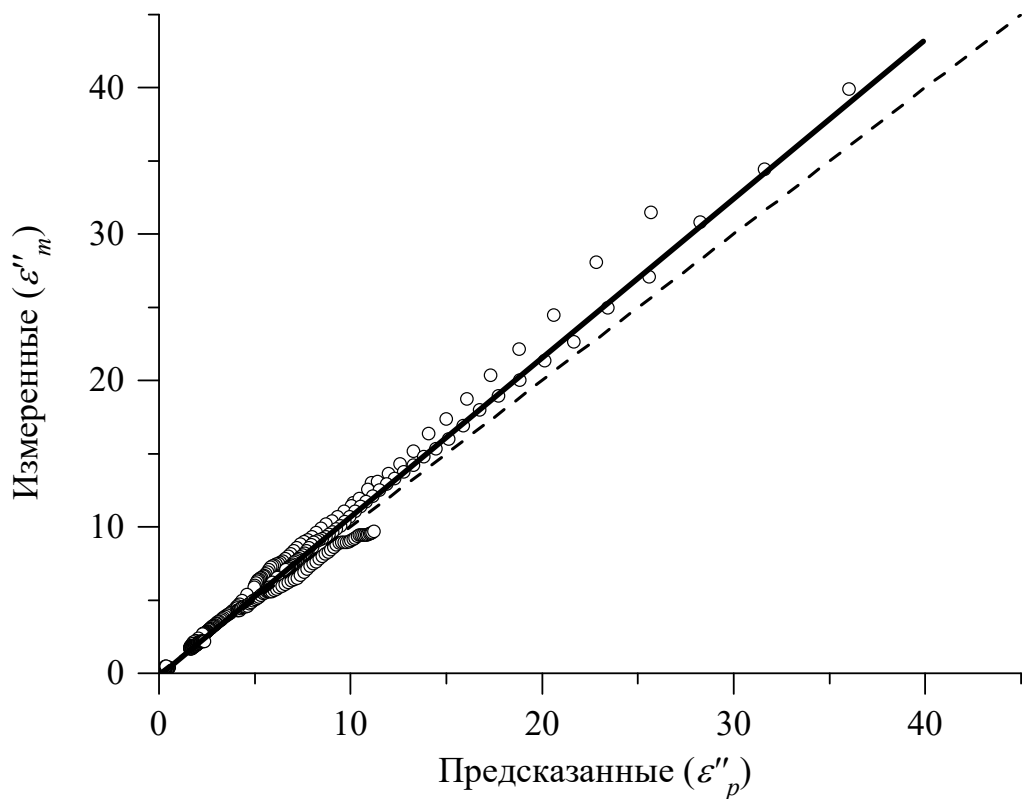
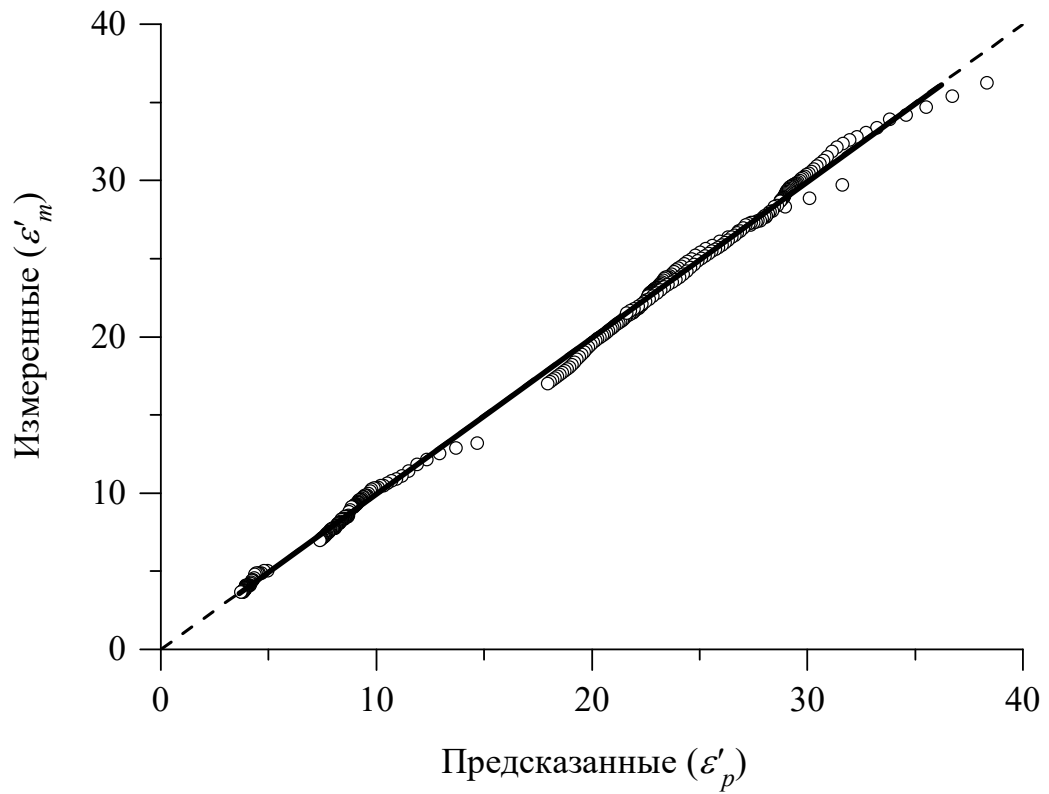


Рисунок 4.5 – Корреляция предсказанных с помощью МР ОРДМС значений ДП, ε'_p и КП, ε''_p , с измеренными для почвы №2 (таблица 4.1) значениями ε'_m и ε''_m . Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии, соответственно

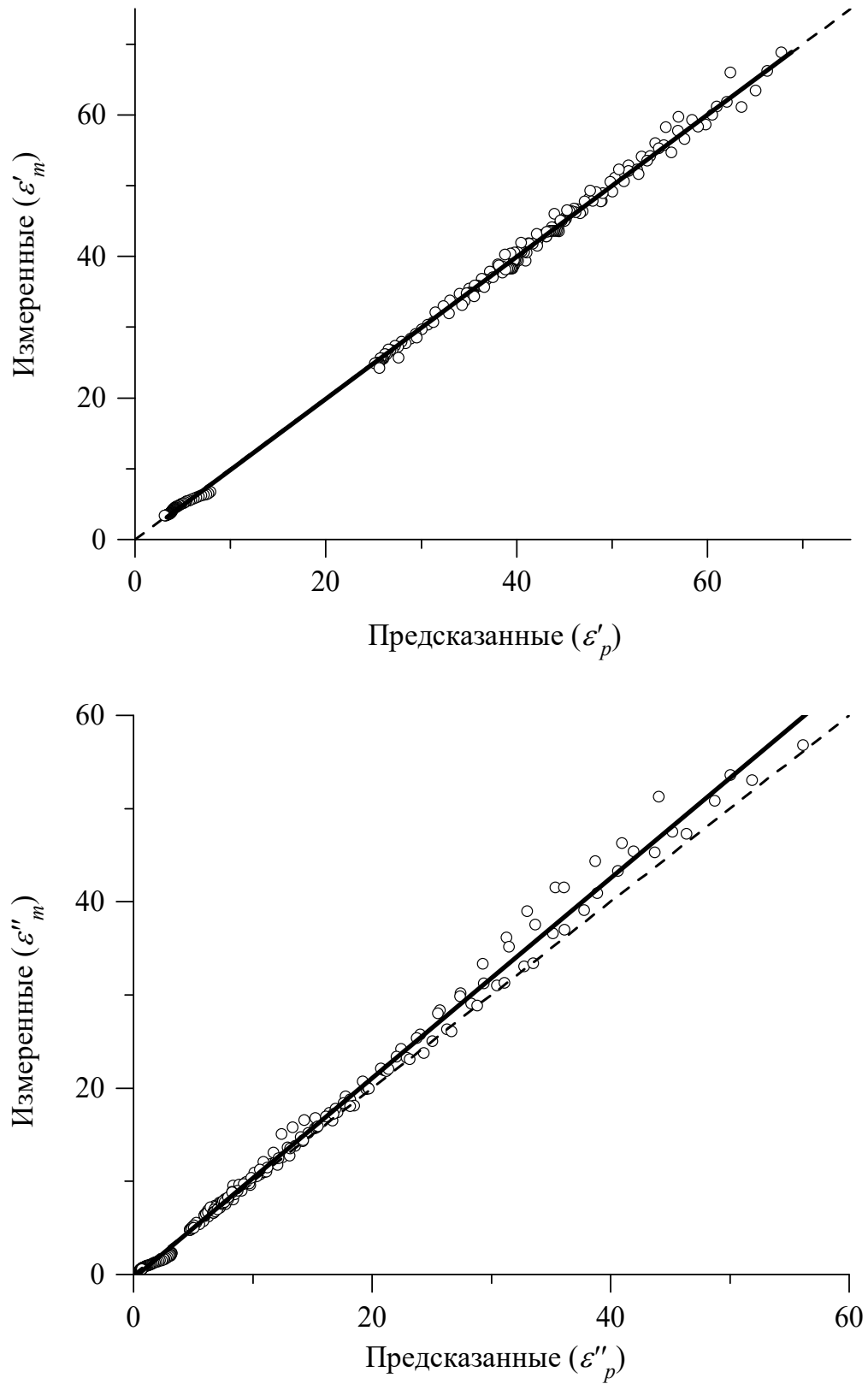


Рисунок 4.6 – Корреляция предсказанных с помощью МР ОРДМС значений ДП, ε'_p и КП, ε''_p , с измеренными для почвы №3 (таблица 4.1) значениями ε'_m и ε''_m . Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии, соответственно

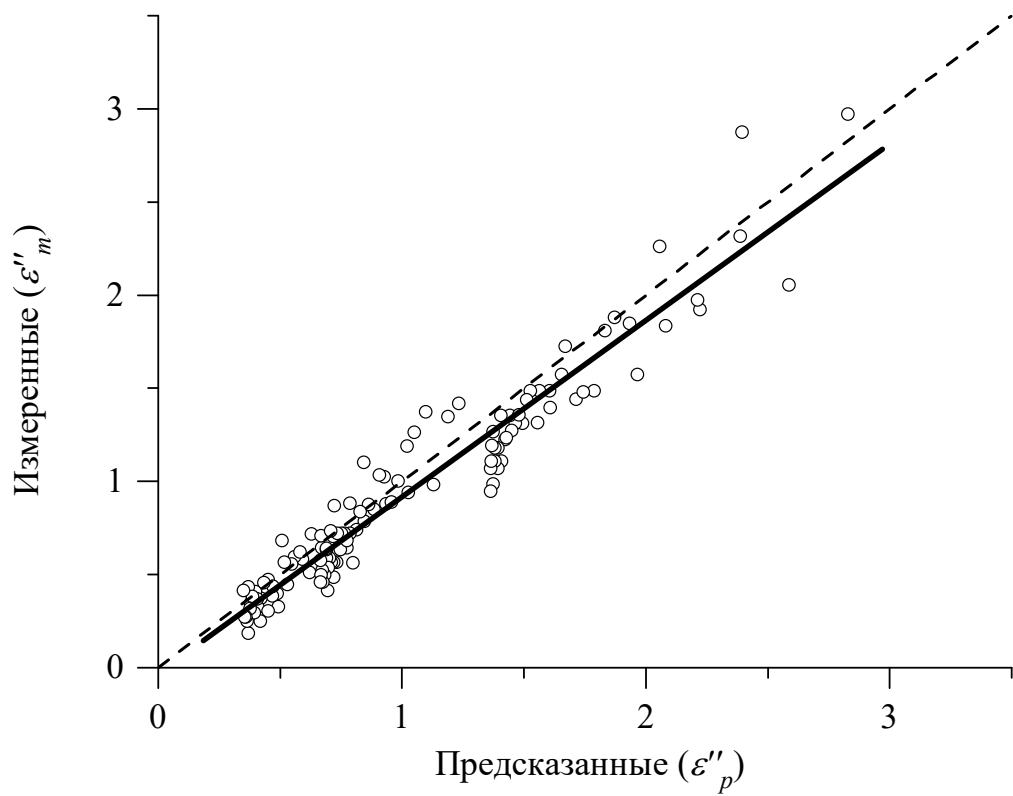
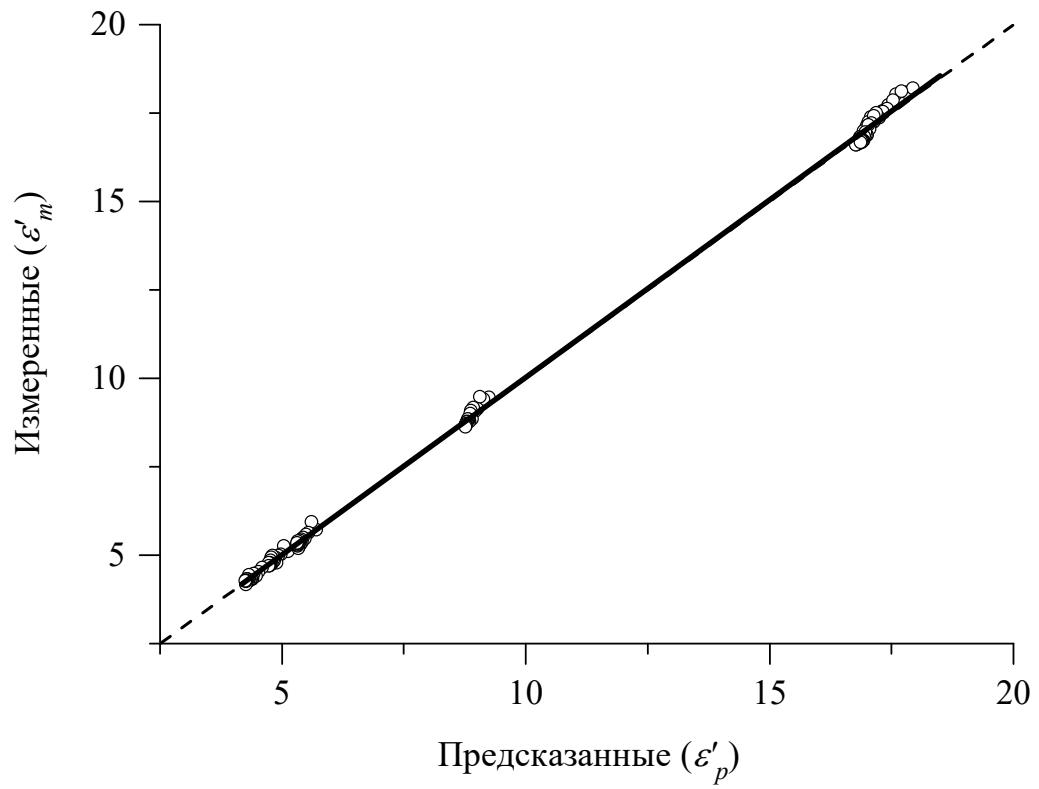


Рисунок 4.7 – Корреляция предсказанных с помощью МР ОРДМС значений ДП, ε'_p и КП, ε''_p , с измеренными для четырех почв (таблица 4.3) значениями ε'_m и ε''_m . Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии, соответственно

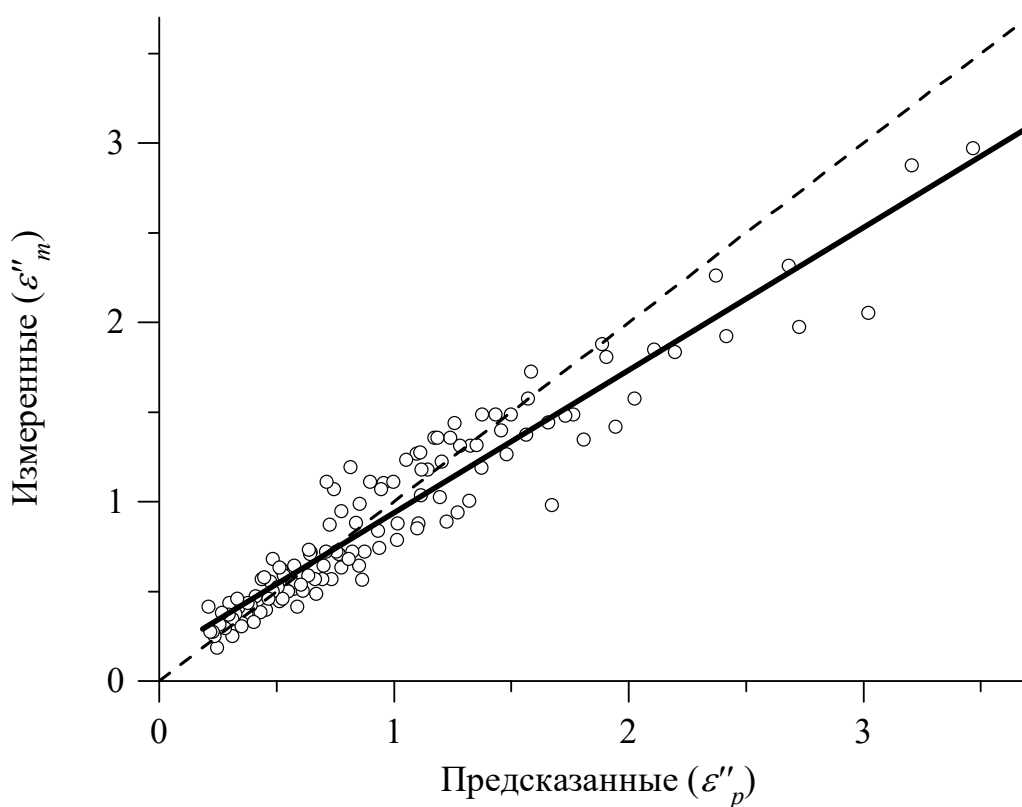
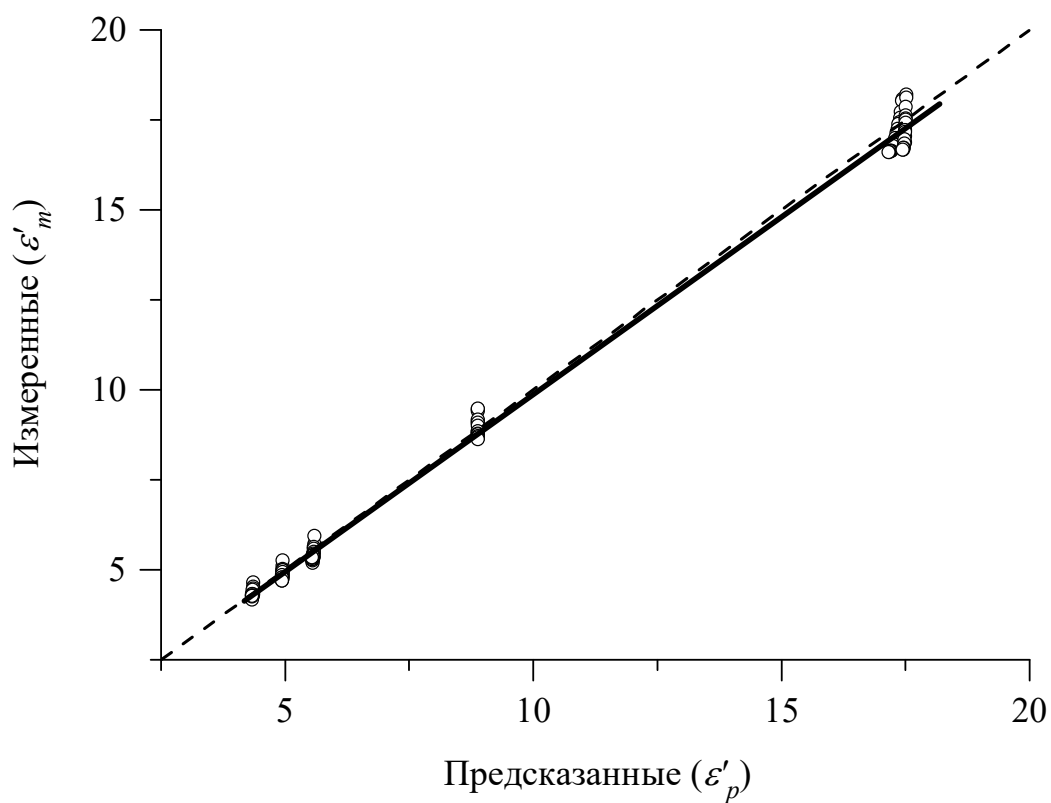


Рисунок 4.8 – Корреляция предсказанных с помощью ПДМС значений ДП, ε'_p и КП, ε''_p , с измеренными для четырех почв (таблица 4.3) значениями ε'_m и ε''_m . Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии, соответственно

Таблица 4.2 – Параметры корреляционного анализа, характеризующие точность МР ОРДМС

Модель	ДП, ε'					КП, ε''					Рис.
	$y = A + Bx$		R^2	СКО	нСКО (%)	$y = A + Bx$		R^2	СКО	нСКО (%)	
	A	B				A	B				
№ 1	-0,013	1,001	0,998	0,248	3	-0,051	1,067	0,975	0,252	16	4.4
№ 2	-0,063	0,999	0,999	0,363	2	-0,195	1,087	0,975	0,909	15	4.5
№ 3	-0,209	1,004	0,998	0,766	2	-0,425	1,073	0,988	1,439	10	4.6

Таблица 4.3 – Структурный состав почв из источника [21]

Почвы	Песок (%)	Ил (%)	Глина (%)
Field 1	50	35	15
Field 2	40	55	5
Field 3	30	60	10
Field 4	15	65	20

Таблица 4.4 – Сравнение точности МР ОРДМС и ПДМС

Модель	ДП, ε'					КП, ε''					Рис.
	$y = A + Bx$		R^2	СКО	нСКО (%)	$y = A + Bx$		R^2	СКО	нСКО (%)	
	A	B				A	B				
МР ОРДМС	-0,005	1,003	0,999	0,145	2	-0,031	0,948	0,902	0,171	19	4.7
ПДМС	0,023	0,985	0,996	0,330	3	0,144	0,795	0,841	0,218	24	4.8

4.2 Двух-релаксационная минералогически-зависимая ОРДМС

В соответствии с описанной выше методикой, опубликованной в [97], найдены спектроскопические параметры для ряда почв с различной структурой. Для исследования использовались различные типы почв, для которых производились диэлектрические измерения при температуре 20 °С в частотном диапазоне от 0,04 до 26,5 ГГц. Почвы выбирались с таким учетом, чтобы процентное содержание глинистой фракции в них охватывало как можно более широкий диапазон значений.

Гранулометрический состав почв, максимальное количество связанной воды для каждого типа почвы, их спектроскопические параметры и проводимость приведены в таблице 4.5.

Как видно из таблицы 4.5, КПП сухой почвы зависит от ее начальной влажности, так как количество воды в почве влияет на плотность частиц почвы в измерительной ячейке, при условии, что процедура упаковки почвы в измерительную ячейку остается одинаковой для всех влажностей. В тоже время КПП сухой почвы также должен зависеть от усредненного КПП минеральных частиц почвы, который коррелирует с минеральным составом данной почвы.

Таблица 4.5 – Физические и спектроскопические параметры образцов почв

№	1		2		3		4		5		6	
Тип почвы	Глинистый ил, коричневый, [53]		Глинистый песок, Темно- коричневый, [53]		пылеватый суглинок, [55]		Глина, серая, [53]		Глинистый чернозем, [98]		Глина, Светло- серая, [53]	
Содержание глины, С(г/г)	0,07		0,130		0,297		0,340		0,520		0,760	
W_t (см ³ /см ³)	0,050		0,066		0,123		0,133		0,209		0,280	
$n_d(W)$	W	n_d	W	n_d	W	n_d	W	n_d	W	n_d	W	n_d
	0,06	1,45	0,040	1,50	0,032	1,75	0,070	1,48	0,030	1,60	0,130	1,35
	0,068	1,60	0,179	1,45	0,174	1,65	0,462	1,30	0,098	1,55	0,750	1,35
	0,175	1,40	0,258	1,30	0,344	1,90	0,520	1,68	0,177	1,55	0,940	1,35
	0,179	1,45	0,287	1,35	0,462	1,45	0,571	1,60	0,264	1,55	0,946	1,35
	0,277	1,60	0,316	1,30			0,610	1,50	0,372	1,65		
	0,305	1,25	0,407	1,45			0,620	1,50	0,454	1,60		
	0,428	1,70	0,407	1,60					0,472	1,77		
0,500	1,55	0,441	1,55					0,514	1,66			
κ_d	0,037		0,034		0,027		0,025		0,020		0,015	
ε_{0bL}	690		650		518		518		300		120	
ε_{0bH}	75		66		50		44		40		30	
τ_{bL} (нс)	2,5		2,7		2,3		2,5		2,5		2,5	
σ_b (СМ/М)	0,001		0,0001		0,001		0,001		0		0,001	
σ_u (СМ/М)	0,165		0,12		0,4		0,25		0,5		0,6	
$\varepsilon_{\infty bH} = \varepsilon_{\infty uH} = 4,9; \quad \varepsilon_{0uH} = 100; \quad \tau_{bH}(\text{пс}) = 12,5; \quad \tau_{uH}(\text{пс}) = 10,6$												

Применив рефракционную диэлектрическую модель смеси к сухой почве, получим следующую формулу для КПП:

$$n_d^* = 1 + \frac{n_m^* - 1}{\rho_m} \rho_d \quad (4.2)$$

где n_m^* и ρ_m – КПП и удельная плотность, соответственно. Как видно из (4.2), при условии, что минеральный состав почвы неизменен, КПП сухой почвы, тем не менее, зависит от объемной плотности, которая может быть обусловлена многими факторами, связанными с различными естественными и искусственными процессами. Поэтому объемную плотность почвы следует рассматривать как независимый параметр в любой из диэлектрических моделей талых почв. Это как раз случай для модели, представленной формулами (1.33–1.34), (4.1–4.2). При этом, согласно (4.2), параметр $(n_m^* - 1)/\rho_m$ может быть определен из таких измерений, в которых доступны данные, как по объемной плотности, так и по КПП. Диэлектрические измерения, проведенные в [78; 93; 98–100] удовлетворяют этим условиям, и одновременно измеренные данные для КПП и объемной плотности сухой почвы были использованы для получения функциональной зависимости параметра $(n_m^* - 1)/\rho_m$ от содержания глины. Типы исследуемых почв, количество содержащейся в них глины и максимальное количество связанной воды приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Физические параметры образцов почв

№	1	2	3	4	5
Тип почвы	Песок, [99]	Гумус, [78]	Гумус, [100]	Глинистый чернозем, [98]	Бентонит, [93]
Содержание глины	0,010	0,170	0,198	0,520	0,570
W_t (см ³ /см ³)	0,027	0,082	0,091	0,200	0,217

В [78; 93; 98–100] КПП был измерен как функция от содержания воды в почве, $n_s^*(W)$, в заданном диапазоне частот, при температуре 20 °С. Для определения параметра n_d^* был проведен регрессионный анализ функций (1.33–1.34) в зависимости от влажности $n_s^*(W)$, в диапазоне влажностей $0 < W < W_t$ и получено значение

n_d^* как параметр линейной регрессии функций (1.33–1.34) при $W = 0$. Для каждой измеренной почвы значение n_d^* было получено на, приблизительно, 400 частотах, в итоге значение n_d^* было взято как среднее от всех частот. В результате получились зависимости параметра $(n_m^* - 1)/\rho_m = n_d^*/\rho_d$ от содержания глины в почве, которые показаны на рисунке 4.9. Соответствующие этим зависимостям уравнения линейной регрессии представлены ниже:

$$\begin{aligned}(n_m - 1)/\rho_m &= 0,432 - 0,065 \cdot C; \\ \kappa_m/\rho_m &= 0,008 + 0,011 \cdot C.\end{aligned}\tag{4.3}$$

Регрессионные уравнения, следующие из (4.2) и (4.3) для показателя преломления n_d и приведенного коэффициента затухания, κ_d как функции от объёмной плотности сухого сложения ρ_d и гранулометрического состава почвы (содержания глины) C , приведены в блоке формул (4.4). Так же здесь даны регрессионные уравнения спектроскопических параметров почвенной влаги и проводимости, как функций от содержания глины, их графическое представление приведено на рисунке 4.10, с помощью пунктирных линий.

$$\begin{aligned}n_d &= (0,432 - 0,065 \cdot C)\rho_d; \\ \kappa_d &= (0,008 + 0,011 \cdot C)\rho_d; \\ W_t(\text{см}^3/\text{см}^3) &= 0,024 + 0,339 \cdot C; \\ \varepsilon_{\infty bH} &= \varepsilon_{\infty uH} = 4,9; \\ \varepsilon_{0bL} &= 761 - 840 \cdot C; \\ \varepsilon_{0b} &= 27,18 + 61 \cdot \exp\left(-\frac{C}{0,287}\right); \\ \varepsilon_{0u} &= 100; \\ \tau_{bL}(\text{нс}) &= 2,5; \\ \tau_{bH}(\text{пс}) &= 12,5; \\ \sigma_b(\text{См/м}) &= 0,001; \\ \sigma_u(\text{См/м}) &= 0,097 + 0,69 \cdot C.\end{aligned}\tag{4.4}$$

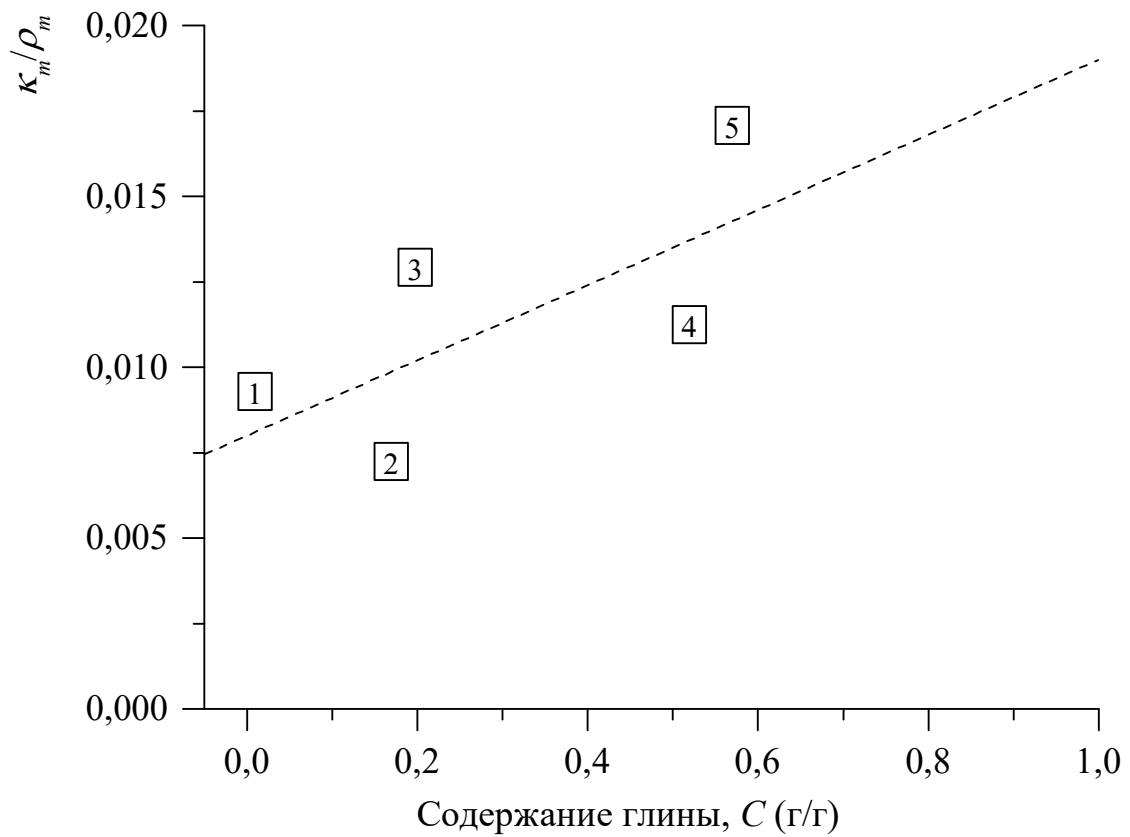
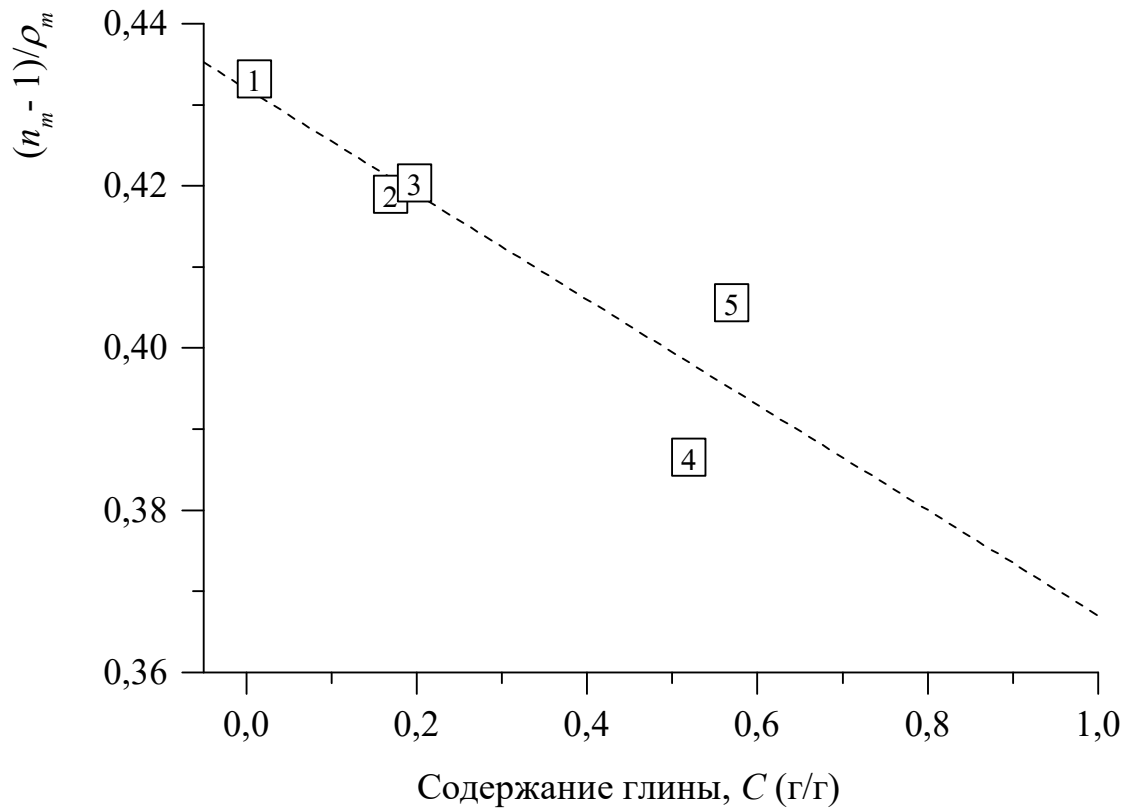


Рисунок 4.9 – Параметры $(n_m - 1)/\rho_m$ и κ_m/ρ_m как функция от содержания глины. Пронумерованные символы соответствуют типу почвы из таблицы 4.6. Пунктирные линии соответствуют зависимостям (4.3)

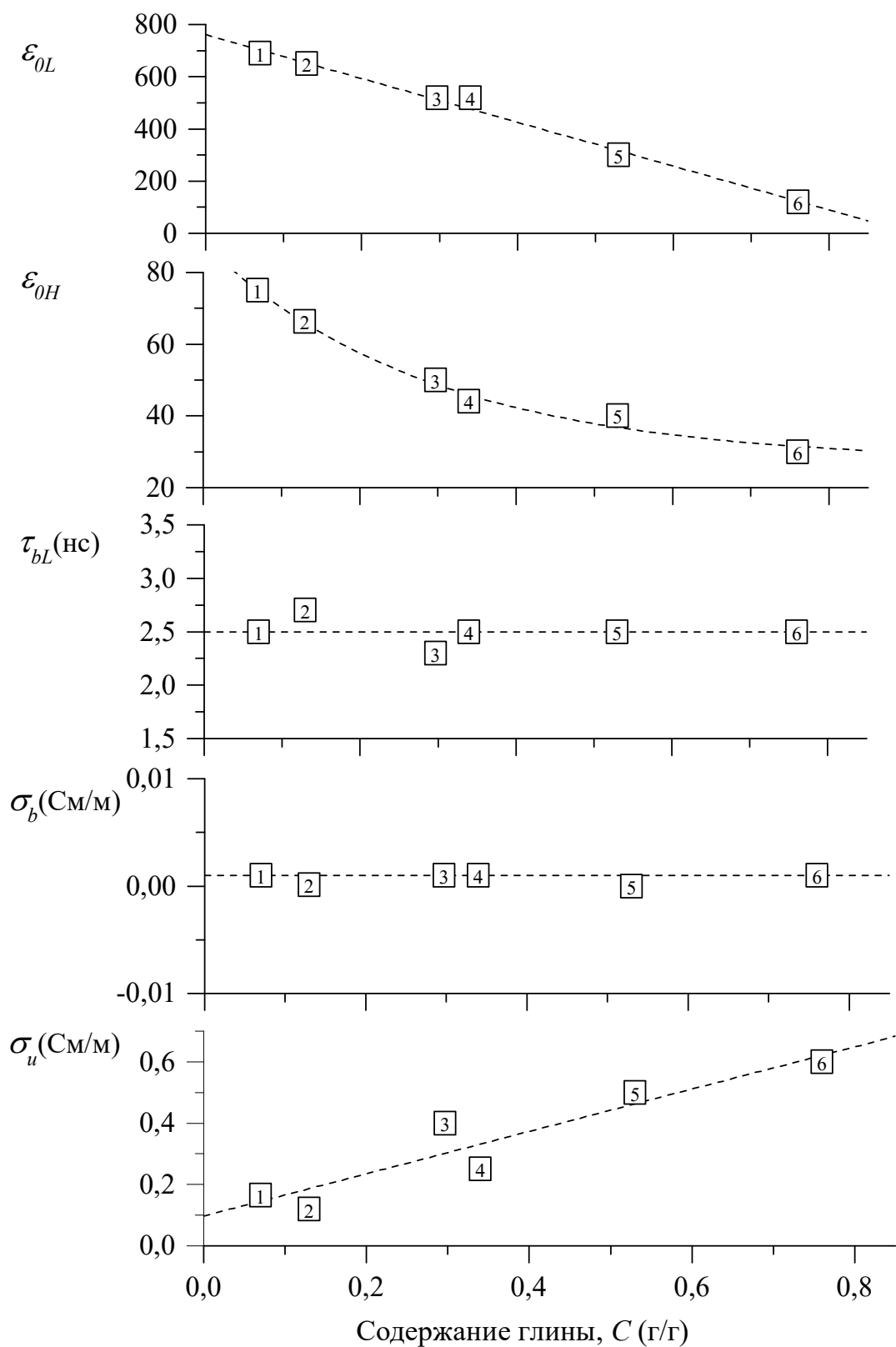


Рисунок 4.10 – Спектроскопические параметры и проводимости почвенной влаги как функции от гранулометрического состава. Пронумерованные символы соответствуют типу почвы из таблицы 4.5. Пунктирные линии соответствуют зависимостям (4.4)

Формулы (1.33–1.34), (4.1) совместно с регрессионными уравнениями блока формул (4.4) представляют разработанную минералогически-зависимую МР ОРДМС. Которая может описывать комплексную диэлектрическую постоянную в диапазоне частот от 0,04 до 26,5 ГГц, при температуре 20 °С как функцию плотности сухого сложения, гранулометрического состава и объемной влажности почвы.

Оценка точности двух-релаксационной МЗ ОРДМС. Для определения точности двух-релаксационной МЗ ОРДМС был проведен корреляционный анализ измеренных значений КДП для шести почвенных образцов (таблица 4.5) и предсказанных с помощью данной модели значений КДП для этих же почв. В результате проведенного корреляционного анализа (рисунок 4.11) получены следующие уравнения линейной регрессии для действительной $\varepsilon'_m = 0,41 + 1,01 \cdot \varepsilon'_p$ и мнимой $\varepsilon''_m = 0,252 + 0,928 \cdot \varepsilon''_p$ частей КДП и соответствующие им параметры оценки: $R^2 = 0,993$, СКО = 1,083, нСКО = 7 % для ДП, и $R^2 = 0,966$, СКО = 1,188, нСКО = 24 % для КП. Сравнив полученные значения параметров оценки точности с соответствующими значениями, найденными для одно-релаксационной МЗ ОРДМС (таблица 3.1) можно увидеть, что несмотря на значительное расширение диапазона применения предлагаемой модели, в область низких частот, вплоть до 40 МГц, точность ее остается на прежнем уровне.

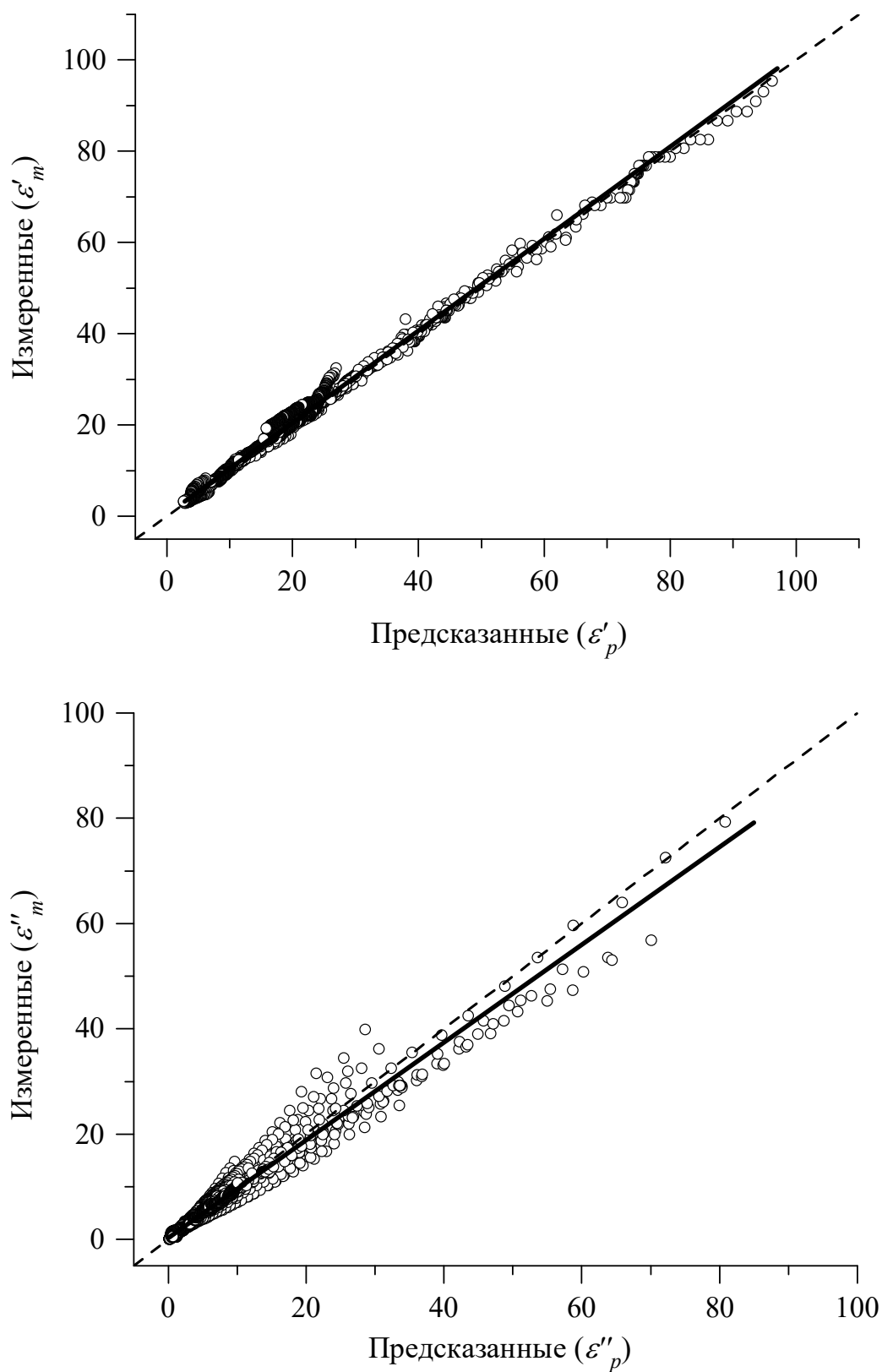


Рисунок 4.11 – Корреляция предсказанных с помощью МЗ двух-релаксационной ОРДМС значений ДП, ε'_p и КП, ε''_p , с измеренными для шести почв (таблица 4.5) значениями ε'_m и ε''_m . Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии, соответственно

4.3 Трех-релаксационная ОРДМС

С целью уменьшения погрешности представленной выше минералогически-зависимой МР ОРДМС [101], данная модель усложняется путем ввода еще одной дополнительной релаксации. В то же время, опираясь на [98] общая почвенная влага будет складываться из связанной, переходной, и свободной почвенной влаги. Кроме того, с целью учета разной плотности набивки почвенных образцов в измерительную ячейку, перейдем от объемной влажности почвенного образца к массовой $M = W/\rho_d$. В итоге рефракционная модель комплексной диэлектрической проницаемости смеси (1.33) –(1.34), выраженная через действительную n_s и мнимую κ_s части комплексного показателя преломления от массовой влаги, M , запишется в следующем виде:

$$\frac{n_s(M, f) - 1}{\rho_d} = \begin{cases} \frac{n_m - 1}{\rho_m} + (n_b(f) - 1)M, & 0 \leq M \leq M_{t1} \\ \frac{n_s(M_{t1}, f) - 1}{\rho_d} + (n_t(f) - 1)(M - M_{t1}), & M_{t1} \leq M \leq M_{t2} \\ \frac{n_s(M_{t2}, f) - 1}{\rho_d} + (n_u(f) - 1)(M - M_{t2}), & M \geq M_{t2} \end{cases} \quad (4.5)$$

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

где n_s , n_m , n_b , n_t , n_u , и κ_s , κ_m , κ_b , κ_t , κ_u – соответственно значения действительной и мнимой частей КПП; f обозначает частоту электромагнитного поля; через ρ_d выражена плотность образца сухого сложения. Подстрочные индексы s , m , b , t и u обозначают соответственно влажную почву, органоминеральную компоненту почвы, связанную, переходную и свободную почвенную воду. В свою очередь, M_{t1} и M_{t2} обозначают предельно возможное количество связанной воды и предельно возможное суммарное количество связанной и переходной воды в конкретном типе почвы.

В отличие от [98] и [101], связанная почвенная вода имеет уже не две, а три частоты релаксации. Это достигается введением третьей частоты релаксации в релаксационное уравнение Дебая [101], в связи с чем оно примет следующий вид:

$$\begin{aligned}\varepsilon'_p &= \frac{\varepsilon_{0pL} - \varepsilon_{0pM}}{1 + (2\pi f \tau_{pL})^2} + \frac{\varepsilon_{0pM} - \varepsilon_{0pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pM})^2} + \frac{\varepsilon_{0pH} - \varepsilon_{\infty pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pH})^2} + \varepsilon_{\infty pH} \\ \varepsilon''_p &= \frac{\varepsilon_{0pL} - \varepsilon_{0pM}}{1 + (2\pi f \tau_{pL})^2} 2\pi f \tau_{pL} + \frac{\varepsilon_{0pM} - \varepsilon_{0pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pM})^2} 2\pi f \tau_{pM} + \frac{\varepsilon_{0pH} - \varepsilon_{\infty pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pH})^2} 2\pi f \tau_{pH}\end{aligned}\quad (4.6)$$

Здесь подстрочный символ p принимает значения $p = b, t, и u$ для случая связанной, переходной, и свободной почвенной влаги, соответственно. А подстрочные символы $H, M, и L$ относятся к высокочастотной, среднечастотной, и низкочастотной релаксациям, соответственно. $\varepsilon_{0pL}, \varepsilon_{0pM}, \varepsilon_{0pH}$ – низкочастотные пределы диэлектрической проницаемости; $\varepsilon_{\infty pH}$ – высокочастотный предел диэлектрической проницаемости дипольной релаксации; $\tau_{pL}, \tau_{pM}, \tau_{pH}$ – времена релаксаций.

Так же в отличие от [98] принято решение отказаться от второй частоты релаксации для переходной почвенной воды из-за незначительного различия в восстановленных спектроскопических параметрах для обеих частот релаксации. Таким образом, переходная и свободная почвенные воды имеют по одной частоте релаксации.

Необходимо отметить, что уравнения (4.6) обуславливают только токи смещения, удельная электропроводность почвенной влаги, σ_p отсюда была убрана. Необходимость этого шага продиктована тем, что в противном случае при нахождении вещественной части КДП влажной почвы, ε'_s , согласно концепции ОРДМС (см. пункт 1.3.3), электропроводность почвенной влаги будет влиять на ДП влажной почвы, в то время как она определяется только токами смещения. В то же время мнимую часть КДП влажной почвы можно выразить в виде суммы вкладов $2n_s \kappa_s$ и $\sigma_s / (2\pi f \varepsilon_r)$, где σ_s – удельная электропроводность влажного образца, ε_r – диэлектрическая проницаемость свободного пространства, обуславливающих токи смещения и проводимости, соответственно. При этом удельную электропроводность влажного образца представим в виде суммы удельных электропроводностей всех

категорий воды, присутствующих в почве при заданной влажности образца, с учетом их относительного объемного содержания, $\sigma_s = W_b \sigma_b + W_t \sigma_t + W_u \sigma_u$, где $W_p = M_p \rho_p$ – объемное содержание отдельных типов воды в почве ($p = b, t, u$). В результате выражение для определения действительной части КДП (1.32) останется без изменений, а мнимая часть КДП влажного образца почвы примет следующий вид:

$$\varepsilon''_s = \begin{cases} 2n_s \kappa_s + \frac{\rho_d(M) M \sigma_b(M)}{2\pi f \varepsilon_r}, & 0 \leq M \leq M_{t1} \\ 2n_s \kappa_s + \frac{\rho_d(M) [M_{t1} \sigma_b(M_{t1}) + (M - M_{t1}) \sigma_t(M)]}{2\pi f \varepsilon_r}, & M_{t1} \leq M \leq M_{t2} \\ 2n_s \kappa_s + \frac{\rho_d(M) [M_{t1} \sigma_b(M_{t1}) + (M_{t2} - M_{t1}) \sigma_t(M_{t2}) + (M - M_{t2}) \sigma_u(M)]}{2\pi f \varepsilon_r}, & M \geq M_{t2} \end{cases} \quad (4.7)$$

Исходя из этих изменений, согласно минералогически-зависимой трех-релаксационной ОРДМС [102], спектр КДП для конкретной почвы с заданной влажностью M и частотой электромагнитного поля f может быть рассчитан с использованием следующего набора параметров:

- 1) $(n_m - 1)/\rho_m$, κ_m/ρ_m – приведенные реальная и мнимая части КПП для органо-минеральной компоненты;
- 2) ρ_d – плотность сухого сложения образца;
- 3) M_{t1} , M_{t2} – максимальное количество связанной и переходной воды в данном типе почвы;
- 4) ε_{0pL} , ε_{0pM} , ε_{0pH} – низкочастотные пределы диэлектрической проницаемости для $p = b, t$, и u ;
- 5) $\varepsilon_{\infty pH}$ – высокочастотный предел диэлектрической проницаемости для $p = b, t$, и u ;
- 6) τ_{pL} , τ_{pM} , τ_{pH} – времена релаксаций для $p = b, t$, и u ;
- 7) σ_p – удельная электропроводность почвенной воды для $p = b, t$, и u .

Все эти параметры могут быть получены для конкретного типа почвы из диэлектрических измерений влажной почвы, как это было сделано в 4.1. Предложенная методика определения параметров спектроскопической модели основана на

многомерном регрессионном анализе измеренных спектров КДП влажной почвы с использованием в качестве теоретической модели регрессии уравнений (4.5) – (4.7).

Для получения функциональных зависимостей параметров трех релаксационной ОРДМС от количества содержащейся в почве глинистой фракции были использованы экспериментальные данные по пяти почвам, полученные из различных источников (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Параметры исследуемых образцов талых почв

Тип почвы	Глинистый ил, [53]	Глинистый песок, [53]	Песчаный суглинок, [93]	Илистый суглинок, [55]	Глинистый чернозем, [98]
Содержание глины	0,070	0,130	0,270	0,297	0,356
ΔМ	0,086–0,584	0,064–0,474	0,020–0,390	0,023–0,326	0,075–0,430
ΔF, ГГц	0,045–25,300	0,045–25,000	0,048–15,000	0,100–10,000	0,048–14,900

Здесь ΔМ – диапазон массовых влажностей, в котором исследовался образец; ΔF – диапазон частот, в котором исследовался образец.

Значения реальной и мнимой частей КПП для органо-минеральной компоненты взятых почвенных образцов находятся по формуле (4.3). Получение остальных параметров трех-релаксационной ОРДМС из этих данных производится с применением модернизированной, вышеописанным способом, методики, описанной в 4.1. Полученные значения приведены в таблице 4.8.

Следующим шагом является нахождение зависимостей параметров МР ОРДМС как функций от содержания глины. С этой целью проведен линейно-регрессионный анализ сведенных в таблице 4.8 спектроскопических параметров модели от содержания глины. Результаты этого анализа представлены ниже в виде регрессионных уравнений в таблице 4.9.

Таблица 4.8 – Спектроскопические параметры исследуемых образцов почв

Параметры	Глинистый ил, [53]	Глинистый песок, [53]	Песчаный суглинок, [93]	Илистый суглинок, [55]	Глинистый чернозем, [98]
M_{t1}	0,034	0,066	0,101	0,123	0,130
M_{t2}	0,067	0,132	0,196	0,246	0,252
ε_{0bL}	850	400	400	400	260
ε_{0bM}	90	70	65	70	61
ε_{0bH}	65	50	38	50	40,5
$\tau_{bL}(\text{нс})$	2,5	4,0	4,5	3,0	3,0
$\tau_{bM}(\text{нс})$	0,08	0,10	0,10	0,20	0,15
$\tau_{bH}(\text{пс})$	3	5	7	12	9
$\sigma_b(\text{C/м})$	0,010	0,001	0,001	0,001	0
ε_{0t}	100	100	90	100	120
$\tau_t(\text{пс})$	12	12	8	10	9
$\sigma_t(\text{C/м})$	0,15	0,08	0,15	0,50	0,60
ε_{0u}	100	100	100	100	100
$\tau_u(\text{пс})$	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6
$\sigma_u(\text{C/м})$	0,20	0,18	0,20	0,40	0,24

Таблица 4.9 – Минералогически-зависимые параметры МР ОРДМС

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

Оценка точности трех-релаксационной МЗ ОРДМС. Для оценки точности трех-релаксационной ОРДМС, по аналогии с предыдущими моделями, были найдены коэффициенты детерминации и СКО измеренных спектров КДП талых почв (см. таблица 4.7) от восстановленных моделями значений. Результаты проведенного анализа представлены в таблице 4.10 и на рисунках 4.12–4.14. Анализ проводился для трех случаев:

- 1) 2Р МЗ ОРДМС – спектры КДП талых почв восстанавливались с помощью двух-релаксационной минералогически-зависимой ОРДМС, описанной в пункте 4.2;
- 2) 3Р ОРДМС – спектры КДП талых почв восстанавливались с помощью трех-релаксационной ОРДМС, спектроскопические параметры которой брались индивидуально для каждой почвы (таблица 4.8);
- 3) 3Р МЗ ОРДМС – спектры КДП талых почв восстанавливались с помощью трех-релаксационной минералогически-зависимой ОРДМС, спектроскопические параметры которой рассчитывались как функция от содержания глины (таблица 4.9).

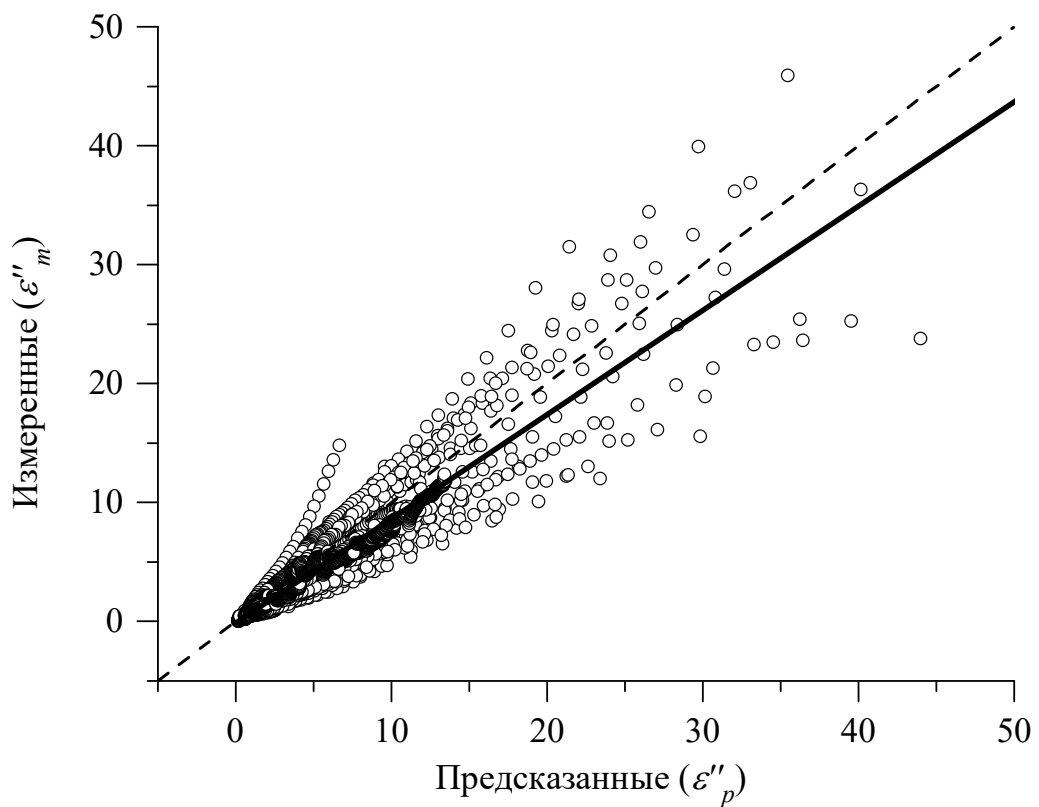
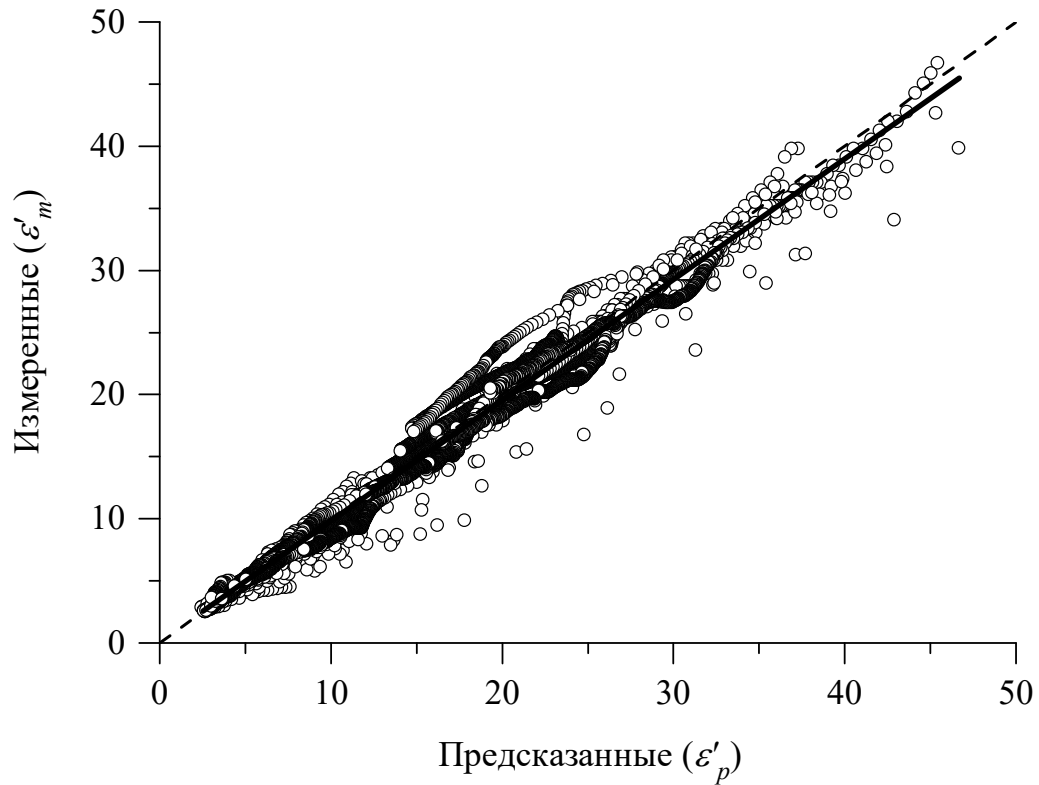


Рисунок 4.12 – Корреляция предсказанных с помощью 2Р МЗ ОРДМС значений ДП, ε'_p и КП, ε''_p , с измеренными для пяти почв (таблица 4.7) значениями ε'_m и ε''_m . Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии, соответственно

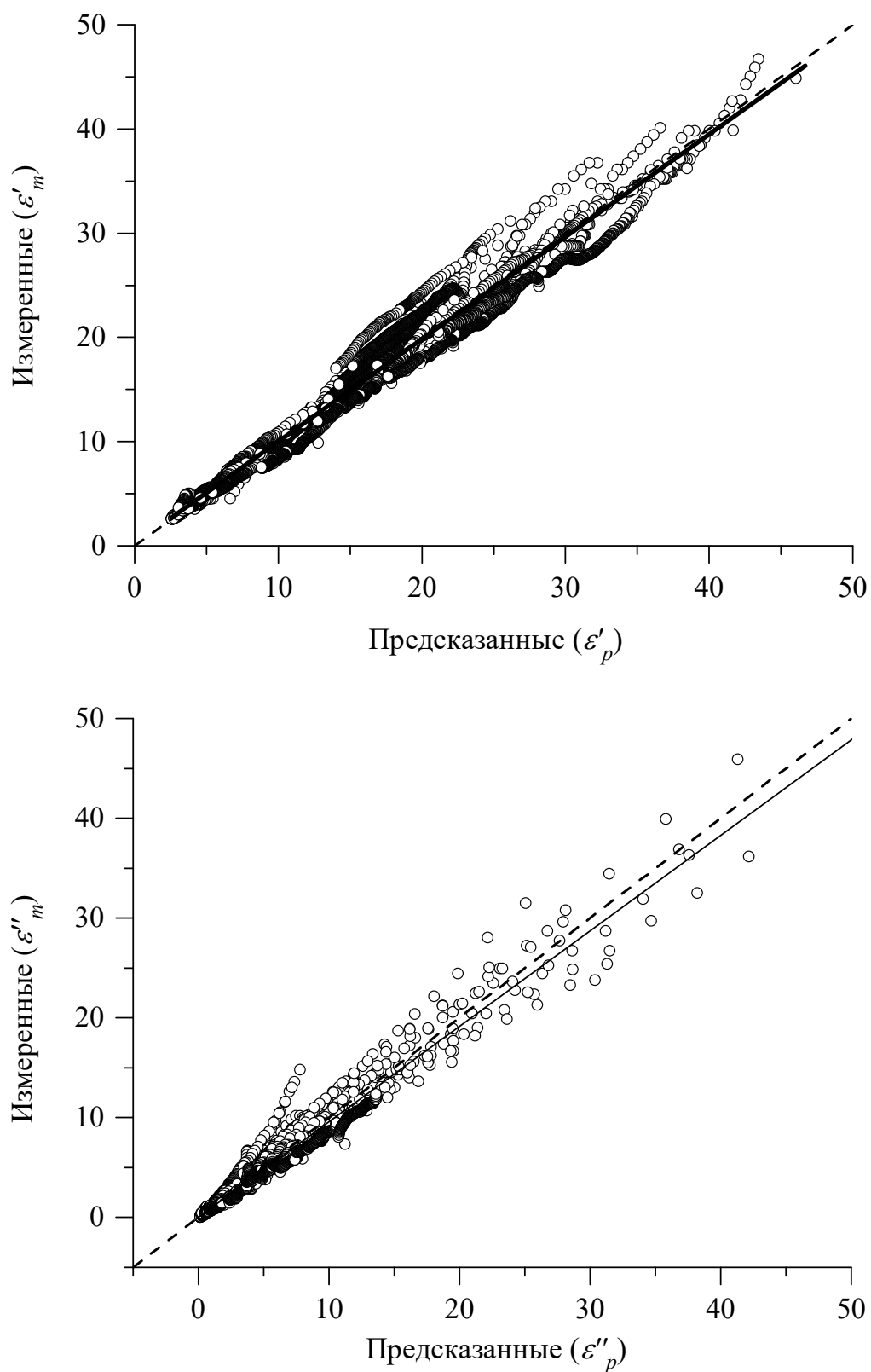


Рисунок 4.13 – Корреляция предсказанных с помощью 3Р ОРДМС значений ДП, ε'_p и КП, ε''_p , с измеренными для пяти почв (таблица 4.7) значениями ε'_m и ε''_m . Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии, соответственно

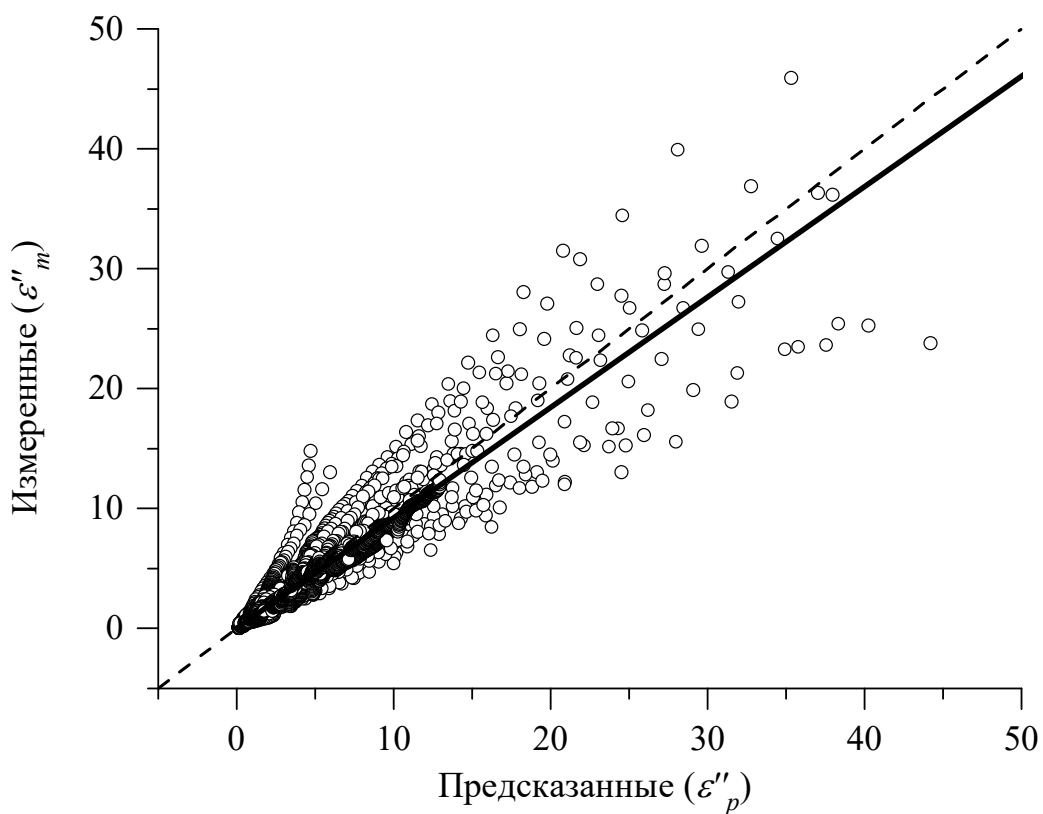
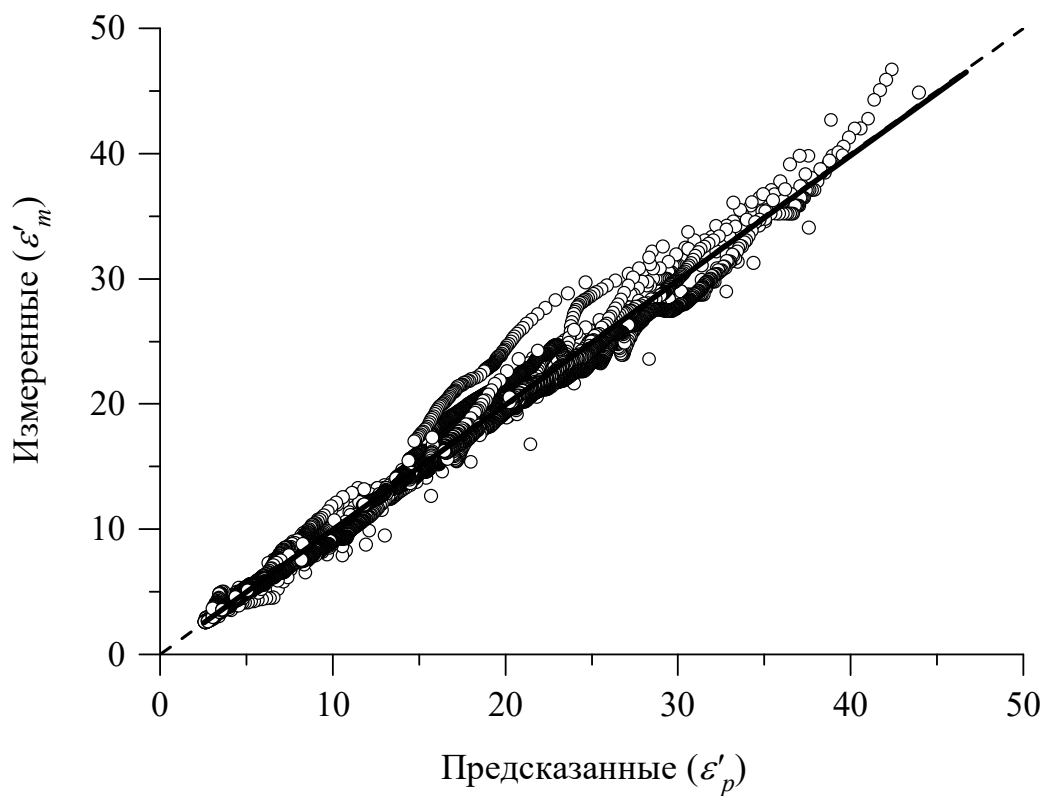


Рисунок 4.14 – Корреляция предсказанных с помощью ЗР МЗ ОРДМС значений ДП, ε'_p и КП, ε''_p , с измеренными для пяти почв (таблица 4.7) значениями ε'_m и ε''_m . Пунктирной и сплошной линиями представлены биссектриса и линия регрессии, соответственно

Таблица 4.10 – Параметры корреляционного анализа, характеризующие точность МР ОРДМС

Модель	ДП, ϵ'					КП, ϵ''					Рис.
	$y = A + Bx$		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	4.12
3Р ОРДМС	0,157	0,983	0,980	1,125	11	0,035	0,956	0,968	0,630	21	4.13
3Р МЗ ОРДМС	0,003	0,996	0,989	0,822	8	0,016	0,921	0,922	0,983	32	4.14

4.4 Одночастотная рефракционная диэлектрическая модель

До этого в данной работе описывались спектроскопические модели. И, хотя, с точки зрения пользователя удалось добиться простоты их использования, сведя к минимуму количество входных параметров, с машинной точки зрения производится много дополнительных операций, призванных рассчитывать промежуточные параметры. Особенно это заметно в главе 4 данной работы, где с вводом дополнительной релаксации количество параметров модели, по меньшей мере, удваивается. В космической же области, где применяется одна из предложенных здесь моделей [24] (аппараты SMOS и SMAP), стараются по максимуму снизить затраты, в том числе и на вычислительные мощности. Кроме того, так как радары и радиометры, устанавливаемые на космических спутниках, работают на определенных частотах, а зачастую имеют только одну рабочую частоту, то применение сложных спектроскопических моделей представляется излишним. В связи с этим была разработана одночастотная рефракционная диэлектрическая модель (ОЧРДМ) для талых минеральных почв на частоте 435 МГц [103]. Модель создавалась для практического использования в алгоритмах спутника BIOMAS ESA, оснащенным радаром работающим в Р-диапазоне, который планируется к запуску в двадцатых годах.

Предлагаемая ОЧРДМ разрабатывалась на основе трех минеральных почв, образцы которых были взяты с полуострова Ямал, Россия. Параметры текстуры взятых образцов почв и их минеральный состав приведены в таблице 4.11. Экспериментальные значения КДП были найдены в частотном диапазоне от 10 МГц до 15 ГГц, в диапазоне температур от -30 до 25 °С, и для содержания почвенной влаги

от почти сухой почвы до полной полевой влагоемкости. При этом использовалась установка и метод измерений, описанные в [93]. Из всего многообразия полученных спектров КДП исследуемых образцов почв, для данной работы, были взяты значения КДП найденные для всех влажностей на частоте 435 МГц при температуре 20 °С.

Таблица 4.11 – Параметры структуры образцов почв и минеральный состав

Тип почвы	Структура образца			Минеральный состав				
	Песок, (%)	Ил, (%)	Глина, (%)	Кварц, (%)	Полевой шпат, (%)	Плагиоклаз, (%)	Слюда, хлорит	Смектит, Амфибол, Сидерит
1 Супесь	41,4	49,5	9,1	40	30	30	незначительно	следы
2 Суглинок	40,4	39,0	20,6	70	15	5–10	незначительно	следы
3 Пылеватая глина	1,6	57,1	41,3	60	20–25	5	незначительно	следы

По аналогии с методикой ОРДМС выразим КДП почвы через КПП (1.32), и запишем ПП_р, n_s , и НКЗ, κ_s , в виде рефракционной диэлектрической модели смеси (1.33), (1.34). На рисунках 4.15–4.17 представлены зависимости КПП исследуемых почв (таблица 4.11.) от содержащейся в них влажности. Точками указаны значения ПП_р, квадратиками – значения НКЗ. Линиями указаны модельные значения КПП, восстановленные с помощью уравнений (1.33), (1.34).

Исходя из того, что КПП имеет линейную зависимость от влажности, а диэлектрические свойства связанной и свободной воды отличаются, проанализировав рисунки 4.15–4.17 можно разбить экспериментальные данные на части и сопоставить им переменные из уравнений (1.33), (1.34). Так экспериментальные значения при $W = 0$ соответствуют КПП сухой почвы n_d и κ_d . Первый участок линейного роста КПП соответствует области влажностей, где присутствует только связанная вода, а наклон самой линии соответствует значениям n_b и κ_b . Второй участок линейного роста КПП соответствует области влажностей, где присутствует как связанная, так и свободная вода, а наклон самой линии соответствует значениям n_u и κ_u . Сама же точка излома, где изменяется наклон линии, соответствует значению W_t .

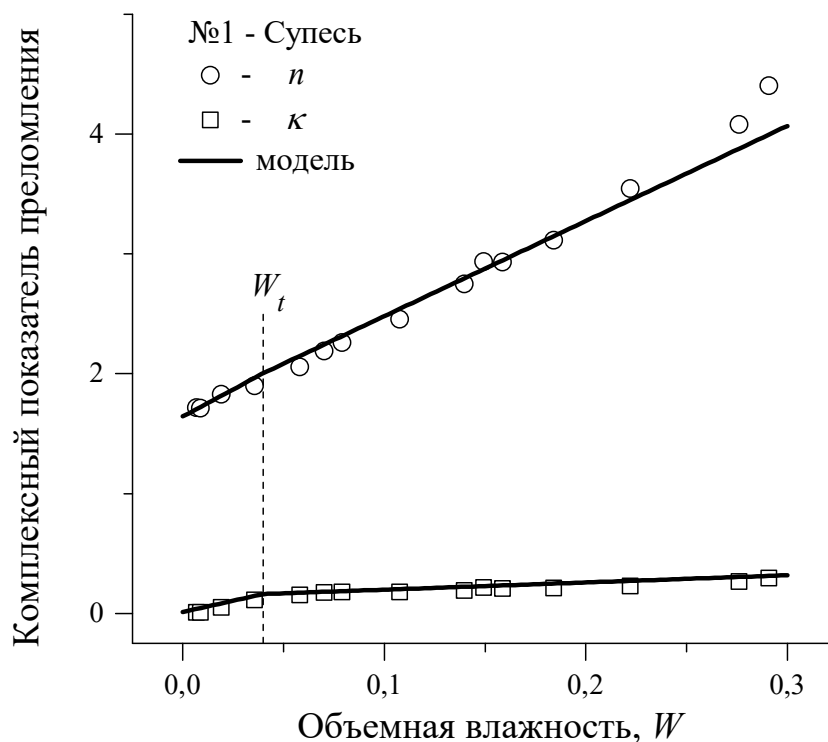


Рисунок 4.15 – Значения ППр (точки) и , НКЗ (квадратики), измеренные для почвы №1 из таблицы 4.11. Линиями отображены соответствующие им восстановленные значения, рассчитанные по выражениям (1.29), (1.30)

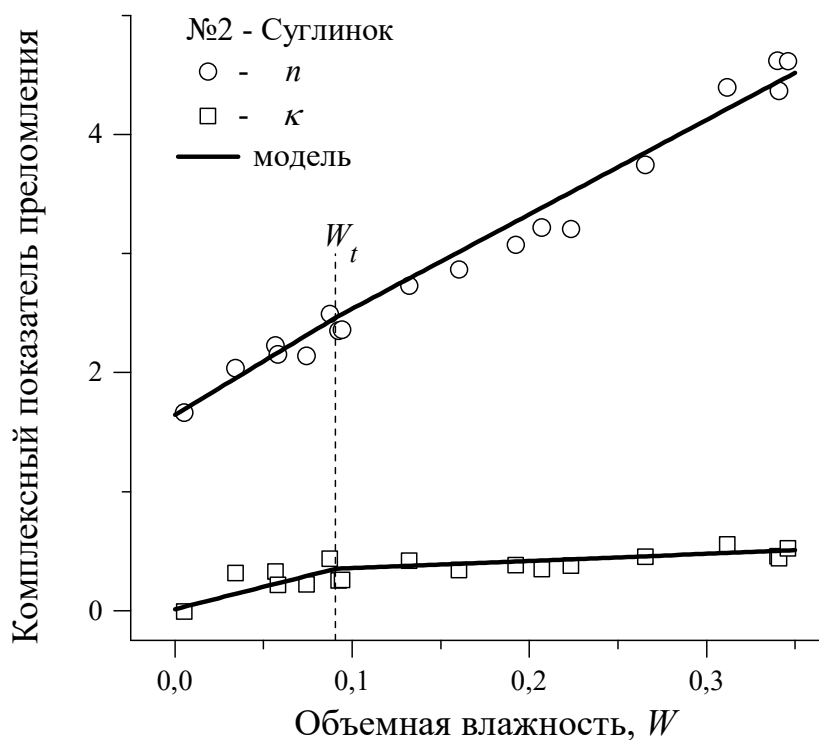


Рисунок 4.16 – Значения ППр (точки) и , НКЗ (квадратики), измеренные для почвы №2 из таблицы 4.11. Линиями отображены соответствующие им восстановленные значения, рассчитанные по выражениям (1.33), (1.34)

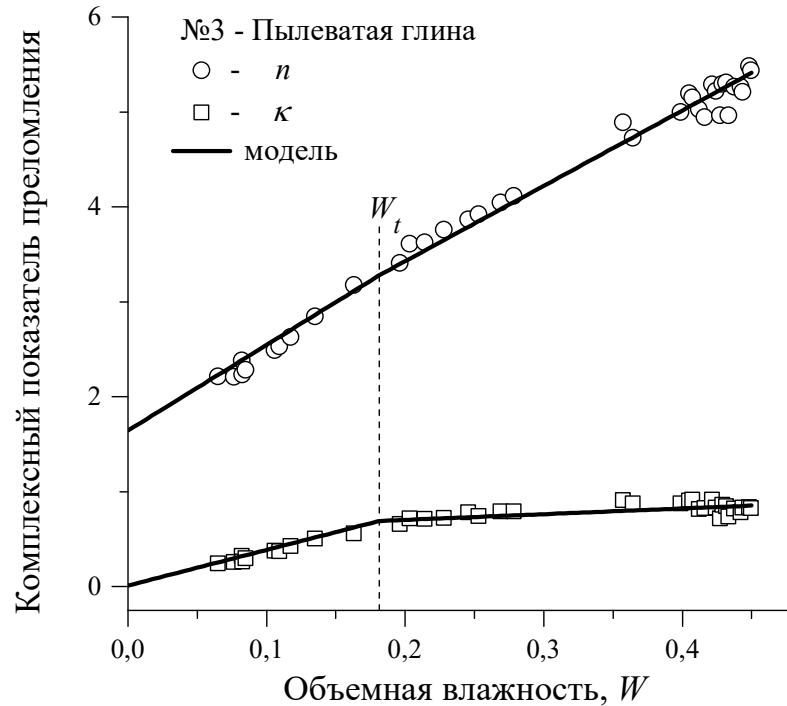


Рисунок 4.17 – Значения ПП_р (точки) и , НКЗ (квадратики), измеренные для почвы №3 из таблицы 4.11. Линиями отображены соответствующие им восстановленные значения, рассчитанные по выражениям (1.33), (1.34)

Чтобы найти вышеупомянутые параметры воспользуемся методикой, описанной в [104]. Проведем регрессионный анализ экспериментальных данных КПП (рисунки 4.15–4.17) кусочно-линейной функцией (1.33), (1.34). Регрессионный анализ проводится одновременно для трех почв. При этом делается предположение, что КПП для сухой почвы, связанной и свободной почвенной влаги, на данной частоте, не зависят от типа почвы. В этом легко убедиться, разместив КПП для всех почв на один график (рисунок 4.18). Так как в данном случае зависимость ПП_р от влажности почвы визуально практически не имеет излома, а на зависимости НКЗ от влажности он более заметен, и мы можем видеть его визуально, то на рисунке 4.18 приведена только зависимость НКЗ от влажности почвы.

В результате регрессионного анализа найдены следующие значения параметров модели: $n_d = 1,644$; $n_b = 10,021$; $n_u = 8,936$; $\kappa_d = 0,012$; $\kappa_b = 3,751$; $\kappa_u = 0,602$.

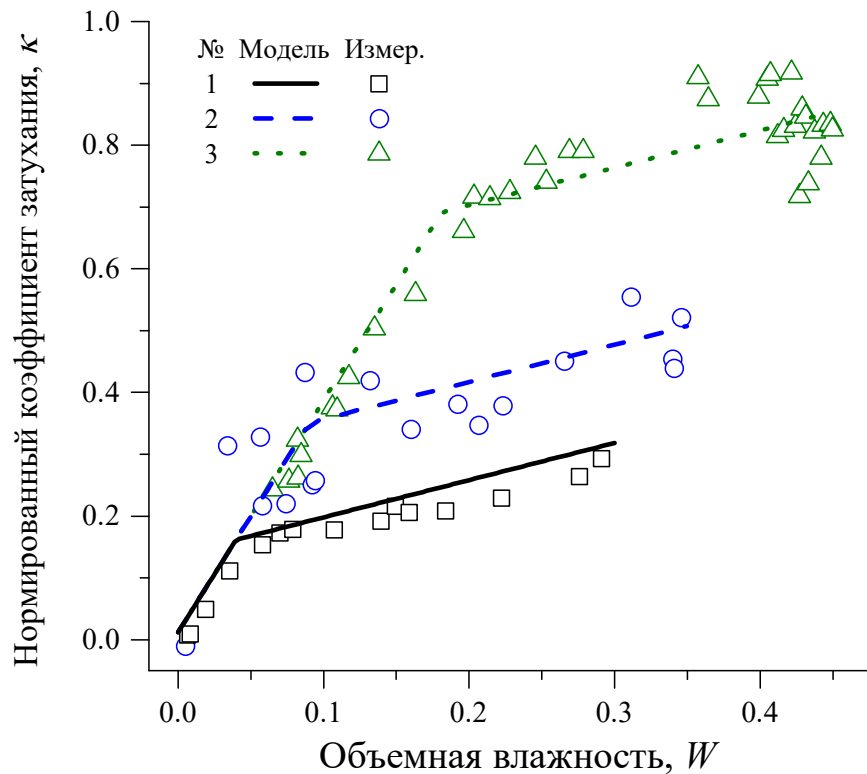


Рисунок 4.18 – Зависимость НКЗ от влажности почвы, для почв из таблицы 4.11

Функциональная зависимость W_t от величины глинистой фракции почвы находится как:

$$W_t = 4,39 \cdot 10^{-3} C \quad (4.8)$$

Найденные параметры совместно с выражениями (1.32), (4.8) 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.

Оценка точности ОЧРДМ. Для проверки точности созданной ОЧРДМ проведем корреляционный анализ экспериментальных и модельных значений КДП почвы. Для этого построим зависимость измеренных значений КДП почвы от восстановленных предложенной моделью значений. Данная зависимость показана на рисунке 4.19 (закрашенные точки). Так же, для сравнения здесь изображены корреляционные зависимости с значениями КДП, восстановленными другими моделями (пустые фигуры), см. таблицу 4.12 и рисунок 4.19. В случае идеального совпадения

все точки должны располагаться на линии биссектрисы угла (сплошная линия). В нашем случае идеального совпадения нет, но ситуация близка к таковой.

Таблица 4.12 – Сравнение ошибок предсказания значений КДП почв различными МДМ

Модель	ДП, ε'					КП, ε''					Рис. (обозн.)
	$y = A + Bx$		R^2	СКО	нСКО (%)	$y = A + Bx$		R^2	СКО	нСКО (%)	
	A	B				A	B				
для почв из таблицы 4.11											
ОЧРДМ	-0,092	1,004	0,987	0,992	7	-0,120	1,015	0,974	0,519	13	4.19 (●)
ПДМС	0,265	1,001	0,961	1,720	13	-0,555	1,520	0,750	1,601	41	4.19 (□)
ОРДМС	0,711	1,079	0,931	2,276	17	0,758	1,076	0,793	1,456	37	4.19 (Δ)
2Р МЗ ОРДМС	0,643	1,120	0,922	2,417	18	0,155	1,269	0,836	1,297	33	4.19 (◇)
для почв [53] (Д.О. Куртис)											
ОЧРДМ	0,694	1,054	0,947	2,688	14	-0,314	1,189	0,891	1,167	37	–
ПДМС	-0,824	1,024	0,792	5,332	29	-0,623	1,656	0,737	1,816	58	–
ОРДМС	0,729	0,986	0,971	1,987	11	-0,210	0,960	0,872	1,266	40	–
2Р МЗ ОРДМС	1,523	1,155	0,845	4,593	25	0,303	1,519	0,667	2,044	65	–

Из таблицы 4.12 видно, что ОЧРДМ обладает минимальными ошибками как для действительной, так и для мнимой части КДП почв (по почвам из таблицы 4.11). Значения параметров оценки точности для остальных трех моделей, по этим же почвам, находятся примерно на одном уровне. И, хотя, ошибка восстановления значений ДП у ПДМС среди этих трех моделей самая маленькая, однако ее же ошибка для восстановления КП является самой большой. При применении ОЧРДМ к независимым данным (почвы Куртиса) она так же остается наиболее точной моделью. Здесь надо помнить, что ОРДМС, ошибки восстановления ДП которой являются наименьшими, разрабатывалась как раз по почвам Куртиса, то есть они являются для этой модели зависимыми данными. И несмотря на это точность восстановления ДП у ОЧРДМ и ОРДМС примерно одинаковы, а точность восстановления КП у ОЧРДМ даже выше. Общее ухудшение точности прогнозирования КДП для почв Куртиса можно объяснить тем, что диапазон содержания глинистой фракции в почвах измеренных Куртисом варьировался от 0 до 76 %, в то время как применяемые для восстановления КДП модели создавались по почвам с максимальным содержанием глинистой фракции, не превышающим 41,3 %.

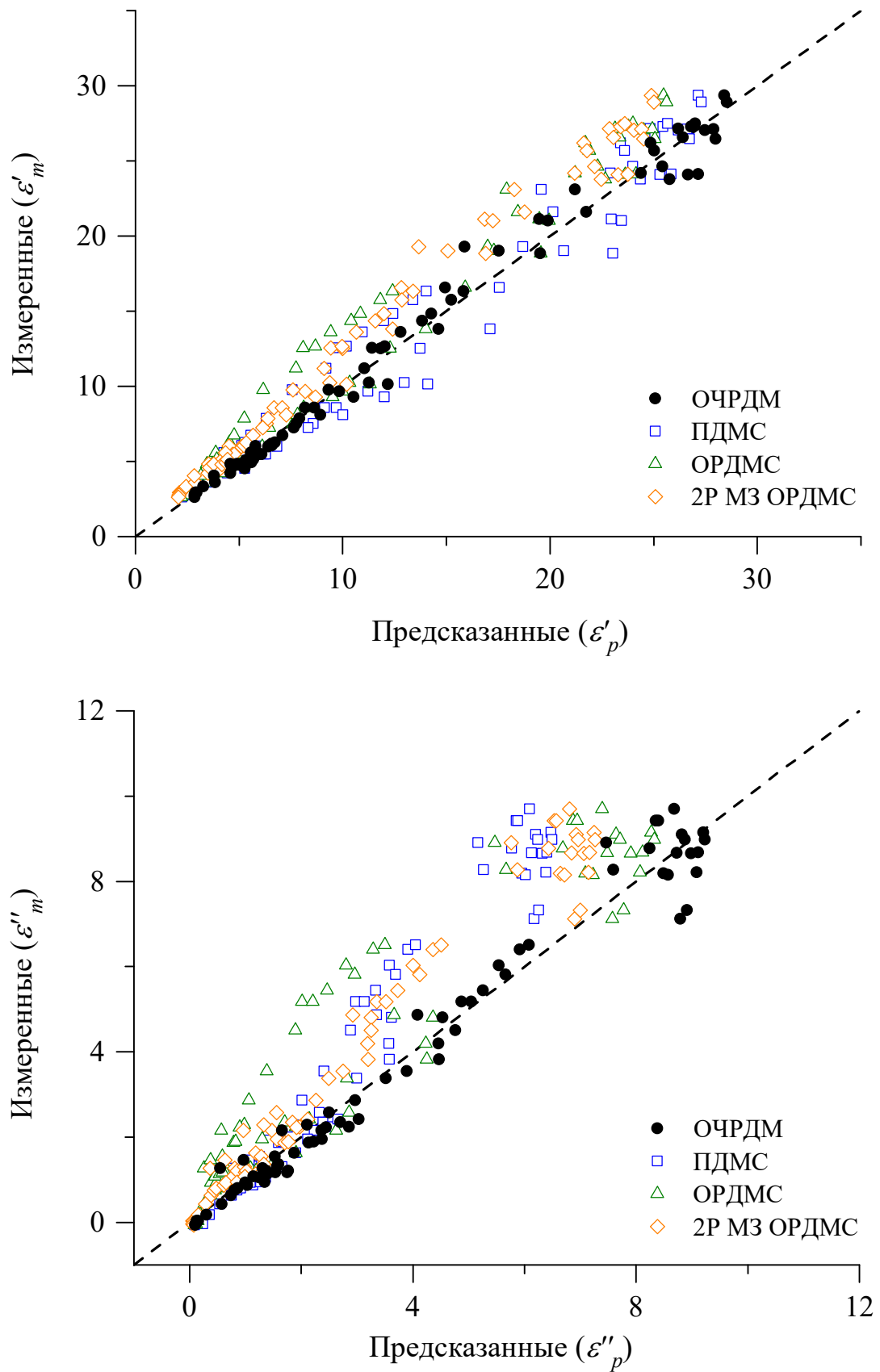


Рисунок 4.19 – Сравнение корреляций предсказанных с помощью различных МДМ значений ДП, ε'_p и КП, ε''_p , с измеренными для почв из таблицы 4.11 значениями ε'_m и ε''_m . Пунктирной линией обозначена биссектриса

4.5 Выводы к главе 4

- Разработана много-релаксационная ОРДМС для расчета спектров КДП в диапазоне частот от десятков МГц до десятков ГГц для конкретного типа влажной почвы при заданной температуре. Предлагаемая модель использует двух-релаксационные уравнения Дебая для КДП связанной и свободной воды в почве.
- Разработана процедура определения спектроскопических параметров МР ОРДМС с использованием диэлектрических измерений талых почв. Ошибки расчета КДП при использовании МР ОРДМС, оказались сравнимы с ошибками диэлектрических измерений почв.
- Разработана минералогически-зависимая МР ОРДМС, для расчета КДП влажной почвы как функции влажности почвы, содержания глинистой фракции, при температуре 20 °С, в широком диапазоне частот от 40 МГц до 26,5 ГГц.
- Предложена МР ОРДМС, с тремя временами релаксации. Точность 3 релаксационной модели незначительно превосходит точность 2 релаксационной модели и находится в пределах ошибок диэлектрических измерений почв.
- Предложена ОЧРДМ для талых минеральных почв на частоте 435 МГц, не уступающая по точности другим представленным выше моделям комплексной диэлектрической проницаемости талых почв и при этом она гораздо проще в описании.

Заключение

В работе исследованы зависимости между физическими и диэлектрическими параметрами талых минеральных почв. На основе выявленных зависимостей предложен ряд МДМ, учитывающих влажность, температуру и тип почвы, которые позволяли бы с большей точностью по сравнению с уже имеющимися моделями рассчитывать комплексную диэлектрическую проницаемость талых минеральных почв в широком диапазоне частот, как для тех почв, на которых данные модели создавались, так и для независимых почв.

Основные результаты и выводы исследований заключаются в следующем.

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 , κ_d , κ_b , κ_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 °C 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 сокращений и условных обозначений

ALOS (Advanced Land Observing Satellite) – спутник предназначен для мониторинга земной поверхности и океанов, запущен 24 января 2006 (Япония).

AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer) – сканирующий микроволновый радиометр.

Aqua – научно-исследовательский спутник, запущен 4 мая 2002 года (США), предназначенных для исследования воды.

ESA (European Space Agency) – международная организация, созданная в 1975 году в целях исследования космоса.

GCOM-W1 (Global Change Observation Mission) – спутник дистанционного зондирования Земли, запущен 18 мая 2012 года (Япония)

NASA (National Aeronautics and Space Administration) – ведомство, относящееся к федеральному правительству США. Осуществляет гражданскую космическую программу страны, а также научные исследования воздушного и космического пространств и научно-технологические исследования в области авиации, воздухоплавания и космонавтики.

PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) – радиолокатор, работает в двух режимах с рабочей частотой 1.27 ГГц (L-диапазон), в высоком разрешении и в режиме сканирования, при этом максимальное разрешение на местности составляет 10 метров (ширина полосы захвата при этом 70 км).

SMAP (Soil Moisture Active Passive) – спутник мониторинга окружающей среды запущенный NASA в 2015 году, обеспечивает глобальный мониторинг и картирование влажности почвы в состоянии замерзания/оттаивания.

SMOS (Soil Moisture & Ocean Salinity) – спутник запущенный Европейским Космическим Агенством в 2009 году, предназначен для улучшения прогнозирования погоды и мониторинга накопления снега и льда.

TerraSAR-X – спутник предназначен для радарной съёмки поверхности Земли в гражданских интересах, запущен 15 июня 2007 (Германия)

ДЗЗ – дистанционное зондирование земли.

МДМ – минералогическая диэлектрическая модель.

ОРДМС – обобщенная рефракционная диэлектрическая модель смеси.

МЗ ОРДМС – минералогически-зависимая ОРДМС (модель Миронова).

ТЗ ОРДМС – температурно-зависимая ОРДМС.

Т-МЗ ОРДМС – температурно-минералогически-зависимая ОРДМС.

МР ОРДМС – много-релаксационная ОРДМС.

ОЧРДМ – одночастотная рефракционная диэлектрическая модель.

ПДМС – полуэмперическая диэлектрическая модель смеси (модель Добсона).

$\dot{\varepsilon}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП), $\dot{\varepsilon} = \varepsilon' + i\varepsilon''$

ε' – действительная часть КДП или диэлектрическая проницаемость (ДП)

ε'' – мнимая часть КДП или коэффициент потерь (КП)

ε_0 – статическая диэлектрическая проницаемость

ε_∞ – высокочастотный предел диэлектрической проницаемости, равный 4,9

ε_r – диэлектрическая проницаемость свободного пространства ($8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м)

n^* – комплексный показатель преломления (КПП), $n^* = \sqrt{\dot{\varepsilon}} = n + ik$

n – показатель преломления (ППр)

k – нормированный коэффициент затухания (НКЗ)

W – объемная влажность

M – весовая влажность

W_t – предельное содержание связанной влаги (ПССВ) в данном типе почвы

ρ_d – плотность сухой почвы

τ – время релаксации

σ – удельная проводимость

ψ_p – коэффициент энергии активации для связанной ($p = b$) и свободной ($p = u$) почвенной влаги

θ_p – энтропия коэффициента активации для связанной ($p = b$) и свободной ($p = u$) почвенной влаги

β_p – коэффициент объемного расширения для связанной ($p = b$) и свободной ($p = u$) почвенной влаги

$\beta_{\sigma p}$ – температурный коэффициент приращения проводимости для связанной ($p = b$) и свободной ($p = u$) почвенной влаги

R – коэффициент корреляции

SD – стандартное отклонение

R^2 – коэффициент детерминации

СКО – среднеквадратичное отклонение

нСКО – нормированное СКО

Список литературы

1. *Depledge J.* Caring for climate: a guide to the climate change convention and the Kyoto protocol / J. Depledge, R. Lamb, C. Lawler // Climate Change Secr. Bonn, Germany. – 2005.
2. *Асмус, В. В.* Спутниковые наблюдения Земли и дистанционные измерения, усваиваемые в моделях прогноза погоды / В. В. Асмус, О. Е. Милехин, А. Б. Успенский // Матер. науч. школы-семинара «Современные технологии прогнозирования погоды». – М. – 2008.
3. Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) [Electronic resource]. URL: http://www.ntsomz.ru/for_clients/standart_ip.
4. Федеральное государственное бюджетное учреждение "Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета" (ФГБУ "НИЦ "Планета") [Electronic resource]. URL: <http://planet.iitp.ru/>.
5. *El Hajj, M.* Evaluation of SMOS, SMAP, ASCAT and Sentinel-1 soil moisture products at sites in southwestern France [Electronic resource] / M. El Hajj [et al.] // Remote Sens. – 2018. – URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01900522/document>.
6. *Ma, H.* Satellite surface soil moisture from SMAP, SMOS, AMSR2 and ESA CCI: A comprehensive assessment using global ground-based observations / H. Ma [et al.] // Remote Sens. Environ. Elsevier. – 2019. – Vol. 231. – P. 111215.
7. *Mironov V. L.* Temperature- and texture-dependent dielectric model for frozen and thawed mineral soils at a frequency of 1.4 GHz / V. L. Mironov [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2017. – Vol. 200. – P. 240–249.
8. *Dobson M. C.* Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part II: Dielectric Mixing Models / M. C. Dobson [et al.] // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1985. – Vol. GE-23. – № 1. – P. 35–46.
9. *Wang J. R.* An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content / J. R. Wang, T. J. Schmugge // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1980. – Vol. GE-18. – № 4. – P. 288–295.

10. *Hallikainen M. T.* Microwave dielectric behavior of wet soil-part I: Empirical models and experimental observations / M. T. Hallikainen [et al.] // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1985. – № 1. – P. 25–34.
11. *Bottcher C. J. F.* Theory of Electric Polarisation / C. J. F. Bottcher // Eisevier, Amsterdam. – 1952. – 147 p.
12. *Bruggeman D. A. G.* Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen Mischkörpern aus Isotropen Substanzen / D. A. G. Bruggeman // Ann. Phys. – 1935. – Vol. 24. – P. 636–664.
13. *Kharadly M. M. Z.* The properties of artificial dielectrics comprising arrays of conducting elements / M. M. Z. Kharadly, W. Jackson // Proc. IEE-Part III Radio Commun. Eng. IET. – 1953. – Vol. 100. – № 66. – P. 199–212.
14. *Pearce C. A. R.* The permittivity of two phase mixtures / C. A. R. Pearce // Br. J. Appl. Phys. IOP Publishing. – 1955. – Vol. 6. – № 10. – P. 358–361.
15. *Nerpin S. V.* Physics of the soil: Israel program for scientific translations. / S. V. Nerpin, A. F. Chudnovskii // Keter press, Jerusalem. – 1967.
16. *Birchak J. R.* High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture / J. R. Birchak [et al.] // Proc. IEEE. – 1974. – Vol. 62. – № 1. – P. 93–98.
17. *Lundien J. R.* Terrain analysis by electromagnetic means / J. R. Lundien // US Army Engineer Waterways Experiment Station. – Tech. Rep. 3-727. – 1971.
18. *Лещанский Ю. И.* Электрические параметры песчаного и глинистого грунтов в диапазоне сантиметровых, дециметровых и метровых волн / Ю. И. Лещанский, Г. Н. Лебедева, В. Д. Шумилин // Изв. вузов. Радиофизика. – 1971. – Т. 14. – № 4. – С. 562–569.
19. *Hoekstra P.* Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies / P. Hoekstra, A. Delaney // J. Geophys. Res. Wiley Online Library. – 1974. – Vol. 79. – № 11. – P. 1699–1708.
20. *Newton R. W.* Microwave remote sensing and its application to soil moisture detection / R. W. Newton // Texas A&M University College Station. – Tech. Rep. RSC-81. – 1977.

21. *Peplinski N. R.* Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3 GHz range / N. R. Peplinski, F. T. Ulaby, M. C. Dobson // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1995. – Vol. 33. – № 3. – P. 803–807.
22. *Paloscia S.* A multifrequency algorithm for the retrieval of soil moisture on a large scale using microwave data from SMMR and SSM/I satellites / S. Paloscia [et al.] // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2001. – Vol. 39. – № 8. – P. 1655–1661.
23. Википедия [Electronic resource]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Aqua>.
24. *Mironov V. L.* Physically and Mineralogically Based Spectroscopic Dielectric Model for Moist Soils / V. L. Mironov, L. G. Kosolapova, S. V. Fomin // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2009. – Vol. 47. – № 7. – P. 2059–2070.
25. Центр дистанционного зондирования биосферы (CESBIO) Французское Космическое Агентство (CNES) [Electronic resource]. URL: <https://labo.obs-mip.fr/smos-blog/>.
26. *Szyplowska A.* Impact of soil salinity, texture and measurement frequency on the relations between soil moisture and 20 MHz–3 GHz dielectric permittivity spectrum for soils of medium texture / A. Szyplowska [et al.] // J. Hydrol. Elsevier. – 2019. – Vol. 579. – P. 124155.
27. *Wu K.* A new drone-borne GPR for soil moisture mapping / K. Wu [et al.] // Remote Sens. Environ. Elsevier. – 2019. – Vol. 235. – P. 111456.
28. *Szyplowska A.* Dielectric models for moisture determination of soils with variable organic matter content / A. Szyplowska [et al.] // Geoderma. Elsevier. – 2021. – Vol. 401. – P. 115288.
29. *Эпов М.* Сверхширокополосное электромагнитное зондирование нефтегазового коллектора. / М. Эпов, В. Миронов, К. Музалевский. – Litres. – 2017. – ISBN: 5040401043.
30. Патент РФ на изобретение №2331062, МПК G01N22/04. Способ определения влажности устойчивого завядания. / Бобров П. П., Миронов В. Л., Яценко А. С.; патентообладатель Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения РАН (ИФ СО РАН). – №2006135882/09; заявл. 10.10.2006; опубл. 10.08.2008. – 7 с.

31. Патент РФ на изобретение №2585169, МПК G01N22/04. Радиофизический способ определения состава почвы. / Бобров П. П., Миронов В. Л., Мустакова М. М., Родионова О. В.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный педагогический университет". – № 2014148842/07; заявл. 03.12.2014; опубл. 27.05.2016. – 8 с.
32. *Tabatabaenejad A.* P-band radar retrieval of subsurface soil moisture profile as a second-order polynomial: First AirMOSS results / A. Tabatabaenejad [et al.] // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 2014. – Vol. 53. – № 2. – P. 645–658.
33. *Joseph A. T.* Development of VHF (240–270 MHz) antennas for SoOp (Signal of Opportunity) receiver for 6U cubesat platforms / A. T. Joseph [et al.] // *IEEE Progress in Electromagnetic Research Symposium.* – 2016. – P. 2530–2531.
34. *Wigneron J.-P.* Modelling the passive microwave signature from land surfaces: A review of recent results and application to the L-band SMOS & SMAP soil moisture retrieval algorithms / J.-P. Wigneron [et al.] // *Remote Sens. Environ.* – 2017. – Vol. 192. – P. 238–262.
35. 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.
36. 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.

37. *O'Neill P.* Algorithm theoretical basis document. Level 2 & 3 soil moisture (passive) data products. / P. O'Neill et al. // California Institute of Technology. – 2020.
38. *Дубровин Б.А.* Современная геометрия–Методы и приложения. / Б. А. Дубровин, А. Т. Фоменко, С. П. Новиков. -М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1986. – 760 с.
39. *Ландау Л. Д.* Теоретическая физика. Том 8. Электродинамика сплошных сред. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. -М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1982.
40. *Виноградова М. Б.* Теория волн: / М. Б. Виноградова, О. В. Руденко, А. П. Сухоруков. – Учебное пособие.-2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1990.
41. *Шутко А. М.* СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. / А. М. Шутко. – Наука. – 1986. – 190 с.
42. *Ньоку Э. Д.* Пассивное зондирование Земли из космоса в СВЧ-диапазоне (обзор) / Э. Д. Ньоку // ТИИЭР. – 1982. – Т. 70. – № 7. – С. 49–75.
43. *Campbell M. J.* Electrical properties of rocks and their significance for lunar radar observations / M. J. Campbell, J. Ulrichs // J. Geophys. Res. Wiley Online Library. – 1969. – Vol. 74. – № 25. – P. 5867–5881.
44. *Виняйкин Е. Н.* Ослабление миллиметровых и сантиметровых радиоволн и изменение их фазы в среде, состоящей из сухих и обводненных пылевых частиц. / Е. Н. Виняйкин, М. Б. Зиничева, А. П. Наумов. – Нижний Новгород: Препринт Научно-исследовательского радиофизического института (НИРФИ). – 1993. – 40 с.
45. *Ray P. S.* Broadband complex refractive indices of ice and water / P. S. Ray // Appl. Opt. Optical Society of America. – 1972. – Vol. 11. – № 8. – P. 1836–1844.
46. *Stogryn A.* Equations for calculating the dielectric constant of saline water (correspondence) / A. Stogryn // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 1971. – Vol. 19. – № 8. – P. 733–736.
47. *Трофимов В.Т.* Грунтоведение, 6-е изд., перераб. и допол./ В. Т. Трофимов, В. А. Королев, Е. А. Вознесенский. – Под ред. В. Т. Трофимова. М.: Наука. – 2005. – 1023 с.

48. *Hipp J. E.* Soil electromagnetic parameters as functions of frequency, soil density, and soil moisture / J. E. Hipp // Proc. IEEE. – 1974. – Vol. 62. – № 1. – P. 98–103.
49. *Wang J.* Dielectric constants of soils at microwave frequencies-2 / J. Wang, T. Schmugge, D. Williams // NASA. – Tech. Pap. 1238. – 1978.
50. *Злочевская Р. И.* Электроповерхностные явления в глинистых породах. / Р. И. Злочевская, В. А. Королев. – М.: Изд-во МГУ. – 1988. – 279 с.
51. *Черняк Г. Я.* Радиоволновые методы исследований в гидрогеологии и инженерной геологии. / Г. Я. Черняк, О. М. Мясковский. – Недра. – 1973.
52. *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.
53. *Curtis J.O.* Effect of soil composition on dielectric properties / J. O. Curtis, C. A. Weiss, J. B. Everett // US Army Corps Eng. Waterw. Exp. Station. – Vicksburg. – Tech. Rep. EL-95-34. – 1995.
54. *Njoku E. G.* Theory for passive microwave remote sensing of near-surface soil moisture / E. G. Njoku, J. Kong // J. Geophys. Res. Wiley Online Library. – 1977. – Vol. 82. – № 20. – P. 3108–3118.
55. *Wagner N.* Experimental Investigations on the Frequency- and Temperature-Dependent Dielectric Material Properties of Soil / N. Wagner [et al.] // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2011. – Vol. 49. – № 7. – P. 2518–2530.
56. *Loewer M.* Ultra-broad-band electrical spectroscopy of soils and sediments – A combined permittivity and conductivity model / M. Loewer [et al.] // Geophys. J. Int. Oxford University Press. – 2017. – Vol. 210. – № 3. – P. 1360–1373.
57. *Bobrov P. P.* Modeling of dielectric relaxation processes in moist sand rocks / P. P. Bobrov [et al.] // Russ. Phys. J. Springer. – 2017. – Vol. 60. – № 4. – P. 711–716.
58. *Бобров П. П.* Определение влажности образцов почв диэлектрическим методом / П. П. Бобров [et al.] // Почвоведение. Федеральное государственное бюджетное учреждение "Российская академия наук". – 2019. – № 7. – С. 859–871.

59. *Bobrov P.P.* The Effect of Dielectric Relaxation Processes on the Complex Dielectric Permittivity of Soils at Frequencies from 10 kHz to 8 GHz–Part I: Experimental / P. P. Bobrov et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2022.
60. *Topp G. C.* Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines / G. C. Topp, J. L. Davis, A. P. Annan // Water Resour. Res. Wiley Online Library. – 1980. – Vol. 16. – № 3. – P. 574–582.
61. *Smith-Rose R. L.* The electrical properties of soil at frequencies up to 100 Megacycles per second; with a note on the resistivity of ground in the United Kingdom / R. L. Smith-Rose // Proc. Phys. Soc. IOP Publishing. – 1935. – Vol. 47. – № 5. – P. 923–931.
62. *Roth K.* Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach / K. Roth [et al.] // Water Resour. Res. Wiley Online Library. – 1990. – Vol. 26. – № 10. – P. 2267–2273.
63. *Dirksen C.* Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements / C. Dirksen, S. Dasberg // J. Soil Science Society of America. – 1993. – Vol. 57. – № 3. – P. 660–667.
64. *Kerr Y. H.* Soil moisture retrieval from space: the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission / Y. H. Kerr [et al.] // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2001. – Vol. 39. – № 8. – P. 1729–1735.
65. *Shutko A. M.* Mixture Formulas Applied in Estimation of Dielectric and Radiative Characteristics of Soils and Grounds at Microwave Frequencies / A. M. Shutko, E. M. Reutov // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1982. – Vol. GE-20. – № 1. – P. 29–32.
66. *Челидзе Т. Л.* Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. / Т. Л. Челидзе, А. И. Деревянко, О. Д. Куриленко. – Наукова думка. – 1977.
67. *Schmugge T.* Remote sensing of soil moisture with microwave radiometers-II. / T. Schmugge [et al.] // NASA. – TN D-8321. – 1976.
68. *Schmugge T. J.* Effect of texture on microwave emission from soils / T. J. Schmugge // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1980. – № 4. – P. 353–361.

69. *Миронов В. Л.* Область применения диэлектрической модели Шмагге для влажных почв / В. Л. Миронов [и др.] // Решетневские чтения. – 2009. – Т. 1. – № 13. – С. 187–188.
70. *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.
71. *Дебай П.* Полярные молекулы / П. Дебай. – М. : ГНТИ. – 1931. – 247 с.
72. *Башаринов А. Е.* Определение влажности земных покровов методами СВЧ-радиометрии (обзор) / А. Е. Башаринов, А. М. Шутко // Радиотехника и электроника. – 1978. – Т. 23. – № 9. – С. 1778–1791.
73. *Бобров П. П.* Исследование диэлектрических характеристик почв в области перехода влаги из свободной в связанную на сверхвысоких частотах / П. П. Бобров [et al.] // ДАН СССР. – 1989. – Т. 304. – № 5. – С. 1116–1119.
74. *Миронов В. Л.* Изучение диэлектрических свойств влажных почвогрунтов в СВЧ-диапазоне / В. Л. Миронов [и др.] // Исследование Земли из космоса. – 1994. – Т. 4. – С. 18–24.
75. *Mironov V. L.* Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils / V. L. Mironov [et al.] // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2004. – Vol. 42. – № 4. – P. 773–785.
76. *Mironov V. L.* Study of the dielectric properties of wet grounds at microwave frequencies / V. L. Mironov [et al.] // Earth Obs. Remote Sens. – The Gordon and Breach Publishing Group. – 1995. – Vol. 12. – № 4. – P. 495–504.
77. *Комаров С. А.* Микроволновое зондирование почв. / С. А. Комаров, В. Л. Миронов. – Изд-во СО РАН. – Новосибирск. – 2000. – 260 с.
78. *Mironov V. L.* Soil dielectric spectroscopic parameters dependence on humus content / V. L. Mironov, P. P. Bobrov // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2003. – Vol. 2. – P. 1106–1108.
79. *Mironov V. L.* Data processing technique for deriving soil water spectroscopic parameters in microwave / V. L. Mironov [et al.] // IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing. – Denver. – 2006. – P. 2957–2961.

80. *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. – Barcelona. – 2007. – P. 749–753.
81. *Mironov V. L.* Spectral dielectric properties of moist soils in the microwave band / V. L. Mironov // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – 2004. – Vol. 5. – P. 3474–3477.
82. *Peplinski N. R.* Corrections to " Dielectric Properties of Soils in the 0.3-1.3-GHz Range" / N. R. Peplinski, F. T. Ulaby, M. C. Dobson // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1995. – Vol. 33. – № 6. – 1340 p.
83. *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 высших учебных заведений. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 9/2. – С. 93–97.
84. *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 высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 9/3. – С. 235–240.
85. *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. – № 6. – P. 3084–3094.
86. SMAP L2 Radiometer Half-Orbit 36 km EASE-Grid Soil Moisture, Version 2. [Electronic resource]. URL: https://nsidc.org/data/SPL2SMP_E/versions/2
87. *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.
88. *Dorf R. C.* The Electrical Engineering Handbook, Second Edition. / R. C. Dorf. – Taylor & Francis. – 1997.

89. *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 // PIERS online. – 2008. – Vol. 4. – № 1. – P. 31–35.
90. *Mironov V. L.* Temperature dependable microwave dielectric model for moist soils / V. L. Mironov, S. V. Fomin // Proc. PIERS. – 2009. – P. 831–835.
91. *Mironov V. L.* Temperature and Mineralogy Dependable Model for Microwave Dielectric Spectra of Moist Soils / V. L. Mironov, S. V. Fomin // PIERS online. – 2009. – Vol. 5. – № 5. – P. 411–415.
92. *Mironov V. L.* Temperature-Dependable Microwave Dielectric Model for an Arctic Soil / V. L. Mironov, R. D. De Roo, I. V. Savin // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2010. – Vol. 48. – № 6. – P. 2544–2556.
93. *Mironov V. L.* A physical model of dielectric spectra of thawed and frozen bentonitic clay within the frequency range from 1 to 15 GHz / V. L. Mironov, Y. I. Lukin // Russ. Phys. J. – 2011. – Vol. 53. – № 9. – P. 956–963.
94. *Ishida T.* Dielectric-relaxation spectroscopy of kaolinite, montmorillonite, allophane, and imogolite under moist conditions / T. Ishida, T. Marino, C. Wang // Clays Clay Miner. Springer. – 2000. – Vol. 48. – № 1. – P. 75–84.
95. *Kelleners T. J.* Frequency dependence of the complex permittivity and its impact on dielectric sensor calibration in soils / T. J. Kelleners [et al.] // Soil Sci. Soc. Am. J. – 2005. – Vol. 69. – № 1. – P. 67–76.
96. *Hasted J. B.* Aqueous dielectrics. / J. B. Hasted. – Chapman and Hall. – 1973. – 287 p.
97. *Mironov V. L.* Multirelaxation Generalized Refractive Mixing Dielectric Model of Moist Soils / V. L. Mironov, P. P. Bobrov, S. V. Fomin // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. – 2013. – Vol. 10. – № 3. – P. 603–606.
98. *Mironov V. L.* Generalized refractive mixing dielectric model of moist soils considering ionic relaxation of soil water / V. L. Mironov [et al.] // Russ. Phys. J. – 2013. – Vol. 56. – № 3. – P. 319–324.

99. *Эпов М.И.* Исследование диэлектрической проницаемости нефтесодержащих пород в диапазоне частот 0.05-16 ГГц / М. И. Эпов [et al.] // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 5. – С. 613–618.
100. *Лукин Ю. И.* Исследование диэлектрических спектров влажной почвы в процессе замораживания-оттаивания / Ю. И. Лукин, В. Л. Миронов, С. А. Комаров // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 9. – С. 24–28.
101. *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.
102. *Миронов В. Л.* Трехрелаксационная обобщенная рефракционная диэлектрическая модель влажных почв / В. Л. Миронов, С. В. Фомин, Ю. И. Лукин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 8–2. – С. 28–31.
103. *Fomin S. V.* Dielectric Model for Thawed Mineral Soils at a Frequency of 435 MHz / S. V. Fomin, K. Muzalevskiy // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. – 2021. – Vol. 18. – № 2. – P. 222–225.
104. *Mironov V. L.* A temperature-dependent dielectric model for thawed and frozen organic soil at 1.4 GHz / V. L. Mironov [et al.] // IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. – 2015. – Vol. 8. – № 9. – P. 4470–4477.