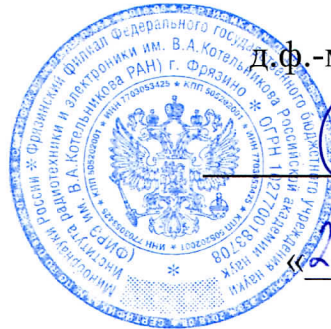


УТВЕРЖДАЮ

Директор ФИРЭ

им. В.А. Котельникова РАН



д.ф.-м.н. В.М. Смирнов

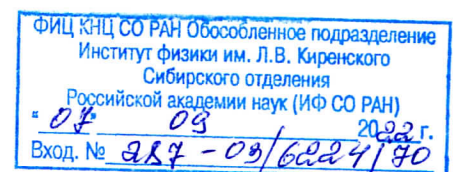
«25» июля 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации Крошки Елены Сергеевны
"Широкополосная диэлектрическая спектроскопия почв и пористых горных
пород", представленной на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика

Актуальность темы диссертации

Метод диэлектрической спектроскопии весьма перспективен для исследования структуры порового пространства почв и горных пород, определяющей многие физические свойства: электропроводность, диэлектрическую проницаемость, фильтрационные свойства, долю связанной воды и др. Знание этих свойства в геофизике позволяет получать исходные материалы для подсчета запасов нефти и газа и производительности скважин, для разработки электромагнитных методов геологоразведки, в том числе с использованием сверхширокополосных импульсов, для точной геонавигации при бурении горизонтальных стволов скважин, при разработке методов диэлектрического каротажа; в микроволновом дистанционном зондировании позволяет оценивать влажность почв, а в подповерхностном зондировании – глубину залегания объектов.



До настоящего времени для исследования природных объектов применяются сравнительно узкие частотные диапазоны. Для перекрытия широкого диапазона от десятков килогерц до единиц гигагерц применяются различные методы, в которых используются измерительные ячейки разной конструкции и разных размеров. При заполнении ячеек исследуемыми образцами не удается сохранить неизменность параметров – плотности и влажности, что не позволяет исследовать широкополосные процессы диэлектрической релаксации в этих образцах. Поэтому тема диссертационной работы Крошки Е.С., посвященная исследованию диэлектрических характеристик почв и влажных пористых пород и релаксационных процессов в широком частотном диапазоне от 10 кГц до единиц гигагерц, является актуальной.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из Введения, 4 глав и Заключения. Полный объем диссертации составляет 156 страниц, включая 80 рисунков и 18 таблиц. Список литературы содержит 145 наименований.

Во Введении аргументирована актуальность работы, описаны цель, научная новизна, методология и методы исследования, теоретическая и практическая значимость, достоверность и апробация работы, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации приведен достаточно полный обзор литературы по исследуемой проблеме. Рассмотрены как основополагающие работы отечественных и зарубежных авторов, так и современные работы по диэлектрическим свойствам почв и пород. Рассмотрены основные диэлектрические модели смесей и модели полярных жидкостей. Описаны электрофизические методы исследования свойств горных пород, методы и модели для расчета комплексной диэлектрической проницаемости (КДП). Представлено обоснование выбора направления исследований. Выполненный обзор свидетельствует о хорошем знании автором предмета исследования.

Во второй главе диссертации описана методика подготовки образцов, насыщающих растворов, а также методика насыщения и изменения влажности образцов; описываются экспериментальные установки и методика проведения экспериментов. Для проведения измерений используется современное оборудование – векторные анализаторы параметров цепей ZNB8 и ZNB20 фирмы Rohde & Schwarz и измеритель импедансов E4990A-10 фирмы Keysight Technologies. Проведен учет погрешностей измерения образцов с высокой электропроводностью. Показано, что в низкочастотном диапазоне погрешность измерения КДП зависит от тангенса диэлектрических потерь. Рассмотрены также возможные подходы к моделированию КДП почв и пород.

В третьей главе приведены результаты исследования слабозасоленных песков и консолидированных песчаных пород нефтеносных скважин. Представлены результаты измерения кварцевых гранул почти сферической формы с различными средними диаметрами двух фракций речного песка, а также пяти образцов кернов пород нефтеносной скважины. Для насыщения образцов применялись дистиллированная вода и растворы соли NaCl с удельной электропроводностью (УЭП) на постоянном токе до 0,77 См/м. При измерениях доля раствора в образцах изменялась от полного насыщения (около 0,4 м³/м³ в рыхлых образцах и около 0,2 – в консолидированных) до 0,16 м³/м³ в рыхлых образцах и до 0,03 м³/м³ в консолидированных образцах. Измерения выполнены не менее чем для пяти значений доли раствора в каждом из образцов. Моделирование диэлектрических спектров осуществлялось тремя релаксационными процессами.

Показано, что параметры процессов диэлектрической релаксации в слабозасоленных песках зависят от размеров частиц (удельной поверхности), от концентрации насыщающего раствора и его доли в образце. Впервые установлены следующие зависимости:

- низкочастотная УЭП образцов с мелкими размерами частиц при насыщении, близком к полному, может уменьшаться при увеличении УЭП

насыщающего раствора, что объясняется уменьшением толщины двойного электрического слоя (ДЭС), приводящим к уменьшению вклада поверхностной проводимости в общую УЭП образца;

- зависимости интенсивностей двух низкочастотных релаксационных процессов от УЭП образцов имеют высокие коэффициенты корреляции, в работе найдены условия, при которых интенсивности первого релаксационного процесса имеют тесную корреляционную связь с размерами частиц;
- времена релаксации релаксационных процессов слабо зависят от УЭП и доли раствора в образцах, в работе найдены корреляционные связи средних значений времен релаксации с размерами частиц. Коэффициент корреляции, как правило, выше при более высокой УЭП раствора (0,3-0,7 См/м);
- третий релаксационный процесс проявляется в мегагерцовом диапазоне, его время релаксации на три порядка меньше времени второго релаксационного процесса, его частотная удаленность как от низкочастотных процессов, так и от процессов, вызванных ориентационной поляризацией молекул свободной и связанной воды, позволяет определять его параметры более точно, чем параметры низкочастотных процессов.

Исследование силикагелей с малыми размерами внутренних пор показало, что значения коэффициента поглощения электромагнитных волн во всех образцах силикагеля слабо уменьшаются при возрастании объемной доли связанной воды до ее максимального содержания, равного $0,32-0,34 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Такая зависимость наблюдается в относительно узком диапазоне частот приблизительно от 0,8 до 2 ГГц. Это вызвано сильной зависимостью частоты релаксации молекул связанной воды во внутренних порах силикагелей от влажности.

Сравнение измеренных диэлектрических характеристик твердых образцов (кернов) песчаных пород нефтеносной скважины с разными размерами

внутренних пор и разрушенных образцов (шламов) этих же пород показало, что как и в твердых образцах, так и в шламах сохраняется зависимость интенсивности процесса от размера пор — чем мельче поры, тем выше интенсивность.

В четвертой главе исследованы образцы, содержащие глину: пески с добавлением бентонита в количестве 5% и 10 % от массы и сельскохозяйственные почвы.

При рассмотрении диэлектрических исследований песчаных смесей с глиной установлено, что добавление небольшого количества глины в песчаные образцы не приводит к значительному возрастанию УЭП образцов с крупными размерами частиц песчаной фазы. В образце кварцевых гранул с мелкими частицами максимальные значения проводимости, причем более значительные, чем в других образцах, наблюдаются при содержании глины 5 %. При этом существует сильная зависимость от концентрации раствора. При увеличении содержания глины до 10 % значения УЭП резко уменьшаются и становятся даже меньшими, чем в образце, не содержащем глины. Автор объясняет такое поведение УЭП образцов наличием разных конкурирующих механизмов электропроводности — поверхностной — движением ионов внутри ДЭС и объемной — движением ионов в объеме раствора. Когда количества глины достаточно для образования узких горловин между мелкими частицами, вступает в силу механизм мембранной поляризации, уменьшающий объемную электропроводность. Добавление глины приводит к возрастанию действительной и мнимой частей КДП на низких частотах, что обусловлено увеличением интенсивностей низкочастотных релаксационных процессов.

Интенсивности третьего высокочастотного релаксационного процесса максимальны в образцах с мелкими частицами песчаной фазы, однако добавление небольшого количества глины, частицы которой имеют меньшие размеры, приводит к уменьшению интенсивности этого процесса. Автор предполагает, что интенсивность этого процесса имеет максимальные значения при определенном размере частиц.

Для описания результатов измерения спектров КДП в диапазоне частот 10 кГц – 8,5 ГГц шести образцов влажных почв с различным содержанием глины и органического углерода была использована комбинированная рефракционно-релаксационная модель. В рефракционной части модели параметры модели Дебая связанной воды находились путем подбора на частотах выше 3 ГГц. Диэлектрические свойства свободной воды определялись по стандартной модели Дебая. Релаксационная часть модели включала три релаксационных процесса. Первый, низкочастотный процесс моделируется формулой Дебая, а два других – формулами Коула-Коула.

Влияние высокочастотного релаксационного процесса объясняет, почему в модели Миронова [86], используемой в алгоритме SMOS, диэлектрические свойства свободной воды на частоте 1,4 ГГц отличаются от предсказываемых моделью Дебая.

Наибольшие интенсивности низкочастотных релаксационных процессов наблюдаются в почвах с большим содержанием глины и отражают быстрое возрастание действительной и мнимой частей КДП в глинистых почвах при уменьшении частоты. Наибольшая изменчивость значений интенсивностей как третьего, так и первых двух релаксационных процессов наблюдается в диапазоне влажности, при котором наблюдаются резкие изменения удельной проводимости. Средние значения в диапазоне влажности от 0,2 до 0,3 м³/м³ имеют тесную корреляционную связь с содержанием глины. Эти зависимости можно аппроксимировать уравнениями линейной регрессии.

Влияние органического вещества при прочих равных условиях заключается в уменьшении действительной и мнимой частей КДП во всем исследованном частотном диапазоне.

При возрастании содержания глины область действия релаксационных процессов распространяется на более высокие частоты. Частота, соответствующая минимальному значению мнимой части КДП, разделяющая область преобладающего влияния релаксационных процессов и область

преобладающего влияния ориентационной поляризации молекул воды, связана с содержанием глины экспоненциальной зависимостью.

В Заключение приведены основные выводы диссертационного исследования.

Научная новизна

Автором получены следующие новые научные результаты, в том числе:

- впервые в широком диапазоне частот от 10 кГц до 8-18 ГГц проведены экспериментальные измерения комплексной диэлектрической проницаемости увлажняемых дистиллированной водой и солевым раствором образцов песков, порошков кварцевых гранул, мелкопористых силикагелей, песков с содержанием глины 5 и 10 % от массы, разрушенных образцов пород нефтеносной скважины, сельскохозяйственных почв с различным содержанием глины и гумуса, а также твердых образцов пород нефтеносной скважины в диапазоне частот от 100 Гц до 500 МГц;
- впервые исследованы процессы диэлектрической релаксации в широком частотном диапазоне в этих образцах, при этом обосновано моделирование спектров КДП тремя релаксационными процессами;
- установлены корреляционные связи параметров процессов диэлектрической релаксации с размерами частиц и удельной поверхностью в рыхлых песчаных образцах и с размерами внутренних пор силикагелей;
- установлено влияние глины и гумуса на интенсивность релаксационных процессов в сельскохозяйственных почвах, обнаружено, что в глинистых почвах релаксационные процессы зависят от содержания глины вплоть до частот 2–5 ГГц.

Теоретическая и практическая значимость. В диссертации показана перспективность метода диэлектрической спектроскопии для исследования влажных пористых пород. Использование метода широкополосной диэлектрической спектроскопии позволяет получать непрерывные спектры диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от единиц килогерц до

единиц гигагерц, с помощью которых открывается возможность создания моделей почв и горных пород, исследования многочастотных релаксационных процессов. Полученные в работе результаты могут быть использованы для изучения свойств структуры порового пространства почв и горных пород, необходимых в геофизике при подсчете запасов нефти и газа, в микроволновом дистанционном зондировании для определения влажности почв. Найденные параметры процессов диэлектрической релаксации имеют корреляционную связь с размерами частиц и удельной поверхностью в песчаных образцах, с содержанием глины в натуральных почвах.

Достоверность полученных данных КДП образцов почв и пород обеспечивается использованием сертифицированных поверенных измерительных приборов, использованием проверенной методики измерений, тщательным анализом погрешностей, совпадением в пределах расчётных погрешностей результатов измерений, полученных разными методами в перекрывающихся частотных диапазонах, совпадением части измерений с результатами, полученными другими авторами. Достоверность результатов моделирования подтверждается количественным совпадением экспериментально полученных зависимостей с модельными расчетами, высокими коэффициентами корреляции полученных регрессионных зависимостей параметров моделей от петрофизических характеристик образцов.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 26 публикациях, 9 из которых изданы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК, 17 — в материалах конференций, 12 из общего числа публикаций — в изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus.

Основные результаты

Подытоживая, можно констатировать, что автор диссертации в составе коллектива принимала непосредственное участие в подготовке публикаций по теме исследований. Автором выполнен большой объем широкополосных измерений комплексной диэлектрической проницаемости песков, порошков

кварцевых гранул, пород нефтеносных скважин, песчано-глинистых смесей и некоторых сельскохозяйственных почв. Основная часть расчетов и моделирования процессов релаксации комплексной диэлектрической проницаемости была выполнена соискателем самостоятельно.

В диссертационной работе были рассмотрены методы измерения комплексной диэлектрической проницаемости в широком диапазоне частот, описаны разные подходы к моделированию диэлектрических спектров.

В ходе работы были проведены диэлектрические измерения в широком диапазоне частот рыхлых и консолидированных песчаных пород, песчано-глинистых смесей, а также несколько образцов сельскохозяйственных почв Омской и Томской областей. При исследовании диэлектрических спектров и параметров процессов диэлектрической релаксации были установлены корреляционные связи с размерами частиц и удельной поверхностью песчаных образцов.

Добавление небольшого количества глины в песчаные образцы показало, что интенсивность имеет максимальные значения при определенном размере частиц.

Исследование силикагелей с малыми размерами внутренних пор показало, что существует явление уменьшения коэффициента поглощения электромагнитных волн при возрастании объемной доли связанной воды до ее максимального содержания.

Сравнение измеренных диэлектрических характеристик твердых образцов песчаных пород нефтеносной скважины с разными размерами внутренних пор и разрушенных образцов (шламов) этих же пород показало, что и в твердых образцах, и в шламах сохраняется зависимость интенсивности процесса от размера пор, при которой чем мельче поры, тем выше интенсивность.

В сельскохозяйственных почвах при насыщении, близком к полному, средние значения интенсивностей трех релаксационных процессов возрастают при увеличении содержания глины по линейному закону. Увеличение

содержания органического вещества (гумуса) при прочих равных условиях приводит к уменьшению действительной и мнимой частей КДП процессов.

Показано, что частота, соответствующая минимальному значению мнимой части КДП, зависит от содержания глины в малогумусных почвах. Эта частота в почвах с высоким содержанием глины достигает 3–4 ГГц.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Полученные данные могут быть использованы при дистанционном космическом зондировании Земли на частотах от 1,4 ГГц до 10,65 ГГц по программам SMOS, SMAP, Sentinel-1 и GCOM-1W; в подповерхностной радиолокации, диэлектрическом каротаже и исследовании свойств пород диэлектрическим методом, при расчете распространения радиоволн в земной атмосфере. Основные результаты исследований могут быть использованы в научно-исследовательских организациях: ИКИ РАН, ИРЭ РАН, Институте почвоведения и агрохимии СО РАН, Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Институте почвоведения МГУ РАН, Агрофизическом НИИ РАСХН.

Замечания

- 1) В работе исследован более широкий класс объектов, чем заявлено в названии и сформулировано в цели работы, а именно, исследованы не в узком смысле почвы (верхние плодородные слои земли), но более широкий класс объектов, а именно грунты (см. ГОСТ 25100-2011), поэтому при представлении работы имеет смысл указывать на то, что под термином «почва» в работе подразумеваются грунты.
- 2) Диссертационная работа отмечается значительным объемом экспериментальных исследований по исследованию большого ряда образцов почв в широком диапазоне частот от 10 кГц до 8-18 ГГц, при этом ее значимость могла быть существенно увеличена включением в экспериментальные работы также исследований температурных зависимостей интенсивностей релаксации.

3) В работе используется модель релаксации, базирующаяся на трех релаксационных процессах, которые так и обозначаются: «первый релаксационный процесс», «второй релаксационный процесс», «третий релаксационный процесс». С точки зрения описания физических процессов имеет смысл не только перенумеровать эти процессы, но также и связать их со структурными особенностями компонентов почв или особенностями взаимодействия этих компонентов между собой, т.е. по крайней мере, кратко указать на то, с какими особенностями компонентов почвы эти релаксационные процессы связаны.

Указанные замечания носят частный рекомендательный характер, не затрагивают основных идей диссертации и положений, выносимых на защиту, не снижают ценности диссертации и хорошего впечатления, которое она производит. Работа выполнена на высоком научном уровне. Автореферат и опубликованные работы правильно и достаточно полно отражают содержание диссертации. При оформлении диссертационной работы основные положения ГОСТ 7.0.11-2011 соблюдены.

Заключение

Диссертация Крошки Елены Сергеевны является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой на актуальную тему, выполненной под руководством доктора физико-математических наук, профессора Боброва Павла Петровича. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для научного направления "Разработка научных основ и принципов активной и пассивной дистанционной диагностики окружающей среды, основанных на современных методах решения обратных задач".

Работа соответствует требованиям пунктов 9-11, 13, 14 "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции от 01 октября 2018 г.).

Учитывая вышеизложенное, считаем, что Крошка Елена Сергеевна

заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика.

Диссертация Крошки Е.С. и отзыв на нее обсуждены и одобрены на заседании научно-квалификационного семинара "Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы" и "Статистическая радиофизика" Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН 25 июля 2022г., протокол № 7.

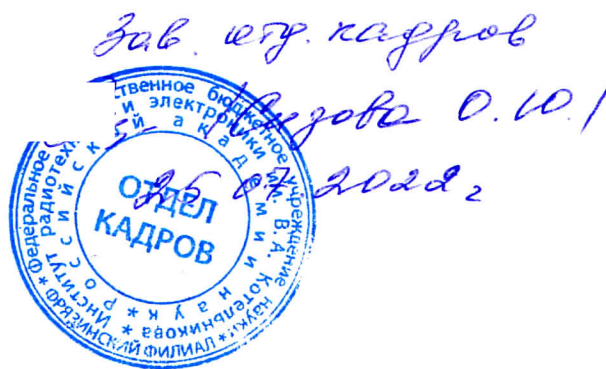
Отзыв подготовлен Саворским Виктором Петровичем, к-ф-м.н., специальность 01.04.03 - «Радиофизика», в.н.с., и.о. зав.лаб. ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, зам. председателя научно-квалификационного семинара "Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы" и "Статистическая радиофизика" Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН _____.

25.07.2022
подпись

Тел.: 84965652566,

e-mail: savor@ire.rssi.ru

Подпись Саворского В.П. заверяю



Сведения о ведущей организации:

Полное наименование: Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук

Сокращенное название: ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

Юридический адрес: Площадь им. Академика Б.А. Введенского, д. 1, Московская область, Фрязино, 141190

Телефон: +7(496)565-26-85

Электронная почта: chucheva@ms.ire.rssi.ru

Web-сайт: <http://fireras.su>

Список основных публикаций работников ведущей организации

1. Голунов В.А. Рассеяние микроволнового излучения в сухом слоистом снеге // РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2019, 11(1). С.39-48.
2. Захаров А.И., Захарова Л.Н. Возможности фазовых измерений в радиолокационной интерферометрии при наблюдении чрезвычайных ситуаций на примере Бурейского оползня. // РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2019, 11(1). С.31-38.
3. Захарова Л.Н., Захаров А.И. Сезонные вариации отражательных свойств растительных покровов // РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2019, 11(1). С.49-56.
4. Крапивин В.Ф., Маречек С.В., Вароцов С.А. The Dependence of the Soil Microwave Attenuation on Frequency and Water Content in Different Types of Vegetation: an Empirical Model // Water, Air, & Soil Pollution. An International Journal of Environmental Pollution, 2018, 229 (4). p. 110. doi.org/10.1007/s11270-018-3773-6.
5. Родионова Н.В. Анализ радарных данных Sentinel 1 для идентификации талых и мерзлых почв в районе Анадыря (Чукотка) и Белой Горы (Якутия) // ИЗК, 2019, № 1, с. 29-37. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019129-37>.
6. Родионова Н.В. Обратное рассеяние от приповерхностного слоя талых/мерзлых почв Аляски по радарным данным Sentinel 1 // РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2019, 11(1). С.21-30.
7. Rodionova N.V. Correlation of the Sentinel 1 radar data with ground-based measurements of the soil temperature and moisture // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2019, 55(9), pp. 939–948. DOI:10.1134/S0001433819090421
8. Юшкова О.В., Кибардина И.Н., Дымова Т.Н. Электрофизическая модель грунта Луны // Астрономический вестник, 2020, том 54, №6, с. 520–528.

Сведения и список публикаций подготовил:

в.н.с., и.о. зав.лаб.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Подпись Саворского В.П. заверяю

В.П.Саворский

