

На правах рукописи



Родионова Ольга Васильевна

**МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ
ПОЧВОГРУНТОВ В ШИРОКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ**

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный педагогический университет» на кафедре физики и методики обучения физике факультета математики, информатики, физики и технологии и в лаборатории микроволновой радиометрии отдела организации и планирования научно-исследовательских работ.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Бобров Павел Петрович**

Официальные оппоненты:

Бордонский Георгий Степанович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория геофизики криогенеза, главный научный сотрудник с возложением обязанностей заведующего лабораторией
Сусляев Валентин Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра радиоэлектроники, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук

Защита диссертации состоится 29 сентября 2016 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.04, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, ауд. 119.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Автореферат разослан _____ 2016 г.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationn/RodionovaOV29092016.html>

Ученый секретарь
диссертационного совета



Пойзнер Борис Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Измерение диэлектрических свойств материалов в широком частотном диапазоне требуется во многих областях фундаментальных и прикладных исследований. Диэлектрические спектры служат инструментом исследования физико-химических свойств исследуемых материалов. Эти измерения необходимы для контроля качества продукции в промышленности, для диагностического применения в области биомедицины, в дистанционном радиозондировании и в диэлектрическом каротаже. Экспериментальные данные о комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) в широком частотном диапазоне позволяют создавать и тестировать спектроскопические модели почв и горных пород, исследовать многочастотные релаксационные процессы.

Для исследования релаксационных процессов необходимо проводить точное измерение КДП ($\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$) в широком диапазоне частот. В существующих методах для разных веществ и в разных частотных диапазонах используются разные измерительные ячейки и разные измерительные приборы. Как показывают литературные данные, погрешность измерения действительной части ϵ^* при размещении образцов в отрезках коаксиальных линий не превышает 1%, если только длина волны в образце не превышает длину заполненной части ячейки более чем в 5 раз. На более низких частотах при отношении длины волны в образце к длине образца, равным 12-ти, погрешность составляет около 5% (Gorriti et al., 2005, Chew et al., 1991). С учетом того, что реальная длина ячейки не может превышать 15–20 см, погрешность измерения веществ с диэлектрической проницаемостью 2–3 ед. на частотах ниже 100 МГц становится неприемлемой.

В итоге до последнего времени для проведения диэлектрических измерений в разных частотных диапазонах применяются разные методы. При этом каждый раз проводятся измерения разных образцов одного и того же вещества. Поскольку исследуемое вещество помещается в разные ячейки, в случае сыпучих флюидонасыщенных веществ не удастся выдерживать одинаковые петрофизические характеристики, такие как плотность, пористость и коэффициент флюидонасыщенности. Это не позволяет проводить изучение многочастотных релаксационных процессов и влияния на них этих петрофизических характеристик.

Поэтому разработка и исследование методов измерения ϵ^* веществ, представленных одним образцом и обеспечивающих низкую погрешность в широком диапазоне частот (от единиц килогерц до единиц гигагерц), является актуальными.

Изучение литературы показывает, что имеются различия в результатах измерения диэлектрических характеристик глин, в частности бентонита. Разные авторы выдерживают увлажненные образцы перед измерением ϵ^* разное время или вообще не сообщают о времени выдерживания. Необходимо выяс-

нить, как время выдерживания увлажненных глинистых почв влияет на результат измерения ϵ^* в широком частотном диапазоне.

Цель диссертационной работы заключалась в разработке широкополосного способа измерения спектров комплексной диэлектрической проницаемости почвогрунтов, доказательстве его работоспособности и его применении для получения сведений о процессах диэлектрической релаксации в породах с содержанием глины от 30% и о влиянии на них петрофизических характеристик.

Конкретными задачами, решаемыми в рамках диссертации, являются:

1. Разработать способ измерения комплексной диэлектрической проницаемости почвогрунтов в диапазоне частот 0,3 – 100 МГц и совместить его с известными методами измерения на частотах ниже 1 МГц и выше 100 МГц таким образом, чтобы во всем диапазоне частот от десятков герц до единиц гигагерц измерялся один и тот же образец.

2. Использовать разработанный метод для изучения процесса изменения во времени комплексной диэлектрической проницаемости пород после увлажнения до достижения равновесного состояния.

3. Исследовать релаксационные процессы во влажных глинистых и песчано-глинистых породах и найти зависимость параметров релаксационных процессов от влажности, содержания глины и удельной площади поверхности.

Объектом исследования являются естественные и искусственные среды.

Предмет исследования – диэлектрические характеристики естественных и искусственных сред в частотном диапазоне от 42 Гц до 8,5 ГГц.

Методы исследования. Физические эксперименты с применением векторных анализаторов цепей в диапазоне частот от 0,3 МГц до 8,5 ГГц и с применением измерителей импеданса в диапазоне частот 42 Гц – 1 МГц. Методы численного моделирования процессов диэлектрической релаксации, реализуемые в программной среде MS Excel. Метод поиска минимума функций нескольких переменных, выполняемый в среде Visual Basic for Applications с использованием инструмента Solver.

Положения, выносимые на защиту:

1. Включение коаксиальной измерительной ячейки в разрыв центрального проводника отрезка линии большего сечения таким образом, что корпус ячейки одновременно служит центральным проводником этого отрезка, позволяет в сочетании с известными методами измерять комплексную диэлектрическую проницаемость одного и того же образца в диапазоне частот 42 Гц – 8,5 ГГц с погрешностью измерения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости не выше 3%.

2. После увлажнения предварительно высушенных образцов бентонита (содержание монтмориллонита ~70% по массе) и естественной лугово-черноземной почвы (содержание гумуса 6,6% и глины 36%) в последующие 7–9 суток происходит изменение значений действительной части комплексной диэлектрической проницаемости в 1,2–1,5 раза и мнимой части – почти на порядок.

3. Наличие изломов на графиках зависимостей действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления бентонита от влажности при значениях влажности 0,04–0,07 м³/м³ свидетельствует о скачкообразном изменении энергетического состояния связанной воды.

4. Зависимость времени диэлектрической релаксации τ глинистых образцов, полностью насыщенных дистиллированной водой, от удельной площади поверхности $S_{уд}$ имеет вид: $\tau = \tau_0 e^{\beta_0 S_{уд}}$, где $\tau_0 = (83,7 \pm 6,6)$ нс, $\beta_0 = (-0,046 \pm 0,001)$ г/м², $S_{уд}$ в м²/г.

Достоверность защищаемых положений. Достоверность первого научного положения подтверждается согласованием экспериментальных данных о диэлектрической проницаемости трансформаторного масла с данными, приведенными в работе (Folgero, 1986), в перекрывающемся частотном диапазоне.

Достоверность второго и третьего научных положений опирается на данные авторских экспериментальных исследований комплексной диэлектрической проницаемости сыпучих и жидких веществ. Результаты подтверждаются совпадением с точностью до погрешности (не выше 3%) измеренных значений комплексной диэлектрической проницаемости одного и того же образца тремя методами и двумя приборами; анализом погрешностей. Результаты по положению 3 не противоречат представлениям о состоянии связанной воды в породах при низкой влажности, когда воды недостаточно для образования мономолекулярных пленок на поверхности минеральных частиц (Дерягин и др., 1984).

Достоверность четвертого научного положения подтверждается анализом погрешности определения времени релаксации, основанном на погрешности экспериментального измерения комплексной диэлектрической проницаемости водонасыщенных пород.

Измерения проведены с использованием сертифицированных поверенных измерительных приборов – измерителя импеданса 3532-50 Hioki HiTESTER и векторных анализаторов цепей ZVRE и ZNB8 производства фирмы Rohde&Schwarz.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационном исследовании, заключается в следующем:

1. Разработан новый широкополосный метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости сыпучих и жидких веществ, находящихся в одной ячейке, в диапазоне частот 42 Гц – 8,5 ГГц при погрешности измерения менее 2,5% для действительной части ϵ^* и менее 3% – для мнимой части ϵ'' . Новизна подтверждена патентами РФ на изобретение № 2509315 МПК G01R27/26, G01N22/04 и № 2474830 C1 МПК G01R27/26, G01N22/04.

2. Обнаружен процесс длительного изменения комплексной диэлектрической проницаемости глинистых почв после увлажнения из сухого состояния, приводящий к наиболее сильным изменениям ϵ^* на частотах ниже 50–100 МГц. Оценена его длительность.

3. Обнаружено скачкообразное изменение показателя преломления связанной воды в бентоните при малом ее количестве, свидетельствующее об изменении ее фазового состояния.

4. Установлена зависимость времени диэлектрической релаксации от удельной площади поверхности глинистых водонасыщенных пород, не зависящая от типа глины.

Научная ценность защищаемых положений и других результатов работы заключается в следующем:

1. В соответствии с положением 1, метод, позволяющий производить измерения сплошных спектров диэлектрической проницаемости почв и горных пород в диапазоне частот от десятков герц до единиц гигагерц, дает возможность исследовать многочастотные релаксационные процессы в газо-, водо-, нефтенасыщенных породах, связывать их с петрофизическими характеристиками. Научная ценность подтверждена в отчете по теме «Разработка физических основ дистанционных и контактных радиофизических методов оценки гидрофизических характеристик почв», 2007–2012 гг., рег. № 0120.0802369, выполненной в рамках аналитической ведомственной целевой программы Минобрнауки РФ.

2. Положение 2 указывает на явление длительного (в течение 7–9 суток) изменения диэлектрической проницаемости глинистых пород после увлажнения из сухого состояния. За время установления стабильного значения диэлектрической проницаемости происходит формирование двойного электрического слоя на границе раздела вода–твердая фаза, который вносит основной вклад в диэлектрическую проницаемость пород с высокой удельной площадью поверхности на частотах ниже 100 МГц. Обнаруженное явление показывает возможность исследования процессов структурной перестройки почвенной матрицы и образования органо-минерального геля диэлектрическим методом. Научная ценность подтверждена в отчете по теме «Исследование влияния органического вещества на комплексную диэлектрическую проницаемость почв и горных пород с различной пористостью в широком диапазоне частот электромагнитных волн», 2012–2013 гг., рег. № 01201254111, выполненной в рамках госзадания Минобрнауки РФ; в отчете по теме «Исследование диэлектрической релаксации в нефтенасыщенных песчано-глинистых породах», 2012–2013 гг., рег. № 01201263698 (грант РФФИ, проект № 12-05-00502а).

3. Положение 3, указывающее на наличие фазового превращения связанной воды при влажности бентонита $0,04\text{--}0,07\text{ м}^3/\text{м}^3$, сопровождаемого скачкообразным изменением энергии взаимодействия молекул воды с поверхностью минерала, необходимо учитывать в теории сорбции паров воды на твердой поверхности.

4. Полученная в 4-м защищаемом положении формула обладает универсальностью по отношению к типам глинистых минералов, имеющим значения удельной площади поверхности от 5 до $70\text{ м}^2/\text{г}$, и может быть использована в почвоведении, геофизике и материаловедении.

Практическая значимость работы заключается в создании нового способа измерения ϵ^* , обладающего следующими преимуществами: широкополосностью (диапазон частот от десятков герц до единиц гигагерц) и низкой погрешностью измерения (менее 3%). С использованием этого способа стало возможным получение непрерывных спектров диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 42 Гц до 8,5 ГГц, которые позволяют создавать и тестировать спектроскопические модели почв и горных пород, исследовать многочастотные релаксационные процессы.

Подобные измерения необходимы при контроле качества продукции в промышленности, для диагностического применения в области биомедицины, в дистанционном радиозондировании и в диэлектрическом каротаже. Практическая значимость подтверждается работами, при выполнении которых был использован данный способ измерений (Бобров и др., 2015а, 2015б).

Положение 2 и связанные с ним результаты указывают на необходимость длительного выдерживания исследуемых пород после увлажнения для достижения стабильного значения комплексной диэлектрической проницаемости перед ее измерением.

Результаты по положению 4 позволяют оценивать удельную поверхность пород путем измерения их диэлектрических характеристик в состоянии полного насыщения дистиллированной водой. В отличие от метода определения удельной поверхности по изотерме адсорбции паров воды диэлектрический метод требует существенно меньших затрат времени.

Включенные в диссертацию результаты получены автором при выполнении работ в рамках следующих НИР: «Исследование радиофизических характеристик почв, загрязненных промышленными выбросами, в микроволновом и оптическом диапазонах длин волн», 2002–2007 гг., рег. № 01.20.0001819, включенной в темплан Минобразования; по гранту РФФИ «Диэлектрическая релаксация в газо-, нефте-водонасыщенных породах» 2014–2016 гг., рег. № 01201453396 (проект № 14-05-00151а) и теме, включенной в базовую часть госзадания Минобрнауки РФ «Исследование влияния удельной поверхности и структуры порового пространства нефте-водонасыщенных пород на диэлектрическую проницаемость и удельную эквивалентную проводимость», 2014–2016 гг., рег. № 114120370138 (проект № 3460).

Апробация работы. Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на конференциях и симпозиумах различного уровня: Всероссийские конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва 2008, 2010, 2012), Международные конференции Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS) (Moscow, 2009; Prague, 2015), Международные студенческие конференции «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2009, 2011), Всероссийские научные конференции студентов-физиков и молодых ученых (Кемерово, 2009, Красноярск, 2012), Международные научно-практические конференции «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск,

2010, 2012, 2015), Российская научная конференция «Зондирование земных покровов радарными с синтезированной апертурой» (Улан-Удэ, 2010), International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS10, Honolulu, USA, 2010), Международные конференции «Физика диэлектриков» (Санкт-Петербург, 2011, 2014), Всероссийская молодежная научная конференция с участием иностранных ученых «Трофимовские чтения – 2013» (Новосибирск), VII Международная научно-практическая конференция «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия» (Новосибирск, 2014), XIX Международный научный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2015).

Личный вклад автора. Автор в составе коллектива «Лаборатории микроволновой радиометрии» отдела организации и планирования НИР ФГБОУ ВО «ОмГПУ» принимал непосредственное участие в создании и тестировании широкополосного метода измерения ϵ^* и измерительной установки. Автором выполнен большой объем измерений диэлектрической проницаемости глинистых пород различного гранулометрического состава и нефте- и водонасыщенных пород. Основная часть расчетов и моделирования процессов диэлектрической проницаемости была выполнена соискателем самостоятельно.

Публикации. Полученные научные результаты изложены в 19 публикациях, из которых 5 – в научных журналах, рекомендованных перечнем сайта Высшей аттестационной комиссии; 2 – патенты, зарегистрированные в Государственном реестре изобретений Российской Федерации; 12 – в сборниках научных трудов и материалов международных и всероссийских конференций (из них 3 в трудах зарубежных конференций). Общий объем публикаций – 5,28 п.л., личный вклад автора – 1,62 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 126 наименований; содержит 136 страниц, 71 рисунок и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, аргументирована их научная новизна, показана практическая значимость полученных результатов и их достоверность на основе сравнения с другими теоретическими исследованиями, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен литературный обзор методов измерения ϵ^* различных веществ, дан обзор современных диэлектрических моделей почв. Сделан анализ публикаций, посвященных вопросам широкополосной диэлектрической спектроскопии. Рассмотрены диэлектрические модели многокомпонентных смесей и релаксационные модели комплексной диэлектрической

проницаемости воды, а также проанализированы диэлектрические свойства глинистых почв. Сформулированы задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** приведено описание метода измерения ϵ^* жидких и сыпучих сред, находящихся в одной коаксиальной ячейке, в широком диапазоне частот.

В **разделе 2.1** выполнен анализ метода измерения ϵ^* сред в диапазоне частот 10–100 МГц с использованием одной коаксиальной ячейки длиной 20 см, описанном в работе (Folgero, 1998). Проведен расчет погрешности измерения действительной части ϵ^* гипотетической среды со значениями $\epsilon' = 2,4$ и эквивалентной удельной проводимостью $\sigma = 10^{-5}$ См/м. Показано, что погрешность измерения является неприемлемо высокой в частотном диапазоне 1–30 МГц.

В **разделе 2.2** описана сущность метода измерений ϵ^* в широком диапазоне частот с использованием одной коаксиальной ячейки.

Исследуемое вещество помещают в коаксиальную ячейку. В высокочастотной области (от 0,1 до 4–8,5 ГГц) ячейка непосредственно подключается к векторному анализатору цепей, с помощью которого измеряются четыре коэффициента матрицы рассеяния (S параметры). Методика измерения ϵ^* веществ описана в работе (Эпов и др., 2009).

Для измерения в частотном диапазоне 0,3–100 МГц ячейка включается в разрыв центрального проводника отрезка линии большого сечения с волновым сопротивлением, равным 50 Ом (см. рис. 1), таким образом, что корпус ячейки одновременно служит центральным проводником этого отрезка (Патент РФ № 2509315). Значения ϵ^* рассчитываются через измеренные значения комплексного коэффициента передачи отрезка линии большого сечения.

На частотах ниже 1 МГц ячейка рассматривается как цилиндрический конденсатор, и ее комплексный импеданс измеряется с помощью измерителя LCR по обычной методике. Схема измерений в разных частотных диапазонах приведена на рис. 2.

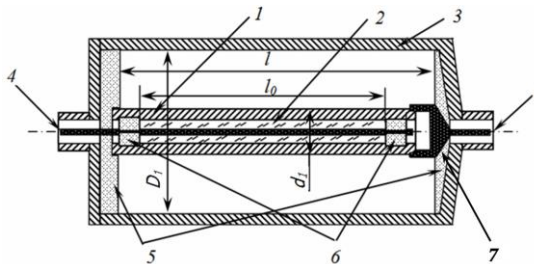


Рис. 1. Эскиз устройства для измерения комплексной диэлектрической проницаемости вещества, заполняющего ячейку, в диапазоне 0,3–100 МГц. 1 – коаксиальная ячейка; 2 – исследуемое вещество; 3 – корпус устройства (наружный проводник внешней коаксиальной линии); 4 – разъемы N-типа; 5 – опорные диэлектрические шайбы внешней коаксиальной линии; 6 – опорные диэлектрические шайбы коаксиальной ячейки; 7 – отрезок конической линии; l_0 – расстояние между шайбами 6; l – расстояние между шайбами 5

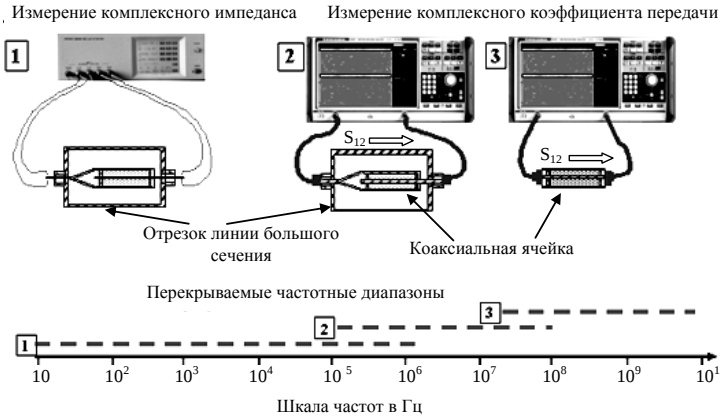


Рис. 2. Схематическое изображение экспериментальной установки для определения частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости образца (вариант 1)

На рис. 3 представлена эквивалентная электрическая схема устройства. Здесь E_g и $R_0 = 50$ Ом – ЭДС и внутреннее сопротивление выхода векторного анализатора цепей, соответственно. Небольшая емкость C_1 образована концом корпуса коаксиальной ячейки 1 (см. рис. 1) и левой стенкой корпуса коаксиальной линии большого сечения. При измерениях ее влиянием на модуль S_{12} на частотах ниже 100 МГц можно пренебречь, а изменение фазы прошедшей волны учесть при калибровке. Отрезок длиной l замещает линию передачи, центральным проводником которой является корпус коаксиальной ячейки (см. рис. 1). В диапазоне частот от 0,3–100 МГц этот отрезок согласован с внутренним сопротивлением генератора и лишь изменяет фазу проходящей волны на величину $\Delta\varphi = k_0 l + \Delta\varphi_X$, где $\Delta\varphi_X$ – фазовый набег в элементах переходников со стандартного сечения 7/3 мм на увеличенное сечение. Этот фазовый набег определяют при начальной калибровке.

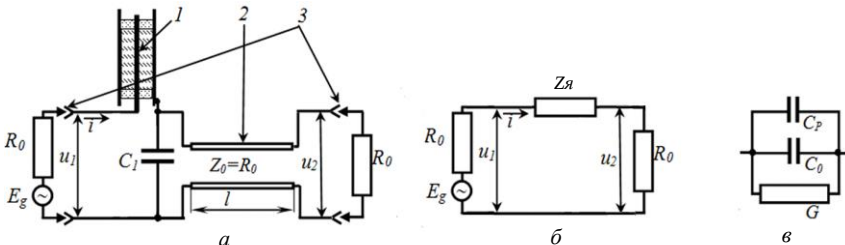


Рис. 3. Эквивалентная схема электрической цепи устройства (а), эквивалентная схема цепи сосредоточенными параметрами (б) и эквивалентная схема коаксиальной ячейки (в). 1 – коаксиальная ячейка с образцом; 2 – отрезок коаксиальной линии большого сечения; 3 – разъемы N-типа

С учетом этого измеряемый комплексный коэффициент передачи можно представить в виде

$$S_{12} = S'_{12} e^{i\Delta\varphi}, \quad (1)$$

где $S'_{12} = S_{12} e^{-i\Delta\varphi}$ – коэффициент передачи за вычетом набега фаз $\Delta\varphi$. Тогда эквивалентную схему можно представить в виде цепи с сосредоточенными параметрами (см. рис. 3б), где $Z_{\mathcal{I}} = 1/(G + i\omega(C_P + \varepsilon' C_0))$ – импеданс ячейки как цилиндрического конденсатора (см. рис. 3в). Здесь G – активная проводимость, ε' – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости вещества, заполняющего ячейку; C_P – паразитная емкость, которая формируется частями коаксиальной ячейки за пределами исследуемого образца; ω – циклическая частота; C_0 – рабочая емкость (емкость отрезка ячейки между внутренними опорными шайбами):

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(D/d)} l_0, \quad (2)$$

где l_0 – длина образца (расстояние между опорными шайбами), D/d – отношение диаметров внешнего и внутреннего проводников ячейки; ε_0 – электрическая постоянная.

Комплексный коэффициент передачи S'_{12} такой цепи равен (Маттей и др. 1971)

$$S'_{12} = 2 \frac{u_2}{E_g} = 2 \frac{u_2}{u_1 + iR_0}, \quad (3)$$

где u_1 и u_2 – напряжения, i – ток на участках цепи (см. рис. 3).

Используя правила Кирхгофа, можно выразить S'_{12} через элементы схемы, приведенной на рис. 3б:

$$S'_{12} = \frac{2R_0}{2R_0 + Z_{\mathcal{I}}}, \quad (4)$$

Из (4) получаем:

$$Z_{\mathcal{I}} = \frac{2R_0(1 - S'_{12})}{S'_{12}} = \frac{1}{Y_{\mathcal{I}}}, \quad (5)$$

где $Y_{\mathcal{I}}$ – комплексная проводимость:

$$Y_{\mathcal{I}} = G + i\omega(C_P + \varepsilon' C_0). \quad (6)$$

Разделив измеренное значение комплексной проводимости на действительную и мнимую части, можно определить значение действительной части ε^* и эквивалентную удельную проводимость исследуемого вещества $\sigma = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon''$, где ε'' – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости вещества:

$$\operatorname{Re}(Y_{\mathcal{I}}) = \sigma C_0 / \varepsilon_0, \quad (7)$$

$$\operatorname{Im}(Y_{\mathcal{I}}) = \omega(C_P + \varepsilon' C_0). \quad (8)$$

Для определения фазового набега $\Delta\varphi$ и паразитной емкости C_P перед измерениями необходимо произвести калибровку, которая производится при измерении импеданса пустой ячейки и комплексного коэффициента передачи (параметра S_{12}) отрезка линии большого сечения с включенной пустой коаксиальной ячейкой.

Возможна модификация описанного выше метода, когда измеряется коэффициент отражения отрезка линии большого сечения с включенной ячейкой, если к другому концу этой линии присоединен короткозамыкатель переменной длины (см. рис. 4). Показано, что такая модификация позволяет для веществ с большими потерями получить меньшую погрешность на частотах 40–100 МГц.

Эквивалентная электрическая схема отрезка коаксиальной линии с расположенной в ней ячейкой 1, содержащей исследуемое вещество, изображена на рис. 5. Здесь обозначения те же, что и на рис. 3, за исключением следующих: l_0 – длина короткозамкнутого отрезка, меньшая четверти длины волны; L – эквивалентная индуктивность этого отрезка.

Комплексный коэффициент отражения (параметр матрицы рассеяния S_{11}) от участка AB эквивалентной схемы (см. рис. 5б), измеряемый с помощью векторного анализатора цепей, равен (Маттей и др., 1971):

$$S_{11} = \frac{Z_{AB} - R_0}{Z_{AB} + R_0}, \quad (9)$$

где Z_{AB} – импеданс участка цепи между точками А и В.

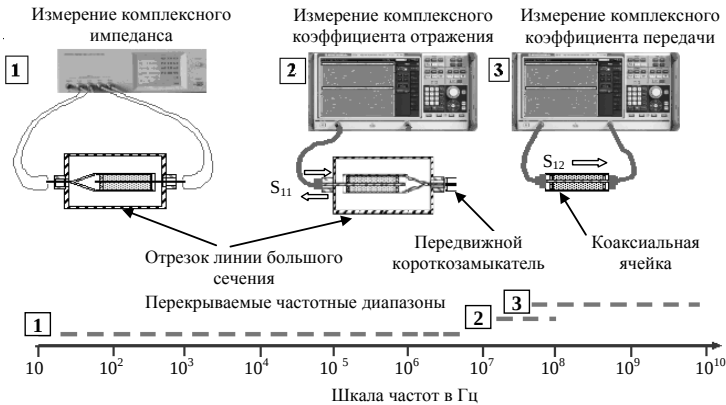


Рис. 4. Схематическое изображение экспериментальной установки для определения частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости образца (вариант 2)

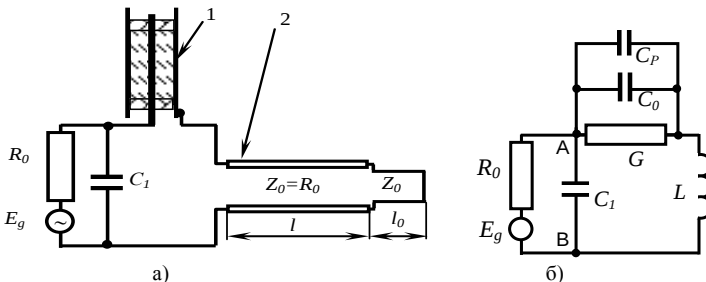


Рис. 5. Эквивалентная схема отрезка коаксиальной линии с расположенной в ней ячейкой

Из выражения (9) получаем

$$Z_{AB} = R_0 \left(\frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \right). \quad (10)$$

С другой стороны,

$$Z_{AB} = \frac{1}{i\omega C_1 + \frac{1}{i\omega L + 1/Y_J}}, \text{ откуда } Y_J = \frac{1 - i\omega C_1 Z_{AB}}{Z_{AB}(1 - \omega^2 L C_1) - i\omega L}. \quad (11)$$

Подставляя в (11) значения Z_{AB} из (10), определяемые через измеренные значения параметра матрицы рассеяния S_{11} , находим комплексную проводимость ячейки. Определение параметров элементов эквивалентной схемы C_1 , C_p и L производится при калибровке ячейки, проводимой как и в варианте 1.

В **разделе 2.3** приведено обоснование выбора в качестве основных приборов векторного анализатора цепей ZNB8 (до 8,5 ГГц) или ZVRE (до 4 ГГц) фирмы Rohde & Schwarz и измерителя LCR 3532-50 HiTESTER.

Результаты тестирования методов изложены в **разделе 2.4**.

Тестирование осуществлялось на веществах, диэлектрическая проницаемость которых была постоянной в широком частном диапазоне, а также на образцах почв разной влажности. Критерием точности метода в последнем случае являлось совпадение значений ϵ' и ϵ'' , измеренных разными способами в перекрывающихся частотных диапазонах. Все измерения проведены при температуре 25°C.

На рис. 6 приведены значения ϵ' и ϵ'' суглинистой почвы и каолина, полученные через комплексный коэффициент передачи (по варианту 1). В перекрывающихся диапазонах частот результаты измерений разными методами отличаются на величины, не превышающие погрешности измерения (менее 3%). Действительная и мнимая части ϵ^* влажного каолина и почвы возрастают на низких частотах вследствие межслойной поляризации на границе твердая фаза–вода.

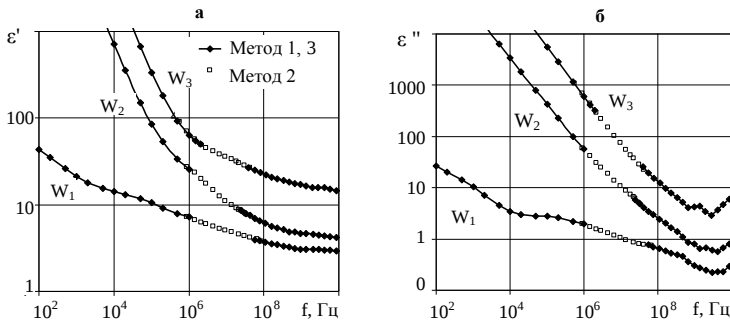


Рис. 6. Частная зависимость действительной (а) и мнимой (б) частей комплексной диэлектрической проницаемости суглинистой почвы влажностью $0,009 \text{ м}^3/\text{м}^3$ – кривая 1, $0,130 \text{ м}^3/\text{м}^3$ – кривая 2, $0,424 \text{ м}^3/\text{м}^3$ – кривая 3

На рис. 7 представлены результаты измерений действительной части комплексной диэлектрической проницаемости ϵ' трансформаторного масла в ячейке длиной 10,5 см по варианту 2 (в диапазоне частот 1–100 МГц измерялся комплексный коэффициент отражения). Видно, что расчетная погрешность измерения этим методом возрастает при уменьшении частоты.

Результаты расчета погрешности измерений, основанные на паспортных значениях погрешности приборов, приведены в **разделе 2.5**. При расчетах погрешностей использовались паспортные значения погрешности измерителя импеданса и векторного анализатора цепей, зависящие от частоты измерения и значений измеряемых величин, а также от погрешности измерений линейных размеров образцов.

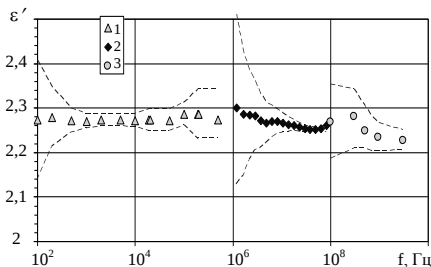


Рисунок 7 – Частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости трансформаторного масла. 1 – результаты получены с помощью измерителя LCR; 2 – получены с помощью измерения параметра S_{11} коаксиальной ячейки помещенной в отрезок коаксиальной линии большого сечения; 3 – получены с помощью измерения параметра S_{12} коаксиальной ячейки. Штриховыми линиями показаны границы диапазона возможных значений ϵ' с учетом приборной погрешности

Расчет погрешности проведен для разных значений ϵ^* и разных длин ячеек. Показано, что для достижения минимальной погрешности измерений длина коаксиальной ячейки должна выбираться таким образом, чтобы значение модуля импеданса заполненной ячейки на частотах 0,1–10 МГц находилось в пределах 100 Ом – 100 кОм. При выполнении этого условия погрешность измерения действительной части комплексной диэлектрической проницаемости не превышает 2,5%, а мнимой части – 3% во всем частотном диапазоне 10^2 – $8,5 \cdot 10^9$ Гц. На рис. 8 приведены частотные зависимости относительной погрешности измерения КДП одного из образцов по варианту 1.

Верхний предел частотного диапазона определяется либо граничной частотой векторного анализатора цепей, либо появлением высших типов волн в заполненной коаксиальной ячейке. В заполненной ячейке с диаметром внутреннего проводника коаксиальной линии $D = 7$ мм критическая частота может составлять 10–12 ГГц. Низкочастотная граница диапазона измерений определяется либо граничной частотой измерителя LCR, либо электродной поляризацией при измерении веществ, в которых существует ионная проводимость.

В третьей главе представлены экспериментальные данные о комплексной диэлектрической проницаемости некоторых пород в частотном диапазоне 1 кГц – 8,5 ГГц. Методика подготовки почвенных образцов и определение их объемной влажности подробно описаны в разделе 3.1.

В разделе 3.2 приведены результаты исследований временной зависимости ϵ^* бентонита и суглинка в широком частотном диапазоне. Установлено, что комплексная диэлектрическая проницаемость исследуемых образцов изменяется в течение нескольких суток после увлажнения из сухого состояния. Самые большие изменения ϵ' во времени наблюдаются в диапазоне 1–100 МГц, а величина ϵ'' на частотах ниже 10 МГц за несколько суток изменяется почти на порядок. На основании этих данных определена методика подготовки почвенных образцов для измерения диэлько-влажностных зависимостей.

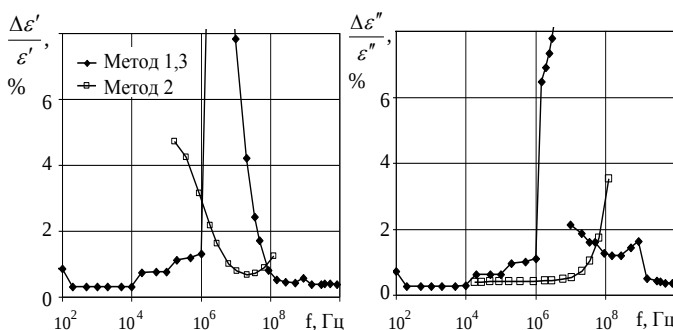


Рис. 8. Относительная погрешность измерения суглинистой почвы в ячейке длиной 2,6 см. Влажностью 0,429 м³/м³

В разделе 3.3 приведены результаты измерения комплексной диэлектрической проницаемости бентонита в широком диапазоне частот и исследованы диэлектрические свойства связанной воды в бентоните.

Обнаружено, что при малых влажностях (доля воды менее 0,06–0,07 м³/м³), когда воды, находящейся в породе, недостаточно для образования сплошной пленки на поверхности твердых частиц, комплексный показатель преломления бентонита $n_s^* = n_s - ik_s = \sqrt{\epsilon_s^*}$ растет с возрастанием влажности быстрее, чем в диапазоне влажностей от 0,07 до 0,2 м³/м³ (см. рис. 9). Изменение наклонов зависимостей $n_s(W)$ и $k_s(W)$ свидетельствует о том, что происходит резкое изменение действительной и мнимой частей комплексной проницаемости связанной воды.

Экспериментально исследованы температурные зависимости ϵ^* бентонита в диапазоне температур от –18°C до 45°C при разных значениях объемной доли воды. Показано, что наиболее сильно температурная зависимость ϵ' и ϵ'' проявляется на низких частотах, причем в диапазоне малых влажностей она слабее, чем при влажностях, превышающих значение 0,07 м³/м³ (на частоте 1 МГц на порядок).

Для исследования диэлектрических свойств связанной воды в бентоните использовалась рефракционная модель смеси (Mironov et al., 2013).

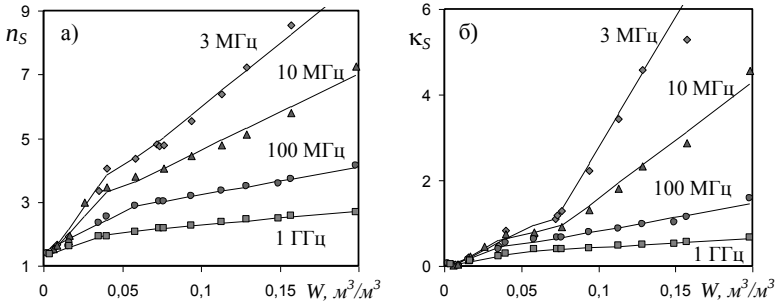


Рисунок 9 – Аппроксимированные зависимости действительной n_s (а) и мнимой κ_s (б) частей показателя преломления бентонита от объемной влажности при температуре 25°C

Спектры комплексного показателя преломления и ϵ^* связанной воды были найдены из экспериментально измеренных спектров комплексного показателя преломления бентонита с помощью рефракционной модели. Частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости связанной воды рассчитывалась по модели (Беляева и др., 2013), в которой частотная зависимость описывалась релаксационными моделями Дебая и Коула–Коула:

$$\epsilon_b^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_{s1} - \epsilon_\infty}{1 + i\omega\tau_1} + \frac{\Delta\epsilon_{s2}}{1 + (i\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}} + \frac{\Delta\epsilon_{s3}}{1 + (i\omega\tau_3)^{1-\alpha_3}}, \quad (12)$$

здесь ϵ_∞ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость, значение которой принималось равным 4,9; ϵ_{s1} – низкочастотная диэлектрическая проницаемость 1-й (начиная с высокочастотного края диапазона) области релаксации; $\Delta\epsilon_{s2}$, $\Delta\epsilon_{s3}$ – разности между низкочастотным и высокочастотным пределами диэлектрической проницаемости 2-й и 3-й областей релаксации, соответственно; τ_1 , τ_2 , τ_3 – времена релаксации для 1, 2, 3-й областей релаксации, соответственно; α_2 , α_3 – коэффициенты распределения времен релаксации для 2-й и 3-й областей; ω – циклическая частота.

Параметры модели (12) подбирались таким образом, чтобы невязка между расчетными значениями по рефракционной модели ϵ^* бентонита и измеренными экспериментально значениями была бы минимальной. Параметры первой области релаксации, описывающей ориентационную поляризацию, принимались неизменными во всех случаях и равными $\epsilon_{s1} = 30$; $\tau_1 = 12,5$ пс, так как в бентоните, имеющем большую удельную поверхность, межповерхностная поляризация превалирует над ориентационной вплоть до частот ~ 10 ГГц. Параметры 2-й области релаксации подбирались путем минимизации невязки на частотах выше 100 МГц, а затем в частотном диапазоне 10 кГц – 8,5 МГц подбирались параметры 3-й области.

После индивидуального подбора параметров модели для каждого образца находились регрессионные уравнения для зависимости каждого параметра модели от влажности образцов. Поскольку параметры, определяемые по регрессионным уравнениям, немного отличаются от параметров, найденных путем индивидуального подбора, расчетные значения ϵ^* бентонита при большой и малой влажностях отклоняются от экспериментальных данных по действительной части ϵ' не более чем на 10%, а по мнимой – на 15–20% (см. рис. 10).

Из температурных зависимостей ϵ^* бентонита с помощью рефракционной модели найдены температурные зависимости ϵ^* связанной воды и температурные зависимости параметров модели (12). При возрастании температуры возрастают ϵ' и ϵ'' связанной воды во всем исследованном диапазоне частот, что характерно для межповерхностной поляризации.

Установлено, что ϵ' и ϵ'' связанной воды зависят от ее количества. При малых влажностях ϵ^* низкая потому, что значительная часть молекул сильно привязана к активным центрам минерала. При возрастании влажности диэлектрическая проницаемость связанной воды возрастает и достигает максимальных значений на частоте 1 ГГц при объемной доле воды около $0,04 \text{ м}^3/\text{м}^3$, а на частоте 1 МГц при доле воды около $0,07 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

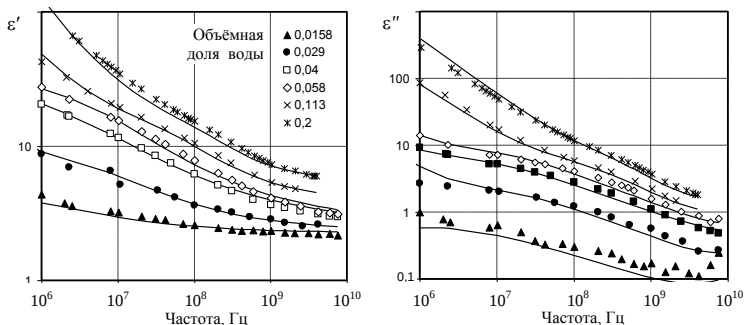


Рис. 10. Сопоставление результатов расчета комплексной диэлектрической проницаемости бентонита по модели (сплошные линии) с экспериментом при температуре 25 °С (маркеры)

Существует предположение (Дерягин и др., 1984), что при таких значениях влажности значительная доля молекул образует «гроздь» вокруг активных центров и слабо связана с поверхностью твердой фазы. Затем при дальнейшем возрастании влажности ϵ^* связанной воды начинает уменьшаться. Молекулы воды начинают образовывать сплошные пленки, в составе которых энергия связи молекул выше, чем в состоянии «гроздьев».

В разделе 3.4 приведены результаты исследований искусственных смесей речного песка или кварцевых гранул с различными типами глин. Было исследовано 12 образцов с удельной поверхностью от 5,1 до $70 \text{ м}^2/\text{г}$.

Для моделирования частотной зависимости ϵ^* образцов использовалась релаксационная модель Коула–Коула с одной областью релаксации, учитывающая ионную проводимость. Расхождение результатов моделирования с экспериментальными данными составляли 7–15% для ϵ' и до 20% для ϵ'' .

Найденные значения времени релаксации в разных образцах, насыщаемых дистиллированной водой, убывают при увеличении удельной поверхности по экспоненциальному закону. На рис. 11 сплошной линией показана аппроксимация значений времен релаксации всех образцов. Отдельно показаны зависимости для образцов с разными типами глины. В образцах, содержащих бентонит 3 (Са-формы), время релаксации при изменении удельной поверхности изменяется быстрее, чем в образцах, содержащих глину других форм.

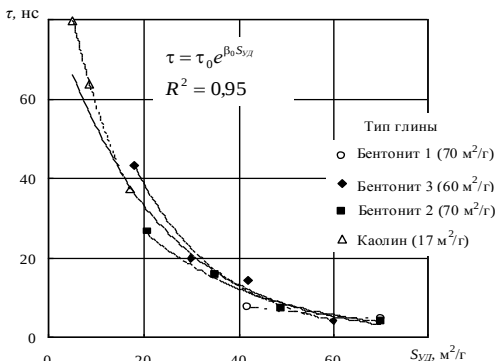


Рис. 11. Зависимость времени релаксации от площади удельной поверхности смеси песка с разными типами глин

В **заключении** приведены основные результаты исследований.

Разработаны и протестированы методы измерения КДП жидких и сыпучих пород в одной ячейке в диапазоне частот от 42 Гц до 8,5 ГГц. На частотах от десятков герц до 1 МГц используется известный способ измерения комплексного импеданса заполненной веществом коаксиальной ячейки. На частотах выше 100 МГц используется также известный способ определения КДП через измерения комплексного коэффициента передачи (параметра матрицы рассеяния S_{12}) этой же ячейки.

Для измерения в диапазоне частот от 0,3 до 100 МГц разработано устройство, представляющее собой отрезок линии большого сечения, в разрыв центрального проводника которой включена та же самая ячейка. Исследованы два способа измерения комплексного импеданса ячейки и вычисления КДП. В первом способе (вариант 1) измеряется параметр S_{12} отрезка линии большого сечения с включенной в него измерительной ячейкой. Показано, что при невысоких потерях погрешность измерения КДП зависит от выбора длины ячеек. При надлежащем выборе длины погрешность измерения составляет 0,5–2,5% для действительной части КДП и 0,5–3% — для мнимой части во всем диапазоне частот 42 Гц – 8,5 ГГц.

Во втором способе (вариант 2) измеряется параметр S_{11} отрезка линии большого сечения, когда к другому разъему этого отрезка присоединен короткозамыкатель переменной длины. Показано, что при подборе длины короткозамыкателя в диапазоне частот от 40 до 100 МГц при измерении сред с

высокой проводимостью можно получить погрешность измерения меньшую, чем в варианте 1, но только в полосе шириной около 20 МГц.

Разработанный метод измерения ε^* использовался для измерения КДП глинистых образцов. При этом установлено следующее.

1. При увлажнении почв из сухого состояния происходит изменение ε^* во времени, особенно значительное на частотах ниже 50–100 МГц. Время установления равновесного состояния зависит от содержания глины и изменяется от нескольких часов в песках до 7–9 суток в бентонитовой глине.

2. Обнаружено резкое изменение состояния связанной воды в бентоните при объемной доле воды, равной 0,04–0,07 м³/м³, приводящее к появлению изломов на графиках зависимости действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления от влажности. При таких значениях влажности происходит также изменение температурной зависимости КДП и параметров моделей, описывающих релаксационные процессы. Это объясняется, скорее всего, тем при влажностях ниже 0,04–0,07 м³/м³ пленки связанной воды распадаются на отдельные «гроздья» (Дерягин, и др., 1984).

3. Установлено, что преобладающее влияние на КДП глинистых почв в диапазоне частот 10 МГц – 1 ГГц оказывает межповерхностная поляризация на границе вода–твердая фаза. В бентоните, имеющем высокую удельную поверхность, это влияние сказывается до частот ~8 ГГц, а возможно, и до более высоких частот. Это подтверждается непрерывным возрастанием действительной части КДП при уменьшении частоты и положительными значениями температурного коэффициента КДП бентонита во всем исследованном диапазоне частот.

4. Установлена тесная корреляционная связь между временем релаксации КДП глинистых образцов, полностью насыщенных дистиллированной водой, и удельной поверхностью в диапазоне ее значений 5–70 м²/г.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобров П. П. Спектры диэлектрической проницаемости нефтеводонасыщенных песчано-глинистых пород различного минералогического состава и релаксационные свойства воды в этих породах / П. П. Бобров, В. Л. Миронов, А. В. Репин // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56, № 7. – С. 1359–1368.
2. Дерягин Б. В. Смачивающие пленки / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев. – М. : Наука, 1984. – 160 с.
3. Маттей Д. Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи / Д.Л. Маттей, Л. Янг, Е. М. Т. Джонс. – М. : Связь, 1971. – Т. 1. – 440 с.
4. Диэлектрическая релаксация в глинистых нефтесодержащих породах / М. И. Эпов [и др.] // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 9. – С. 1302–1309.
5. Bobrov P. P. Effect of the Rock/Water/Air Interaction on the Complex Dielectric Permittivity and Electromagnetic Waves Attenuation in Water-saturated Sandstones / P. P. Bobrov, A. S. Lapina, A. V. Repin // Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings. Prague, July 6–9, 2015. – Prague, 2015. – P. 1877–1879.

6. Chew W. C. Design and Calibration of a Large Broadband Dielectric Measurement Cell / W. C. Chew, K. J. Olp, G. P. Otto // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1991. – Vol. 29, № 1. – P. 42–47.
7. Folgero K. Broad-Band Dielectric Spectroscopy of Low-Permittivity Fluids Using One Measurement Cell / K. Folgero // IEEE Trans. on Instrument and Measurement. – 1998. – Vol. 47, № 4. – P. 881–885.
8. Gorriti A. Comparison of the Different Reconstruction Techniques of Permittivity from S-parameters / A. Gorriti, E. Slob // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2005. – Vol. 43, № 9. – P. 2051–2057.
9. Mironov V. L. Multirelaxation Generalized Refractive Mixing Dielectric Model of Moist Soils / V. L. Mironov, P. P. Bobrov, S. V. Fomin // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2013. – Vol. 10, № 3. – P. 603–606.

Список публикаций по теме диссертации.

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Бобров П. П. Методы измерения диэлектрической проницаемости диэлектриков с высокой и очень низкой проводимостью в диапазоне частот от 10^3 до 10^8 Гц / П. П. Бобров, О. В. Кондратьева (Родионова), А. В. Репин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53, № 9/2. – С. 168–169. – 0,06 / 0,02 п.л.
2. Бобров П. П. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости образца в одной ячейке от десятков герц до единиц гигагерц / П. П. Бобров, О. В. Кондратьева (Родионова), А. В. Репин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8/3. – С. 23–26. – 0,19 / 0,06 п.л.
3. Беляева Т. А. Изменение диэлектрических свойств связанной воды в почвах при увеличении ее количества / Т. А. Беляева, П. П. Бобров, О. В. Кондратьева (Родионова) // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2013. – № 5(51). – С. 92–95. – 0,19 / 0,06 п.л.
4. Беляева Т. А. Зависимость диэлектрической проницаемости связанной воды в бентоните от влажности и температуры / Т. А. Беляева, П. П. Бобров, В. Л. Миронов, О. В. Родионова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11, № 3. – С. 288–300. – 0,75 / 0,19 п.л.
5. Bobrov P. P. Wideband Frequency Domain Method of Soil Dielectric Properties Measurements / P. P. Bobrov, A. V. Repin, O. V. Rodionova // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2015. – Vol. 53, is. 5. – P. 2366–2372. – 0,38 / 0,13 п.л. – DOI: 10.1109/TGRS.2014.2359092.

Патенты:

6. Пат. 2474830 С1 Российская Федерация, МПК G01R27/26. Способ измерения комплексной диэлектрической проницаемости жидких и сыпучих веществ в широком диапазоне частот / Бобров П.П., Репин А.В., Кондратьева (Родионова) О.В.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный педагогический университет» (RU). – № 2011134175/28; заявл. 12.08.2011; опубл. 10.02.2013, Бюл. № 4. – 12 с. – 0,75 / 0,19 п.л.
7. Пат. 2509315 Российская Федерация, МПК G01R27/26, G01N22/04. Способ измерения комплексной диэлектрической проницаемости жидких и сыпучих веществ /

Бобров П.П., Репин А.В., *Кондратьева (Родионова) О.В.*; заявитель и патентообладатель федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Омский государственный педагогический университет» (RU). – № 2012119574/28; заявл. 11.05.2012; опубл. 10.03.2014, Бюл. № 7. – 15 с. – 0,94 / 0,31 п.л.

Публикации в других научных изданиях:

8. Bobrov P. P. Frequency Dependence of Permittivity of Free and Bound Water in Soils for Different Textures / P. P. Bobrov, V. L. Mironov, O. V. Kondratieva (Rodionova), A. V. Repin // PIERS Online. – 2009. – Vol. 5, № 5. – P. 426–430. – 0,3 / 0,1 п.л. – DOI: 10.2529/PIERS090219110307

9. Bobrov P. P. The Effect of Clay and Organic Matter Content on the Dielectric Permittivity of Soils and Grounds at the Frequency Range from 10 MHz to 1 GHz / P. P. Bobrov, V. L. Mironov, O. V. Kondratyeva (Rodionova), A. V. Repin // 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2010) : Proceedings. – Honolulu, Hawaii, USA, July 25–30, 2010. – Honolulu, 2010. – P. 4433–4435. – 0,13 / 0,03 п.л.

10. Бобров П. П. Медленные изменения диэлектрической проницаемости почв после увлажнения из сухого состояния / П. П. Бобров, *О. В. Кондратьева (Родионова)* // Физика диэлектриков (Диэлектрики – 2011) : материалы XII Международной конференции. Санкт-Петербург, 23–26 мая 2011 г. – Санкт-Петербург, 2011. – Т. 1. – С. 204–206. – 0,13 / 0,07 п.л.

11. Бобров П. П. Спектральная диэлектрическая модель прочносвязанной воды в монтмориллоните в диапазоне частот 1-4000 МГц / П. П. Бобров, В. Л. Миронов, *О. В. Кондратьева (Родионова)*, А. В. Репин // Физика диэлектриков (Диэлектрики – 2011) : материалы XII Международной конференции. Санкт-Петербург, 23–26 мая 2011 г. – Санкт-Петербург, 2011. – Т. 1. – С. 207–209. – 0,13 / 0,03 п.л.

12. *Кондратьева (Родионова) О. В.* Спектры диэлектрической проницаемости прочносвязанной и рыхлосвязанной воды в смеси песка и бентонитом / *О. В. Кондратьева (Родионова)*, А. С. Лапина // Студент и научно-технический прогресс. Геология : материалы XLIX Международной научной студенческой конференции. Новосибирск, 16–20 апреля 2011 г. – Новосибирск, 2011. – С. 55. – 0,06 / 0,03 п.л.

13. Беляева Т. А. Частотные и температурные зависимости диэлектрической проницаемости песчаных и песчано-глинистых грунтов с малой влажностью / Т. А. Беляева, П. П. Бобров, *О. В. Кондратьева (Родионова)* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : материалы десятой открытой всероссийской конференции. Москва, 12–16 ноября 2012 г. – Москва, 2012. – С. 278. – 0,06 / 0,02 п.л.

14. *Кондратьева (Родионова) О. В.* Зависимость от температуры времени установления диэлектрической проницаемости грунта после увлажнения из сухого состояния / *О. В. Кондратьева (Родионова)*, Е. С. Федосеева // 18-я всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКФ – 18) : материалы конференции. Красноярск, 29 марта – 05 апреля 2012 г. – Красноярск, 2012. – С. 502–503. – 0,06 / 0,02 п.л.

15. Бобров П. П. О погрешности диэлектрических измерений с применением векторного анализатора цепей в диапазоне частот 10–100 МГц / П. П. Бобров, *О. В. Кондратьева (Родионова)*, А. В. Репин // Трофимукские чтения – 2013 : материалы всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых. – Новосибирск, 08–14 сентября 2013 г. – Новосибирск, 2013. – С. 316–319. – 0,19 / 0,06 п.л.

16. Бобров П. П. Сверхширокополосный метод измерения диэлектрической проницаемости / П. П. Бобров, А. В. Репин, *О. В. Родионова* // Физика диэлектриков (Ди-

электрики – 2014) : материалы XIII Международной конференции. Санкт-Петербург, 02–06 июня 2014 г. – Санкт-Петербург, 2014. – Т. 2. – С. 43–46. – 0,19 / 0,06 п.л.

17. Репин А. В. Влияние удельной поверхности на диэлектрическую проницаемость нефте-водонасыщенных пород / А. В. Репин, О. В. Родионова, Е. С. Крошка // *Educatio*. – 2014. – № 7, ч. 4. – С. 135–139. – 0,25 / 0,09 п.л.

18. Bobrov P. P. The Electrical Characteristics of Rocks Different of Texture / P. P. Bobrov, A. S. Yashchenko, O. V. Rodionova, A. V. Repin, A. S. Lapina // *Progress in Electromagnetics Research Symposium : Proceedings*. Prague, Czech Republic, July 06–09, 2015. – Prague, 2015. – P. 1881–1884. – 0,25 / 0,05 п.л.

19. Бобров П. П. Зависимость диэлектрических характеристик песчано-глинистых смесей от их физических параметров при полном насыщении в диапазоне частот от 10 МГц до 8,5 ГГц / П. П. Бобров, О. В. Родионова, А. В. Репин // *Проблемы геологии и освоения недр : труды XIX Международного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М. А. Усова*. Томск, 06–10 апреля 2015 г. – Томск, 2015. – Т. 1. – С. 284–286. – 0,13 / 0,04 п.л.

Подписано в печать 20.06.2016 г.
Формат А4/2. Ризография
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 11-06/16
Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а