

На правах рукописи



Крошка Елена Сергеевна

**ШИРОКОПОЛОСНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ  
СПЕКТРОСКОПИЯ ПОЧВ И ПОРИСТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД**

1.3.4 – Радиофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Омск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный педагогический университет» (ФГБОУ ВО «ОмГПУ»).

Научный руководитель: **Бобров Павел Петрович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «ОмГПУ»

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

**Кочеткова Татьяна Дмитриевна**,  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Ведущая организация: Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской Академии Наук

Защита состоится 7 октября 2022 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.1.228.02 при ФИЦ КНЦ СО РАН по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 38, Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН.

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

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета 24.1.228.02,  
доктор физико-математических наук



Втюрин Александр Николаевич

## Общая характеристика работы

**Актуальность.** Структура порового пространства почв и горных пород является ключевой характеристикой, определяющей многие физические свойства: электропроводность, диэлектрическую проницаемость, скорость упругих волн, фильтрационные свойства, долю связанной воды, недоступной растениям. Точное знание этих свойств необходимо в геофизике для получения обоснованных исходных материалов по подсчету запасов нефти и газа; в микроволновом дистанционном зондировании для определения влажности почв.

В настоящее время существуют прямые способы изучения структуры порового пространства, позволяющие в лабораторных условиях путем изучения фотографий шлифов, методами ртутной порометрии, капиллярометрии, адсорбции газов, методом ядерно-магнитного резонанса и др. определять общую пористость, распределение пор по размеру, удельную поверхность, проницаемость, глинистость. Чаще всего каждый из этих методов нацелен на определение одной из характеристик и требует отдельной экспериментальной установки.

Большими возможностями обладают электрофизические методы исследования коллекторских свойств горных пород: пористости, извилистости поровых каналов, глинистости и проницаемости. В отличие от метода ЯМР электрофизические методы весьма чувствительны к составу насыщающего флюида (нефть, вода, солевой раствор и его концентрация). Метод широкополосной (от долей герца до единиц гигагерц) диэлектрической спектроскопии обладает большим потенциалом, поскольку позволяет обнаруживать все существующие в этом диапазоне релаксационные процессы.

Знание диэлектрических характеристик почв и пород в диапазоне частот от сотен килогерц до единиц гигагерц требуется для разработки электромагнитных методов георазведки, в том числе с использованием сверхширокополосных импульсов, для подповерхностного зондирования, для точной геонавигации при бурении горизонтальных стволов скважин, при разработке методов диэлектрического каротажа, при исследовании поверхности Земли дистанционными микроволновыми методами.

**Степень разработанности темы исследования.** В настоящее время для исследования природных объектов применяются сравнительно узкие частотные диапазоны. На постоянном токе измерения удельной проводимости применяются для определения показателя цементации, коэффициента извилистости, пластового коэффициента песчаников с помощью формулы Арчи-Дахнова.

На низких частотах от миллигерц до килогерц диэлектрические свойства пород достаточно хорошо изучены в связи с применением явления вызванной поляризации (ВП) для исследования геологических сред. Многочисленные работы разных авторов выявляют связь комплексной удельной проводимости (или комплексной диэлектрической проницаемости) на этих частотах с удельной поверхностью, размерами пор и гидравлической проницаемостью. Создан

ны разные модели этого явления, однако они основаны на конкретных предположениях, которые выполняются не для всех материалов.

Высокочастотный диапазон (1-10 ГГц) электромагнитных волн используется для определения общей пористости с достаточно хорошей точностью и содержания глины (с меньшей точностью) путем измерения в лабораторных условиях диэлектрической проницаемости полностью или частично насыщенными водой пород. Модели диэлектрических характеристик почв необходимы при дистанционном космическом зондировании Земли на частотах от 1,4 ГГц до 10.65 ГГц по программам SMOS, SMAP, Sentinel-1 и GCOM-1W.

Исследования диэлектрических свойств пород, проводимые в промежуточном диапазоне частот от единиц килогерц до сотен мегагерц, до последнего времени не обнаруживают надежных связей с петрофизическими характеристиками пород. Возможности спектрального диэлектрического метода до настоящего времени изучены плохо, так как отсутствовал метод диэлектрических измерений одного и того же образца в широкой полосе частот.

#### **Объект и предмет исследования.**

**Объектом** исследования являются почвы и пористые породы, увлажняемые водой и солевыми растворами. **Предметом** исследования являются процессы диэлектрической релаксации в почвах и пористых породах.

**Целью** диссертации является исследование взаимодействия электромагнитных волн с почвами и пористыми породами в сверхшироком частотном диапазоне (от единиц килогерц до 8–18 ГГц) и процессов диэлектрической релаксации в этом диапазоне с целью установления устойчивых связей диэлектрических характеристик пород с их петрофизическими свойствами. В связи с этим в работе решались следующие **задачи**:

- выбор метода измерения КДП пород в широком диапазоне частот и анализ погрешностей измерения;
- исследование релаксационных моделей для описания спектров КДП в широком диапазоне частот;
- проведение диэлектрических измерений в широком диапазоне частот песчаных образцов; песчано-глинистых смесей; мелкопористых силикагелей; твердых и разрушенных пород нефтеносных скважин; сельскохозяйственных почв;
- установление связи параметров процессов диэлектрической релаксации с физическими характеристиками исследованных образцов.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой работы является широкополосная диэлектрическая спектроскопия. Комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) рыхлых образцов измерялась в одной и той же коаксиальной ячейке в диапазоне частот от 10 кГц до 8-18 ГГц. КДП твердых образцов в диапазоне частот от 100 Гц до 500 МГц измерялась в конденсаторе, включенном в разрыв центрального проводника коаксиальной линии большого сечения. Процессы диэлектрической релаксации моделировались формулами Дебая и Коула-Коула в программной среде MS Excel с использованием инструмента Solver (Поиск решения).

### Научная новизна.

– Впервые проведены экспериментальные измерения комплексной диэлектрической проницаемости увлажняемых дистиллированной водой и соевым 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 в широком диапазоне частот от 10 кГц до 8-18 ГГц; 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. Спектры КДП моделировались 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. В глинистых почвах влияние релаксационных процессов в зависимости от содержания глины сказывается вплоть до частот 2–5 ГГц.

### Положения, выносимые на защиту.

1. Интенсивность релаксационного процесса в диапазоне частот от 0,5 до 100 МГц у рыхлых песчаных образцов при увлажнении соевым раствором NaCl с концентрацией 1,5 г/л связана со средним размером частиц соотношением:  $\Delta\epsilon_{s3} = (5,2 \pm 0,6) \cdot 10^2 (1/\text{мкм}) \cdot d^{(0,98 \pm 0,05)}$  (мкм), где  $d$  – средний размер частиц. Квадрат коэффициента корреляции ( $R^2$ ) составляет  $0,95 \div 0,99$ . Связь времени релаксации этого процесса со средним размером частиц имеет вид:  $\tau_3 = -(12,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-2} \cdot d + (16,7 \pm 0,7)$ , где  $\tau_3$  в микросекундах, а  $d$  в нанометрах. Значения  $R^2$  составляют  $0,95 \div 0,97$ .

2. Добавление небольшого количества (5 % и 10 %) глины в песчаные образцы с средними размерами частиц 118 и 130 мкм приводит к возрастанию действительной и мнимой частей КДП на низких частотах (у образца с размерами частиц 130 мкм при увлажнении дистиллированной водой действительная часть КДП в диапазоне частот 10–100 кГц возрастает в 4-6 раз). Добавление глины в песчаные образцы с крупными частицами (118 и 130 мкм) приводит к возрастанию в 3-6 раз интенсивности релаксационного процесса в диапазоне частот 0,5–100 МГц и его уменьшению при добавлении глины в образец с мелкими частицами (5 мкм) в 6-9 раз.

3. Диэлектрическая релаксация связанной воды во внутренних порах силикагелей приводит к уменьшению коэффициента поглощения электромагнитных волн в диапазоне частот от 0,8 до 2 ГГц от 0,14 до 0,11 при увеличении доли связанной воды от  $0,11 \text{ м}^3/\text{м}^3$  до  $0,28 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . При доле воды, близкой к адсорбционной емкости ( $0,27 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ), на частоте 10 МГц наблюдается линей-

ная связь действительной части КДП  $\varepsilon'$  со средним размером пор  $d$ :  $\varepsilon' = 12,3 - 0,33(1/\text{нм}) \cdot d$  (нм).

4. В сельскохозяйственных почвах при насыщении близком к полному (влажности  $0,35-0,45 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ) 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 в частотном диапазоне от 10 кГц до 8 ГГц. Зависимость частоты  $f_{\varepsilon''\text{min}}$ , соответствующей минимальному значению  $\varepsilon''$ , разделяющей область преобладающего влияния релаксационных процессов и область преобладающего влияния ориентационной поляризации молекул связанной и свободной воды от содержания глины в малогумусных почвах, имеет вид  $f_{\varepsilon''\text{min}} = A \cdot \exp(B \cdot C)$ , где  $f_{\varepsilon''\text{min}}$  – частота в ГГц,  $A = (0,779 \pm 0,019)$  ГГц,  $B = (0,025 \pm 0,001)$ ,  $C$  – содержание глины в процентах от массы.

**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.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на конференциях всероссийского и международного уровня, таких как: Двадцать первая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-21) (Омск,

2015); Всероссийская молодежная научная конференция с участием иностранных ученых «Трофимуксовские чтения» (Новосибирск, 2015, 2019, 2021); «Progress In Electromagnetics Research Symposium» (PIERS) (St Petersburg, Russia 2017, Rome, Italy, 2019); V Международная научная конференция «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (Красноярск, 2018); 2-я Всероссийская научная конференция молодых ученых и студентов, посвященная 85-летию академика А. Э. Конторовича «Актуальные проблемы геологии нефти и газа Сибири» (Новосибирск, 2019); I Российская научная конференция «Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества» (Омск, 2020); 2-я Международная научная конференция «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности. Часть 2» (Казань, 2020); The International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (Kiel, Germany, 2021), Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2021).

#### **Связь с плановыми работами.**

Включенные в диссертацию результаты получены автором при выполнении работ в рамках следующих проектов и грантов: РФФИ № 14-05-00151. Диэлектрическая релаксация в газо- нефте- водонасыщенных породах (2014–2016); РФФИ № 18-35-00284. Исследование процессов диэлектрической релаксации, вызванных поляризацией границ связанная вода-воздух и связанная вода-лед в глинистых породах (2018–2019); РФФИ № 19-05-00395. Разработка физических основ сверхширокополосного диэлектрического метода исследования петрофизических свойств нефтесодержащих пород (2019–2021); Госзадание. Исследование засоленных и переувлажненных почв дистанционными радиофизическими методами, № госрегистрации АААА-А17-117030610080-9 (2017-2019).

**Личный вклад.** Содержание диссертационной работы и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора. Соискатель в составе коллектива Лаборатории диэлькометрии и петрофизики ФГБОУ ВО «ОмГПУ» принимала непосредственное участие в работе по подготовке к публикациям по теме исследований, изложенных в диссертационной работе. 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.

**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.

**Объем и структура работы.** 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.

### **Основное содержание работы**

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** приведен литературный обзор некоторых петрофизических и диэлектрических характеристик почв и пород. Описаны диэлектрические характеристики почв, такие как комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) и комплексный показатель преломления (КПП). Рассмотрены основные диэлектрические модели смесей и модели полярных жидкостей. Описаны электрофизические методы исследования свойств горных пород, методы и модели для расчета КДП в высокочастотном диапазоне (0,5-18 ГГц). Представлено обоснование выбора направления исследований, указывающее на то, что возможности диэлектрического метода до конца не раскрыты

Во **второй главе** дано описание методов измерения КДП и моделирования диэлектрических спектров образцов в широком диапазоне частот.

В **разделе 2.1** описана методика подготовки образцов, насыщающих растворов, а также методика насыщения и изменения влажности образцов.

В **разделе 2.2** описана методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости сыпучих пород в диапазоне частот 10 кГц – 18 ГГц. Для измерения КДП в широком диапазоне частот мы применяли метод, позволяющий измерение одного и того же образца в коаксиальной ячейке в диапазоне частот от 20 Гц до 8,5 ГГц [1].

Измерения производились с помощью измерителя импедансов E4990A-10 фирмы Keysight Technologies, (20 Гц – 10 МГц) и векторных анализаторов параметров цепей ZNB8 и ZNB20 фирмы Rohde & Schwarz (от 100 кГц до 8,5 или 18 ГГц). Из-за электродной поляризации, искажающей результаты измерений на низких частотах, обрабатывались результаты, полученные на частотах выше 10 кГц. При этом диапазоны частот, перекрываемые разными методами, являются достаточно широкими, что позволяет повысить достоверность результатов измерений. В диапазоне 0,1 до 8,5-18 ГГц измеряется комплексный коэффициент передачи (параметр матрицы рассеяния  $S_{12}$ ) через отрезок коаксиальной ячейки, включающей исследуемый образец и ограничивающие шайбы из фторопласта. В диапазоне 0,3 –100 МГц коаксиальная ячейка с тем же образцом включается в разрыв центрального проводника отрезка линии большего сечения с волновым сопротивлением 50 Ом таким образом, что корпус ячейки одновременно служит центральным проводником этого отрезка. Импеданс ячейки рассчитывается через параметр  $S_{12}$  отрезка линии боль-



шего сечения. В диапазоне 20 Гц – 5 МГц импеданс коаксиальной ячейки измеряется непосредственно с помощью прибора Е4990А.

Анализ погрешностей измерений показал, что погрешность измерения действительной части КДП  $\varepsilon'$  возрастает при высоких значениях тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) на низких частотах. На основе измерений смесей вода-этиловый спирт найдена зависимость погрешностей от  $\text{tg}\delta$ :

$$\Delta\varepsilon'/\varepsilon' = 0.53\% \cdot \text{tg}\delta + 1.5\% , \quad (1)$$

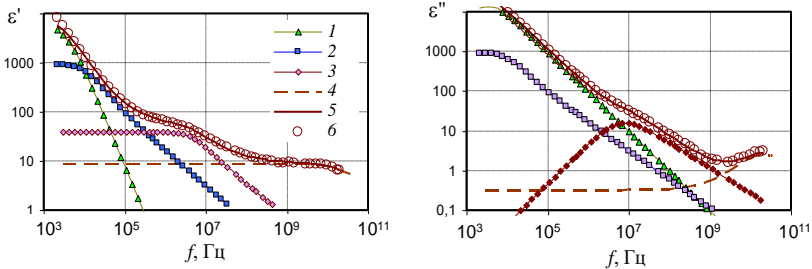
В глинистых почвах в точках максимальных значений  $\text{tg}\delta$  (до 15-20 и выше) погрешность  $\varepsilon'$  может достигать 10-17% (при влажности выше  $0,3 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ) и 2,5–6% (при влажности меньше  $0,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ). При значениях  $\text{tg}\delta < 1$  средние погрешности измерения действительной и мнимой частей КДП не превышают 2,5% во всем частотном диапазоне.

В **разделе 2.3** описана методика измерения КДП консолидированных пород в диапазоне частот 100 Гц – 0,5 ГГц и анализ погрешностей.

В **разделе 2.4** рассмотрено моделирование процессов диэлектрической релаксации и возможные разные подходы к моделированию КДП почв и пород. Дано подробное описание комбинированной модели, используемой в данной работе. Описание низкочастотной части спектров осуществлялось тремя релаксационными процессами; первый моделировался формулой Дебая, второй – формулой Коула-Коула, третий высокочастотный процесс, проявляющийся в мегагерцовой части спектра – также формулой Коула-Коула:

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - i\varepsilon'' = n^2 + \frac{\Delta\varepsilon_{S1}}{1 + i\omega\tau_1} + \frac{\Delta\varepsilon_{S2}}{1 + (i\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}} + \frac{\Delta\varepsilon_{S3}}{1 + (i\omega\tau_3)^{1-\alpha_3}} - i \frac{\sigma_0}{\omega\varepsilon_0} , \quad (2)$$

где  $n$  – комплексный показатель преломления почвы на частотах выше 2-5 ГГц, определяемый по рефракционной модели [2], в которой проводимость свободной и связанной воды принималась равной 0;  $\Delta\varepsilon_{S1}$ ,  $\Delta\varepsilon_{S2}$  и  $\Delta\varepsilon_{S3}$  – интенсивности первого, второго и третьего релаксационных процессов, соответственно;  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $\tau_3$  – времена релаксации;  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  – коэффициенты распределения времен релаксации второго и третьего релаксационного процесса;  $\omega = 2\pi f$ , где  $f$  – частота;  $\sigma_0$  – удельная электропроводность образца,  $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая постоянная;  $i^2 = -1$ . Процедура подбора параметров релаксационных процессов иллюстрируется рис. 1. Первый релаксационный процесс влияет на действительную часть КДП на частотах ниже 100 кГц. Второй процесс частично накладывается на первый и проявляется в диапазоне частот от 10-40 кГц до 1-10 МГц, а третий – на частотах от 0,2-0,5 МГц до 100-200 МГц. Релаксационные процессы практически не влияют на действительную часть КДП на частотах выше 1 ГГц, но влияние этих процессов на мнимую часть КДП обнаруживается вплоть до частот от 2 до 4-5 ГГц.



Рисунбок 1 – Иллюстрация применения модели (2) для КДП суглинка. 1–3 вклады релаксационных процессов №№ 1–3; 4 – вклад рефракционной части модели; 5 – расчет по полной модели (2); 6 – эксперимент

В **третьей главе** описана диэлектрическая спектроскопия слабозасоленных песков и консолидированных пород нефтеносных скважин. Представлены результаты измерения кварцевых гранул почти сферической формы с различными средними диаметрами (по массе), двух фракций речного песка, а также пяти образцов кернов скважины № 1 Варягского месторождения.

В **разделе 3.1** рассмотрены характеристики слабозасоленных песков и порошков кварцевых гранул. Описание и физические свойства исследуемых образцов даны в Табл. 1. Речной песок из бассейна реки Иртыш содержит около 1,5% глины, фракция речного песка, содержащая частицы размером от 0,08 до 0,18 мм, промыта в дистиллированной воде с целью удаления частиц глины.

Таблица 1 – Физические характеристики образцов песка и кварцевых гранул

№	Описание	Средний размер частиц, мкм	Плотность сухого сложения, г/см <sup>3</sup>	Пористость (объемная доля)	Удельная поверхность $S_v$ , м <sup>2</sup> /см <sup>3</sup>
1	Речной песок	250	1.48-1.59	0.39-0.43	-
2	Фракция речного песка	130±13	1.51-1.55	0.40-0.42	-
3	Кварцевые гранулы 70-110	118 ± 12	1.41-1.47	0.43-0.46	0.064±0.007
4	Кварцевые гранулы 0-50	71 ± 7	1.45-1.50	0.42-0.44	0.13±0.02
5	Кварцевые гранулы 0-20	5.3 ± 0.5	1.40-1.46	0.44-0.46	1.88±0.06

Влияние размеров частиц на спектры действительной части КДП  $\epsilon'$  показано на рис. 2. Действительная часть КДП  $\epsilon'$  речного песка равномерно возрастает при увеличении доли воды или раствора во всем частотном диапазоне. На частотах выше 100 МГц на значения  $\epsilon'$  влияет в основном ориентационная поляризация молекул воды с частотой релаксации около 19,5 ГГц.

На частотах, приближающихся к частоте релаксации, значения  $\epsilon'$  уменьшаются. На частотах ниже 10 МГц наблюдается возрастание значений  $\epsilon'$ , более сильное при насыщении солевым раствором, вызываемое поляризацией

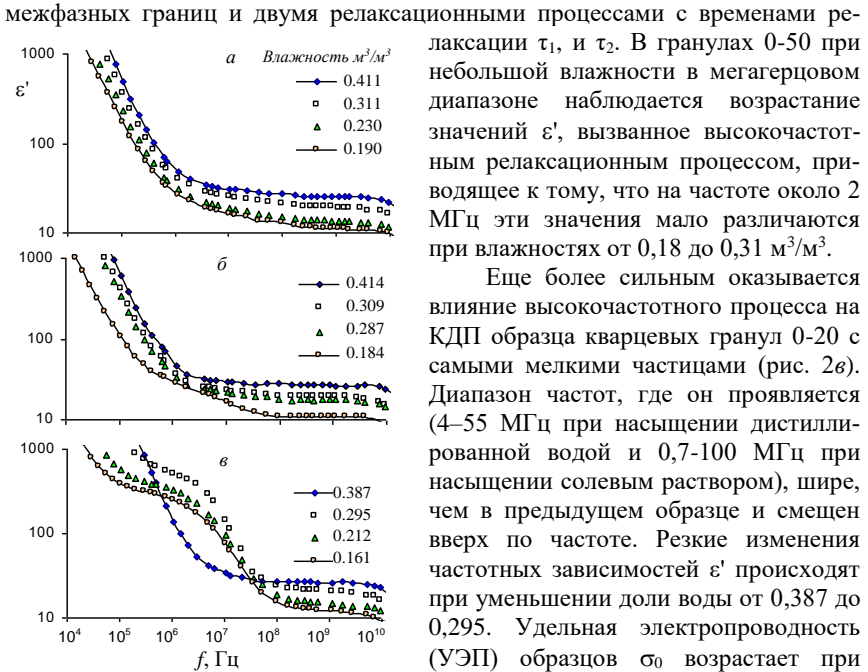


Рисунок 2 – Частотные зависимости действительной части КДП песка (а), гранул 0-50 (б) и гранул 0-20 (в) при увлажнении дистиллированной водой

образце № 5 с мелкими частицами.

Установлено, что зависимость интенсивностей двух низкочастотных процессов от УЭП образцов  $\sigma_0$  имеет более высокий коэффициент корреляции, чем зависимость от доли насыщающего раствора. Данные приведены на рис. 3. Это объясняется тем, что свойства двойного электрического слоя (ДЭС) у поверхности минерала определяют как поверхностную часть общей электропроводности, так и диэлектрическую релаксацию на низких частотах. Отметим, что регрессионные зависимости на графиках и в таблице не включают данные, полученные для образцов с крупными частицами (№№ 1–3) при насыщении дистиллированной водой. Времена релаксации 1-го и 2-го процессов слабо зависят от доли и концентрации раствора и немного уменьшаются при увеличении среднего размера частиц. Значения  $\alpha_2$  убывают при увеличении влажности. Особенно это заметно в образцах с мелкими размерами. Значения  $\alpha_2$  существенно меньше, а при насыщении солевым раствором в большинстве случаев равны 0.

межфазных границ и двумя релаксационными процессами с временами релаксации  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . В гранулах 0-50 при небольшой влажности в мегагерцовом диапазоне наблюдается возрастание значений  $\epsilon'$ , вызванное высокочастотным релаксационным процессом, приводящее к тому, что на частоте около 2 МГц эти значения мало различаются при влажностях от 0,18 до 0,31 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Еще более сильным оказывается влияние высокочастотного процесса на КДП образца кварцевых гранул 0-20 с самыми мелкими частицами (рис. 2в). Диапазон частот, где он проявляется (4–55 МГц при насыщении дистиллированной водой и 0,7-100 МГц при насыщении солевым раствором), шире, чем в предыдущем образце и смещен вверх по частоте. Резкие изменения частотных зависимостей  $\epsilon'$  происходят при уменьшении доли воды от 0,387 до 0,295. Удельная электропроводность (УЭП) образцов  $\sigma_0$  возрастает при уменьшении размеров частиц и возрастании УЭП насыщающего раствора  $\sigma_w$ . В образцах кварцевых гранул №№ 3-5 наблюдается более резкое возрастание значений  $\sigma_0$ , особенно заметное в об-

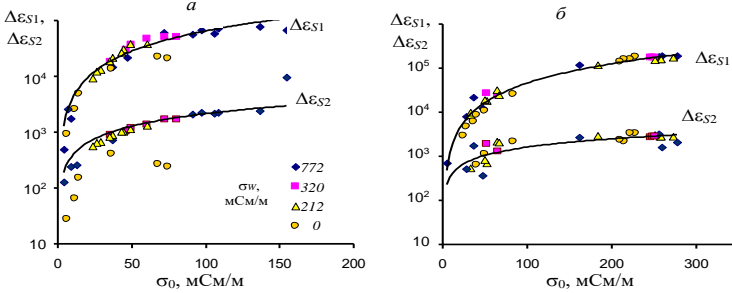


Рисунок 3 – Зависимости интенсивностей 1-го и 2-го релаксационных процессов в образцах № 3 (а) и № 5 (б) от УЭП образцов

Некоторые параметры релаксационных процессов имеют тесную корреляционную связь с размерами частиц и удельной поверхностью. В диссертации приведены регрессионные уравнения, связывающие параметры первого процесса при насыщении образцов, близком к полному, а третьего процесса – при доле раствора менее  $0,3 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Приведены только те уравнения, которые обеспечивают высокие значения квадрата коэффициента корреляции.

Наиболее тесные связи обнаружены у параметров высокочастотного 3-го релаксационного процесса при увлажнении раствором NaCl с концентрацией  $1,5 \text{ г/л}$ . Средние значения параметров процесса определялись при влажностях меньших, чем  $0,3 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , так как при меньших влажностях значения интенсивности этих процессов больше и времена релаксации определяются точнее. Интенсивность процесса связана со средним размером частиц соотношением:

$$\Delta \varepsilon_{S3} = (5.2 \pm 0.6) \cdot 10^2 \cdot d^{(0.98 \pm 0.05)}, \quad (3)$$

где  $d$  – средний размер частиц в мкм. Квадрат коэффициента корреляции ( $R^2$ ) составляет  $0,95 \div 0,99$ . Связь времени релаксации процесса со средним размером частиц имеет вид:

$$\tau_3 = -(12.0 \pm 0.8) \cdot 10^{-2} \cdot d + (16,7 \pm 0.7). \quad (4)$$

Значения  $R^2$  составляют  $0,95 \div 0,97$ . Погрешности коэффициентов в уравнениях найдены методом Монте-Карло.

В разделе 3.2 приведены результаты измерения КДП трех образцов порошка силикагеля для хроматографии с размерами внутренних пор 40, 60 и 90 ангстрем и сравнили с КДП образца № 4 (см. табл. 1) кварцевых гранул, не имеющих внутренних пор. В табл. 2, где приведены физические характеристики образцов, он обозначен под № 1. Значения полной пористости определялись после высушивания и взвешивания образцов ранее водононасыщенных образцов. Значения внутренней пористости определялись через значения максимального количества связанной воды. Порошки силикагеля насыщали дистиллированной водой вначале в атмосфере паров воды для заполнения внутренних пор, а затем насыщали жидкой водой в вакууме для заполнения внешних пор.

Таблица 2 – Физические свойства образцов силикагелей

№	Средн. размер внутр. пор, Å	Средн. размер внешн. пор, мкм	Средн. размер частиц, мкм	Плотн. сухого сложен., г/см <sup>3</sup>	Общ. пористость	Абсорбц. емкость, объемн. доля <sup>1</sup>	Доля связ. воды, $Wt$
1	-	15	71	1,3-1,4	0,43	-	0
2	40	9,6	98	0,40-0,43	0,84	> 0,27	0,32
3	60	2,5	82	0,46-0,48	0,82	> 0,27	0,34
4	90	7,2	61	0,37-0,38	0,86	> 0,27	0,33

Измерения показали, что релаксационные процессы в силикагеле существуют только при влажности, меньшей чем  $Wt$  (рис. 4). В частотном диапазоне, где существуют релаксационные процессы, значения  $\epsilon''$  зависят от влажности и от размера внутренних пор силикагеля. На рис. 5 показано, что значения коэффициента поглощения  $\kappa$  всех образцов силикагеля слабо уменьшаются при возрастании объемной доли связанной воды до ее максимального содержания, равного 0,32–0,34 (см. табл. 2). 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 от влажности. При малой влажности 0,046 частота релаксации (и максимум значений  $\epsilon''$ ) приближается к частоте 1,5 ГГц (рис. 4а). При более высоких влажностях значения  $\epsilon''$  немного выше, однако за счет значительного возрастания действительной части КДП  $\epsilon'$  при увеличении влажности (см. рис. 4б) показатель затухания уменьшается в соответствии с формулой (5).

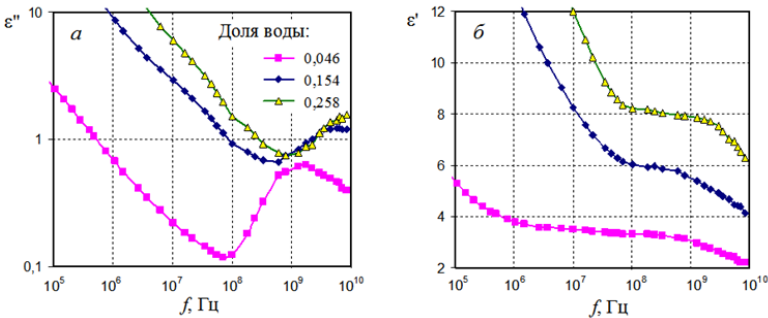


Рисунок 4 – Частотные зависимости мнимой (а) и действительной частей (б) КДП силикагеля с размерами внутренних пор 40 Å при разных количествах связанной воды

$$\kappa \approx \epsilon'' / (2\sqrt{\epsilon'}) \quad (5)$$

При доле воды, близкой к адсорбционной емкости, в диапазоне частот 0,7-10 ГГц наблюдается уменьшение  $\epsilon'$  при увеличении размеров пор (рис. 6).

На частоте 10 МГц эта связь выражается следующей зависимостью:  $\varepsilon' = 12,3 - 0,33 d$ , где  $d$  – средний размер пор в нанометрах.

Уменьшение коэффициента  $k$  при увеличении количества связанной воды в порошках частиц без внутренней пористости не наблюдается.

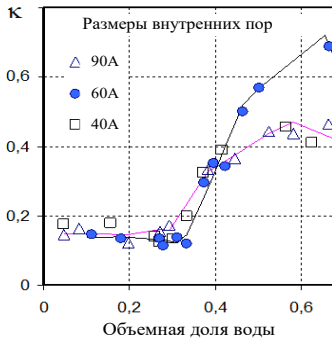


Рисунок 5 – Зависимость от влажности мнимой части показателя преломления силикагелей на частоте

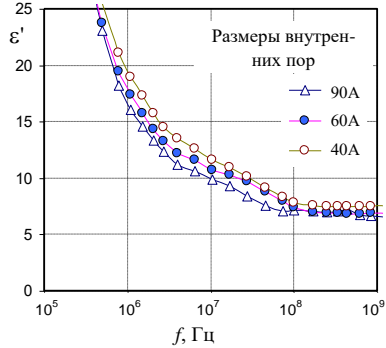


Рисунок 6 – Частотные зависимости действительной части КДП силикагелей при объемной доле воды 0,27

В разделе 3.3 проведено сравнение измеренных диэлектрических характеристик твердых образцов (кернах) песчаных пород нефтеносной скважины с разными размерами внутренних пор и разрушенных образцов (шламов) этих же пород. При небольших значениях доли воды в диапазоне частот от  $10^4$  Гц до  $10^6$  Гц для кернов и в диапазоне от  $10^5$  Гц до  $10^7$  Гц для шламов наблюдается локальное возрастание значений  $\varepsilon'$ , вызванное проявлением релаксационного процесса. Интенсивность этого процесса выше в твердых образцах, чем в шламах. Однако, как и в твердых образцах, так и в шламах, полученных из этих образцов, сохраняется зависимость интенсивности процесса от размера пор – чем мельче поры, тем выше интенсивность.

В выводах по Главе 3 сформулированы основные результаты исследований, которым посвящена данная глава.

В четвертой главе рассмотрена диэлектрическая спектроскопия образцов, содержащих глину: песков с добавлением бентонита и сельскохозяйственных почв.

В разделе 4.1 рассмотрено изменение диэлектрических характеристик песков и порошков кварцевых гранул при добавлении небольшого количества бентонитовой глины (5% и 10% по массе), физические характеристики которых даны в Табл. 3, при постепенном уменьшении доли солевого раствора путем центрифугирования образца, находящегося в измерительной ячейке.

В разделе приведены спектры действительной  $\varepsilon'$  и мнимой  $\varepsilon''$  частей КДП образцов с содержанием бентонита 5% и 10% при различных значениях объемной доли насыщающего раствора и его УЭП. В высокочастотной части

спектра (выше 200 МГц) значения  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  возрастают при увеличении доли раствора при всех значениях его УЭП. У образцов с размерами песчаной фракции 130 мкм и 70-110 мкм подобные зависимости наблюдаются и в низкочастотной части диапазона. В мегагерцовом диапазоне существует третий релаксационный процесс, интенсивность которого максимальна при доле раствора 0,2–0,3 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, а при насыщении, близком к полному, он практически отсутствует.

Таблица 3 – Физические характеристики образцов песчано-глинистых смесей.

№	Состав песчаной фракции	Средний размер частиц, мкм	Массовая доля глины 5%		Массовая доля глины 10%	
			Плотность сухого сложения, г/см <sup>3</sup>	Пористость	Плотность сухого сложения, г/см <sup>3</sup>	Пористость
2.1	Фракция песка	130±18	1.35-1.48	0.43-0.48	1.22-1.42	0.45-0.53
2.2	Кварцевые гранулы 70-110	118 ± 12	1.27-1.37	0.47-0.51	1.37-1.44	0.47-0.45
2.3	Кварцевые гранулы 0-20	5.3 ± 0.5	1.12-1.32	0.49-0.54	1.20-1.27	0.51-0.54

Увеличение содержания глины по-разному влияет в образцах с разными размерами песчаной фракции. Добавление глины к песчаной фракции приводит к увеличению значений  $\varepsilon'$  на частотах 30 МГц, а на частотах выше 200 МГц – к их уменьшению (рис. 7а). Увеличение удельной поверхности приводит к возрастанию интенсивности низкочастотных релаксационных процессов, определяющих КДП на низких частотах, и к увеличению доли связанной воды, количество которой заметнее всего влияет на КДП на высоких частотах. Кроме того, добавление глины приводит к небольшому возрастанию интенсивности третьего релаксационного процесса  $\Delta\varepsilon_{S3}$  (от 3,5 в чистом песке до 7,1 в песке с содержанием глины 10%).

Размеры гранул в образце 2.3 близки к размерам крупных глинистых частиц. Добавление некоторого количества более мелких частиц, наоборот, приводит к уменьшению интенсивности  $\Delta\varepsilon_{S3}$  (от 115 в чистых гранулах до 28 при содержании глины 10 % – рис. 7б). Это свидетельствует о том, что зависимость  $\Delta\varepsilon_{S3}$  от размера частиц имеет "резонансный" характер. Максимальная интенсивность наблюдается в образцах с размерами частиц не более нескольких микрометров. При увеличении концентрации раствора до 4 г/л ( $\sigma_w=772$  мСм/м) значения  $\Delta\varepsilon_{S3}$  слабо возрастают, а при дальнейшем увеличении концентрации – уменьшаются.

В низкочастотной части диапазона не наблюдается регулярной зависимости параметров  $\Delta\varepsilon_{S1}$  и  $\Delta\varepsilon_{S2}$  от содержания глины в образцах. Поскольку параметры  $\Delta\varepsilon_{S1}$  и  $\Delta\varepsilon_{S2}$  зависят от низкочастотной УЭП образца, их изменения при изменении содержания глины коррелируют с соответствующими изменениями УЭП образца. Последняя есть результат проявления нескольких конкурирующих механизмов проводимости. В частности, в образцах, показанных

на рис. 7б, УЭП образцов принимает значения 53, 26, и 40 мСм/м при содержании глины 0, 5 и 10%, соответственно.

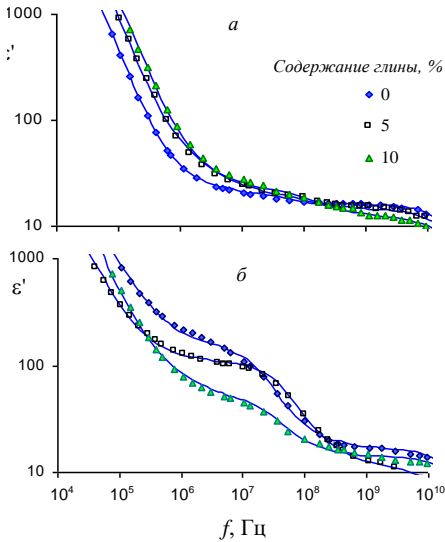


Рисунок 7 – Частотные зависимости действительной части КДП образцов 2.1 (а) и 2.3 (б) при доле солевого раствора 0,261-0,265 (а) и 0,257-0,263 (б). Концентрация раствора 1 г/л ( $\sigma_w=212$  мСм/м). Сплошные линии – расчет по модели.

кими частицами (мембранная поляризация).

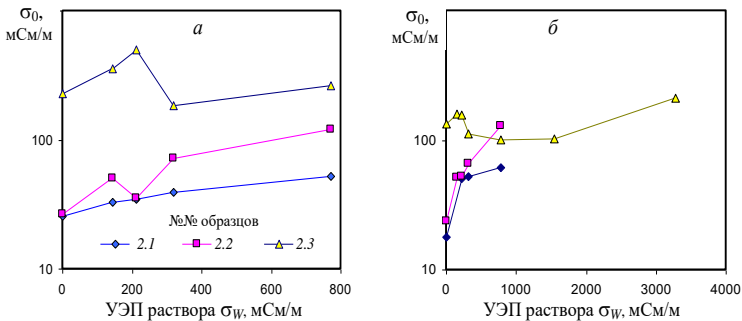


Рисунок 8 – Зависимость УЭП образцов от УЭП раствора при насыщении, близком к полному. Содержание глины в образцах 5% (а) и 10% (б).

При увеличении концентрации раствора толщина ДЭС уменьшается, и общая УЭП образца в некоторых случаях может даже уменьшаться за счет уменьшения поверхностной части общей проводимости (рис. 8).

В образце 2.3 с содержанием глины 10% при увеличении УЭП раствора до 320 мСм/м УЭП образца уменьшается почти в 2 раза и мало изменяется при УЭП раствора от 320 до 1544 мСм/м. Только при увеличении УЭП раствора до 3280 мСм/м значения УЭП образца возрастают до тех значений, которые были при УЭП раствора 144–212 мСм/м (рис. 8б). В образцах, содержащих глину, размеры пор настолько малы, что заряды на поверхности минерала препятствуют движению ионов раствора в узких горловинах между мел-



В данном разделе также приведены параметры релаксационных процессов и их зависимость от влажности, УЭП раствора и их связь с размерами частиц песчаной фракции и содержанием глины в образцах.

В разделе 4.2 рассмотрены диэлектрические характеристики сельскохозяйственных почв. Для исследований были отобраны несколько образцов почв Омской и Томской областей с разным содержанием песка, глины и органического углерода (табл. 4). Перед измерением почвенные образцы в достаточном большом объеме замачивались дистиллированной водой почти до полного капиллярного насыщения и выдерживались в течение 7-9 дней. Все измерения проводились только при постепенном высушивании замоченных ранее образцов. От постепенно высыхающего образца отбиралась небольшая часть, тщательно перемешивалась, затем ею заполнялась измерительная ячейка, в которой почва выдерживалась перед измерениями еще в течение одних суток.

Таблица 4 – Физические свойства исследованных почв.

№	Содержание фракций (по Качинскому) в %, размером, мм				Предел пластичности, %	Емкость катионного обмена, ммоль/100г	Органический углерод $C_{tot}$ , %
	0,05-2	0,01-0,05	< 0,01	<0,001			
1	93,9	4,4	1,65	0	0	$6,0 \pm 1,7$	0
2	5,3	37,9	56,8	7,48	24,2	$38 \pm 11$	3,9
3	4,6	48,7	46,7	8,38	15,7	$14,0 \pm 3,9$	0,5
4	25,5	22,8	51,7	30,8	22,4	$31,3 \pm 8,9$	1,6
5	6,9	25,9	67,2	51,2	21,1	$19,8 \pm 5,5$	0,7
6	49,1	21,1	29,1	4,57	18,4	$22,0 \pm 6,5$	1,9

В разделе рассмотрено влияние содержания глины и содержания органического углерода на диэлектрические спектры.

Увеличение удельной поверхности за счет добавления глины приводит к возрастанию интенсивности релаксационных процессов. На рис. 9а приведены спектры образцов песка (№ 1 в Табл. 4) и образца № 6, содержащего 29,1% глины (частиц размером менее 0,01мм) при близких значениях влажности. Наличие глины приводит к возрастанию значений  $\epsilon'$  на частотах ниже 100 МГц. В этом образце содержится связанная вода в количестве около 0,05 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Так как  $\epsilon'$  связанной воды меньше, чем у свободной, значения  $\epsilon'$  этого образца на частотах выше 1 ГГц при равных значениях влажности немного меньше, чем у песка.

Влияние гумуса (органического углерода) показано на рис. 9б. Значения  $\epsilon'$  образца №2 с высоким содержанием гумуса меньше, чем у образца №3 во всем частотном диапазоне, несмотря на то что в образце № 3 глины немного меньше. В высокочастотном диапазоне уменьшение  $\epsilon'$  вызвано увеличением

доли связанной воды (в гумусных почвах удельная поверхность больше), а на средних и низких частотах - уменьшением интенсивности релаксационных процессов на границах органика-вода в сравнении с границами минерал-вода в почвах, бедных гумусом.

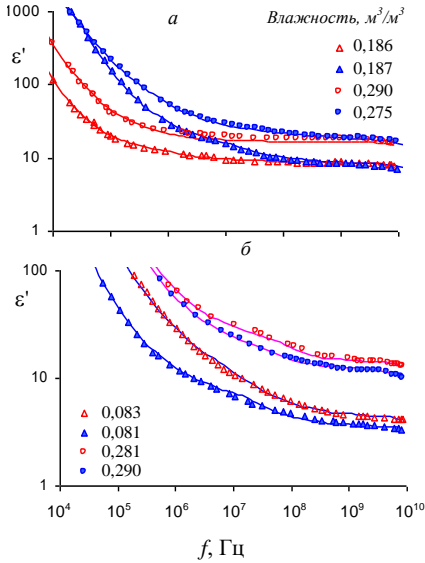


Рисунок 9 – Влияние глины (а) на действительную часть КДП образцов №1 (светлые маркеры) и №2 (темные маркеры). Влияние гумуса (б) на  $\epsilon'$  образцов №2 (темные маркеры) и №3 (светлые маркеры). Сплошные линии – расчет по модели.

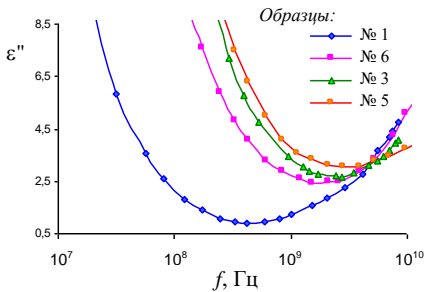


Рисунок 10 – Положение минимума  $\epsilon''$  в образцах с разным содержанием глины. Значения влажности 0,28-0,30 м³/м³.

проводимости связанной и свободной воды.

Чем больше в почве глины, тем на более высокие частоты распространяется влияние релаксационных процессов. На рис. 10 показано, что их влияние на высоких частотах сказывается в первую очередь на мнимой части КДП. С увеличением количества глины частота, на которой наблюдается минимальное значение мнимой части и разделяющая диапазоны преимущественного влияния на КДП релаксационных процессов и ориентационной поляризации молекул воды, увеличивается при увеличении содержания глины в образцах (рис. 10). Зависимость этой частоты от содержания глины показана на рис. 11. Образец № 2 с большим содержанием гумуса не включен в выборку для определения регрессионного уравнения, поскольку наличие гумуса ослабляет релаксационные процессы и уменьшает частоту минимального значения  $\epsilon''$ .

В диэлектрических моделях почв [2; 3], используемых, в том числе, и в алгоритмах SMOS и SMAP на частоте 1,4 ГГц, релаксационные процессы не учитываются. Вызываемое этими процессами увеличение мнимой части КДП в моделях компенсируется нереально высокими значениями

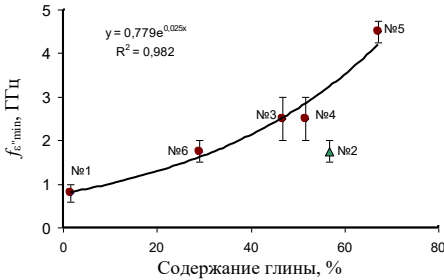


Рисунок 11 – Зависимость частоты, соответствующей минимальному значению  $\varepsilon''$ , от содержания глины в малогумусных почвах.

столь сильна. В почвах, содержащих глину, интенсивности релаксационных процессов имеют тенденцию возрастания при увеличении влажности и проводимости, а времена релаксации изменяются в зависимости от влажности и проводимости существенно в меньшей степени как в сторону возрастания, так и в сторону уменьшения. Именно возрастание интенсивности 1-го и 2-го релаксационных процессов приводит к резкому возрастанию значений  $\varepsilon'$  на низких частотах при увеличении влажности.

Значения интенсивности третьего релаксационного процесса зависят от глинистости и варьируются в образцах от 3,4 до 10–30 ед. Наибольшая изменчивость значений интенсивностей как третьего, так и первых двух релаксационных процессов наблюдается в диапазоне влажности от 0,2 до 0,3 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, при котором наблюдаются резкие изменения удельной проводимости. В диапазоне влажности 0,35–0,45 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> изменения интенсивностей релаксационных процессов минимальны. Средние значения в этом диапазоне влажности имеют тесную корреляционную связь с содержанием глины. Эти зависимости можно аппроксимировать уравнениями линейной регрессии.

**В Заключение** приведены основные результаты исследований.

Проведены диэлектрические измерения в диапазоне частот от 10 кГц до 8–18 ГГц песчаных образцов с различными размерами частиц, песчано-глинистых смесей, твердых пород нефтеносной скважины, сельскохозяйственных почв и определены параметры релаксационной модели.

При исследовании диэлектрических спектров и параметров процессов диэлектрической релаксации было установлено:

1. Частотная зависимость КДП определяется ориентационной поляризацией молекул связанной и свободной воды (на высокочастотном краю диапазона) и поляризацией межфазных границ, проявляющейся на частотах ниже 100–500 МГц в песчаных образцах и ниже 2-5 ГГц в образцах с большим содержанием глины.

2. На низкочастотном краю диапазона значительный вклад в КДП вносит поляризация двойного электрического слоя на поверхности минеральных частиц. Низкочастотная электропроводность частично осуществляется движе-

Параметры релаксационных процессов существенным образом зависят от соотношения содержащихся в почвах двух форм воды. При наличии только связанной воды интенсивность и время релаксации сильно зависят от влажности. При увеличении влажности время релаксации уменьшается, а интенсивность возрастает. При наличии свободной воды зависимость параметров от влажности не

нием ионов через ДЭС (поверхностная проводимость). Свойства ДЭС влияют таким образом на общую УЭП образца и его КДП, поэтому между параметрами двух низкочастотных релаксационных процессов и УЭП есть тесная корреляционная связь.

3. Найдены регрессионные уравнения связи параметров высокочастотного релаксационного процесса со средним размером частиц в песчаных образцах. Определены условия, при которых наблюдаются наиболее тесные корреляционные связи.

4. В образцах силикагелей с мелкими внутренними порами наблюдается уменьшение коэффициента поглощения электромагнитных волн в диапазоне частот от 0,8 до 2 ГГц при увеличении доли связанной воды. Это вызвано процессом диэлектрической релаксация связанной воды во внутренних порах. При доле воды, близкой к адсорбционной емкости, на частоте 10 МГц наблюдается линейная связь действительной части КДП  $\epsilon'$  со средним размером пор  $d$ :  $\epsilon' = 12,3 - 0,33d$ , где  $d$  в нанометрах. Во внутренних порах твердых песчаников этих явлений не наблюдается из-за весьма малого содержания связанной воды.

5. Сравнение диэлектрических характеристик твердых песчаников из нефтеносной скважины с соответствующими характеристиками шламов, полученных разрушением этих образцов, показало, в последних за счет сохранения внутренней пористости сохраняется хотя и более слабая зависимость интенсивности релаксационного процесса от размера внутренних пор.

6. Добавление небольшого количества (до 10%) глины в песчаные образцы приводит к возрастанию действительной и мнимой частей КДП на низких частотах, обусловленному увеличением интенсивностей низкочастотных релаксационных процессов. При добавлении глины в образцы с крупными частицами интенсивность высокочастотного процесса слабо возрастает, а добавление ее в образец с самыми мелкими частицами приводит к уменьшению интенсивности этого процесса, что свидетельствует о "резонансном" характере этого процесса, т.е. его интенсивность имеет максимальные значения при определенном размере частиц.

7. Исследовано влияние глины и гумуса на диэлектрические спектры сельскохозяйственных почв. При насыщении, близком к полному (влажности 0,35–0,45 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>), средние значения интенсивностей трех релаксационных процессов возрастают при увеличении содержания глины по линейному закону. Влияние релаксационных процессов на мнимую часть КДП в глинистых почвах распространяется до частот 2-5 ГГц. Увеличение содержания органического вещества (гумуса) при прочих равных условиях приводит к уменьшению действительной и мнимой частей КДП. В высокочастотном диапазоне это вызвано увеличением доли связанной воды, а на средних и низких частотах – уменьшением интенсивностей релаксационных процессов.

## Список основных публикаций по теме диссертации.

### Статьи в журналах из перечня ВАК:

1. *Репин, А. В.* Способы уменьшения погрешности измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов с высокой электропроводностью / А. В. Репин, Т. А. Беляева, О. В. Родионова, Е. С. Крошка // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. № 8/2. – С. 32-35.
2. *Бобров, П. П.* Моделирование процессов диэлектрической релаксации во влажных песчаных породах / П. П. Бобров, В. Н. Красноухова, Е. С. Крошка, А. С. Лапина // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017. – Т. 60. № 4. – С. 135-140.  
*Bobrov, P. P.* Modeling of Dielectric Relaxation Processes in Moist Sand Rocks / P. P. Bobrov, V. N. Krasnoukhova, E. S. Kroshka, A. S. Lapina // Russian Physics Journal. – 2017. – V.60, № 4. – P. 711-716. (Q3, IF=0.664, Scopus, WoS)
3. *Belyaeva, T. A.* The effect of very low water content on the complex dielectric permittivity of clays, sand-clay and sand rocks / T. A. Belyaeva, P. P. Bobrov, E. S. Kroshka, A. S. Lapina, O. V. Rodionova // Measurement Science and Technology. – 2017. – V. 28. – P. 014005. (Q2, IF=2.046, Scopus, WoS)
4. *Бобров, П. П.* Определение влажности образцов почв диэлектрическим методом / П. П. Бобров, Т. А. Беляева, Е. С. Крошка, О. В. Родионова // Почвоведение. – 2019. – № 7. – С. 859-871.  
*Bobrov, P. P.* Soil moisture measurement by the dielectric method / P. P. Bobrov, T. A. Belyaeva, E. S. Kroshka, O. V. Rodionova // Eurasian Soil Science. – 2019. – V. 52, № 7. – P. 822-833(Q2, IF=1.369, Scopus, WoS).
5. *Bobrov, P. P.* Combined dielectric model of sandy soils in the frequency range from 10 kHz to 8 GHz / P. P. Bobrov, T. A. Belyaeva, E. S. Kroshka // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – V. 159. – P. 616-620 (Q2, IF=2.121, Scopus, WoS).
6. *Бобров, П.П.* Диэлектрическая спектроскопия слабозасоленных песков / П.П. Бобров, Т.А. Беляева, Е.С. Крошка, О.В. Родионова // Геология и геофизика. – 2021. DOI: 10.15372/GiG2021107 (Q2, IF=1.206, Scopus, WoS).
7. *Бобров, П. П.* Связь низкочастотной диэлектрической проницаемости с проводимостью слабозасоленных образцов песка / П. П. Бобров, Т. А. Беляева, Е. С. Крошка, О. В. Родионова // Техника радиосвязи. Омский научно-исследовательский институт приборостроения. Омск. – 2020. – Выпуск 3 (46). – С. 85-94.
8. *Репин, А. В.* Моделирование диэлектрической релаксации в глинах при отрицательных и положительных температурах / А. В. Репин, О. В. Родионова, Е. С. Крошка // Известия вузов. Физика. – 2021. – Т. 64, № 1. – С. 58-63.  
*Repin, A.V.* Modeling of Dielectric Relaxation in Clays at Negative and Positive Temperatures / A.V. Repin, O.V. Rodionova, E.S. Kroshka, // Russian Physics Journal. – 2021. – V. 64. № 1. – P. 67–73. (Q3, IF=0.664, Scopus, WoS)
9. *Бобров, П. П.* О параметрах диэлектрической модели почв, используемой в алгоритме SMOS / П. П. Бобров, Т. А. Беляева, Е. С. Крошка, О. В. Родионова // Техника радиосвязи. Омск. – 2021. – Выпуск 1 (48). – С. 85-94.

### В сборниках трудов конференций и прочих изданиях:

10. *Belyaeva, T. A.* Complex dielectric permittivity of saline soils and rocks at frequencies from 10 kHz to 8 GHz / T. A. Belyaeva, P. P. Bobrov, E. S. Kroshka, A. V. Repin // Proceedings of 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS). St Petersburg, Russia. – 22-25 May, 2017. – P. 3046-3051 (Scopus, WoS).
11. *Bobrov, P. P.* Relaxation model of complex relative permittivity of sandstones for the frequency range from 10 kHz to 1 GHz / P. P. Bobrov, E. S. Kroshka, A. S. Lapina, A. V. Repin // Proceedings of 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS). St Petersburg, Russia. – 22-25 May 2017. – P. 3046-3051 (Scopus, WoS).
12. *Kroshka, E. S.* Dielectric Relaxation in Clays in a Wide Range of Frequencies at Temperatures from  $-15^{\circ}\text{C}$  to  $25^{\circ}\text{C}$  / E. S. Kroshka, A. V. Repin, O. V. Rodionova // 2019 PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring). Rome, Italy, 17-20 June, 2019. – 2019. – P. 2167-2172 (Scopus, WoS).
13. *Bobrov, P. P.* Dielectric Relaxation in Wet Soils at Frequencies from 10 kHz to 10 MHz / P. P. Bobrov, T. A. Belyaeva, E. S. Kroshka, O. V. Rodionova // 2019 PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring). Rome, Italy, 17-20 June, 2019. – 2019. – P. 2160-2166 (Scopus, WoS).
14. *Kroshka, E. S.* Effect of Internal Pore Sizes of the Silica Gel on the Dielectric Permittivity in the Frequency Range from 100 Hz to 8 GHz / E. S. Kroshka, P. P. Bobrov // 2019 PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring). Rome, Italy, 17-20 June, 2019. – 2019. – P. 3464-3468 (Scopus, WoS).
15. *Bobrov, P. P.* Dielectric Spectroscopy of Slightly Saline Sandy-Clay Mixtures in the Frequency Range from 10 kHz to 10 GHz / P. P. Bobrov, T. A. Belyaeva, E. S. Kroshka, O. V. Rodionova // 13th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA). Kiel, Germany. – 26-30 July, 2021. – P. 122-127 (Scopus, WoS).
16. *Беляева, Т. А.* Проявление растворяющей способности связанной воды в диэлектрической проницаемости засоленного бентонита / Т. А. Беляева, П. П. Бобров, Е. С. Крошка, А. В. Репин // Материалы Всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых «Трофимуксовские чтения – 2015». Новосибирск: РИЦ НГУ. – 2015. – С. 245-248.
17. *Крошка, Е. С.* О диэлектрической проницаемости почвы антенных полигонов / Е. С. Крошка // Сборник тезисов, материалы Двадцать первой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-21, Омск): материалы конференции, тезисы докладов: В 1 т.Т.1 – Екатеринбург - Омск: издательство АСФ России, – 2015. – С. 454-455.
18. *Беляева, Т. А.* Влияние релаксационных процессов на комплексную диэлектрическую проницаемость почв при положительных и отрицательных температурах / Т. А. Беляева, П. П. Бобров, Е. С. Крошка // Материалы V Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Красноярск: Сибирский федеральный университет. Институт космических и информационных технологий. – 2018. –

- С. 77-81.
19. *Репин, А. В.* Диэлектрическая релаксация в глинах в широком диапазоне частот при отрицательных и положительных температурах / А. В. Репин, О. В. Родионова, Е. С. Крошка // *Материалы V Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли»*. – Красноярск: Сибирский федеральный университет. Институт космических и информационных технологий. – 2018. – С. 194-198.
  20. *Крошка, Е. С.* О возможности определения размеров пор силикагелей и буровых шламов по данным диэлектрических и ЯМР-измерений / Е. С. Крошка, П. П. Бобров, О. В. Родионова, М. Й. Шумскайте // *Материалы Всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых «Трофимуксовские чтения – 2019»*. Новосибирск: ИНГ СО РАН. – 2019. – С. 176-179.
  21. *Бобров, П. П.* Связь низкочастотной диэлектрической проницаемости с проводимостью слабозасоленных образцов песка / П. П. Бобров, Т. А. Беляева, Е. С. Крошка, О. В. Родионова // *Тезисы докладов I Российской научной конференции «Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества»*. Омск. – 6-8 октября, 2020. – С. 69-70.
  22. *Бобров, П. П.* О параметрах диэлектрической модели почв, используемой в алгоритме SMOS / П. П. Бобров, Т. А. Беляева, Е. С. Крошка, О. В. Родионова // *Тезисы докладов I Российской научной конференции «Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества»*. Омск. – 6-8 октября, 2020. – С. 67-68.
  23. *Репин, А. В.* Физические принципы моделирования спектров диэлектрической проницаемости глин в широком частотном диапазоне / А. В. Репин, Е. С. Крошка, О. В. Родионова // *Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сборник научных статей второй международной научной конференции. Часть 2*. Казань: ООО «Конверт». – 28-29 февраля, 2020. – С. 18-21.
  24. *Бобров, П. П.* Учет частотной зависимости диэлектрической проницаемости грунтов при проектировании и моделировании приземных антенн / П. П. Бобров, С. В. Кривальцевич, Е. С. Крошка // *Техника радиосвязи*. – 2015. – №4 (27). – С.72-79.

### Список цитируемой литературы.

1. *Bobrov, P. P.* Wideband Frequency Domain Method of Soil Dielectric Properties Measurements / P. P. Bobrov, A. V. Repin, O. V. Rodionova // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 2015. – V. 53, № 5. – P. 2366-2372.
2. *Mironov, V. L.* Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils / V. L. Mironov, M. C. Dobson, V. H. Kaupp, S. A. Komarov, V. N. Kleshchenko // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 2004. – V. 42, №4. – P. 773-785.
3. *Dobson, M. C.* Microwave dielectric behavior of wet soil - Part II: Dielectric mixing models / M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, M. A. El-Rayes // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 1985. – Vol. GE-23, №1. P. 35-46.