

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
(НИТУ МИСИС)

На правах рукописи

Гапеев Артем Андреевич

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ГОРНЫХ ПОРОД В НИЗКОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ

Специальность 2.8.3 – «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология,
геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Черепецкая Елена Борисовна

Москва – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1 Современное состояние исследований в области изучения частотной зависимости электрических свойств горных пород	11
1.1 Механизмы поляризации и релаксационные процессы в горных породах.....	12
1.2 Модели релаксационных процессов и дисперсии диэлектрической проницаемости	14
1.3 Экспериментальные методы измерения электрических свойств горных пород в лабораторных условиях.....	20
1.4 Исследования в области изучения электрических свойств (в том числе диэлектрической проницаемости) горных пород	23
1.5 Исследования электрических свойств горных пород при отрицательных температурах	28
1.6 Цель и постановка задач исследования	31
Глава 2 Теоретические предпосылки и основы методики прецизионного измерения низкочастотной дисперсии электрических свойств	33
2.1 Теоретические основы частотной зависимости диэлектрической проницаемости	33
2.2 Емкостной метод измерения дисперсии диэлектрической проницаемости с учетом краевых эффектов	35
2.3 Учет электродной поляризации на низких частотах	38
2.4 Выводы к главе 2.....	41
Глава 3 Исследование электрических свойств горных пород в сухом состоянии	42
3.1 Сведения об образцах горных пород, исследуемых в работе	42
3.2 Используемая аппаратура и ее калибровка перед проведением измерений.....	48

3.3 Исследование частотной зависимости электрических свойств горных пород различного генотипа	51
3.3.1 Исследование электрических свойств осадочных горных пород	52
3.3.2 Исследования электрических свойств магматических и метаморфических горных пород	67
3.4 Зависимость частотной дисперсии электрических свойств от пористости осадочных горных пород.....	69
3.5 Время релаксации и вклад поляризаций.....	71
3.6 Выводы к главе 3.....	73
Глава 4 Исследование электрических свойств горных пород в водонасыщенном состоянии при положительных и отрицательных температурах	75
4.1 Методика водонасыщения горных пород.....	75
4.2 Исследование электрических свойств горных пород осадочного генотипа в водонасыщенном состоянии.....	76
4.3 Изучение электрических свойств горных пород при отрицательной температуре.....	82
4.4 Выводы к главе 4.....	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	88
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	90
ПРИЛОЖЕНИЕ А РАЗРАБОТАННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И УДЕЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД НА ОБРАЗЦАХ НЕПРАВИЛЬНОЙ ФОРМЫ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ.....	105
ПРИЛОЖЕНИЕ Б ИЗМЕРЕННЫЕ И ВЫЧИСЛЕННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ В СПРАВКА ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность научной работы.

В настоящее время при освоении месторождений в сложных горно-геологических условиях все большее внимание уделяется повышению информативности данных, извлекаемых как из результатов геофизических наблюдений, так и при изучении образцов горных пород в полевых и лабораторных условиях.

С точки зрения геофизических исследований на сегодняшний день особое значение приобретают электромагнитные методы. Данные методы могут быть как пассивными, когда определяются характеристики полей, излучаемых массивом горных пород при развитии в нем динамических процессов, приводящих, например, к внезапным выбросам, так и активными, когда рассматривается отклик горной породы на внешние электромагнитные поля. Так, к активным методам относятся радиоволновой скважинный каротаж, электромагнитное зондирование поверхности земли, георадиолокация и другие, к пассивным – электромагнитная эмиссия.

Все перечисленные выше методы базируются на таких электромагнитных параметрах горных пород, как относительная диэлектрическая проницаемость, удельная электропроводность и магнитная проницаемость. Остальные характеристики (удельное сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь и мнимая часть диэлектрической проницаемости) однозначно связаны с первыми двумя характеристиками. Точное измерение данных характеристик обеспечивает ценной информацией, позволяющей идентифицировать геоматериал. Третья основная характеристика электромагнитного поля – магнитная проницаемость – важна при регистрации магнитной компоненты поля, которая в данной работе не рассматривается.

Отклик горной породы на внешнее переменное электрическое поле связан с поляризацией диэлектрической гетерогенной среды, то есть со

смещением связанных зарядов относительно их положения равновесия. Поскольку данный процесс является инерционным, то требуется некоторое конечное время, и отклик среды запаздывает по времени относительно внешнего поля. Временные зависимости относительной диэлектрической проницаемости и удельной электропроводности называются релаксацией данных величин и характеризуется временами релаксации. Это приводит к тому, что в экспериментах наблюдается частотная дисперсия электрических характеристик горной породы, обусловленная данными релаксационными процессами. В различных частотных диапазонах проявляются различные типы поляризации (электронная, ионная, дипольная, межфазная и др.). При электромагнитном зондировании поверхности земли и радиоволновом скважинном каротаже, когда используются частоты от десятков герц до нескольких мегагерц, наряду с другими видами поляризации наиболее сильно проявляется межфазная поляризация (поляризация Максвелла-Вагнера-Силларса) гетерогенной среды, время релаксации которой варьируются от секунд до микросекунд в зависимости, в первую очередь, от структурных особенностей и флюидонасыщения геоматериала.

В связи с этим задача установления закономерностей изменения электрических свойств горных пород в низкочастотном диапазоне для корректной интерпретации данных геофизических исследований, полученных на основе изучения электромагнитных полей, является актуальной.

Целью диссертационной работы является изучение закономерностей изменения электрических свойств (комплексной диэлектрической проницаемости, удельной электропроводности, тангенса угла диэлектрических потерь) горных пород различных генотипов с разномасштабными структурными неоднородностями и при флюидонасыщении в низкочастотном диапазоне 100 Гц – 1 МГц.

Основная идея работы заключается в установлении закономерностей частотной дисперсии электрических свойств горных пород различных генотипов в низкочастотном диапазоне в зависимости от их структурных

особенностей и в условиях флюидонасыщения на основе прецизионного конденсаторного метода.

Для достижения цели диссертационной работы необходимы решить следующие **задачи**:

- провести аналитический обзор существующих методов определения комплексных диэлектрической проницаемости и удельной электропроводности горных пород;
- разработать и создать методику прецизионного определения диэлектрической проницаемости и удельной проводимости горных пород на образцах неправильной формы в лабораторных условиях;
- провести апробацию разработанной методики на модельных образцах с известной частотной дисперсией в диапазоне 100 Гц – 1 МГц;
- экспериментально исследовать и проанализировать низкочастотную дисперсию электрических свойств горных пород различного генотипа в сухом состоянии;
- установить закономерности изменения электрических свойств образцов песчаника и известняка в частотном диапазоне 100 Гц – 1 МГц в зависимости от флюидонасыщения;
- установить закономерности изменения электрических свойств образцов песчаника и известняка в частотном диапазоне 100 Гц – 1 МГц при водонасыщении при замораживании до отрицательной температуры.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Для образцов горных пород всех генотипов в сухом состоянии при пористости от 0,7 % до 25 % установлено, что частотная дисперсия комплексной относительной диэлектрической проницаемости наиболее сильно проявляется в диапазоне 120 Гц – 10 кГц (с увеличением частоты действительная и мнимая части уменьшаются в среднем в 2,8 раз), а при частотах диапазона 10 кГц – 1 МГц значения обеих частей относительной диэлектрической проницаемости стабилизируются, изменяясь в пределах от 1,1 до 1,7 раз.

2. Установлено, что при полном водонасыщении образцов песчаника и известняка с пористостью от 3,2 % до 25 % при нормальных условиях помимо резкого возрастания значений действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости в десятки раз наблюдается смещение верхней границы частотного диапазона проявления дисперсии до 100-500 кГц.

3. Установлено, что для полностью водонасыщенных образцов песчаника и известняка с пористостью от 3,2 % до 25 % изменение температуры от +20 °С до -40 °С приводит к снижению действительной части диэлектрической проницаемости в частотном диапазоне 0,1-1 кГц в 1,2-1,4 раза, 2-20 кГц – в 2,5-4 раза, 100-1000 кГц – в 4-5 раз.

4. Тангенс угла диэлектрических потерь в исследуемом частотном диапазоне сухих известняков и песчаников и в полностью водонасыщенном состоянии при отрицательной температуре, изменяется в диапазоне 0,1-0,6, а в полностью водонасыщенном состоянии при нормальных условиях – от 2,2 до 0,1.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается теоретическими исследованиями с корректным использованием математического анализа, достаточным количеством экспериментальных данных, применением аттестованных измерительных установок и приборов, апробацией разработанной методики, совпадением части измерений с результатами, полученными другими авторами, а также хорошей сходимостью полученных экспериментальных результатов с теоретическими расчетами.

Методы исследований предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач, а именно: анализ и обобщение научно-технической информации в рассматриваемой области, проведение лабораторных исследований образцов горных пород, интерпретацию и статистическую обработку полученных данных с помощью современного программного обеспечения.

Научная новизна работы:

1. Установлены зависимости частотной дисперсии электрических свойств горных пород осадочного, метаморфического и магматического типов в низкочастотной области до 1 МГц в сухом состоянии (скелет породы).

2. Установлены зависимости частотной дисперсии электрических свойств горных пород осадочного генотипа в частотной области до 1 МГц в полном водонасыщенном состоянии.

3. Установлено смещение верхней границы частотного диапазона проявления дисперсии действительной части комплексной диэлектрической проницаемости с 10 кГц в сухом состоянии до 100-500 кГц в полностью водонасыщенном состоянии для песчаника и известняка.

4. Установлены зависимости частотной дисперсии и изменение диэлектрических свойств горных пород осадочного генотипа в частотной области до 1 МГц при замораживании до температуры -40°C в водонасыщенном состоянии.

5. Установлено изменение тангенса угла в исследуемом частотном диапазоне сухих известняков и песчаников и в полностью водонасыщенном состоянии при отрицательной температуре, изменяется в диапазоне 0,6-0,2, а в полностью водонасыщенном состоянии при нормальных условиях – от 2,0 до 0,7.

Научная значимость работы состоит в теоретическом обосновании влияния краевых эффектов при использовании конденсаторного метода и их учете при изучении электрических свойств горных пород, в установлении зависимостей изменения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов горных пород в сухом и полностью водонасыщенном состоянии, и при замораживании.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики прецизионного определения диэлектрической проницаемости и удельной проводимости горных пород на образцах неправильной формы в лабораторных условиях, установлении зависимостей дисперсии

электрических свойств горных пород различного генотипа в диапазоне 100 Гц-1 МГц. Разработанная методика была использована в рамках выполнения ряда договоров на оказание научно-технических услуг по определению относительной диэлектрической проницаемости и удельной проводимости образцов различных горных пород.

Личный вклад автора заключается в проведении аналитического обзора существующих методов определения электрических свойств горных пород различного генотипа, в том числе комплексной диэлектрической проницаемости, удельной электропроводности и удельной проводимости, разработке плана исследований, проведения экспериментов, обработке, анализе и обобщении полученных результатов, формулировании научных положений и оформлении результатов работы в виде научных статей.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены и обсуждены на следующих научных конференциях: Международная конференция «Innovations in Geology, Mining, Processing, Economics, Safety and Environmental Management» (05.06.2019 – 07.06.2019, г. Фрайберг, Германия); Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2024» (30 января - 2 февраля 2024 года, г. Москва); VII Международная научно-техническая конференция «Горная геология, геомеханика и маркшейдерия» (23-24 октября 2024 года, г. Донецк), Международный научный симпозиум «Неделя Горняка-2025» (г. Москва).

Публикации

Результаты исследования изложены в 4 печатных изданиях, в том числе в 3 входящих в перечень ВАК, 2 из которых входят в международные наукометрические базы данных.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, 3 приложений, библиографического списка из 136 источников. Работа изложена на 138 страницах текста, содержит 30 рисунков и 20 таблиц.

Благодарности.

Автор выражает особую благодарность научному руководителю Черепецкой Елене Борисовне за сопровождение работы, ценные советы и обсуждения результатов; к.т.н. Шibaеву Ивану Александровичу и к.т.н. Иванову Павлу Николаевичу за помощь и поддержку при решении задач диссертационной работы; коллективу лаборатории ЛУМИИ НИТУ МИСИС за помощь при проведении лабораторных исследований; зав. каф. ФизГео Винникову Владимиру Александровичу за ценные замечания и обсуждения результатов работы.

Глава 1 Современное состояние исследований в области изучения частотной зависимости электрических свойств горных пород

На протяжении более ста лет электрические свойства (удельное электрическое сопротивление и удельная электропроводность) горных пород являются объектом изучения исследователей со всего мира [1-3], особенно в рамках приповерхностной геофизики [4, 5]. Они используются как для картирования больших поверхностей, так и для местных томографических/зондовых исследований. В последние два десятилетия большое внимание уделяется диэлектрической спектроскопии горных пород, обеспечивающей повышение достоверности результатов геофизических исследований, связанных с изучением характеристик электромагнитных полей в массиве [6, 7].

Изучением электрических свойств горных пород занимались такие видные деятели горной науки СССР и России как В.В. Ржевский, Г.Я. Новик, Э.И. Пархоменко, М.П. Тонконогов, А.Б. Успенская, А.А. Петровский, Л.Я. Нестеров, А.Г. Тархов, Т.Л. Челидзе, И.И. Кононенко, А.Н. Тихонов, С.Г. Семенова, Р.И. Тедер, а также зарубежные ученые и исследователи К. Шлюмберже, Н. Лундберг, Г.В. Келлер, Т. Катсуб и другие.

Метод диэлектрической спектроскопии основан на уникальном свойстве различных материалов реагировать на переменные электромагнитные поля. Величина отклика вещества на внешние переменные поля различной частоты может быть определена из таких измеряемых величин, как действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости, которые являются наиболее фундаментальными, входят в материальные уравнения электромагнетизма и для которых развиты теоретические модели. С этими диэлектрическими характеристиками связаны удельная электропроводность, кажущееся сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь, показатель преломления и коэффициент поглощения электромагнитных волн. Временная задержка отклика среды на внешнее воздействие и приводит к частотной

зависимости ее электрических свойств, или дисперсии, учет которой важен при корректной интерпретации данных, полученных при использовании таких геофизических методов, как радиоволновой каротаж, индукционные измерения в скважине, георадарные исследования и другие. Учет временной и частотной индуцированной поляризации, возникающий при внешнем воздействии внешнего электромагнитного поля, необходим также при исследовании флюидонасыщения горных пород по результатам электроразведки на основе переменных электромагнитных полей [8].

Однако часто данные, полученные из натуральных наблюдений, расходятся с измеренными в лабораторных условиях. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что частотный диапазон, где наиболее сильно наблюдается дисперсия диэлектрической проницаемости и электропроводности в гетерогенных средах, определяется как петрофизическими характеристиками, так и флюидонасыщением горной породы.

Поэтому повышение достоверности оценки электрофизических характеристик исследуемой среды и восстановления ее параметров из данных натуральных электромагнитных измерений предполагает измерение электрических характеристик материала в лабораторных условиях и установление их частотных зависимостей.

1.1 Механизмы поляризации и релаксационные процессы в горных породах

Поляризуемость вещества обусловлена смещением связанных зарядов молекул и атомов относительно их положения равновесия под воздействием внешнего электрического поля. Различные виды поляризуемости объясняются различиями в природе взаимодействий между частицами вещества, приводящих к различным типам поляризации. Выделяют несколько типов поляризуемости, каждый из которых характеризует отдельные аспекты взаимодействия вещества с электрическим полем [7, 9].

При этом процесс поляризации является инертным, поскольку на перемещение связанных зарядов требуется некоторое конечное время. При выключении внешнего поля возвращение системы в первоначальное состояние происходит за время, которое называется временем релаксации, а процесс – релаксационным.

Поляризация по характеру смещения частиц разделяется на упругую и релаксационную. Для упругого типа поляризации характерным является то, что частицы под действием переменного электромагнитного поля смещаются на очень малые расстояния в пределах поля упругих сил, связывающих эти частицы. При этом для упругой поляризации характерными временами установления являются 10^{-12} - 10^{-15} с, что соответствует высокочастотной области [10].

Для релаксационной поляризации выделяют несколько видов [11, 12]. В однородных диэлектриках, имеющих кристаллическую структуру, под действием переменного электрического поля электроны внешних оболочек атомов, обладающие наименьшей энергией связи со своим ядром, могут перемещаться на расстояние порядка размера кристаллической решетки. Наблюдается электронно-релаксационная поляризация, время установления которой варьируется в пределах 10^{-7} - 10^{-2} с [13].

В жидких или газообразных диэлектриках (например, флюиды в горных породах), в которых молекулы при отсутствии поля обладают отличными от нуля хаотически ориентированными дипольными моментами, наблюдается ориентационная релаксационная поляризация. В этом случае дипольные молекулы ориентируются вдоль поля, при снятии которого диполи возвращаются в исходное состояние, также в течение некоторого времени. Если диэлектрик имеет ионную структуру, то при помещении такого материала в электрическое поле происходит смещение ионов, находящихся в узлах кристаллической решетки, в противоположных направлениях. Данное явление называется ионно-релаксационной поляризацией, время установления которой может варьироваться от 10^{-10} до 10^{-6} с в зависимости от

структурных особенностей материала [14, 15]. Этот тип поляризации проявляется в керамике, стекле и большинстве природных минералов.

Еще один тип поляризации наблюдается в гетерогенных диэлектриках и называется межфазной поляризацией или поляризацией Максвелла-Вагнера-Силларса (МВС) [3, 16]. Эффект МВС описывает реакцию многокомпонентной системы на внешнее электрическое поле, где различные компоненты или фазы материала имеют разные электрофизические свойства, такие как диэлектрическая проницаемость и электропроводность. Когда внешнее электрическое поле воздействует на такие многокомпонентные системы, состоящие из разных фаз с различными свойствами, поляризация каждой из этих фаз будет различной. В результате на границах между этими фазами или частями вещества возникает дополнительный эффект, связанный с накоплением зарядов на границах раздела фаз [17]. Этот накопившийся заряд на границах фаз создает локальные электрические поля, которые могут значительно изменять общую поляризацию системы. Эффект МВС сильно зависит от частоты внешнего электрического поля. При низких частотах молекулы успевают следовать за внешним полем и перестраиваются с изменением его величины, так что поляризация системы остается высокой. Однако при высоких частотах молекулы не успевают перестроиться и суммарный поверхностный заряд на границах раздела фаз меньше, а, следовательно, и поляризация системы также значительно уменьшается. Время релаксации поляризации МВС может варьироваться в широких пределах от 10^{-4} до 10^4 с, поэтому данный эффект наиболее сильно проявляется в низкочастотной области до 10 кГц [18].

1.2 Модели релаксационных процессов и дисперсии диэлектрической проницаемости

Конечное время перемещения связанных зарядов и определяемое им время релаксации τ в полярных однородных диэлектриках под действием

переменных электромагнитных полей, приводящее к дисперсии (частотной зависимости) диэлектрической проницаемости для гомогенной среды, одним из первых было описано Дебаем [13, 19]. Результаты его исследования были использованы в множестве следующих работ, например [20-22]. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости (ДП) $\varepsilon(\omega)$, являющейся в общем случае комплексной величиной, в [19] была записана в виде:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau}, \quad (1.1)$$

где $\varepsilon(\omega)$ – диэлектрическая проницаемость, зависящая от частоты ω , ε_s – значение ДП при приложении к диэлектрику постоянного электрического поля, ε_{∞} – предельное значение ДП при высоких частотах, ω – круговая частота, равная $\omega = 2\pi f$, τ – время релаксации молекулы, определяющее, как быстро молекула успевает реагировать на внешнее переменное поле. В работах [14, 23, 24] модель Дебая была записана для комплексного удельного сопротивления в виде:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left[1 - m \left(1 - \left(\frac{1}{1 + i\omega\tau} \right) \right) \right], \quad (1.2)$$

где $\rho(\omega)$ – частотная зависимость удельного сопротивления материала, ρ_0 – удельное сопротивление при статическом ($\omega \rightarrow 0$) поле или постоянном токе, а ρ_{∞} – удельное сопротивление на высоких частотах при переменном поле, частота которого стремится к бесконечности. В выражении $m = (\rho_0 - \rho_{\infty})/\rho_0$ (где $0 \leq m \leq 1$).

Десятилетия спустя появились релаксационные модели, учитывающие возможность существования нескольких времен релаксации, связанных с различными типами поляризации диэлектриков (ионной, электронной, межфазной и т.д.). Это особенно полезно для гетерогенных материалов, которые показывают более сложное поведение, чем те, которые можно описать простой моделью Дебая. Среди них стоит отметить модель Коул-

Коула [14, 25-28], в которой частотная зависимость комплексной ДП задается следующим выражением:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{(1 + i\omega\tau)^{1-\alpha}}, \quad (1.3)$$

где α – эмпирический параметр, который задает уширение кривой ($0 < \alpha < 1$). Сюда же следует отнести и модель диэлектрической релаксации Дэвидсона-Коула [29], где ДП описывается соотношением:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{(1 + i\omega\tau)^{\beta}}, \quad (1.4)$$

Здесь β – экспериментально определяемый параметр, зависящий от свойств материала и температуры, который характеризует отклонение от стандартной модели Дебая ($\beta = 1$ для стандартной модели Дебая, $\beta \neq 1$ для более сложных материалов).

Обобщение выражений (1.1)-(1.4) приведено в дисперсионной модели Гавриляка-Негами [30]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{((1 + i\omega\tau)^{1-\alpha})^{\beta}}. \quad (1.5)$$

В выражении (1.5) значения $\alpha = 0$, $\beta = 1$ соответствуют модели Дебая, при $\alpha < 1$, $\beta = 1$ – модели Коул-Коула, если $\alpha = 0$, $0 < \beta < 1$ – это модель Дэвидсона-Коула.

Несколько позднее появились работы, например [27, 31], в которых для неоднородных сред с различными минеральными зёрнами и большим разбросом в значениях их геометрических параметров предполагалось, что время релаксации индуцированной поляризации изменяется в широком диапазоне. В этом случае распределение времен релаксации задается некоторой нормированной функцией плотности вероятности $g(\tau)$ ($\int_0^{\infty} g(\tau) d\tau = 1$), а выражение для комплексной ДП имеет вид:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \int_0^{\infty} \frac{g(\tau) d\tau}{1+i\omega\tau}. \quad (1.6)$$

Плотность вероятности $g(\tau)$ может быть использована и в моделях (1.1)-(1.5), в которых задается соответствующей функцией [32-34].

Еще одним подходом в рамках описания релаксационных процессов является подход, описанный в работах [35, 36]. В рамках данного подхода среда моделируется набором релаксационных процессов, каждый из которых характеризуется разностью диэлектрических постоянных $\Delta\varepsilon_j = \varepsilon_{sj} - \varepsilon_{\infty j}$ для каждой фазы, временами релаксации τ_j и параметрами α_j . Частотная область применимости таких моделей зависит от наличия экспериментальных данных, позволяющих определить параметры модели путем подгонки. Тогда функция комплексной диэлектрической проницаемости выглядит следующим образом:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \sum_j \frac{\Delta\varepsilon_j}{(1+i\omega\tau_j)^{1-\alpha_j}}. \quad (1.7)$$

Число членов в сумме (1.7) в зависимости от количества релаксационных процессов может быть различным, например, три, которые рассмотрены авторами [37]. Тогда релаксационные процессы можно описать выражением (1.8):

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\Delta\varepsilon_{s1}}{1+i\omega\tau_1} + \frac{\Delta\varepsilon_{s2}}{1+i\omega\tau_2} + \frac{\Delta\varepsilon_{s3}}{(1+i\omega\tau_3)^{1-\alpha_3}}, \quad (1.8)$$

где $\Delta\varepsilon_{s1}$, $\Delta\varepsilon_{s2}$, $\Delta\varepsilon_{s3}$ – интенсивности первого, второго и третьего релаксационного процесса, обусловленные влиянием различных видов поляризации, τ_1 , τ_2 , τ_3 – их времена релаксации.

Приведенные выше модели дисперсии диэлектрической проницаемости гетерогенных сред не учитывают их структурные особенности, а оперируют

лишь с набором различных времен релаксации, каждое из которых связано с соответствующим видом поляризации. Для описания структурных особенностей композитов использовались модели сред, состоящих из матрицы с комплексной ДП ε_m , внутри которой находятся слабо проводящие частицы различной формы: либо сферической (модель Максвелла-Гарнета) [38-40], либо цилиндрической [41] или эллиптической [42-44] с ДП ε_f . В работах [38-44] частотная дисперсия комплексной диэлектрической проницаемости композитов с частицами различной геометрической формы объяснялась с точки зрения возникающей межфазной поляризации МВС. Здесь же отмечалось, что появление межфазной поляризации обусловлено разницей электрических свойств отдельных элементов композитов и возникновением двойного поляризационного слоя на границе раздела фаз композитного материала. Авторами [45] представлено экспериментальное и теоретическое исследование влияния межфазной поляризации МВС на электрические свойства в композитных материалах в зависимости от морфологии, объемной доли наполнителя и ориентации частиц наполнителя, их форм-фактора. Рассматривая комплексную диэлектрическую постоянную матрицы и наполнителей, диэлектрические спектры композитов рассчитаны в диапазоне частот от 10^7 Гц до 10^{-2} Гц.

Перечисленные выше теоретические модели разработаны и хорошо применимы в основном для моделирования дисперсии ДП пористых пород (например, [46-50]) на основе учета объемных долей и диэлектрических свойств различных пороодообразующих компонентов и их геометрических размеров.

В работе [41] на основе теории индуцированной поляризации Максвелла-Вагнера получены интегральные соотношения, связывающие приращение эффективной комплексной диэлектрической проницаемости с приращением объемной доли включений при добавлении бесконечно малого количества зерен. Используя результаты [41], в работе [51] были выполнены расчеты дисперсии диэлектрической проницаемости модельной пористой

среды песчаника, состоящего из пирита, кварца и кальцита, насыщенного нефтью и водой, в частотном диапазоне 1 МГц-1 ГГц и проведено численное моделирование, при этом коэффициент корреляции численных и теоретических расчетов оказался равным 0,9889.

Экспериментальные исследования [52] по изучению дисперсии электрофизических характеристик горных пород в лабораторных условиях проведены в широком частотном диапазоне (от 10^{-2} Гц до 10 ГГц). Непосредственно в массиве применяется многочастотный метод индуцированной поляризации, в котором использовались более низкие частоты, чем в работах [53, 54]. Наиболее полно этот метод описан в работе [54], он апробирован на 26 месторождениях сульфидных, графитовых, магнетитовых, пирротиновых и порфировых медных руд. При этом использовался частотный диапазон от 10 мГц до 100 кГц. Было показано, что наблюдаются существенные различия между спектральными откликами в кажущемся сопротивлении сульфидных и графитовых руд. Это дает возможность дифференциации данных руд в полевых условиях. Обнаружены различия между спектральными характеристиками кажущегося сопротивления магнетита и никелевого пирротина, которые могут оказаться полезными при использовании многочастотного метода индуцированной поляризации при разведке месторождений сульфида никеля. Получено, что большинство спектров in-situ могут быть описаны модифицированной моделью релаксации Коула-Коула. Так, например, для медно-порфирового месторождения при использовании электроразведки на основе переменного электромагнитного поля для аппроксимации экспериментальных точек, полученных для комплексного удельного сопротивления, в частотном диапазоне 10^{-2} - 10^5 Гц использовалось выражение:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left[1 - m \left(1 - \left(\frac{1}{1 + (i\omega\tau_1)^{c_1}} \right) \right) \right] \left[\frac{1}{1 + (i\omega\tau_2)^{c_2}} \right], \quad (1.9)$$

где времена релаксации τ_1, τ_2 равны соответственно $(6,9 \pm 1,3)$ мс, (23 ± 2) нс, $m = 0,42 \pm 0,02$, $c_1 = 0,28 \pm 0,01$, $c_2 = 0,72 \pm 0,05$. Аналогичные (1.9) выражения были получены и для других медно-порфировых месторождений, а также для магнетитовых, пиротитовых и других месторождений.

Натурные эксперименты по измерению дисперсионных характеристик горных пород выполнены также в работах [55-57].

Так, в работе [55] на основе электромагнитного каротажа с использованием индукционного зонда, проведенного в насыщенном пористом коллекторе, выполнена оценка соотношения вода-нефть и проведена идентификации компонентов коллектора по диэлектрическим спектрам и релаксационным параметрам. Получено выражение, определяющее комплексную диэлектрическую проницаемость через комплексные диэлектрические проницаемости подсистем, составляющих коллектор для МГц-диапазона частот электромагнитного поля. В работе [58] разработан специальный алгоритм и получены аналитические выражения позволяющие определить время релаксации по результатам измерения кажущегося сопротивления на трех частотах при электроразведке.

Однако следует отметить, что для верификации данных натурных измерений и извлечения из них некоторых физико-химических параметров необходимо проводить лабораторные исследования на образцах с целью получения информации по определенным временам релаксации и изменении спектра индуцированной поляризации, обусловленного различными размерами зерна, различной концентрацией проводящих частиц и др.

1.3 Экспериментальные методы измерения электрических свойств горных пород в лабораторных условиях

Для корректного измерения электрических свойств горных пород, в особенности комплексной ДП, в лабораторных условиях в каждом частотном диапазоне применяются различные методы, приведенные в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Методы определения электрических свойств горных пород в лабораторных условиях

Диапазон частот	Метод	Принцип
1 МГц-10 МГц	Конденсаторный метод	С использованием измерителей импеданса (LCR-измеритель): - с использованием плоского конденсатора, состоящего из двух плоскопараллельных обкладок, между которым размещается образец; - с использованием конденсаторов сферической или цилиндрической формы, внутри которых расположен объект исследования.
100 МГц-40 ГГц	Волноводный метод	Основан на использовании отрезков линий передач с реализацией различных методов (стоячих волн): прямоугольные или круглые волноводы (различные диапазоны работы в зависимости от размеров волновода).
100 кГц-50 ГГц	Коаксиальный метод	Основан на использовании коаксиальных линий и ячеек. Определение комплексной ДП выполняется через измерение коэффициента отражения и передачи сигналов, проходящих по коаксиальному кабелю, внутри которого размещается исследуемый материал
1-100 ГГц	Микрополосковые линии	Основан на использовании микрополосковых линий или микрополосковых резонаторов с использованием СВЧ-датчиков.
10 кГц-50 МГц	Резонансный метод	Основан на измерении сдвига резонансной частоты и изменение добротности контура, в который помещается образец

В низкочастотном диапазоне (от 1 мГц до 1-10 МГц) применяется, в основном, конденсаторный метод с использованием плоского, сферического

или цилиндрического конденсаторов. Суть этого метода заключается в измерении емкости конденсатора на различных частотах, в котором образец материала (непосредственно, горная порода) заменяет часть диэлектрической среды между обкладками [14, 59-61].

Метод с использованием волноводов особенно эффективен для измерений в частотных диапазонах от 100 МГц до 40 ГГц, что охватывает важные области микроволновых и радиочастотных технологий [62]. При использовании волноводов для измерения диэлектрической проницаемости волновод различного сечения заполняется материалом, и затем измеряются параметры, такие как коэффициент прохождения и отражения электромагнитных волн, что позволяет рассчитывать электрические свойства материала в соответствии с теорией [63].

Использование коаксиальных кабелей, внутри которых помещается материал, являются еще одним важным методом для измерения электрических свойств в целом и диэлектрической проницаемости в частности в широком частотном диапазоне от 100 кГц до 50 ГГц [64-66]. В отличие от волноводов, коаксиальные линии используются для измерений коэффициента отражения и прохождения сигналов, распространяющихся по коаксиальному кабелю, внутри которого размещается исследуемый материал [67]. Эти линии широко применяются в радиоэлектронных устройствах, в том числе в системах связи.

Следующим методом определения комплексной ДП являются микрополосковые линии – это структуры, часто используемые в микроволновых и сверхвысокочастотных диапазонах для измерения диэлектрических свойств материалов [68]. Эти линии часто используются в лабораторных условиях, где требуется высокая точность и миниатюрность. Микрополосковые линии применяются в частотных диапазонах от 1 до 100 ГГц и выше [69].

Еще одним существующим методом является резонансный метод, основанный на измерении изменений характеристик высокочастотного СВЧ-резонатора при помещении в него образца материала. Введение диэлектрика

вызывает сдвиг резонансной частоты, связанный с действительной частью диэлектрической проницаемости ε' , а изменение добротности определяется мнимой частью ε'' , с которой связаны потери. Таким образом, по величине сдвига частоты резонанса и изменению резонансной кривой можно вычислить комплексную диэлектрическую проницаемость исследуемого материала. Метод отличается высокой чувствительностью и точностью, особенно для малых образцов и материалов с низкими потерями [70, 71].

Помимо вышеперечисленных методов, наиболее распространённых и используемых, применяются методы, использующие волны в свободном пространстве или методы измерения во временной области.

Таким образом, существует множество лабораторных методов измерения электрических свойств и каждый из них имеет свои преимущества и ограничения. Выбор метода зависит от материала, частотного диапазона, точности измерений и требуемых условий эксперимента. Конденсаторные методы эффективны при измерениях в низкочастотных диапазонах, волноводы и коаксиальные линии подходят для высокочастотных широкополосных измерений, а микрополосковые линии – для работы с микроволновыми частотами.

В данной диссертационной работе выполняется исследование электрических свойств горных пород при частотах до 1 МГц, поэтому для проведения измерений был выбран конденсаторный метод исследования.

1.4 Исследования в области изучения электрических свойств (в том числе диэлектрической проницаемости) горных пород

Как отмечалось авторами [72], измерение комплексной ДП в лабораторных условиях даже при незначительной влажности горных пород при частотах ниже 100 Гц сталкивается с определенными трудностями, связанными с увеличением поляризации электродов при конденсаторном методе. В связи с этим в большей части работ по экспериментальному

измерению ДП в лабораторных условиях исследовался диапазон от 100 Гц до 1 ГГц.

Обзор экспериментальных данных, полученных к 1999 году, по диэлектрической спектроскопии образцов пористых горных пород приведен в работе [16]. Авторами [16] отмечается, что при определении действительной части ДП на основе конденсаторного метода использование четырехэлектродной схемы вместо двухэлектродной для уменьшения индуктивности измерительной ячейки приводит к значительно меньшим значениям величин в диапазоне частот 10 Гц-10 кГц, при этом для больших частот эти значения практически совпадают. В работе [16] приведены зависимости от водонасыщения, концентрации включений, размеров зерен обеих частей ДП и удельной проводимости в частотном диапазоне от 100 Гц 1 МГц для гранита, песчаника, бентонитовой глины. Результаты приведенных в обзоре [16] экспериментов подтвердили, что в осадочных горных породах с различной площадью поверхности частиц и химией поверхности основной вклад в электрические спектры проводимости и поляризацию водосодержащих пород на низких частотах дают связанные поверхностные заряды. Диэлектрическая проницаемость таких сред увеличивается с ростом отношения суммарной поверхности частиц к объему образца и сильно зависит от поверхностного заряда.

В последующие годы интерес к спектроскопии диэлектрических свойств горных пород только возрастал. Так, в работе [73] исследовались диэлектрические свойства известняка и песчаника в частотном диапазоне 10 кГц-110 МГц. Было получено, что действительная часть ДП как для песчаников, так и для известняков в низкочастотной области (частоты порядка 10 кГц) резко возрастает (достигая значений ~ 100). Начиная с частоты 100 кГц и выше величины действительной части ДП монотонно уменьшались до 15 как для песчаников, так и для известняков, и были одинаковыми для всех образцов. Для образцов песчаника наблюдалось по одному максимуму мнимой части ДП для каждого образца на частотах 15 кГц и 23,5 кГц, в то время как для известняков –

на частотах 42,1-42,3 кГц. По предположению авторов, возможно, появление максимумов дисперсионной кривой мнимой части известняков на частотах ниже 10 кГц, которые в [74] рассматривались. В статье не объясняется причина появления данных экстремумов.

В работе [74] приведены результаты экспериментальных исследований действительной и мнимой частей ДП мерзлой дисперсной среды на основе порошка кварца в частотном диапазоне от 10^{-2} Гц до 1 МГц при влажности 13 % и изменении температуры от -140 °С до 0 °С. Получено, что в данном диапазоне значения действительной части изменяются от 17 до 5, мнимая часть ДП имеет максимум при частоте порядка 1 кГц. Предложена методика обработки экспериментальных данных с использованием программного пакета, разработанного в процессе исследования, а также подобраны параметры модели Гавриляка-Негами.

В последнее время для объяснения экспериментально наблюдаемых дисперсионных зависимостей ДП интенсивно применяется обобщенная теория эффективной среды с индуцированной поляризацией [75-77]. Основная идея данного метода заключается в том, что дисперсионные характеристики эффективной среды реконструируются в виде суммы дисперсионных характеристик всех составляющих гетерогенной среды с учетом доли каждого минерала, средних размеров их зерен, формы и ориентации зерен. Полученные таким образом модельные зависимости сопоставляются с экспериментальными данными. В работе [78] выполнены исследования флюидонасыщенных образцов горных пород в диапазоне от 0,1 кГц до 1 МГц и обработка полученных результатов. Наиболее перспективен метод эффективной среды для образцов горных пород с металлическими включениями [79]. В работе [79] в частотном диапазоне 10^{-4} - 10^4 Гц измерены спектральные характеристики образцов халькопирита и пирита, образцов свинцово-цинковой руды и магнетита. Разработанный на основе метода эффективной среды так называемый алгоритм дифференциальной эволюции позволил с высокой степенью достоверности аппроксимировать полученные экспериментальные данные. При этом аномалии спектров дисперсии ДП

двухфазных, трехфазных и многофазных горных пород могут быть изучены на основе используемой модели. Эта модель обеспечивает эффективный количественный метод анализа для изучения структурных особенностей горных пород.

Гетерогенные среды с частицами с различной электропроводностью изучались в работе [80]. Диэлектрический отклик исследовался на двух образцах марганцевых и железосодержащих горных пород. Метод основан на приложении переменного электрического поля к образцу и измерении амплитуды и фазы его отклика. Метод широкополосной диэлектрической релаксационной спектроскопии применялся в диапазоне частот от 1 кГц до 1 МГц. Высокие значения как действительной, так и мнимой части комплексной функции диэлектрической проницаемости гидратированных образцов вышеуказанных горных пород обусловлены механизмами поляризации на границе раздела фаз, приписываемыми поровой воде. Два сухих образца имеют гораздо более низкие значения ДП по сравнению с водонасыщенными, в то время как они имеют больший разброс в значениях диэлектрической проницаемости. Это можно объяснить различным происхождением геотектонических деформаций образцов.

В работе [14] измерена комплексная ДП песчаника в частотном диапазоне 10^{-3} - 10^6 Гц. Для объяснения наблюдаемой дисперсии электрических свойств применена обобщенная модель Дебая, в которой учитывается распределение зерен по размеру, а также влияние на поляризационные параметры распределения поверхностного заряда на границах зерен.

Авторами [60] изучалась зависимость электрических свойств 20 образцов песчаника при частотах от 1 МГц до 1 ГГц от флюидонасыщения как водой, так и соляным раствором. Характерные особенности дисперсионных кривых были объяснены с применением модели Максвелла-Вагнера.

Результаты измерений диэлектрических спектров смеси песка и бентонита, насыщенных нефтью или соленой водой (раствором NaCl) в

диапазоне частот от 50 МГц до 16 ГГц при 22 °С приведены в работе [81]. Здесь же разработана обобщенная модель, основанная на суперпозиции электрических свойств диэлектриков. Эксперименты на керновых образцах и моделирующих смесях выявили, что действительная часть ДП ε' возрастает с увеличением влажности, тогда как нефть практически не влияет на ε' , но снижает проводимость. Мнимая часть ε'' характеризуется дисперсией в области релаксации воды и хорошо отражает содержание остаточной влаги и нефтенасыщенность. Авторами изучена возможность применимости модели для описания нефтеносных пластов, а также при разработке новых методов электромагнитного каротажа.

В своей следующей работе [82] авторы [81] продолжили изучение диэлектрических спектров водосодержащих горных пород, формирующих минеральный скелет нефтенасыщенного слоя с содержанием глинистых компонентов меньше 16 %, в диапазоне частот от 500 МГц до 15 ГГц и температур от 20 °С до 80 °С. Создана физическая модель для расчета спектров диэлектрической проницаемости и эффективной проводимости исследованной группы пород, входными параметрами которой являются содержание воды (солевого раствора) и температура, учитывающая распределение времен релаксации. Авторы показали, что при высоких степенях водонасыщенности преобладает релаксационный отклик свободной воды, а в случае частичной насыщенности возрастает роль межфазной поляризации на границах минерал-нефть-вода. Существенным результатом является количественная оценка температурной зависимости параметров модели, что позволяет экстраполировать лабораторные данные на условия реальных пластов.

В работе [83] было изучено применение диэлектрических измерений для оценки поврежденности горных пород в лабораторных условиях при приложении одноосного сжатия. В ходе серии экспериментов образцы различных пород подвергались механическим нагрузкам, а затем проводились измерения тангенса диэлектрических потерь $\tan \delta$ в широком диапазоне частот. Было показано, что по мере накопления повреждений в материале и

образования микротрещин происходит возрастание $tg \delta$, что связано с изменением распределения влаги в порах, ростом проводящих путей и усилением межфазной поляризации. Для изученного диапазона частот, который составлял от 100 Гц до 1 МГц, также стало очевидным, что легче обнаруживается появление микротрещин, вызванных приложением напряжения, в диапазоне частот приблизительно от 100 Гц до 1 кГц, в то время как на частоте 1 МГц влияние трещин на значения $tg \delta$ практически не проявляется. Причем в диапазоне частот 100 Гц-1 кГц резко возрастал тангенс угла потерь при достижении приложенного к образцу напряжения 0,6 от предела прочности на одноосное сжатие, что говорило о появлении поврежденности в образце.

1.5 Исследования электрических свойств горных пород при отрицательных температурах

Исследование диэлектрической проницаемости и проводимости горных пород при отрицательных температурах и, в особенности, в водонасыщенном состоянии является важным направлением в геофизике, геоэлектрике, инженерной геологии [84-89]. Такое исследование преследует как фундаментальные, так и прикладные цели. В условиях пониженных температур физико-химические свойства горных пород изменяются, что оказывает значительное влияние на их электрические характеристики [84].

Понижение температуры вызывает фазовые переходы в порах пород, насыщенных различными флюидами [85]. Так, вода замерзает, изменяя диэлектрическую проницаемость и электропроводность породы в целом [85]. Это обусловлено высоким значением диэлектрической проницаемости воды (около 81 при 20 °С), тогда как лёд имеет гораздо более низкое значение (около 3,2 при -20 °С). Замерзание влаги в порах, а также температурные изменения в минералах (например, в кварце, полевом шпате и других) изменяют поляризационные процессы, влияя на диэлектрический отклик породы [86].

Поскольку льдистое состояние подавляет дипольную подвижность молекул, эффективность поляризации снижается, особенно в низкочастотной области.

При инженерно-геофизических работах в районах Крайнего Севера, Арктики, Сибири и других зонах распространения вечной мерзлоты важно учитывать изменение электрических свойств пород при отрицательных температурах [84]. Знание диэлектрической проницаемости и проводимости позволяет:

- определять границу мерзлотного слоя [87, 90];
- различать талые и замерзшие участки в подповерхностной среде [90];
- оценивать насыщенность пор водой/льдом/газом [88, 91];
- интерпретировать данные различных геофизических методов: георадиолокации, вызванной поляризации, метода переходных процессов, радиоволновой сканировании и других [87];
- контролировать состояние вечномерзлых оснований под инфраструктурой (дорогами, трубопроводами, зданиями) [92].

Также понимание электрофизических характеристик мерзлых пород необходимо для моделирования тепломассопереноса, фазовых переходов и процессов деградации мерзлоты [86]. Эти параметры критичны для оценки устойчивости склонов, термокарстов, паводков, а также для построения криогидрологических моделей. Диэлектрические характеристики мерзлых пород вводятся при моделировании в различных программных пакетах (COMSOL, GPRMax, EMGeo и др.) [86]. Без данных по зависимости действительной части ДП $\varepsilon'(f, T)$ или удельной электропроводности от частоты и температуры $\sigma'(f, T)$ невозможно корректное моделирование отклика массива горных пород на электромагнитные волны, применяемые при георадарных исследованиях или при методе индуцированной поляризации. Эти параметры необходимы также для создания и калибровки температурных датчиков, антенн и ГИС-инструментов.

Еще одним важным прикладным значением при отрицательных

температурах является изучение лунных, марсианских и других внеземных грунтов при изучении зависимости электрических и диэлектрических свойств, которое связано с анализом их характеристик при низких температурах (от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) для корректной интерпретации отражённых сигналов и стратиграфии [89, 93]. Лабораторные исследования при сверхнизких температурах позволяют корректно трактовать данные по внеземным объектам [94].

Формирование баз данных о температурной зависимости электрофизических свойств горных пород является приоритетной задачей для будущих экологических, инженерных и геофизических приложений.

В работах [35, 94, 95] установлено, что в диапазоне от $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ диэлектрическая проницаемость водонасыщенных пород снижается на 70-90 % по сравнению с положительными температурами. Эта зависимость особенно ярко выражена в диапазоне частот 100 Гц-10 МГц. Переход от высокочастотной к низкочастотной области сопровождается ростом вкладов межфазной и МВС поляризации. При отрицательных температурах характерны задержки релаксации, при котором время τ возрастает на несколько порядков, особенно при наличии льда и капиллярных структур [96].

При отрицательных температурах в капиллярных порах вода не всегда замерзает сразу даже при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже – из-за эффекта переохлаждения и повышенного давления в малом объёме. Это создаёт так называемую связанную или незамерзающую воду, которая влияет на электропроводность, изменяет диэлектрическую проницаемость, участвует в релаксационных процессах. При этом капиллярные структуры определяют скорость фильтрации жидкости, характер электрического тока (ионный перенос), взаимодействие минералов с флюидами, степень насыщения пор при замерзании.

Осадочные породы (например, песчаники и известняки) показывают наибольшую вариативность при отрицательных температурах. Это связано с их пористостью, капиллярной структурой и остаточной влагой [97, 98].

Магматические породы (например, граниты) демонстрируют меньшую изменчивость, поскольку степень водонасыщения у них ниже, а структура более монолитна. Для метаморфических пород (мрамор, гнейс) характерна высокая анизотропия при замерзании влаги [99].

Электропроводность горных пород при отрицательных температурах зависит не только от наличия льда, но и от структуры порового пространства. При замерзании воды наблюдается резкое падение удельной электропроводности σ' со значений около 10^{-3} См/м до значений около 10^{-7} - 10^{-8} См/м [100]. Это обусловлено блокировкой путей перемещения ионов и ослаблением ионной подвижности. Однако наличие адсорбированных слоёв и жидкой плёнки даже при $T < 0$ °С может сохранять проводимость на уровне 10^{-6} См/м [101, 102].

При отрицательных температурах тангенс диэлектрических потерь $tg \delta$ в водонасыщенных горных породах значительно снижается из-за замерзания воды и падения проводимости [103, 104]. Однако, при переходных температурах (-2...-5 °С) может наблюдаться временный пик, связанный с фазовыми процессами и аномальной проводимостью. Тангенс диэлектрических потерь $tg \delta$ полезен как чувствительный индикатор состояния влаги в породе при геофизических исследованиях [104]. При понижении температуры ионная подвижность и проводимость в капиллярной воде/растворе резко падает. В результате уменьшается мнимая часть ε'' , а следовательно, и $tg \delta$. Поляризация Максвелла-Вагнера-Силларса становится менее выраженной, а дипольная поляризация воды исчезает – что также снижает потери [105].

1.6 Цель и постановка задач исследования

Таким образом, исследование электрических свойств в горных породах, несмотря на большое количество проведенных исследований, до сих пор представляют научный интерес в особенности в области низких частот.

На основании вышеизложенного была сформулирована цель диссертационной работы – изучение закономерностей изменения в диапазоне 100 Гц - 1 МГц электрических свойств (комплексной диэлектрической проницаемости, удельной электропроводности, удельного сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь) горных пород различных генотипов с разномасштабными структурными неоднородностями в сухом состоянии, при флюидонасыщении и при отрицательных температурах в условиях водонасыщения на основе конденсаторного метода с учетом краевых эффектов.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать и создать методику прецизионного определения диэлектрической проницаемости и удельной проводимости горных пород на образцах неправильной формы в лабораторных условиях;
- провести апробацию разработанной методики на модельных образцах с известной частотной дисперсией в диапазоне 100 Гц-1 МГц;
- экспериментально исследовать и проанализировать низкочастотную дисперсию электрических свойств горных пород различного генотипа в сухом состоянии;
- установить закономерности изменения электрических свойств образцов песчаника и известняка в частотном диапазоне 100 Гц – 1 МГц в зависимости от флюидонасыщения;
- установить закономерности изменения электрических свойств образцов песчаника и известняка в частотном диапазоне 100 Гц – 1 МГц при водонасыщении при замораживании до отрицательной температуры.

Глава 2 Теоретические предпосылки и основы методики прецизионного измерения низкочастотной дисперсии электрических свойств

2.1 Теоретические основы частотной зависимости диэлектрической проницаемости

Как известно, поведение диэлектрических материалов, в том числе таких гетерогенных сред, как горные породы, в переменном электромагнитном поле описывается системой уравнений Максвелла.

При этом электрическое поле в диэлектриках описывается вектором электрического смещения $\vec{D}(t)$, который равен:

$$\vec{D}(t) = \varepsilon_0 \vec{E}(t) + \vec{P}(t), \quad (2.1)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85$ пФ/м – электрическая постоянная, $\vec{P}(t)$ – вектор поляризации, равный дипольному моменту единицы объема диэлектрика, временная зависимость которого обусловлена не только перемещением внешним электрическим полем, но и инерционными свойствами связанных зарядов.

Поскольку вектор поляризации $\vec{P}(t)$ определяется откликом связанных зарядов гетерогенной среды на внешнее поле $\vec{E}(t)$, то в силу инерционности их перемещения временная зависимость $\vec{P}(t)$ отстает от временной зависимости $\vec{E}(t)$ и может быть записана в виде:

$$\vec{P}(t) = \varepsilon_0 \int_0^\infty \chi(\tau) \vec{E}(t - \tau) d\tau \quad (2.2)$$

где $\chi(\tau)$ – временная зависимость электрической восприимчивости, являющаяся в данном случае функцией отклика среды на внешнее электрическое поле. Учитывая, что в правой части выражения (2.2) стоит свертка двух функций, получим для каждой гармоники ω внешнего электрического поля:

$$\vec{P}(\omega) = \varepsilon_0 \chi(\omega) \vec{E}(\omega), \quad (2.3)$$

$$\vec{D}(\omega) = \varepsilon_0 \vec{E}(\omega) + \varepsilon_0 \chi(\omega) \vec{E}(\omega), \quad (2.4)$$

$$1 + \chi(\omega) = \varepsilon(\omega), \quad (2.5)$$

где $\varepsilon(\omega)$ – комплексная ДП, равная:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega), \quad (2.6)$$

где $\varepsilon'(\omega)$ – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости, задающая фазовую скорость электромагнитных волн, $\varepsilon''(\omega)$ – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости, i – мнимая единица.

Удельная проводимость входит в закон Ома в дифференциальной форме, учитывающий также конечное время отклика зарядов диэлектрической среды на внешнее поле

$$\vec{j}(t) = \int_0^\infty \sigma(\tau) \vec{E}(t - \tau) d\tau. \quad (2.7)$$

В выражение (2.7) $\sigma(\tau)$ – временная зависимость удельной проводимости.

Для каждой гармоники внешнего электрического поля $\vec{E}(\omega)$ связь между электрическими характеристиками среды имеет вид [106]:

$$\sigma(\omega) - i\omega\varepsilon(\omega)\varepsilon_0 = 0, \quad (2.8)$$

где $\sigma(\omega)$ – Фурье образ удельной электропроводности, которая также является комплексной величиной, причем $\varepsilon''(\omega)$ – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости, однозначно связана с действительной частью удельной электропроводности $\sigma'(\omega) = \omega\varepsilon_0\varepsilon''(\omega)$ и определяет в основном затухание волн в среде. Мнимая часть удельной электропроводности связана с действительной частью $\sigma''(\omega) = \omega\varepsilon_0\varepsilon'(\omega)$. К

тому же удельное сопротивление является обратной величиной удельной электропроводности $\rho(\omega) = 1/\sigma(\omega)$.

При этом отношение мнимой части к действительной части комплексной диэлектрической проницаемости задается тангенсом угла диэлектрических потерь и характеризует потери энергии электрического поля, рассеиваемой в материале:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)}. \quad (2.9)$$

2.2 Емкостной метод измерения дисперсии диэлектрической проницаемости с учетом краевых эффектов

В данной работе исследуется низкочастотная дисперсия (частотный диапазон 100 Гц-1 МГц) образцов горных пород различных генотипов. Как отмечалось в главе 1, для определения комплексной ДП и удельной электропроводности в данной области частот наиболее эффективен конденсаторный метод с использованием измерителей импеданса.

Расчет емкости в большинстве случаев проводится на основе классической формулы для идеального конденсатора с плоскими электродами [60]:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon'(\omega) ab}{d} \quad (2.10)$$

где C_0 – емкость идеального плоского конденсатора, $\varepsilon'(\omega)$ – действительная часть ДП среды между электродами, a , b и d – длина, ширина электрода и величина межэлектродного зазора, соответственно.

Однако расчет емкости с использованием формулы (2.10) имеет значительную погрешность, которая неуклонно растет с увеличением межэлектродного зазора d [107]. Так, в работе [108] было получено, что при использовании формулы (2.10) и соотношении $\frac{d}{b} < 0,02$ и $\frac{d}{b} < 0,05$

(при $\frac{a}{b} \gg 1$) рассчитанные и экспериментально измеренные значения отличаются, соответственно, на 10 % и 16 %. Это связано с тем, что на границах электродов возникает искажение электрического поля и появляются краевые эффекты.

Краевые эффекты в плоских конденсаторах – это искажения электрического поля на границах обкладок, возникающие из-за конечных размеров электродов. В идеальной модели поле считается однородным и перпендикулярным между бесконечно широкими и тонкими обкладками. Однако в реальности электрическое поле «расплывается» у краёв, что изменяет распределение потенциала и увеличивает фактическую ёмкость по сравнению с идеальной моделью [106].

Учет краевых эффектов может быть выполнен при нахождении распределения потенциала поля, создаваемого двумя плоскими электродами конечных размеров с равномерно распределенным по их поверхности зарядами, на основе численного моделирования емкости методом конечных элементов (МКЭ) в программных пакетах, например, ANSYS или LS DINA [108, 109]. Так, в работе [108] методом МКЭ было получено, что отношение емкости плоского конденсатора C , рассчитанной с учетом краевых эффектов при погрешности расчета не более 0,03 %, к емкости идеального конденсатора C_0 , рассчитанного по формуле (2.11), может отличаться от 2 до 10 раз в зависимости от соотношения d/b .

Большой интерес представляют приближенные аналитические формулы, учитывающие краевые эффекты [106, 108, 110].

Классическая задача вычисления и измерения емкости плоского конденсатора упоминается в литературе и исследуется уже долгое время. При этом возникающие краевые эффекты на границе обкладок конденсатора и его емкость были первоначально изучены Г. Кирхгофом, а затем развиты в работах [110-113]. В литературе встречаются различные аналитические выражения для емкости конденсаторов, учитывающие краевые эффекты, в том числе для бесконечно длинных электродов с нулевой толщиной,

прямоугольных электродов с также нулевой толщиной или прямоугольных электродов с конечной толщиной [108, 109].

Для уменьшения погрешности в значениях действительной части ДП и других электрических свойств при измерении емкости конденсатора, образованного двумя прямоугольными электродами, между которыми помещался образец горной породы в виде плоскопараллельной пластины неправильной формы, учитывались краевые эффекты, связанные с искажением электрического поля на границах электродов. При этом площадь поперечного сечения образцов должна быть значительно больше площади электродов. В этом случае при приложении разности потенциалов к электродам все электрическое поле будет сконцентрировано в образце горной породы.

В данной диссертационной работе было принято решение использовать прямоугольные электроды с размерами a и b (ширина и длина). В случае плоскопараллельного конденсатора, где электроды имеют пренебрежимо малую толщину ($h/b \rightarrow 0$), а их длина a и ширина b имеют один порядок величины, существует уточненная формула для вычисления емкости, учитывающая краевые эффекты [107, 109]:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon'(\omega) ab}{d} \left\{ 1 + \frac{d}{\pi b} \left[1 + \ln \left[2\pi \left(\frac{b}{d} + \frac{3}{4} \left(1 + \frac{b}{a} \right) \right) \right] \right] + \frac{d}{\pi a} \left[1 + \ln \left[2\pi \left(\frac{a}{d} + \frac{3}{4} \left(1 + \frac{a}{b} \right) \right) \right] \right] \right\}. \quad (2.11)$$

Результат сравнения расчета методом конечных элементов емкости плоского конденсатора авторов [108] и аналитического расчета по формуле (2.11) приведена на рисунке 2.1.

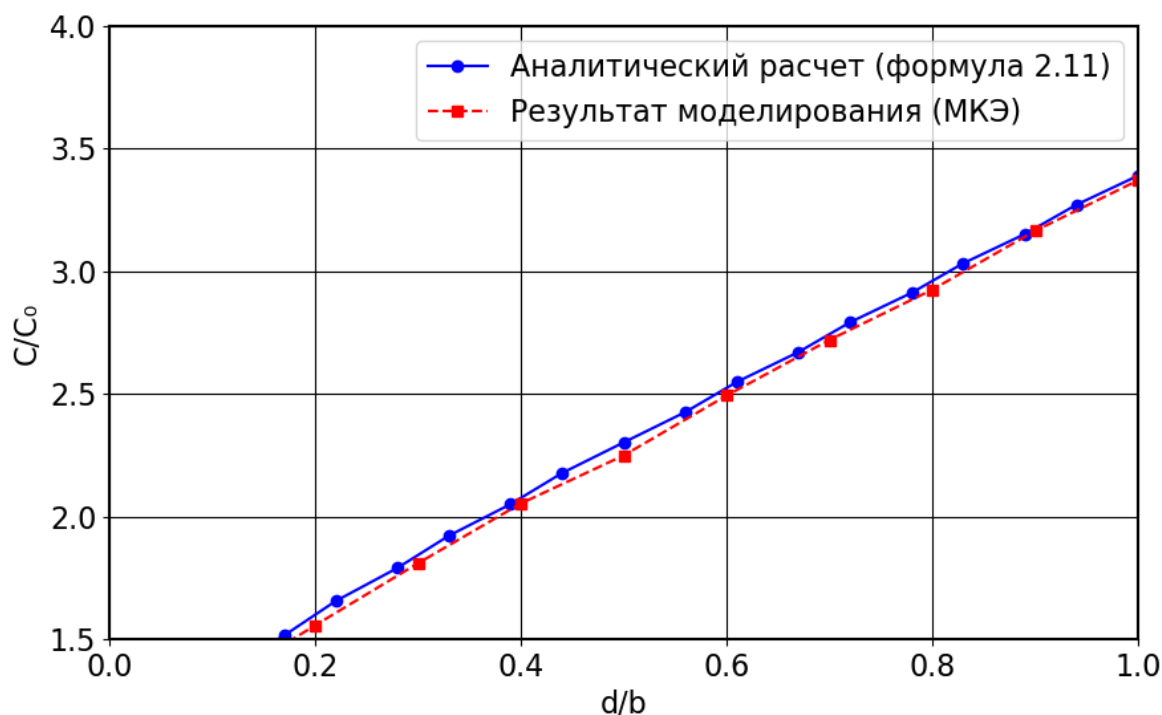


Рисунок 2.1 – Сравнение результатов расчета емкости плоского конденсатора методом конечных элементов [108] и методом аналитического расчета по формуле (2.11) [109]

На основе формулы (2.11) была разработана методика прецизионного определения диэлектрической проницаемости и удельной проводимости горных пород на образцах неправильной формы в лабораторных условиях, устанавливающая порядок и алгоритм проведения испытаний в лабораторных условиях (Приложение А).

2.3 Учет электродной поляризации на низких частотах

Как было отмечено ранее, важным фактором, проявляющимся при изучении электрических и диэлектрических свойств горных пород на низких частотах (ниже 1 кГц), является электродная поляризация [16, 72, 114]. Этот эффект возникает при контакте изучаемой среды с измерительными электродами. На границе между объектом исследования и электродом возникает двойной электрический слой, в котором ионы или полярные

молекулы диффундируют к поверхности, при этом заряды разделяются, и появляется дополнительная емкость.

В современной литературе описаны и используются различные способы и механизмы устранения и ослабления электродной поляризации при работе конденсаторным и другими методами, приведенные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные способы уменьшения электродной поляризации

Способ	Принцип
Введение диэлектрического барьера	Отделить образец исследования от электрода тонким слоем из какого-либо другого диэлектрического материала, имеющего неизменяющуюся с частотой ДП, предполагающую хороший контакта с образцами. В работе [72] предлагается использовать тонкий слой полимера с известным значением электрических и диэлектрических свойств. При этом конденсаторная ячейка считается как последовательно соединенный конденсатор, состоящий из нескольких слоев [72].
Нанесение на поверхность электродов дополнительного покрытия	Нанесение на поверхность электродов или использование в качестве самих электродов покрытия из платины [115], нитрида титана [115], серебра [116] или золота [117]. Также в последнее время упоминается уменьшение поляризации на границе электродов в импедансной спектроскопии с использованием графитовой (углеродной пасты) [118].
Использование четырёх-электродной схемы	Применение вместо двухконтактной схемы – четырехконтактной (четырёхэлектродной) системы подключения образцов к измерительным приборам [119-121].
Использование кольцевых защитных электродов	В некоторых работах предлагается использование кольцевых защитных электродов (guard ring electrodes) для уменьшения влияния краевых эффектов при электрохимической импедансной спектроскопии бетона [122, 123]

Продолжение таблицы 2.1

Способ	Принцип
Использование бесконтактных ячеек	Коаксиальная или резонаторная методика: образец не прикасается к металлу. Однако в работе [124] показано, что при использовании коаксиальной ячейки влияние электродной поляризации при исследовании водонасыщенных почв проявляется на частотах 10-100 кГц.
Применение безэлектродного метода	Одним из таких методов является предложенный в работе [125] индукционный метод. При этом зондирующее электрическое поле в материале создается не контактными электродами, а электромагнитной индукцией с использованием индуктивного зонда с покрытием из эпоксидной смолы. Однако применение этого индуктивного датчика ограничено довольно узким частотным диапазоном и требует больших объемов образца.
Применение математических моделей коррекции	Описаны и приведены различные модели коррекции электродной поляризации, в том числе: использование эквивалентных схем [126], проверка согласованности через уравнение Крамерса-Кронинга [121] и др. [114].

При проведении исследований были использованы одновременно два способа уменьшения влияния электродной поляризации при проведении экспериментов. Первым способом устранения электродной поляризации являлось использование четырехпроводной схемы подключения с использованием зажимов Кельвина, при этом внешние (токовые) электроды задают поле, внутренние (потенциальные) считывают напряжение. Вторым способом являлось нанесение на поверхность образцов с двух сторон тонкого полимерного покрытия, выступающее в качестве «блокирующего слоя», электрические характеристики которого известны.

2.4 Выводы к главе 2

Таким образом, корректное изучение диэлектрических свойств горных пород в низкочастотной области требует не только учёта фундаментальных закономерностей поляризационных процессов, но и устранения экспериментальных искажений, связанных с краевыми эффектами и электродной поляризацией, что обеспечивает достоверность получаемых данных и их физическую интерпретацию.

В данной главе в рамках исследования электрических свойств горных пород в частотной области от 100 Гц до 1 МГц были рассмотрены:

- теоретические основы дисперсии электрических свойств горных пород;
- разработана методика прецизионного определения диэлектрической проницаемости и удельной проводимости горных пород на образцах неправильной формы в лабораторных условиях на основе конденсаторного метода;
- разработана электрическая схема измерений, в которой учтена электродная поляризация, возникающая при конденсаторном методе, и за счет четырехпроводной схемы подключения уменьшен вклад паразитных емкостей.

Глава 3 Исследование электрических свойств горных пород в сухом состоянии

3.1 Сведения об образцах горных пород, исследуемых в работе

Исследования электрических свойств проводились по представленной в приложении А методике прецизионного определения диэлектрической проницаемости и удельной проводимости горных пород на образцах неправильной формы в лабораторных условиях в плоском конденсаторе на образцах скальных горных пород всех трех генотипов: магматического, метаморфического и осадочного.

Магматическая интрузивная горная порода была представлена гранитом. В качестве осадочных горных пород были исследованы известняки и песчаники шести различных месторождений юга России. Разнозернистый мрамор с месторождения Бранко Валонго (Португалия) был выбран для исследований метаморфических горных пород.

Для всех типов горных пород был определен элементный состав горной породы, их структурные и текстурные особенности. Измерения элементного состава проводились на подготовленных аншлифах на сканирующем электронном микроскопе Phenom ProX с интегрированной системой энергодисперсионного микроанализа. Ускоряющее напряжение составляло 15 кВ, а увеличение выбиралось в зависимости от размера зерен и общей структуры. Исследование проводилось при площадных и точечных измерениях. Для верификации площадные измерения были продублированы. Точечные измерения были необходимы для определения элементного состава конкретного зерна. Определение элементного состава выполнялось минимум по десяти точкам и областям и в дальнейшем усреднялось для представления результатов. Структурные и текстурные особенности также определялись по результатам микроскопических исследований.

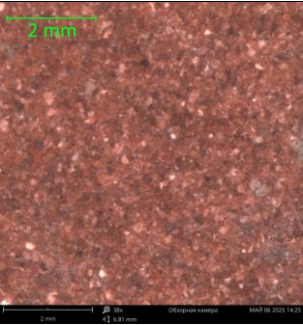
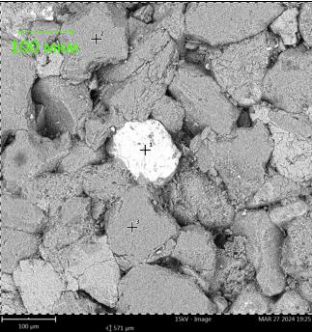
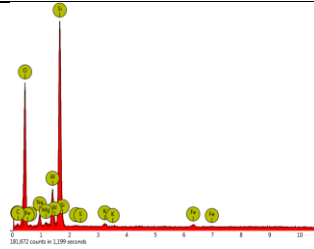
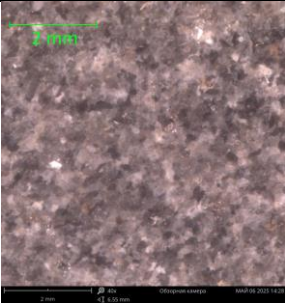
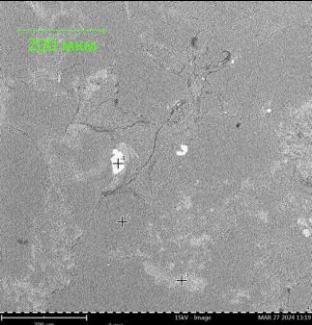
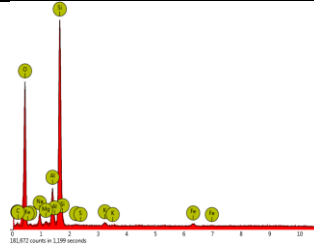
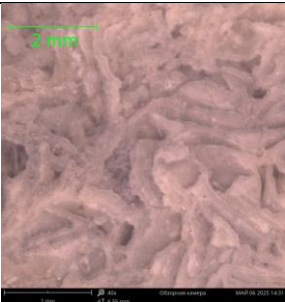
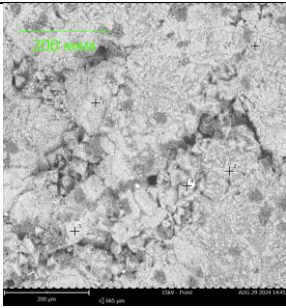
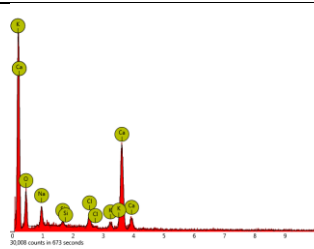
В таблице 3.1 приведены принятые в диссертационной работе обозначения по типам горным пород, а также их элементный состав.

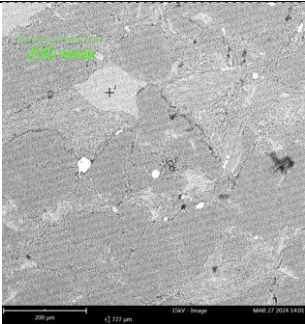
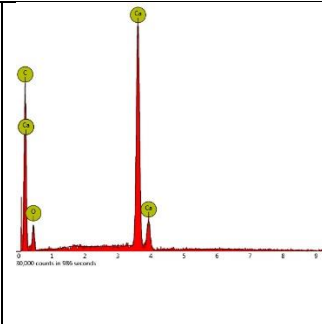
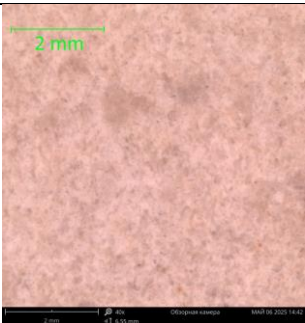
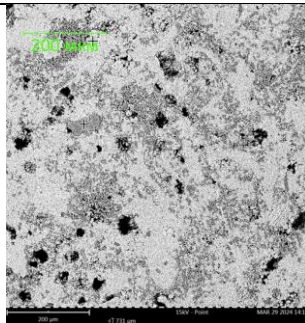
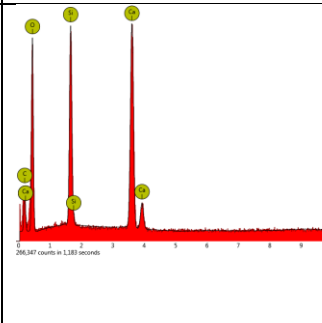
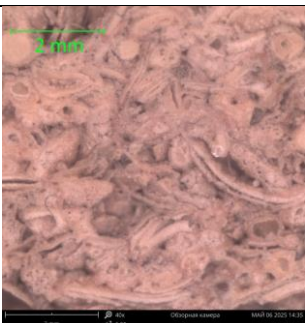
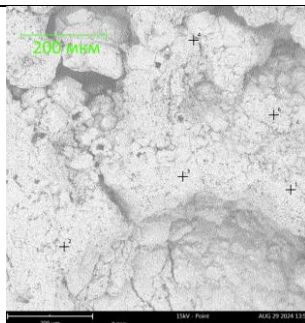
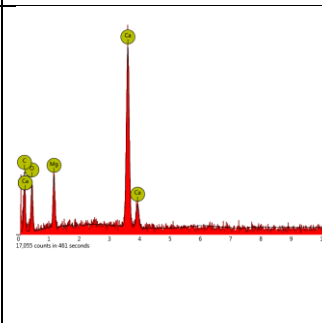
В каждой группе образцов для исследования были подготовлены от 10 до 15 образцов по методике, представленной в Приложении А.

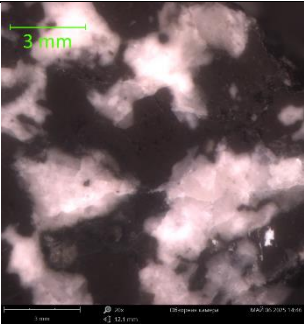
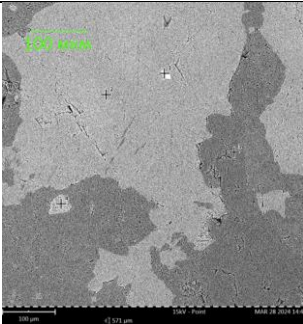
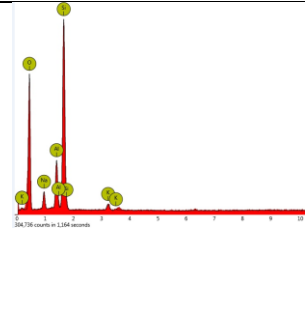
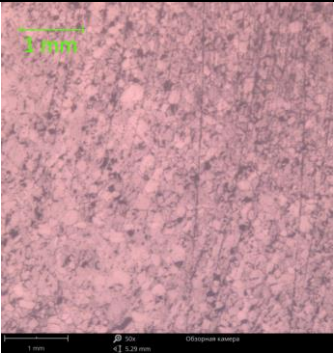
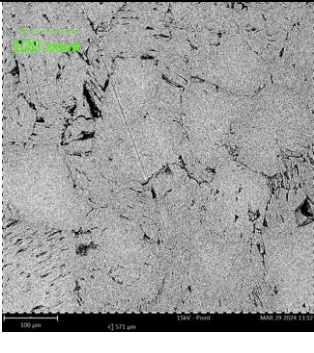
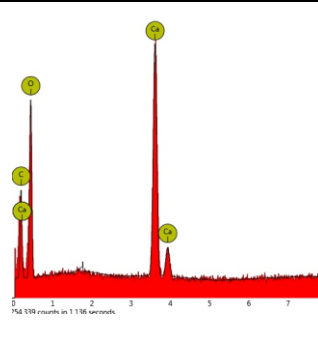
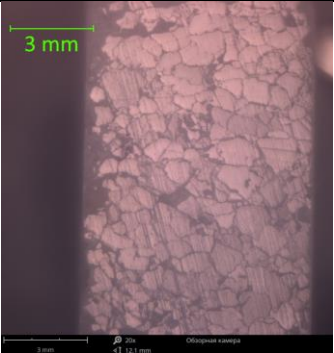
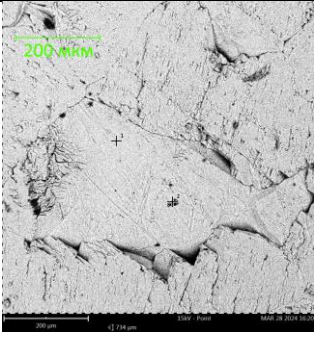
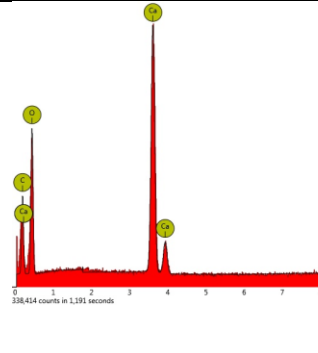
Ниже приведено описание каждой серии горной породы:

- серия О.1 – песчаник красноватого цвета. Породообразующим минералом, слагающим основную часть горной породы, является кварц (до 80-90 %). Наблюдаются включения полевого шпата и железистые включения. Образец характеризуется равномерно мелко- до среднезернистой обломочной структурой, состоящей из преимущественно угловатых и слабо окатанных зёрен. Текстура массивная, ориентировка зёрен не выражена;
- серия О.2 – песчаник серого цвета. Основная часть горной породы представлена кварцем (около 60 %) и полевым шпатом (до 35 %), обнаружены железистые включения пирита FeS_2 . Образец характеризуется плотной, тонкозернистой структурой, зернистая составляющая плохо дифференцируется визуально. Текстура массивная, ориентировка зёрен отсутствует. Пористость слабо выражена. Порода характеризуется высокой степенью диагенеза и значительным цементированием;
- серия О.3 – известняк-ракушечник светло-серого цвета. Породообразующим минералом, которым сложена горная порода является кальцит CaCO_3 (до 95-98 %), обнаружены включения кварца SiO_2 , присутствуют калиево-натриевые следовые включения. Структура — мелко- и среднезернистая обломочная. Зёрна угловатые и слабо окатанные, разнообразной формы. Текстура массивная, ориентировка зёрен не прослеживается;

Таблица 3.1 – Обозначения горных пород и элементный состав

Генотип	Горная порода	Обозначение	Макроскопическое изображение	Микроскопическое изображение	Спектр	Элементный состав
Осадочный	Песчаник	O.1				Weight percentage O 57.2 % Si 30.3 % Fe 3.9 % Al 2.9 % Ca 2.8 % Na 2.0 % K 0.8 %
Осадочный	Песчаник	O.2				Weight percentage O 52.6 % Si 28.7 % C 5.9 % Al 5.8 % Na 3.0 % Fe 2.2 % Mg 0.8 % K 0.8 % S 0.2 %
Осадочный	Известняк	O.3				Weight percentage O 48.1 % C 27.4 % Ca 22.7 % Na 0.9 % Cl 0.6 % Si 0.3 %

Осадочный	Известняк	O.4				Weight percentage C 43.0 % Ca 37.1 % O 19.9 %
Осадочный	Известняк	O.5				Weight percentage O 52.8 % Ca 22.2 % C 14.7 % Si 10.3 %
Осадочный	Доломит	O.6				Weight percentage O 53.6 % C 26.8 % Ca 10.3 % Mg 9.3 %

Магматический	Гранит	Мг.1				Weight percentage O 54.0 % Si 31.3 % Al 8.3 % Na 4.6 % K 1.8 %
Метаморфический	Мрамор	Мр.1				Weight percentage O 56.1 % Ca 26.8 % C 17.1 %
Метаморфический	Мрамор	Мр.2				Weight percentage O 53.1 % Ca 30.6 % C 16.3 %

- серия О.4 – известняк светло-бежево-коричневого цвета. Большая часть горной породы представлена кальцитом CaCO_3 (около 95-97 %). Структура обломочная, мелкозернистая. Хорошо различимы мелкие включения (до 1–2 мм), имеющие округлую и изредка угловатую форму. Текстура массивная, ориентировка зерен не выражена. Порода цементирована. Межзерновые границы выражены не слишком чётко;
- серия О.5 – известняк бежевого цвета, основная масса горной породы сложена карбонатом кальция CaCO_3 (85-90 %), остальная часть представлена вкраплениями зерен кварца SiO_2 . Структура тонкозернистая. Образец характеризуется высокой неравномерной пористостью: поры различной формы, местами с тенденцией к объединению. Текстура рыхлая;
- серия О.6 – доломит белого цвета со светло-розоватым оттенком. Горная порода представлена исключительно минералом доломитом $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Структура мелкообломочная, преобладают округлые зерна, частично агрегированные. Матрица представлена тонкодисперсным кальцитом, окружающим зерна. Текстура рыхлая, пористая, с хаотичным распределением обломков;
- серия Мг.1 – гранит, белый с черным цветом. Порода представлена кварцем, калиевым полевым шпатом и вкраплениями биотита. Образец гранита характеризуется полнокристаллической крупнозернистой структурой, с чётко различимыми кристаллами кварца, полевого шпата и тёмноцветных минералов. Структура неравномернозернистая. Текстура породы массивная.
- серия Мр.1 – мрамор белого цвета, вся порода представлена метаморфизованным кальцитом CaCO_3 . Примесей и вторичных минералов не наблюдается. Мрамор характеризуется полнокристаллической гранобластовой структурой с равномерно-зернистой текстурой. Текстура массивная, ориентировка зёрен

отсутствует, пористость минимальная. Локально выявляются микротрещины, ориентированные хаотично.

- серия Мр.2 – мрамор светло-белого цвета, вся порода представлена метаморфизованным кальцитом CaCO_3 . Порода характеризуется полнокристаллической средне- и крупнозернистой структурой. Зерна кальцита преимущественно изометричные. Текстура мозаичная, блоковая. Местами наблюдаются микротрещины, проходящие по границам кристаллов или пересекающие их.

Поскольку дисперсия диэлектрической проницаемости горных пород зависит, в том числе, от поровой структуры геоматериала, то на первом этапе были исследованы горные породы осадочного типа, в которых пористость менялась в широком диапазоне. Для этих образцов был определен коэффициент открытой пористости в соответствии с ГОСТ 26450.1-85 путем взвешивания образцов горных пород в сухом состоянии, а также взвешивании их в водонасыщенном состоянии (дистиллированной водой) в воздухе и в воде.

3.2 Используемая аппаратура и ее калибровка перед проведением измерений

Для измерения электрических и диэлектрических свойств горных пород конденсаторным методом в рамках диссертационной работы использовались два LCR-измерителя. Измерения производились с помощью анализатора компонентов АММ-3046 фирмы Aktakom с частотным диапазоном от 20 Гц до 200 кГц, а также с использованием измерителя импеданса East Tester ET3510 с частотным диапазоном 10 Гц-1 МГц. Базовая точность измерений у обоих приборов – 0,05 %, а основная измерительная схема – автобалансный четырехпроводный мост.

При выполнении экспериментальных исследований первоначально выполнялась калибровка аппаратуры, LCR-измерителя. Проводилась как «open-коррекция» встроенным в прибор методом, так и «short-коррекция».

Коррекции выполняются на каждой измеряемой в дальнейшем частоте при подключенной к прибору схеме.

В режиме «open-коррекция» прибор измеряет остаточную собственную емкость подключенных кабелей и сохраняет ее для дальнейшего вычитания из проводимых измерений. «Open-коррекция» снижает влияние паразитных параметров, которые могут исказить результат. Проведение на втором этапе «short-коррекции» позволяет снизить погрешность, вызванную измерительными наконечниками, за счёт замыкания выводов.

Также для подтверждения работы собранной схемы и конденсаторной ячейки проводились измерения электрических характеристик конденсатора, заполненного материалом, у которого в используемом частотном диапазоне 120 Гц-1 МГц известно значение действительной части ДП и практически отсутствует дисперсия. В качестве таких материалов выступали два вида стекол – боросиликатное стекло № 1 и бесцветное оптическое стекло № 2 [127]. Геометрические размеры образцов составляли 31х31 мм, а толщины – $5,96 \pm 0,02$ мм для образца № 1 и $6,02 \pm 0,02$ мм – для образца № 2.

В процессе эксперимента при помощи LCR-измерителя для образцов стекла измерялась емкость плоского конденсатора $C_{\text{изм}}$, по которой вычислялось значение действительной части ДП ε' образцов. Результаты приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Измеренные в процессе эксперимента емкости конденсатора $C_{\text{изм}}$ и расчетные значения действительной части ДП ε'

Частота, кГц	Емкость $C_{\text{изм}}^{1 \text{ обр}}$, пФ	$\varepsilon'^{1 \text{ обр}}$	Емкость $C_{\text{изм}}^{2 \text{ обр}}$, пФ	$\varepsilon'^{2 \text{ обр}}$
	Боросиликатное стекло № 1		Оптическое стекло № 2	
0,12	5,51	6,18	5,37	6,06
0,24	5,50	6,17	5,26	5,93
0,36	5,50	6,17	5,32	5,99
0,48	5,49	6,16	5,28	5,95
0,6	5,48	6,14	5,25	5,92
0,72	5,49	6,15	5,27	5,95
0,84	5,47	6,13	5,25	5,91
1	5,47	6,13	5,23	5,89
2	5,43	6,09	5,19	5,85
5	5,38	6,03	5,15	5,81
10	5,34	5,98	5,11	5,76
15	5,28	5,92	5,10	5,75
20	5,29	5,93	5,11	5,76
25	5,29	5,93	5,11	5,76
30	5,29	5,93	5,09	5,73
40	5,26	5,90	5,08	5,73
50	5,26	5,90	5,12	5,78
75	5,30	5,94	5,09	5,74
80	5,27	5,90	5,08	5,73
100	5,25	5,89	5,04	5,68
150	5,25	5,88	5,00	5,64
200	5,23	5,86	5,05	5,69
300	5,23	5,86	5,08	5,72
400	5,24	5,87	5,11	5,76
500	5,27	5,91	5,07	5,72
600	5,31	5,95	5,11	5,76
700	5,34	5,98	5,24	5,90
800	5,35	6,00	5,18	5,84
900	5,40	6,05	5,30	5,97
1000	5,45	6,11	5,25	5,92

В рассматриваемом диапазоне для образца стекла № 1 среднее измеренное значение действительной части комплексной ДП равнялось $\varepsilon' = 6,00$ при среднеквадратичной погрешности 0,09, а для стекла № 2 – $\varepsilon' = 5,82$ при среднеквадратичной погрешности 0,10, что составляло менее 2 % и было обусловлено, по-видимому, погрешностью в измерении емкости. Найденные численные значения совпали с известными значениями ДП стекол [128]. Частотные зависимости действительной части комплексной ДП образцов стекол приведены на рисунке 3.1.

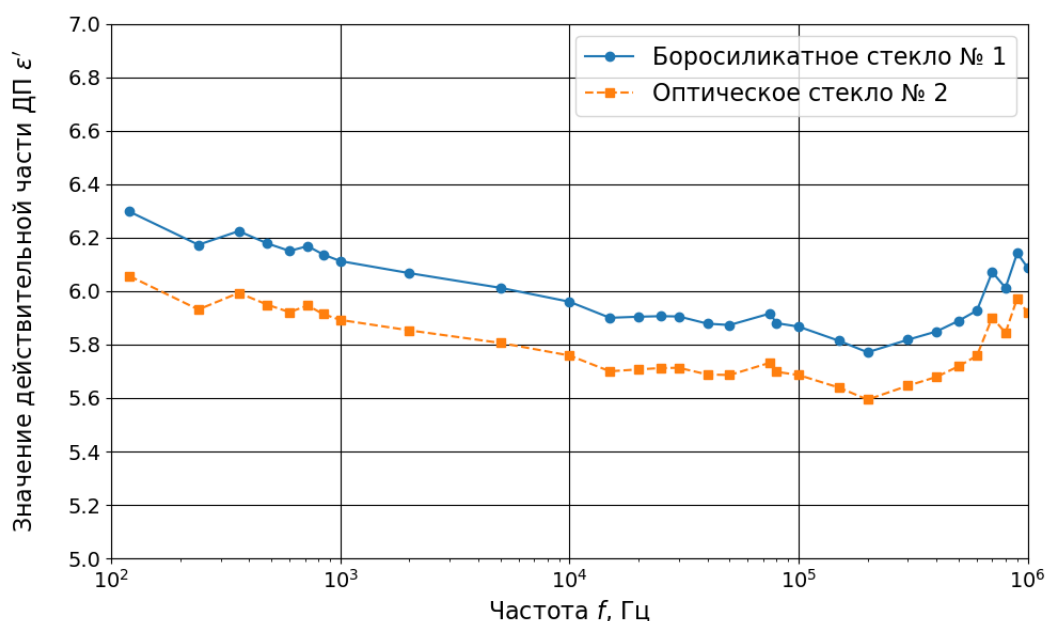


Рисунок 3.1 – Действительная часть ДП стекол

Стекла являлись однородными аморфными телами без выраженной релаксации ДП в диапазоне частот от 120 Гц до 1 МГц, поэтому действительная часть ДП ϵ' оставалась достаточно стабильной.

После выполнения калибровки на образцах стекла, которая подтвердила корректность измерений, были проведены исследования электрических свойств образцов горных пород различного генотипа, представленные в следующем разделе.

3.3 Исследование частотной зависимости электрических свойств горных пород различного генотипа

В процессе проведения эксперимента на подготовленных образцах горных пород были проведены измерения емкости конденсатора и тангенса угла диэлектрических потерь.

Результаты измерений и расчетов значений параметров электрических свойств приведены в Приложении Б.

3.3.1 Исследование электрических свойств осадочных горных пород

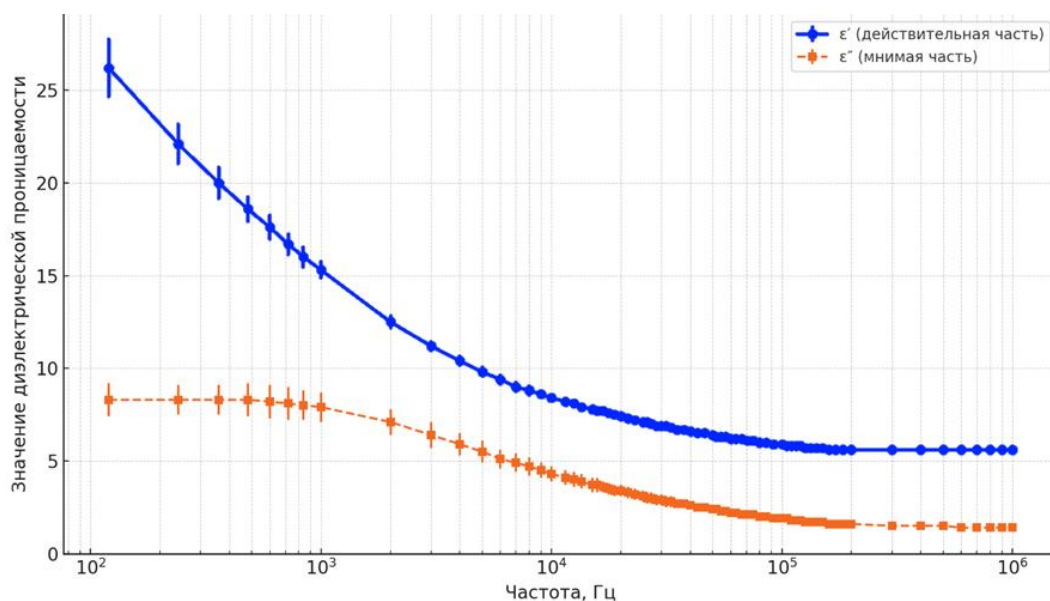
На рисунке 3.2 приведены частотные зависимости усредненных значений действительной и мнимой частей ДП (рисунок 3.2, а) для образцов песчаника серии О.1, а также тангенса угла диэлектрических потерь (рисунок 3.2, б) для всей серии О.1 с указанием среднеквадратичного отклонения.

На низких частотах (до ~ 1 кГц) среднее значение $\varepsilon'_{0.1}$ достигает максимума, равного 26,2 при СКО 1,6 на частоте 120 Гц. Высокие значения $\varepsilon'_{0.1}$ свидетельствуют о вкладе в дисперсию ДП при низких частотах всех видов поляризации (электронной, ионной, дипольной, межфазной и др.). Причем основное влияние на дисперсию оказывает межфазная поляризация МВС. Даже несмотря на высокую пористость образцов песчаника серии О.1, которая составляла $(14,9 \pm 0,5) \%$, приводящую к уменьшению электрического поля в образце, и следовательно, значений ε' , действительная часть ДП достигла 27,5 для некоторых образцов серии.

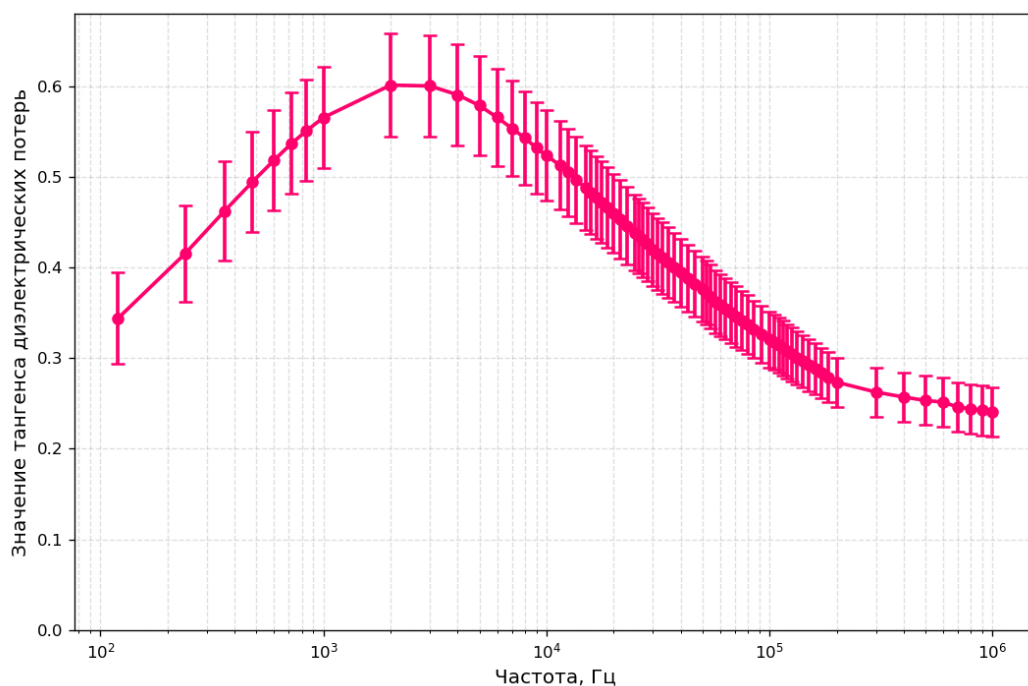
С ростом частоты индуцированная поляризация не достигает максимума вследствие инертности перемещения связанных зарядов, поэтому ε' снижается и выходит на более стабильный уровень, отражающий значение действительной части ДП минерального скелета (в данном случае кварца).

На низких частотах (до 1 кГц) значения мнимой части ДП $\varepsilon''_{0.1}$ имеют величину от 7,9 до 8,3, затем они постепенно снижаются до значений $\varepsilon''_{0.1} = 1,36 \pm 0,13$ при 1 МГц. Снижение величин $\varepsilon''_{0.1}$ идёт особенно быстро в диапазоне частот от 120 Гц до 10-20 кГц, затем темп спадает.

На низких частотах средние значения $tg \delta_{0.1}$ лежат в пределах 0,30-0,70, причем максимумы этих значений могут достигать около 0,66 для некоторых образцов. Максимумы тангенса диэлектрических потерь $tg \delta_{0.1}$ для образцов песчаника вида О.1 располагаются в диапазоне частот 1-20 кГц, затем наблюдается плавное снижение до $0,32 \pm 0,03$ на 100-200 кГц и до $0,24 \pm 0,03$ на 1 МГц. Данные максимумы выступают индикатором релаксационных процессов.



(а)



(б)

(а) – действительная и мнимая части ДП, (б) – тангенс угла диэлектрических потерь

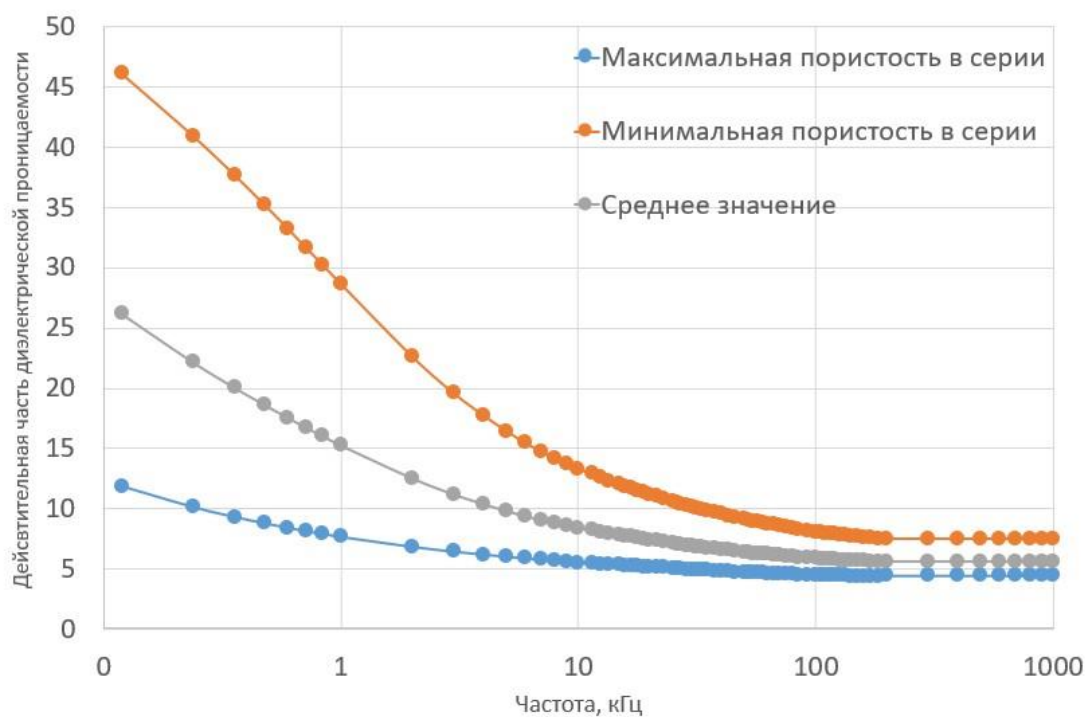
Рисунок 3.2 – Частотные зависимости электрических свойств песчаника серии О.1

Учитывая, что вклад влаги в открытых порах был устранен за счет высушивания при температуре 105 °С, можно утверждать, что низкочастотная дисперсия ДП связана с межфазной поляризацией за счет более активного

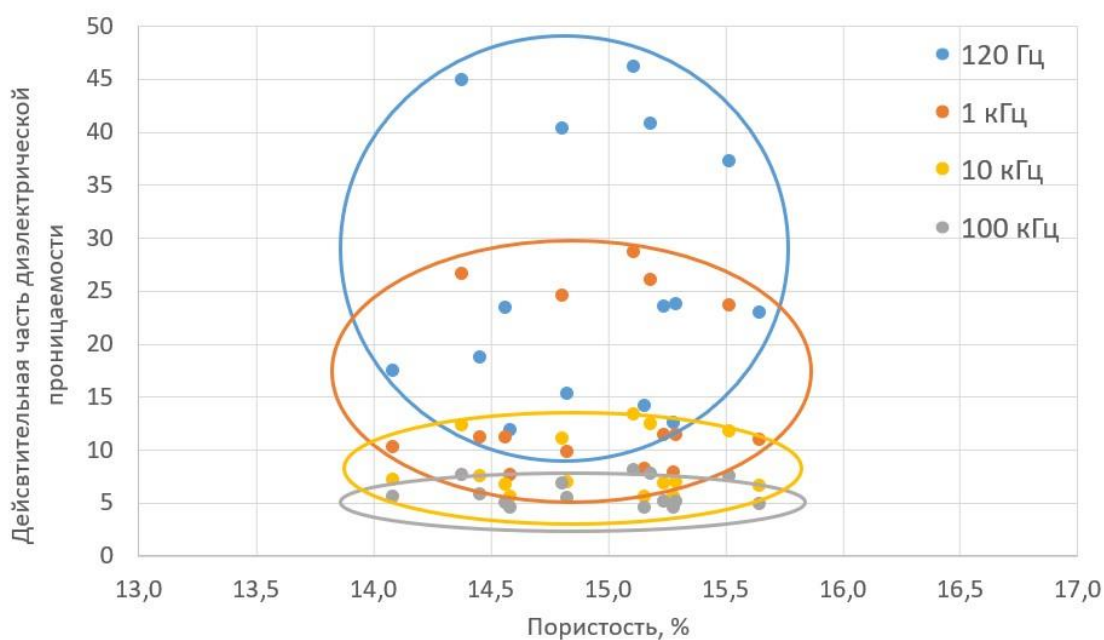
накопления заряда на границах фаз. На высоких частотах (выше 10-20 кГц) остаются лишь внутризеренные релаксационные процессы, менее чувствительные к структурным особенностям.

Как отмечалось выше, в горных породах, являющихся хорошими диэлектриками, основной вклад дает межфазная поляризация, времена релаксации которой в зависимости от структурных характеристик и химического состава могут меняться в очень широком диапазоне. Проведенные исследования показали, что для сухих образцов песчаника серии О.1 дисперсия наиболее сильно проявляется в частотном диапазоне от 0,12 до 10 кГц значения времен релаксации лежат в диапазоне от 10 мс до 0,1 мс. При этом увеличение пористости приводит к уменьшению влияния поляризации и уменьшению значений ε' и ε'' в низкочастотной области.

На рисунке 3.3 а, б приведены зависимости действительной и мнимой частей ДП для трех образцов данной серии с различной пористостью, из которых следует, что проявляющаяся наиболее сильно в области низких частот (120-500 Гц) дисперсия существенно зависит от пористости. Так, при частоте $f = 120$ Гц $\varepsilon' = 22,9$ и $\varepsilon'' = 9,6$ для образца с пористостью 15,7 % и $\varepsilon' = 46,1$ и $\varepsilon'' = 11,5$ при пористости 14,1 %. В диапазоне частот 10 кГц-1 МГц значения ε' выравниваются для образцов с различной пористостью, а градиенты $d\varepsilon'/df$ уменьшаются при увеличении частоты (рисунок 3.3, б).



(а)



(б)

(а) – зависимость действительной части ДП для максимальной/минимальной пористости, (б) – зависимость действительной части ДП от пористости на разных частотах

Рисунок 3.3 – Зависимость ДП песчаника серии О.1 от пористости

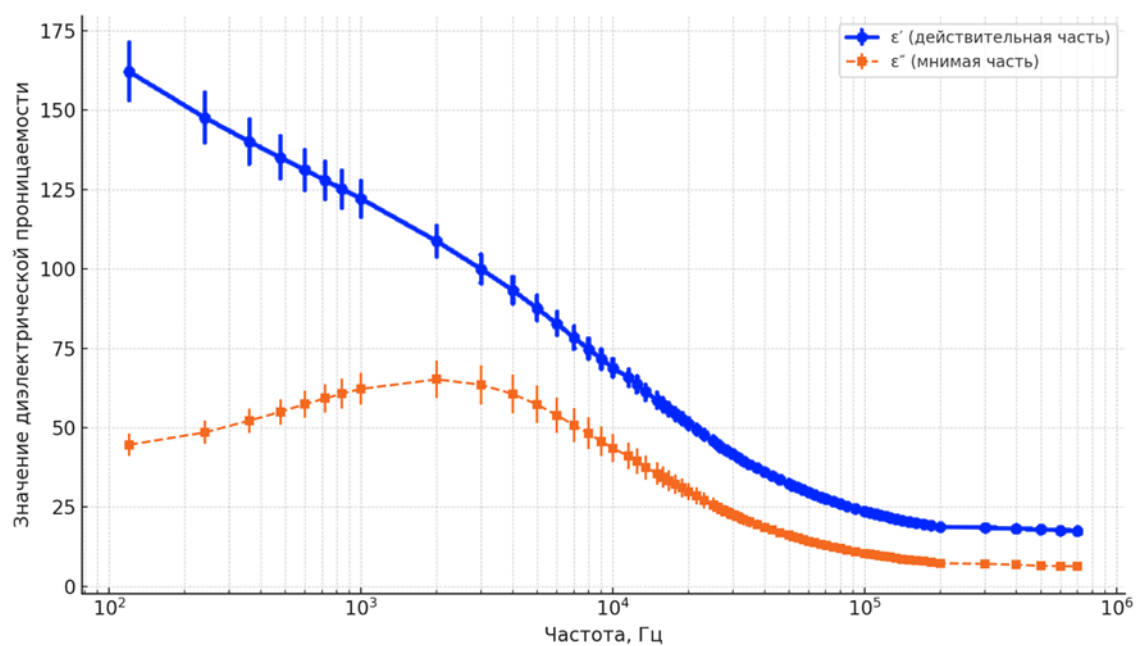
Таким образом, наиболее сильно дисперсия ДП в данных образцах происходит на частотах до 1 кГц, где доминируют поверхностные и межфазные

процессы. При этом после 100 кГц происходит стабилизация всех параметров, отражающая вклад основной минеральной фазы (кварца).

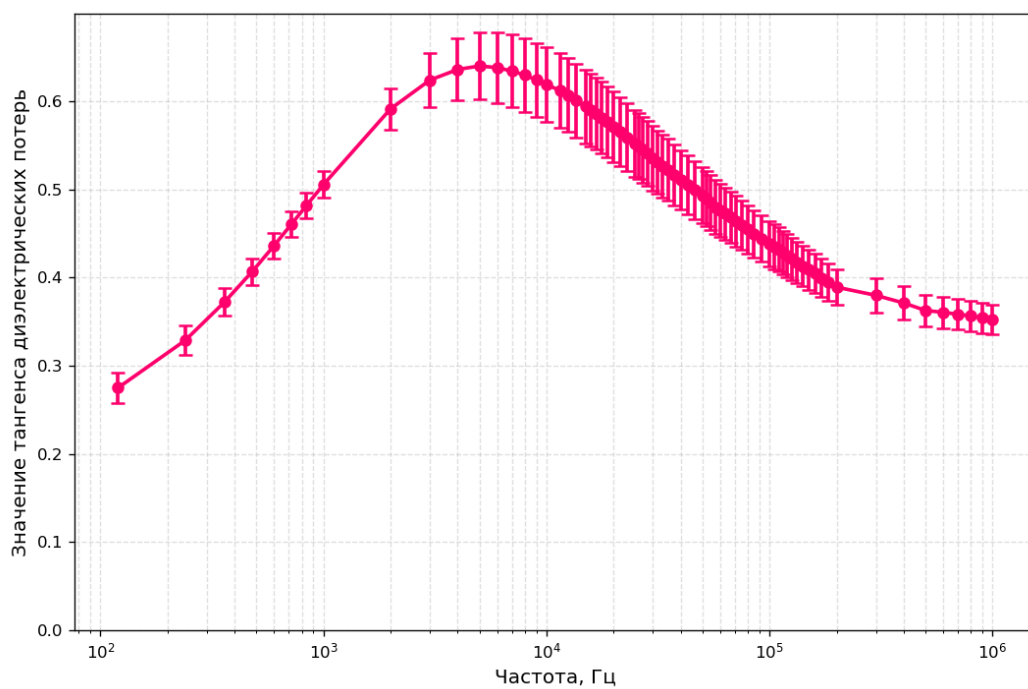
Для другого вида песчаника серии О.2, обладающего значительно меньшей пористостью, значения действительной части ДП при частоте 120 Гц составляет $\varepsilon'_{0.2}=162,0\pm9,4$, а затем происходит ее уменьшение до значения $\varepsilon'_{0.2}=17,1\pm0,8$ на частоте 1 МГц. При этом мнимая часть ДП $\varepsilon''_{0.2}$ имеет максимум в области частот 2-3 кГц, достигая значений $65,2\pm5,9$. Максимум тангенса диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_{0.2}$ наблюдается в районе 5-10 кГц и составляет $0,64\pm0,04$. Графики зависимостей приведены на рисунке 3.4 [129].

При увеличении частоты свыше 100 кГц дисперсия комплексной диэлектрической проницаемости проявляется меньше. Однако значения действительной части ДП, характерные для минералов, составляющих песчаник О.2 (кварц и калиевый полевой шпат) – не достигаются даже на 1 МГц.

Так как песчаник по своей сути является полиминеральной горной породой, состоящей из кварца (преимущественно), полевого шпата, слюды, включений пирита, то межфазная поляризация проявляется на границах различных зерен. Основная масса образцов песчаника представлена кварцем с наличием в составе полевого шпата (элементов Al, Ca, Na) и включений пирита FeS₂. Для разных минералов характерно наличие различных времен релаксации. Экспериментальные исследования показали, что диапазон значений времен релаксаций простирается от 10 мс до 10 мкс. Полиминеральная структура в образцах песчаника серии О.2 приводит к сильной межфазной поляризации (и, как следствию, увеличению ε' , ε'' , σ' и $\operatorname{tg} \alpha$) и обуславливает дисперсию диэлектрической проницаемости практически во всем исследуемом частотном диапазоне. А включения пирита наиболее сильно влияют на электрические свойства образцов песчаника серии О.2. При этом данный песчаник серии О.2 обладает более сцементированной структурой, его пористость в несколько раз меньше ($3,2\pm0,3$ %), чем у песчаника серии О.1 ($14,9\pm0,5$ %).



(а)



(б)

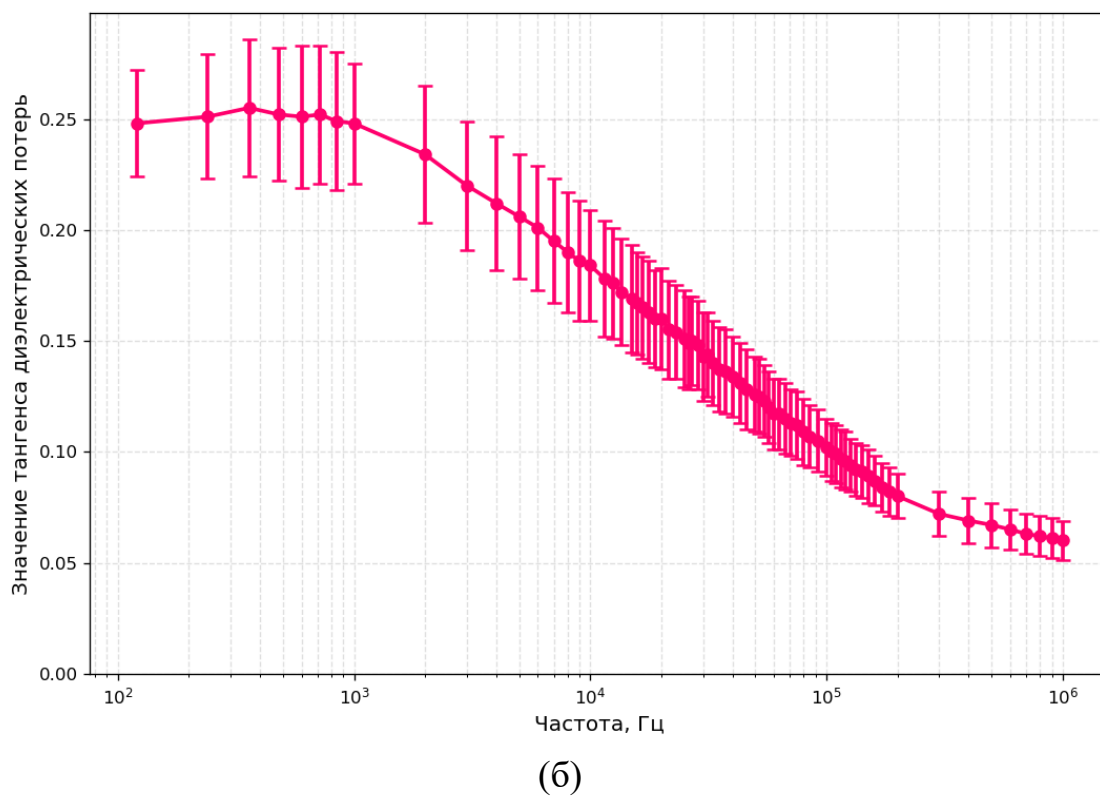
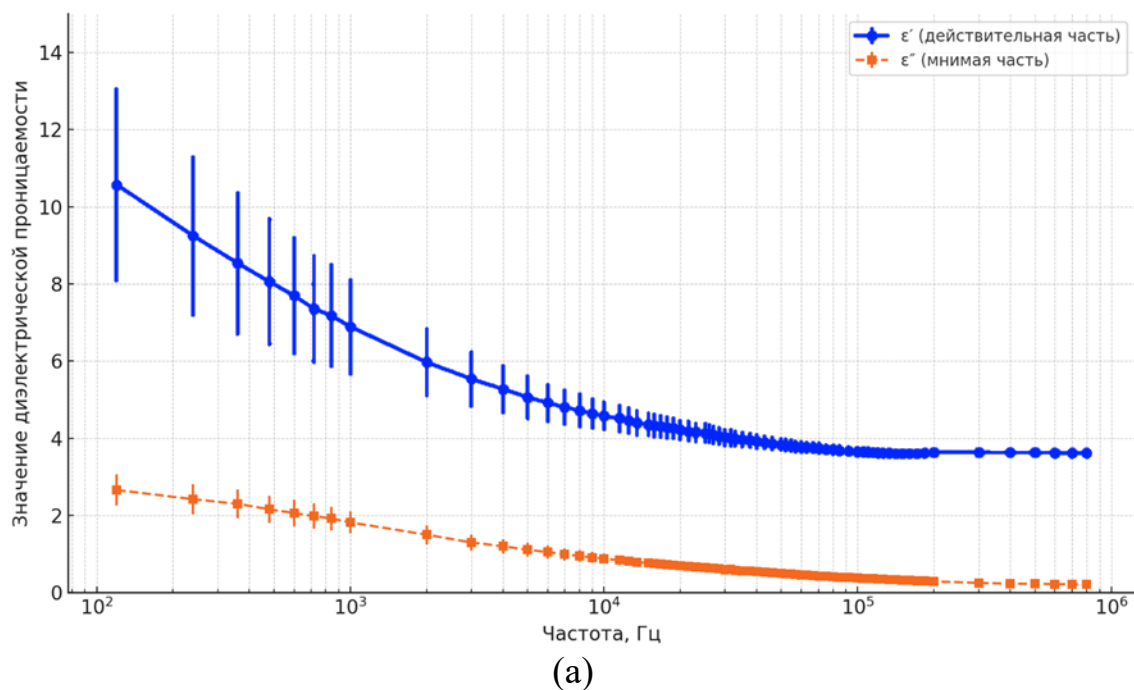
(а) – действительная и мнимая части ДП, (б) – тангенс угла диэлектрических потерь

Рисунок 3.4 – Частотные зависимости электрических свойств песчаника серии О.2

Таким образом, в данных образцах поляризация и частотная дисперсия электрических свойств наблюдаются на всем исследуемом диапазоне вплоть до 1 МГц.

Для серии О.3 осадочной горной породы (известняка-ракушечника) значение действительной части ДП в области низких частот составляет $\varepsilon'_{0.3} = 9,0 \pm 1,6$, а далее происходит ее уменьшение в 2,7 раз до значения $\varepsilon'_{0.3} = 3,3 \pm 0,4$ на частоте 1 МГц. Наблюдаемого максимума мнимой части диэлектрической проницаемости $\varepsilon''_{0.3}$ не имеется, максимальные значения достигают $\varepsilon''_{0.3} = 3,1 \pm 0,6$ на минимально измеряемой частоте 120 Гц. Максимум тангенса диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_{0.3}$ наблюдается на частотах 0,12-1 кГц и составляет $0,28 \pm 0,04$. Графики зависимостей приведены на рисунке 3.5. По сравнению с образцами песчаника серий О.1 и О.2 частотная дисперсия диэлектрической проницаемости существенно меньше.

Известняк-ракушечник серии О.3 в основной своей массе (до 95-98 %) представлен карбонатом кальция, то есть является практически мономинеральной горной породой с высокой степенью пористости образцов, которая лежит в диапазоне от 20,2 % до 24,7 %. Поэтому на границах «зерно-пора», как и на границах «зерно-зерно», происходит межфазная поляризация, однако большая пористость приводит к снижению значений диэлектрических характеристик.



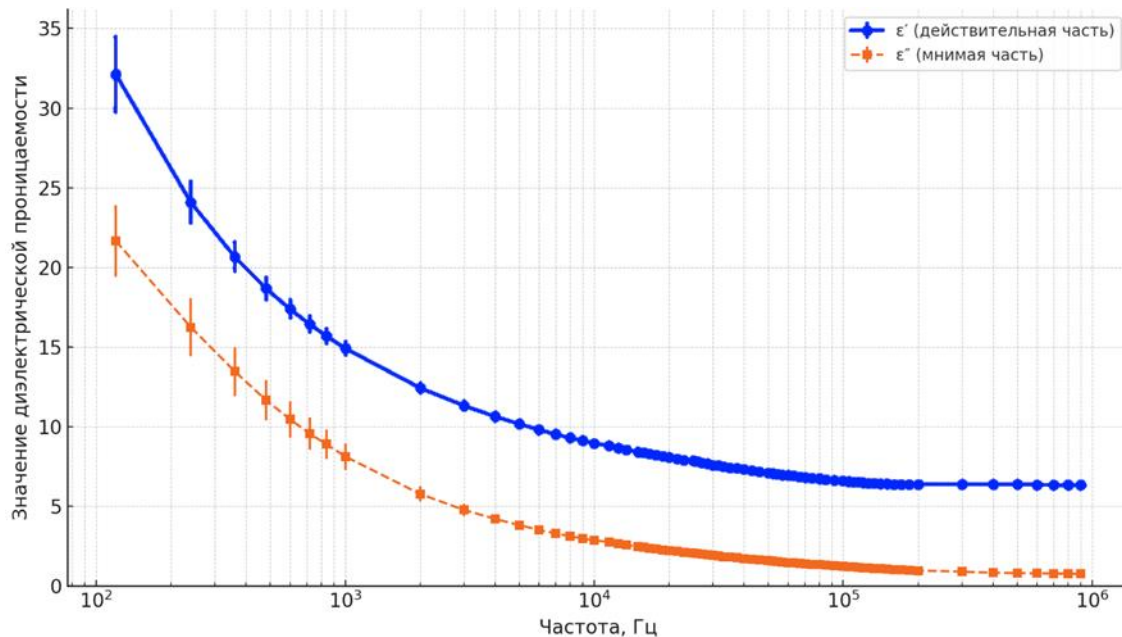
(а) – действительная и мнимая части ДП, (б) – тангенс угла диэлектрических потерь

Рисунок 3.5 – Частотные зависимости электрических свойств известняка-ракушечника серии О.3

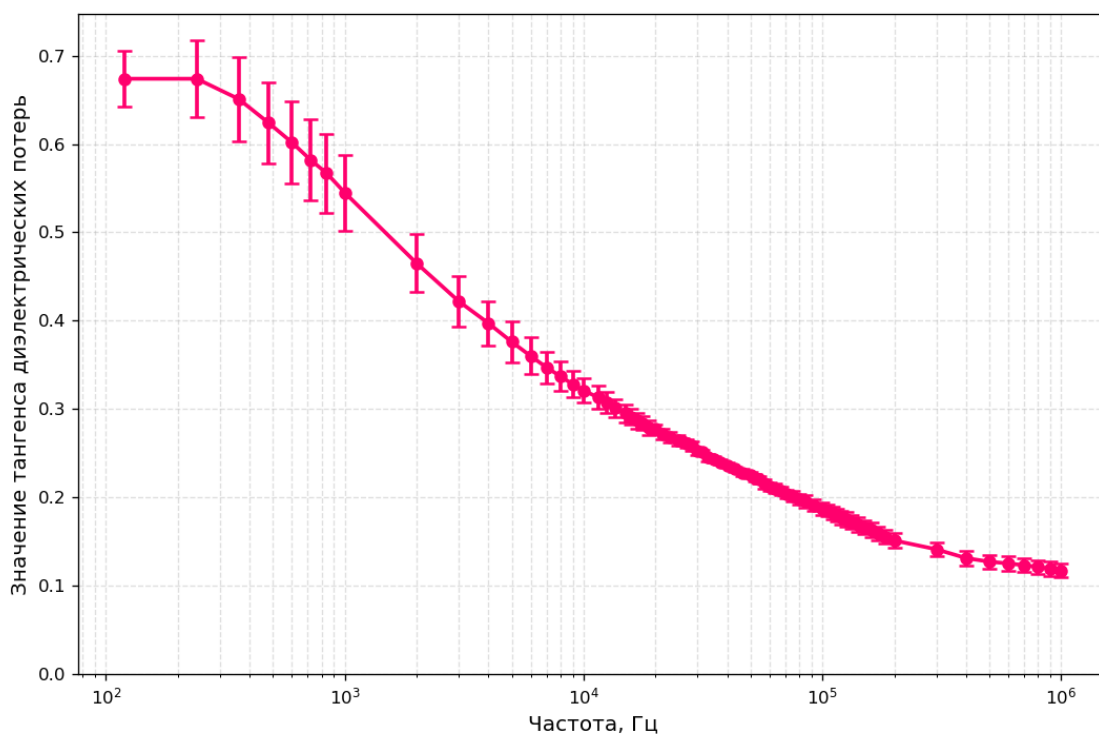
Для другого вида известняка серии О.4, отличающегося от серии О.3 пористостью ($P_{0,4} = 12,5 \pm 0,3 \%$), значение действительной части ДП в области

низких частот составляет $\varepsilon'_{0.4} = 32,1 \pm 2,4$ на частоте $f = 120$ Гц, в то время как уже на частоте $f = 1$ кГц – $\varepsilon'_{0.4} = 14,9 \pm 0,5$, то есть происходит резкое снижение и после 1 кГц вплоть до частот 50-100 кГц. После чего происходит стабилизация значений действительной части ДП значения $\varepsilon'_{0.4} = 6,4 \pm 0,1$ на частоте 1 МГц (рисунок 3.6, а).

Максимум тангенса диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_{0.4}$ наблюдается на частотах 120 Гц и 240 Гц и составляет $0,67 \pm 0,04$, достигая значений $0,12 \pm 0,01$ на частоте 1 МГц. Следствием этого является значения мнимой части ДП $\varepsilon''_{0.4}$, которая также плавно снижается с максимумов в области частот на таких же частотах до 1 кГц, достигая минимальных значений $\varepsilon''_{0.4} = 0,77 \pm 0,08$ на частоте 1 МГц. Известняк серии О.4 так же, как и известняк серии О.3, представлен карбонатом кальция, то есть является мономинеральной горной породой с меньшей степенью возможной поляризации на границах «зерно-зерно», однако с межфазной поляризацией на границах «зерно-пора».



(а)



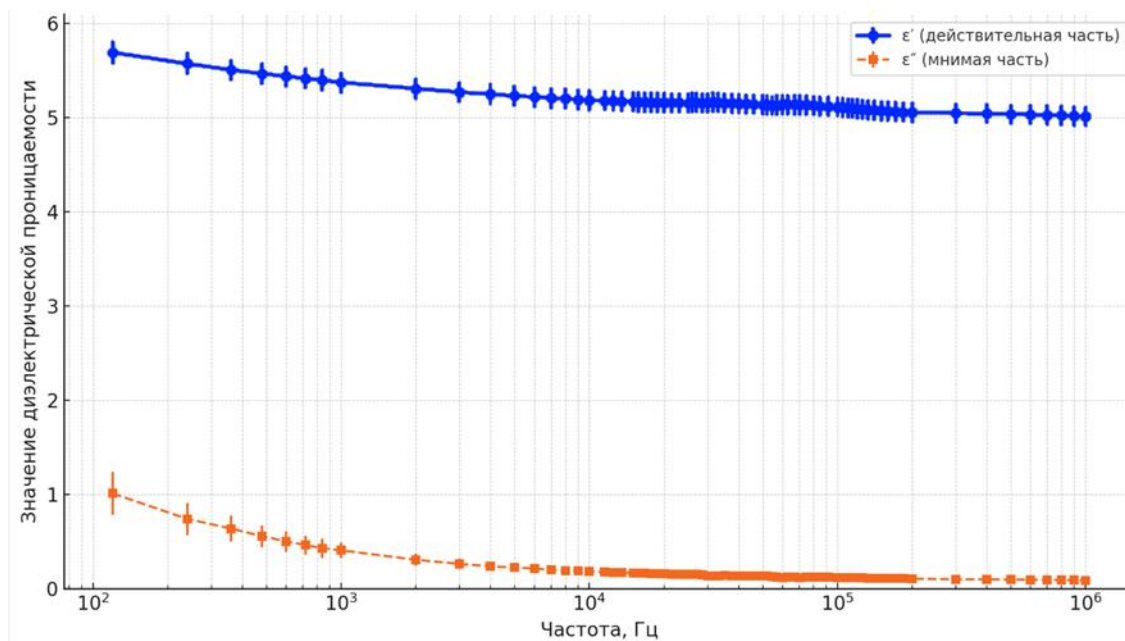
(б)

(а) – действительная и мнимая части ДП, (б) – тангенс угла диэлектрических потерь

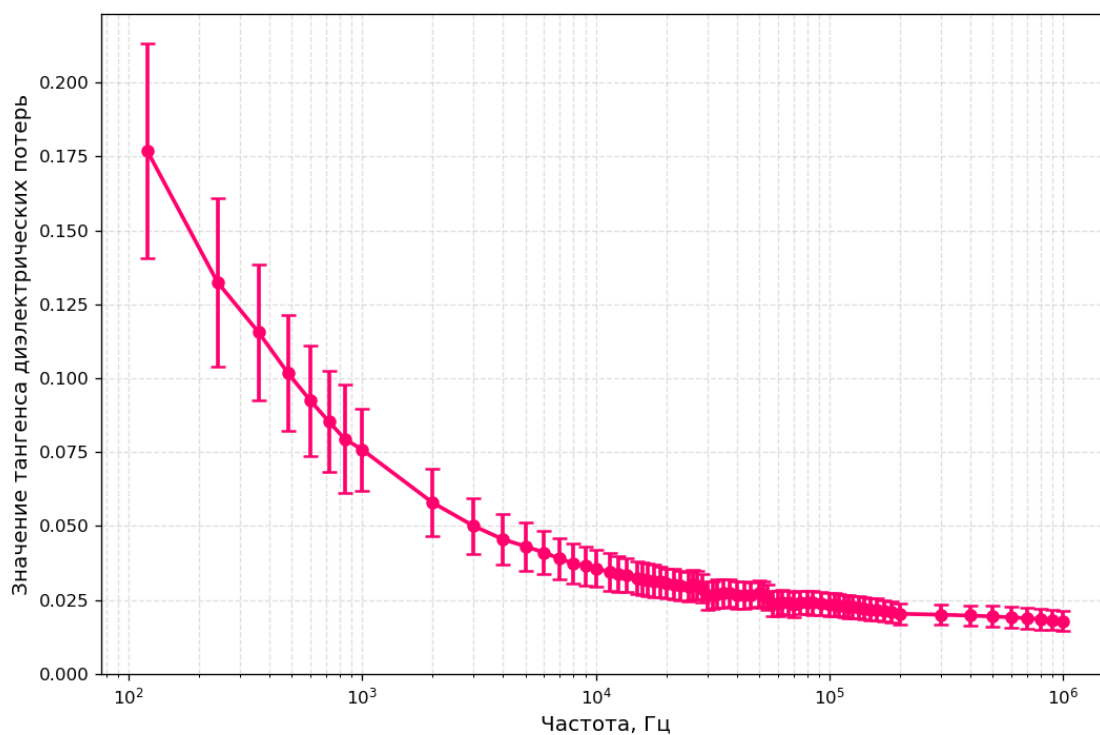
Рисунок 3.6 – Частотные зависимости электрических свойств известняка серии О.4

В еще более сцементированном известняке серии О.5 ($P_{0.5} = 5,2 \pm 0,4 \%$) частотная дисперсия действительной части ДП проявляется меньше. Максимальные значения так же, как и для других серий образцов, наблюдаются на частотах до 1 кГц. Разница значений составляет всего лишь 12 %. После 10 кГц происходит выполаживание значений и действительной и мнимой частей КП и составляют на 1 МГц – $\varepsilon'_{0.5} = 5,0 \pm 0,1$ и $\varepsilon''_{0.5} = 0,090 \pm 0,018$ (рисунок 3.7, а).

Максимум тангенса диэлектрических потерь $tg \delta_{0.5}$ наблюдается на частотах 120 Гц и 240 Гц и составляет $0,67 \pm 0,04$, достигая значений $0,12 \pm 0,01$ на частоте 1 МГц. Следствием этого является значения мнимой части ДП $\varepsilon''_{0.5}$, которая также плавно снижается с максимумов в области частот на таких же частотах до 1 кГц, достигая минимальных значений на частоте 1 МГц [129].



(а)



(б)

(а) – действительная и мнимая части ДП, (б) – тангенс угла диэлектрических потерь

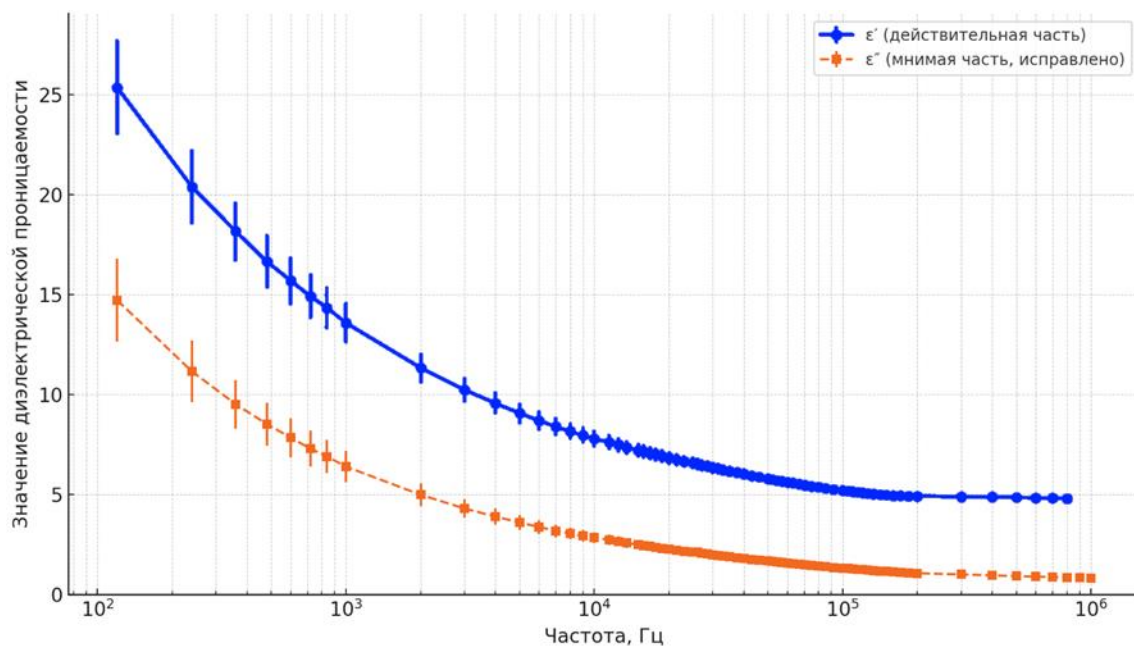
Рисунок 3.7 – Частотные зависимости электрических свойств известняка серии О.5

Экспериментальные исследования диэлектрических свойств образцов серии О.6 показали ярко выраженную дисперсию действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости, а также тангенса угла

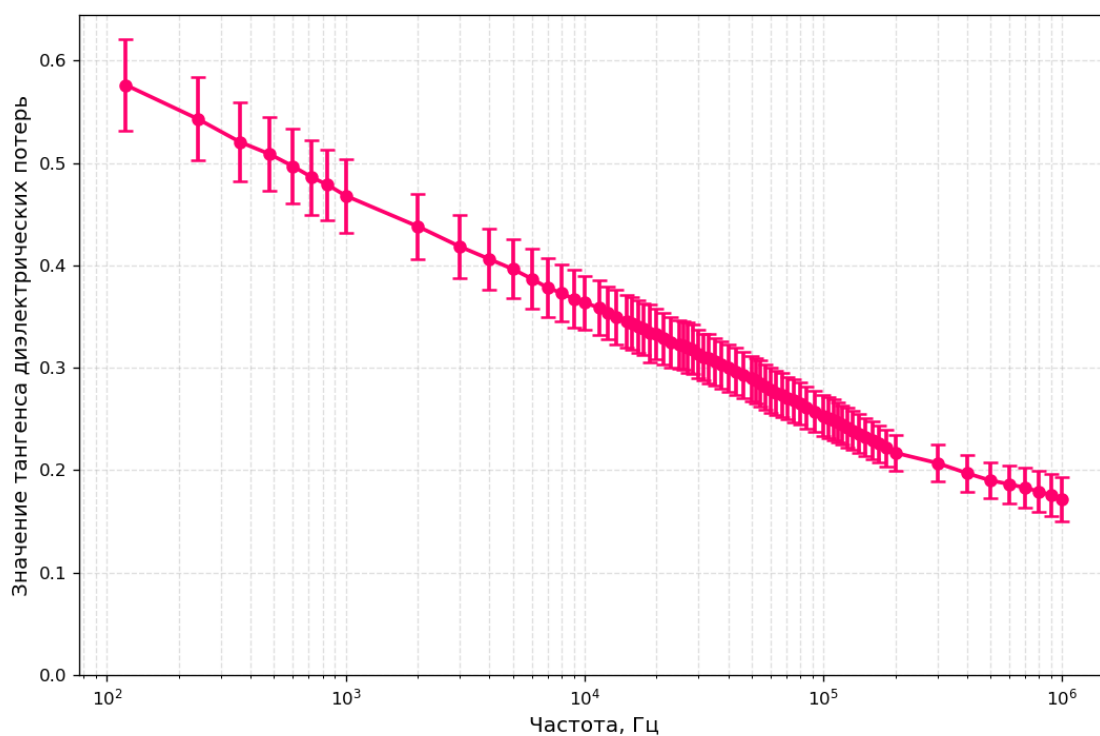
диэлектрических потерь в частотном диапазоне от 0,12 до 1000 кГц. Действительная часть диэлектрической проницаемости $\epsilon'_{0.6}$ на минимальной исследованной частоте 0,12 кГц составляет $25,3 \pm 2,4$, после чего наблюдается монотонное снижение значения с ростом частоты. Уже на частоте 1 кГц $\epsilon'_{0.6}$ составляет $13,6 \pm 1,0$, а при дальнейшем увеличении частоты до 1 МГц её значения снижаются до $4,76 \pm 0,16$ (рисунок 3.8, а).

Мнимая часть диэлектрической проницаемости $\epsilon''_{0.6}$, характеризующая потери, также демонстрирует убывающую зависимость от частоты (рисунок 3.8, а). На низких частотах 0,12 кГц её значение достигает $14,7 \pm 2,1$, затем стремительно уменьшается до $\sim 6,4$ при 1 кГц и далее до $1,32 - 1,16$ в области 100-150 кГц. В диапазоне частот 400-1000 кГц мнимая часть снижается ниже единицы, достигая $0,82 \pm 0,09$ при 1000 кГц. Такая динамика свидетельствует о существенном ослаблении релаксационных процессов и росте роли электропроводности как вклада в потери при низких частотах.

Анализ частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_{0.6}$ (рисунок 3.8, б) показывает схожие изменения с другими сериями. Максимальные значения порядка 0,58 наблюдаются при 0,12 кГц, затем $\operatorname{tg} \delta_{0.6}$ плавно снижается до минимального значения 0,172 при 1000 кГц. Серия О.6 демонстрирует типичную для осадочного генотипа горных пород частотную дисперсию: значительное падение действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости с ростом частоты, снижение тангенса потерь и выход на относительно устойчивые значения в диапазоне высоких частот. Это указывает на преобладание релаксационных процессов межфазной поляризации при низких частотах и переход к более стабильному диэлектрическому отклику в области сотен килогерц, что полностью согласуется с современными представлениями о поведении карбонатных осадочных пород.



(a)



(б)

(a) – действительная и мнимая части ДП, (б) – тангенс угла диэлектрических потерь

Рисунок 3.8 – Частотные зависимости электрических свойств доломита серии О.6

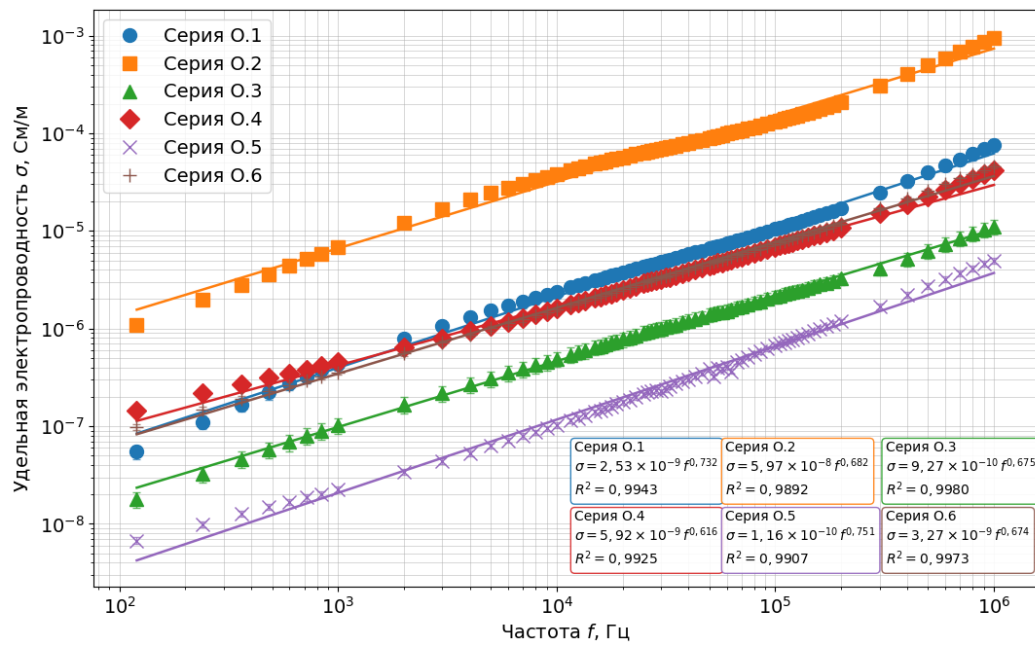
На основе полученных результатов были рассчитаны значения удельной электропроводности и удельного сопротивления для рассматриваемых серий образцов. Частотные зависимости приведены на рисунке 3.9. В результате

измерений в частотном диапазоне от 0,12 кГц до 1 МГц для сухих образцов осадочного генотипа были получены следующие интервалы удельного сопротивления ρ :

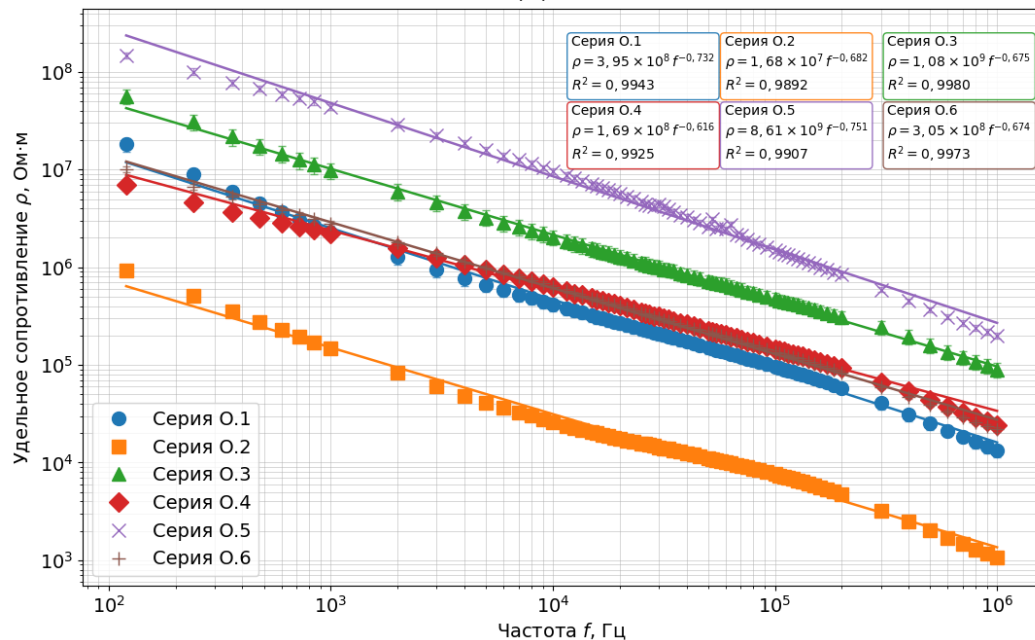
- серия О.1 – от $1,8 \cdot 10^7$ Ом·м при 120 Гц до $1,3 \cdot 10^4$ Ом·м при 1 МГц;
- серия О.2 – от $9,3 \cdot 10^5$ Ом·м при 120 Гц до $1,1 \cdot 10^3$ Ом·м при 1 МГц;
- серия О.3 – от $5,6 \cdot 10^7$ Ом·м при 120 Гц до $9,0 \cdot 10^4$ Ом·м при 1 МГц;
- серия О.4 – от $6,9 \cdot 10^6$ Ом·м при 120 Гц до $2,4 \cdot 10^4$ Ом·м при 1 МГц;
- серия О.5 – от $1,5 \cdot 10^8$ Ом·м при 120 Гц до $2,0 \cdot 10^5$ Ом·м при 1 МГц;
- серия О.6 – от $1,0 \cdot 10^7$ Ом·м при 120 Гц до $2,2 \cdot 10^4$ Ом·м при 1 МГц.

Для всех образцов разброс значений удельного сопротивления ρ и удельной электропроводности σ не превышает трёх порядков во всем изучаемом частотном диапазоне, что описывается степенным законом $\rho = a \cdot f^b$ для удельного сопротивления и $\sigma = a^{-1} \cdot f^{-b}$ для удельной электропроводности с различными подобранными коэффициентами a и b . Коэффициенты корреляции при этом составляют $\sim 0,99$.

Исследованные в работах [73, 130] осадочные горные породы в диапазонах частот от 10 кГц до 4 МГц имеют удельное сопротивление ρ порядка 10^4 - 10^8 Ом·м. Серии О.1 и О.2 целиком находятся в этом «коридоре». Более низкий нижний предел ($\approx 10^3$ Ом·м) в серии О.2 допустим и, по всей видимости, связан с наличием в образце железистых включений пирита FeS_2 . Значения, полученные для серий О.3-О.6 полностью перекрывают опубликованный интервал, а величины коэффициента b практически совпадают с оценками, полученными в работе [131].



(а)



(б)

(а) – удельная электропроводность, (б) – удельное сопротивление)

Рисунок 3.9 – Частотная зависимость электрических свойств осадочных горных пород

Частотная дисперсия удельной электропроводности (зависимость $\sigma(f)$) и удельного сопротивления $\rho(f)$ сухих пород-коллекторов (известняка, песчаника, доломита) описываются функциями степенной зависимости и совпадают с известными диапазонами. Таким образом, экспериментальные данные, полученные для сухих осадочных горных пород конденсаторном

методом с учетом возникающих краевых эффектов, можно считать репрезентативными для пород указанных литологий.

3.3.2 Исследования электрических свойств магматических и метаморфических горных пород

Также были исследованы магматические и метаморфические горные породы с низкой пористостью (менее 1 %).

Полученные результаты показали, что в низкочастотной области 120 Гц-10 кГц для низкопористого гранита проявляется дисперсия как действительной, так и мнимой частей диэлектрической проницаемости для сухих образцов, однако меньшая, чем для осадочных горных пород. Резкое уменьшение значений обеих частей ДП сухих образцов наблюдается в диапазоне (120 Гц – 5,0 кГц, рисунки 3.10 и 3.11): ϵ' в 1,5 раза (от значения 9,3 до 6,2); ϵ'' в почти 4 раза (от 2,3 до 0,8). При частотах, больших 5-10 кГц и мнимая, и действительная составляющие ДП стремятся к постоянным значениям ($\epsilon' \sim 6,2$; $\epsilon'' \sim 0,6$).

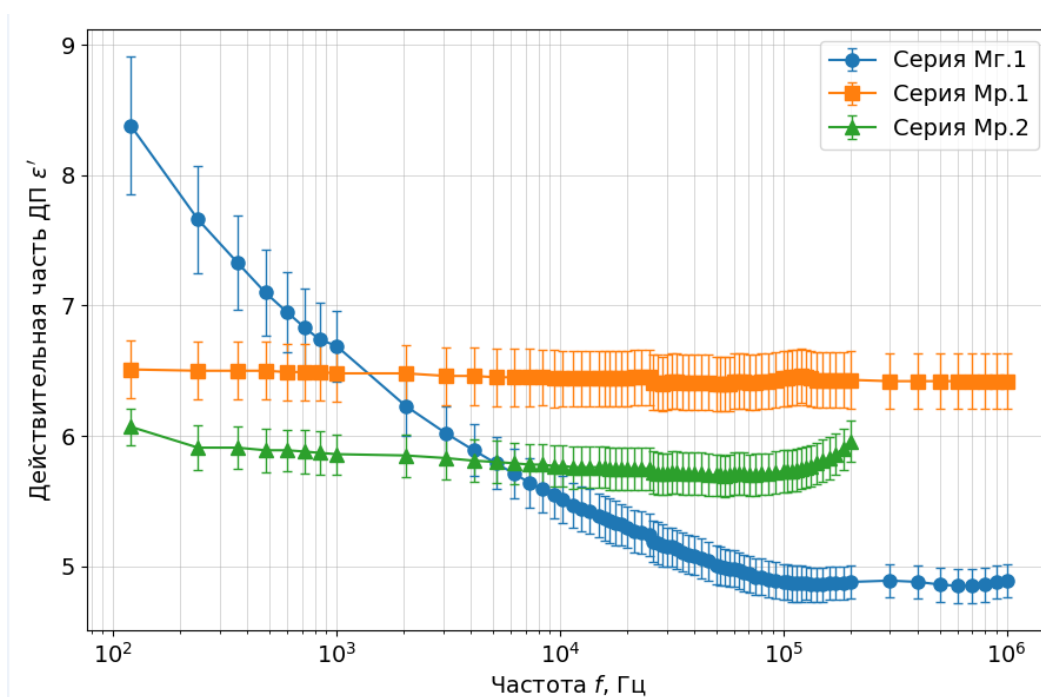


Рисунок 3.10 – Действительная ϵ' часть ДП магматических и метаморфических образцов в сухом состоянии

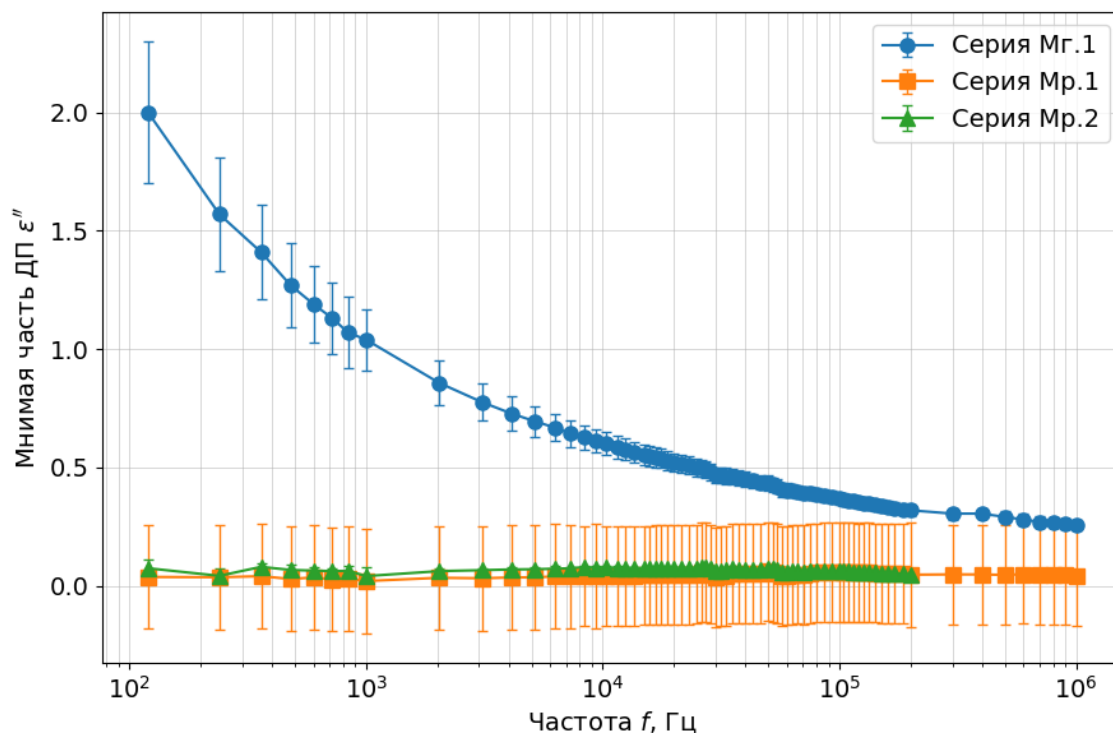


Рисунок 3.11 – Мнимая ϵ'' часть ДП магматических и метаморфических образцов в сухом состоянии

Так же как и для осадочных горных пород отмечается, что для всех образцов диэлектрическая проницаемость уменьшается с увеличением частоты.

Действительная часть ДП исследованных образцов демонстрирует различный характер частотной зависимости, что связано с особенностями их структуры и механизмами поляризации. Для гранита при переходе от низкочастотной области к высоким частотам наблюдается заметное уменьшение значений действительной части ДП ϵ' от 8,4 при 0,12 кГц до примерно 5,0 при частотах порядка 50-200 кГц, при этом в области высоких частот проницаемость стабилизируется на уровне 4,9-5,0. Подобное поведение указывает на выраженный релаксационный процесс, связанный с межфазной поляризацией на границах зерен минералов и пор. С ростом частоты дипольные и межфазные механизмы перестают успевать за изменением электрического поля и вклад в диэлектрическую проницаемость снижается, остаётся только

высокочастотная составляющая, которая определяется в основном ионной и электронной поляризацией кристаллической решётки [132].

Для образцов серии Мр.1 значения $\epsilon'_{\text{Мр.1}}$ во всём диапазоне частот практически не меняются и остаются в пределах 6,4-6,6, что свидетельствует об отсутствии заметного вклада межфазной поляризации и минимальном влиянии пористости и примесных фаз. Основной вклад здесь вносят ионная и электронная поляризация решётки кальцита, тогда как дипольные механизмы не проявляются. В области высоких частот фиксируется лишь небольшой рост диэлектрической проницаемости, который может быть связан как с погрешностями эксперимента, так и с незначительной переориентацией ионных групп в структуре CaCO_3 .

Для образцов серии Мр.2 наблюдается примерно такая же картина, однако значения $\epsilon'_{\text{Мр.2}}$ немного ниже и находятся в диапазоне от 6,1 при низких частотах до 5,7-5,9 на частотах 20-200 кГц. Это различие, вероятно, обусловлено вариациями в кристаллохимическом составе, например, примесью доломита или кварца, которые снижают среднюю поляризуемость материала [133].

Таким образом, образцы мрамора характеризуются стабильной диэлектрической проницаемостью, обусловленной в первую очередь ионной поляризацией, тогда как гранит демонстрирует частотную дисперсию ϵ' за счёт межфазной поляризации и релаксационных процессов, связанных с неоднородностью и пористостью структуры.

3.4 Зависимость частотной дисперсии электрических свойств от пористости осадочных горных пород

На основе полученных экспериментальных данных (см. раздел 3.3) выполнена оценка изменения значений комплексной ДП в зависимости от пористости для осадочных горных пород. Данные породы являются породами-коллекторами и характеризуются значительным разбросом значений

пористости. Поскольку диэлектрическая проницаемость воздуха принимается равной единице, то увеличение пористости при прочих равных условиях должно приводить к изменению значений как действительной, так и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости в сторону уменьшения. Так как наличие в открытом поровом пространстве несвязанной воды было исключено в процессе пробоподготовки (образцы высушивались при температуре 105-110 °С), то с увеличением пористости образцов осадочных горных пород происходило уменьшение значений обеих частей ДП.

Значения измеренных составляющих ДП для образцов с различной пористостью на разных частотах приведены на рисунке 3.12, где различными цветами обозначены значения, полученные для частот 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц и 200 кГц. Подобраны аппроксимирующие функции – степенные функции вида $\varepsilon'(f) = ae^{-kf}$. Анализ полученных данных (рисунок 3.12) позволяет отметить, как и было сказано ранее, что с увеличением частоты происходит уменьшение разброса значений действительной части ДП как в целом в одной группе образцов, так и среди всех образцов осадочных горных пород. Это выражается в меньшем коэффициенте k в аппроксимирующих функциях, а также в увеличении коэффициента детерминации.

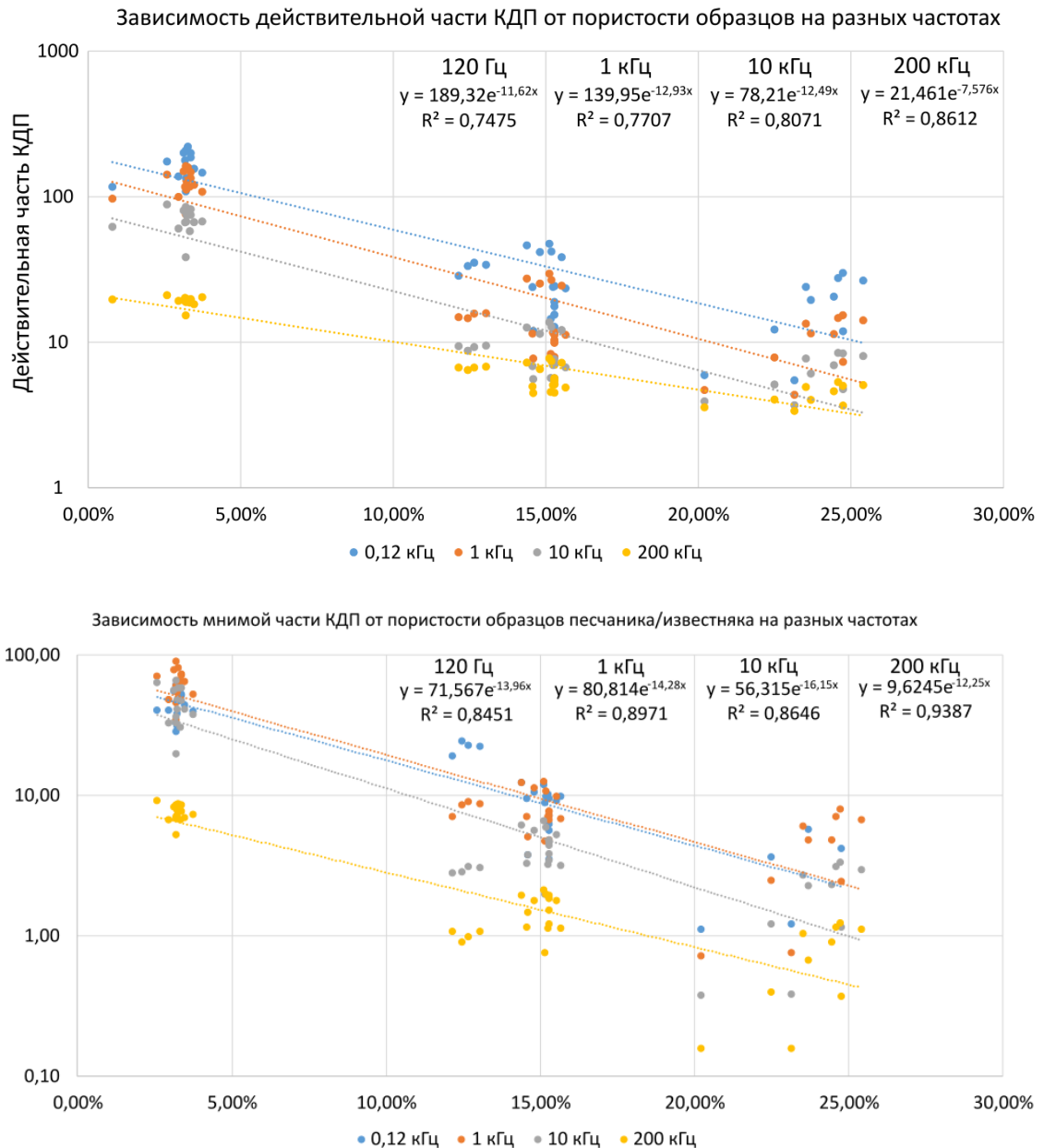


Рисунок 3.12 – Зависимость ДП от пористости исследуемых образцов осадочных горных пород при различных частотах

3.5 Время релаксации и вклад поляризаций

Для гетерогенных сред основной вклад в низкочастотную дисперсию диэлектрической проницаемости, которая изучается в данной работе, дает межфазная поляризация, связанная со скоплением зарядов на границах структурных неоднородностей. Время релаксации данного типа поляризации

для гетерогенных твердых тел лежит в диапазоне от секунд до микросекунд. При низких частотах вектор поляризации успевает за изменением внешнего электрического поля, что приводит к увеличению значения вектора поляризации и, следовательно, к увеличению значения диэлектрической проницаемости.

Следует отметить, что в выражениях, учитывающих запаздывание отклика гетерогенной среды на внешнее электрическое поле, вводится некоторое эффективное время релаксации, вклад в которое дают электронная, ионная, дипольная, межфазная и др. виды поляризации.

Также проявляется дисперсия мнимой части комплексной ДП образцов сухих горных породы, которая обусловлена электропроводностью. Характер изменения мнимой части ДП такой же, что и действительной части: с увеличением частоты скорость уменьшения мнимой части диэлектрической проницаемости постепенно замедляется.

Для оценки времени релаксации (и частоты) была произведена их аппроксимация моделью Коула-Коула, описывающей релаксационные процессы:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\Delta\varepsilon}{(1+i\omega\tau)^{1-\alpha}}. \quad (3.1)$$

Коэффициенты аппроксимации моделью Коула-Коула представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Коэффициенты аппроксимации модели Коула-Коула

Серия	Параметры поляризации				
	ε_{∞}	$\Delta\varepsilon$	τ , с	f , Гц	α
O.1	5,0	18,6	$2,10 \cdot 10^{-4}$	4761	0,45
O.2	11,95	96,2	$1,54 \cdot 10^{-5}$	64935	0,27
O.3	3,35	6,07	$1,99 \cdot 10^{-4}$	5025	0,46
O.4	5,46	7,01	$1,46 \cdot 10^{-3}$	685	0,05
O.5	5,01	0,11	$1,13 \cdot 10^{-3}$	885	0,04
O.6	4,76	20,1	$2,36 \cdot 10^{-4}$	4237	0,17

Можно отметить, что для всех серий образцов, за исключением серии О.2, частота релаксации лежит в диапазоне до 5 кГц с временами релаксации поляризационного процесса от 0,19-1,13 мс. Частотный диапазон до 5 кГц является тем диапазоном, в котором дисперсия описанных выше свойств проявляется наибольшим образом. Серия О.2, как было отмечено выше, имеет значения параметров электрических свойств больше, что, по всей видимости, обусловлено наличием в образце небольшого количества связанной воды и включений пирита, что приводит к уменьшению времени релаксации до $1,54 \cdot 10^{-5}$ с и увеличению частоты релаксации до 64935 Гц.

3.6 Выводы к главе 3

Таким образом, в данной главе были получены следующие результаты:

- проведена апробация разработанной методики на модельных образцах (стеклах) с отсутствующей частотной дисперсией в диапазоне 100 Гц – 1 МГц;
- проведена апробация разработанной методики прецизионного определения диэлектрической проницаемости и удельной проводимости горных пород на образцах неправильной формы в лабораторных условиях;
- исследована частотная дисперсия электрических свойств электрических свойств горных пород осадочного, магматического и метаморфического генотипов в частотной области от 120 Гц до 1 МГц в сухом состоянии;
- выявлены различия в закономерностях уменьшения значений действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости в частотных диапазонах 120 Гц – 10 кГц и 10 кГц-1 МГц в сухом состоянии горных пород;

Полученные в данной главе результаты позволили сформулировать первое научное положение: для образцов горных пород всех генотипов в сухом состоянии при пористости от 0,7 % до 25 % установлено, что частотная

дисперсия комплексной относительной диэлектрической проницаемости наиболее сильно проявляется в диапазоне 120 Гц – 10 кГц (с увеличением частоты действительная и мнимая части уменьшаются в среднем в 2,8 раз), а при частотах диапазона 10 кГц – 1 МГц значения обеих частей относительной диэлектрической проницаемости стабилизируются, изменяясь в пределах от 1,1 до 1,7 раз.

Глава 4 Исследование электрических свойств горных пород в водонасыщенном состоянии при положительных и отрицательных температурах

Была выполнена оценка изменения дисперсии электрических свойств горных пород, песчаника и известняка, в полном водонасыщенном состоянии. Процессу водонасыщения подвергались те же самые образцы, которые до этого исследовались в сухом состоянии. После установления изменения частотной дисперсии в полном водонасыщенном состоянии при комнатной температуре выполнялось изучение электрических свойств при отрицательных температурах также в водонасыщенном состоянии.

4.1 Методика водонасыщения горных пород

Перед процессом водонасыщения образцы вновь подвергались высушиванию в сушильном шкафу, а только после этого проводился процесс водонасыщения. Водонасыщенное состояние образцов горных достигалось путем первоначального удаления воздуха из порового пространства образцов с использованием вакуумного импрегнатора Struers CitoVac с давлением 0,05 бар. Затем производилось насыщение образцов дистиллированной водой при таком же давлении в камере в течение двух часов. После процесса водонасыщения давление в камере выравнивалось с атмосферным постепенно, а образцы продолжали находиться в воде еще до 24 ч при температуре воздуха 20 ± 2 °C.

На следующем этапе поверхность образцов после процесса водонасыщения и удаления свободной воды покрывалась полимерным покрытием для того, чтобы предотвратить испарение воды из открытых пор образцов, а также с целью создания диэлектрического барьера для устранения электродной поляризации при дальнейших измерениях электрических свойств конденсаторным методом.

4.2 Исследование электрических свойств горных пород осадочного генотипа в водонасыщенном состоянии

Зависимости действительной $\varepsilon'(f)$, мнимой частей $\varepsilon''(f)$ и тангенса диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ от частоты в полном водонасыщенном состоянии исследуемых образцов осадочного генотипа приведены на рисунках 4.1-4.3.

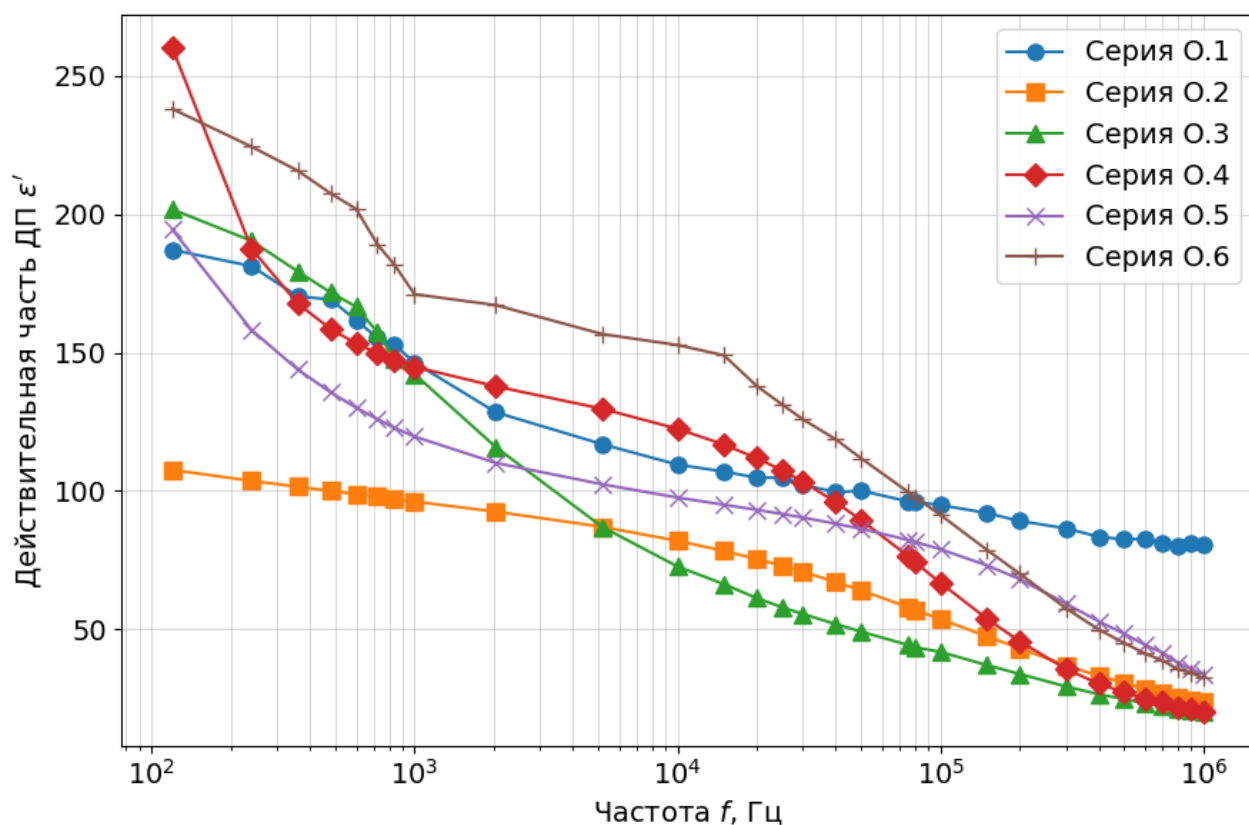


Рисунок 4.1 – Зависимость действительной части ДП от частоты водонасыщенных образцов осадочных горных пород (серии О.1-О.6)

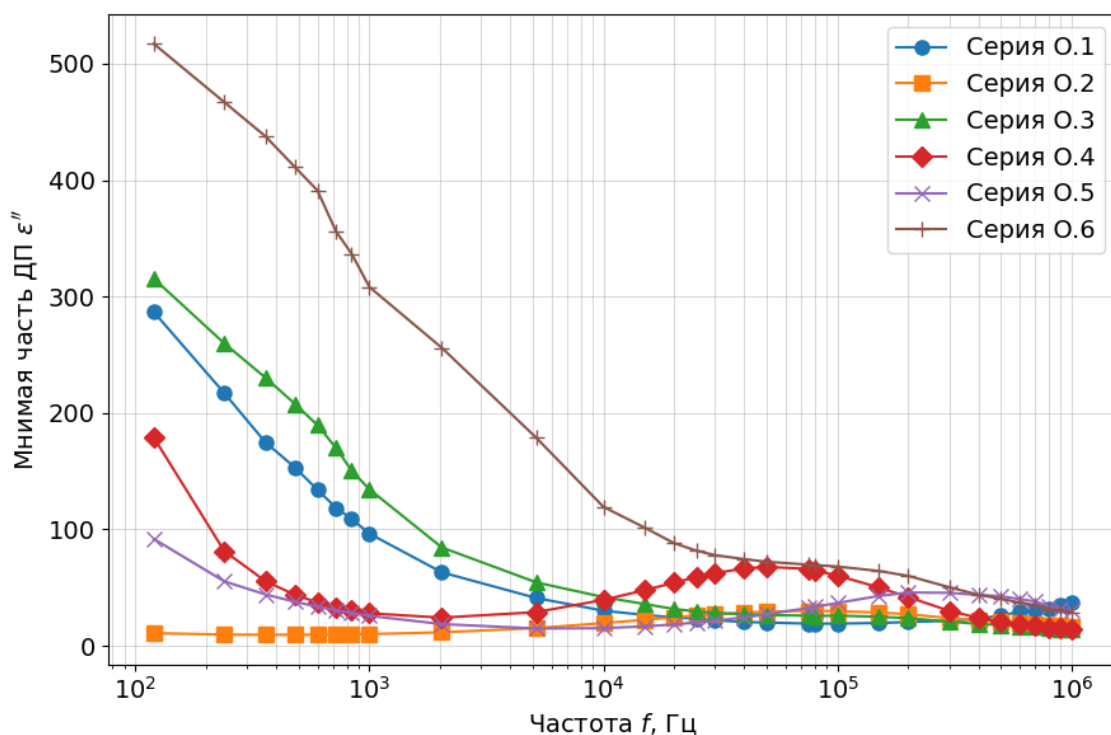


Рисунок 4.2 – Зависимость мнимой части ДП от частоты водонасыщенных образцов (серии О.1-О.6)

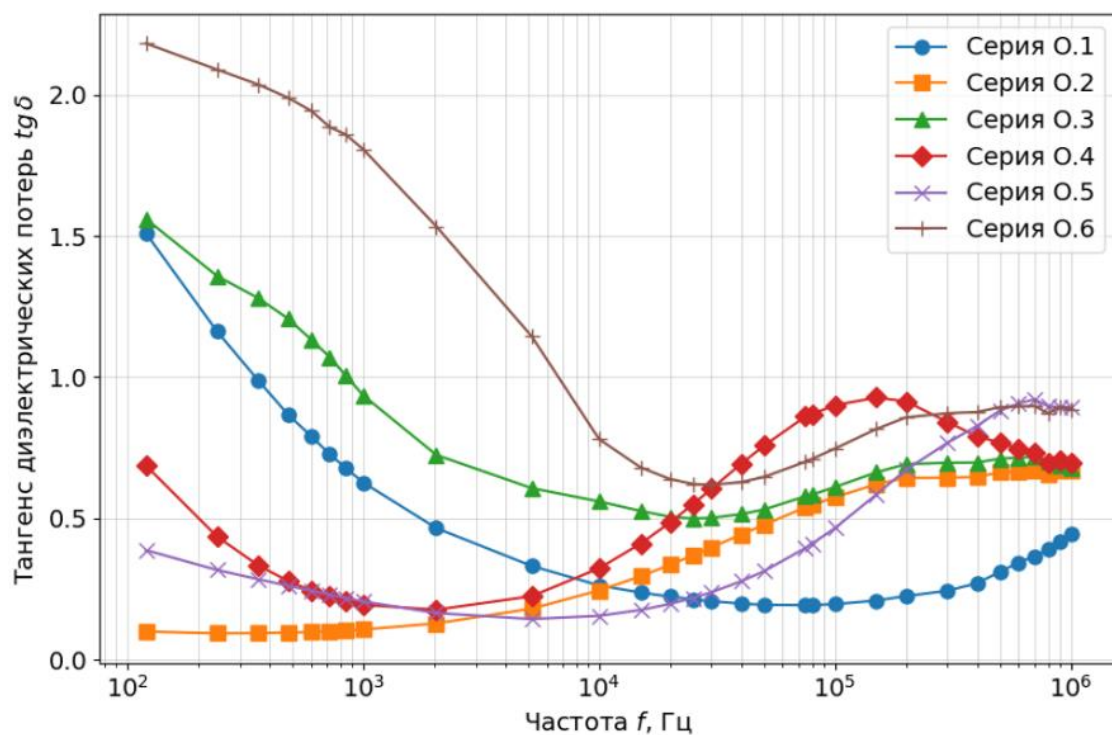


Рисунок 4.3 – Зависимость тангенса диэлектрических потерь от частоты водонасыщенных образцов (серии О.1-О.6)

Можно отметить, что форма частотной дисперсии действительной $\varepsilon'(f)$ и мнимой частей ДП $\varepsilon''(f)$, а также тангенса диэлектрических потерь $tg \delta$ существенно меняется. В рассматриваемом диапазоне от 0,12 кГц до 1 МГц полное водонасыщение исследованных осадочных пород приводит к существенному и резкому возрастанию значений данных параметров.

Так, у песчаника серии О.1 значения $\varepsilon'_{0.1}^{вод}$ возросли в водонасыщенном состоянии до 187 при 120 Гц и затем уменьшились до 80 к 1 МГц; а значение тангенса диэлектрических потерь $tg \delta_{0.1}^{вод}$ составило максимально 1,5 на частоте 120 Гц, отражая активный процесс поляризации.

Для образцов серии О.2 наблюдались более низкие значения $\varepsilon''_{0.2}^{вод}$ и $tg \delta_{0.2}^{вод}$ ($\leq 0,7$) из-за низкой пористости и меньшего насыщения водой.

Известняк-ракушечник серии О.3 демонстрирует самые высокие значения обеих частей ДП на частоте 120 Гц $\varepsilon'_{0.3}^{вод} = 201$ и $\varepsilon''_{0.3}^{вод} = 315$ и значения тангенса диэлектрических потерь $tg \delta_{0.3}^{вод} > 1$ на частотах до 1 кГц благодаря процессам поляризации, а также ионной проводимости флюида вследствие высокой пористости образцов.

В более плотном известняке серии О.4 максимальное значение тангенса диэлектрических потерь $tg \delta_{0.4}^{вод}$ ($\sim 0,9$) сместился к ~ 200 кГц, что связано с тонкоплёночной проводимостью в границах зёрен.

Известняк серии О.5 характеризуется пологим максимумом $tg \delta_{0.5}^{вод} \approx 0,9$ в области от 600 до 800 кГц и самой высокой удельной электропроводностью $\sigma'_{0.2}^{вод} \approx 1,6 \cdot 10^3$ мкСм/м при 1 МГц, что связано с высокой пористостью и заполнением пор водой и ее ионизации, в которой частично растворяется геоматериал.

Доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ серии О.6 также обладает высокими значениями мнимой части ДП $\varepsilon''_{0.6}^{вод}$ равным более 500 вследствие высокого значения тангенса угла диэлектрических потерь, который на частоте 120 Гц равен $tg \delta = 2,2$ и $\rho \approx 6 \cdot 10^{-4}$ МОм·м из-за развитой трещиноватости [134].

Как было сказано в главе 1, комплексную ДП можно представить в виде функции (1.8). При этом водонасыщение горных пород влияет на три механизма сразу.

Одним из факторов, влияющим на это, является вклад самой жидкости. Полярная молекула воды имеет значение действительной части ДП $\varepsilon'_{\text{вода}} \approx 78$ –80 при комнатной температуре, в то время как скелет пород – от 3,3 до 12. Заменяя воздух ($\varepsilon'_{\text{воздух}} \approx 1$) в порах, вода радикально увеличивает объёмную среднюю ε' по любому смесевому закону (например, Максвелла-Гарнета) [130]. При низких частотах дипольная релаксация самой воды не успевает проявиться, однако статическая величина ε' воды остаётся в сумме смесевой формулы. Это приводит к увеличению значений характеристик электрических свойств горных пород.

Из-за резкого контраста электрической проводимости σ и диэлектрической проницаемости ε' между скелетом горных пород и заполненными электролитом порами на их границе формируется так называемая межфазная, или Максвелл-Вагнер-Силларса, поляризация. При наложении переменного поля ионы из порового раствора смещаются к поверхности минеральных зёрен, образуя плотный заряженный слой, а в прилегающем объёме раствора – противоположно заряженную диффузионную зону. Такая двухслойная структура ведёт себя как плоский конденсатор, так как заряды разделены плёнкой раствора с пониженной подвижностью, поэтому вся система накапливает энергию [3].

Вода в порах образцов имеет более высокую проводимость, образуя проводящий канал и снижая общее удельное сопротивление системы (водонасыщенный образец), а также увеличивая общее удельную электропроводность. Растворенные ионы и ионы воды повышают объёмную проводимость порового раствора и значения ε'' через связь $\varepsilon'' = \frac{\sigma'}{2\pi f \varepsilon_0} \Rightarrow \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma'}{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'}$, поэтому при фиксированной частоте увеличение σ на порядок приводит к увеличению значения тангенса диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$.

Таким образом, водонасыщение одновременно увеличивает поляризуемость ε' , вовлекает новые механизмы потерь ε'' и открывает каналы ионной проводимости σ , что при измерениях в диапазоне частот 100 Гц-1 МГц приводит к резко возросшим комплексным электрическим свойствам горных пород.

Как было указано ранее, мнимая часть диэлектрической проницаемости однозначно связана с удельной электропроводностью $\sigma' = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon''$, а удельная электропроводность – с удельным сопротивлением (обратные величины). Зависимости удельной электропроводности и удельного сопротивления от частоты для образцов горных пород в водонасыщенном состоянии приведены на рисунках 4.4 и 4.5. Частотные зависимости данных величин хорошо аппроксимируются степенными функциями с коэффициентом корреляции в диапазоне 0,96-0,99.

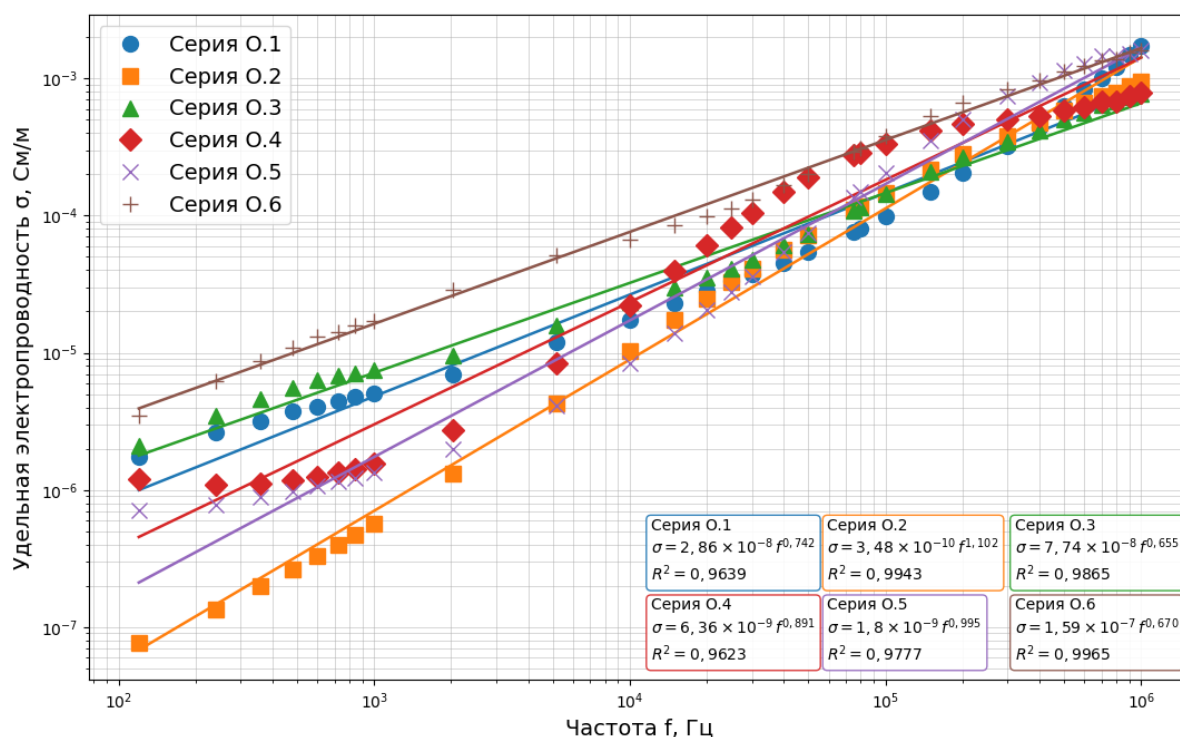


Рисунок 4.4 – Зависимость удельного электропроводности водонасыщенных образцов осадочного генотипа при положительной температуре +20 °С, определенная конденсаторным методом с учетом краевых эффектов

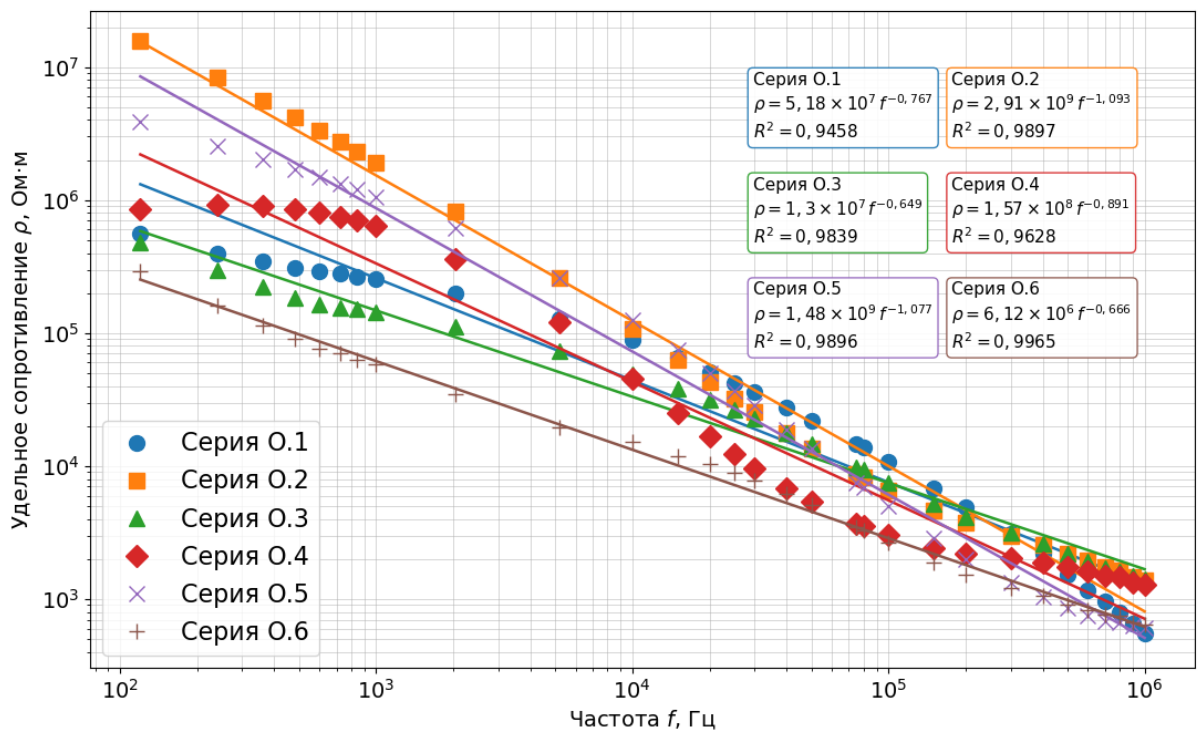


Рисунок 4.5 – Зависимость удельного сопротивления водонасыщенных образцов осадочного генотипа при положительной температуре +20 °С, определенная конденсаторным методом с учетом краевых эффектов

В заключение следует подчеркнуть, что полное водонасыщение осадочных пород приводит к систематическому увеличению низкочастотной действительной части ДП ε' на 1-2 порядка, росту мнимой части ДП ε'' и тангенса диэлектрических потерь $\tan \delta$, а также к снижению значений удельного сопротивления. Поскольку эффекты в кварцевых и карбонатных породах выражены по-разному, их количественная интерпретация при инженерно-геофизическом зондировании должна учитывать как литологию, так и текущее состояние влажности. Полученный массив данных позволяет калибровать релаксационные модели, уточнять корреляции « $\varepsilon' - \sigma$ » и зависимости $\varepsilon'(f)$ и $\varepsilon''(f)$.

4.3 Изучение электрических свойств горных пород при отрицательной температуре

После определения электрических свойств горных пород осадочного генотипа при полном водонасыщении при комнатной температуре происходило изучение их свойств при отрицательной температуре -40°C . Для этого происходило замораживание изучаемых образцов в морозильной камере в течение 2 часов при данной температуре. Зависимость действительной части ДП для образцов серий О.1-О.6 представлена на рисунке 4.6, а тангенса угла диэлектрических потерь на рисунке 4.7.

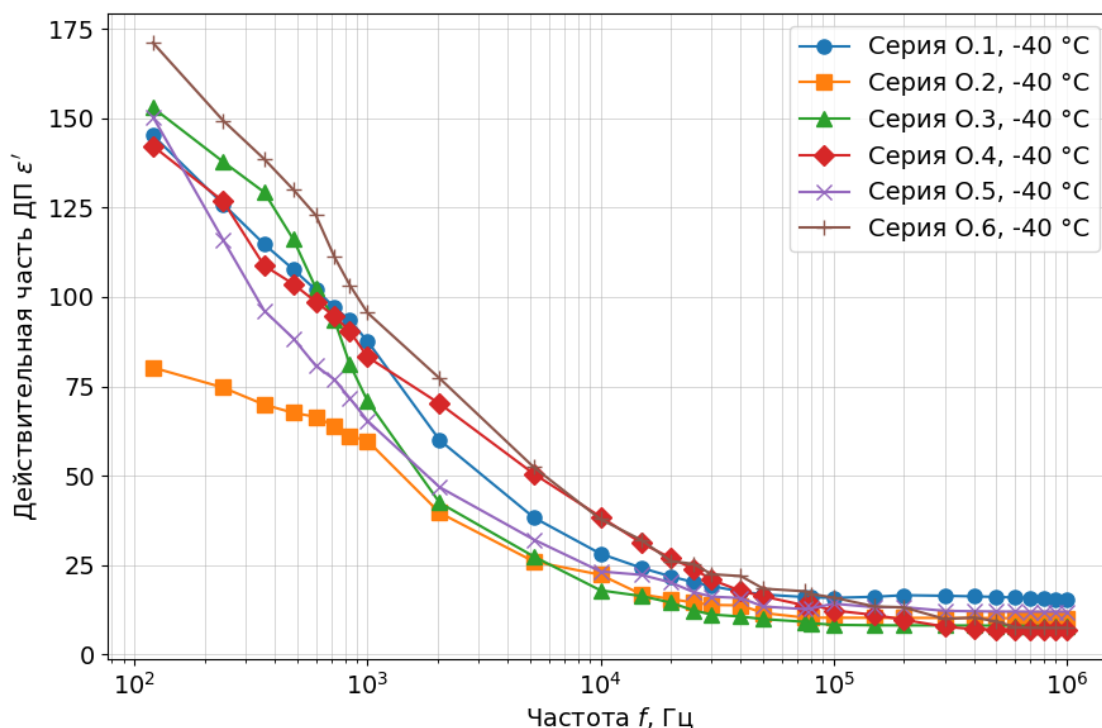


Рисунок 4.6 – Зависимость действительной части ДП от частоты водонасыщенных образцов осадочных горных пород при температуре -40°C

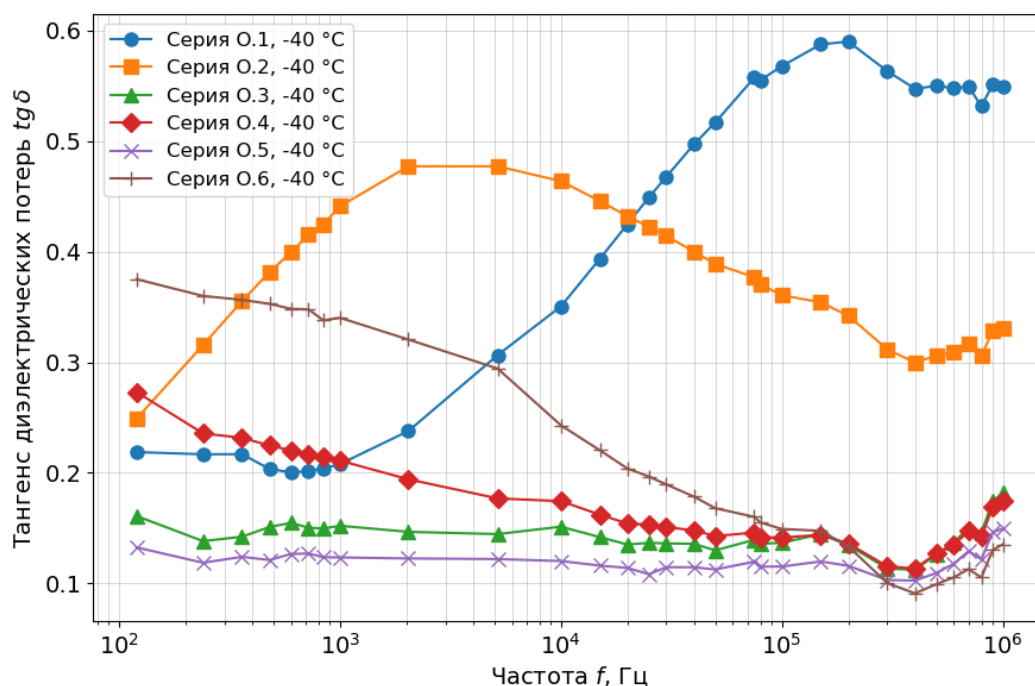


Рисунок 4.7 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты для водонасыщенных образцов осадочных горных пород при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

В исследуемой серии О.1 во всем частотном диапазоне значения действительной части ε' диэлектрической проницаемости при $t = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ существенно меньше, чем при $t = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$. На частоте 120 Гц величина $\varepsilon'_{0.1}^{-40}$ уменьшается с 187 до 145, что соответствует снижению примерно на 22 %. При дальнейшем росте частоты расхождение усиливается. Так, на 1 кГц $\varepsilon'_{0.1}^{-40}$ при отрицательной температуре ниже на 40 % по сравнению с ее значением при положительной температуре, а в диапазоне 10-20 кГц различие достигает 70-80 %. В области от сотен килогерц до 1 МГц тренд сохраняется: при $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ значения стабилизируются около 80, тогда как при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – на значениях 15-16, что отражает уменьшение более чем в пять раз (снижение на 80-82 %). Таким образом, наличие льда в структуре образцов при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости, причём степень снижения возрастает с частотой: от умеренной (20-25 %) на низкочастотном участке до крайне выраженной (80 % и более) в высокочастотной области. Подобное поведение свидетельствует о существенном ограничении механизмов

межфазной и ионно-релаксационной поляризации при отрицательных температурах за счёт снижения подвижности зарядов и замедления релаксационных процессов в поровом пространстве породы.

Для серии О.2 характерна устойчивая тенденция снижения действительной части диэлектрической проницаемости при переходе от +20 °С к -40 °С во всём диапазоне частот. На низкочастотном участке (например, на частоте 120 Гц) значения уменьшаются со 108 до 80, что соответствует снижению примерно на 25 %. При 1 кГц $\varepsilon'_{0.2}^{-40}$ падает с 96 до 60 (около 38 %), а в диапазоне 10-20 кГц различие достигает 70-80 %. В области сотен килогерц и выше разница в значениях увеличивается. Так, при +20 °С значения сохраняются на уровне 20-25, тогда как при отрицательной температуре составляет около 10, что отражает снижение более чем в два раза (на 55-60 %).

В серии О.3 при +20 °С в низкочастотной области ε' достигает ~200, тогда как при -40 °С оно снижается до ~153, что соответствует уменьшению на 24 %. При увеличении частоты расхождение усиливается: при 1 кГц значения падают вдвое (142 против 71), а на частотах 10-20 кГц уменьшение составляет около 70-75 %. На частотах сотен килогерц и выше при комнатной температуре действительная часть диэлектрической проницаемости составляет около 20-30, тогда как при отрицательной температуре снижается до 8, что означает уменьшение более чем в три раза (на 65-70 %).

Для образцов серии О.4 наблюдается особенно сильное уменьшение действительной части ДП. На частоте 0,12 кГц ε' уменьшается с 260 при +20 °С до 142 при -40 °С (снижение на 45 %). При 1 кГц величина снижается с 145 до 83 (на 43 %), а в области 10-20 кГц – с 122-112 до 38-27, что соответствует падению на 70-75 %. На высокочастотном участке (выше 100 кГц) различие становится ещё более выраженным: при положительной температуре значения действительной части ДП составляют 20-30, тогда как при отрицательной снижаются до ~7, что означает уменьшение почти в три раза (до 70-75 %).

В серии О.5 при 0,12 кГц значения ε' при +20 °С составляют ~194, а при -40 °С снижаются до 150 (около -23 %). В диапазоне 1 кГц расхождение

усиливается: 120 против 65, что соответствует уменьшению почти на 46 %. В интервале от 10 до 20 кГц различие достигает 70-75 %, а на частотах выше 100 кГц при комнатной температуре величина ДП составляет на уровне 30-60, тогда как при отрицательной снижаются до ~12, что отражает падение в 3–5 раз.

Серия О.6 характеризуется наибольшей величиной действительной части диэлектрической проницаемости на низких частотах при +20 °С (238 на 0,12 кГц), однако при –40 °С значения падают до 171, что соответствует снижению на 28 %. На 1 кГц ε' уменьшается почти вдвое (171 против 96), а в диапазоне 10–20 кГц — на 70–80 %. На частотах выше 100 кГц при положительной температуре значения составляют от 30 до 70, тогда как при отрицательной снижаются до 7-13, что отражает уменьшение в 4–5 раз (снижение более чем на 80 %).

В работе [135] отмечалось, что при охлаждении водонасыщенных горных пород и грунтов от 0 °С и ниже ключевую роль играют фазовый переход воды в лёд (резкий спад электролитической проводимости); остаточная (адсорбционно связанная) незамёрзшая вода; межфазная поляризация МВС в пористых средах; поверхностная проводимость вдоль минерально-водных границ.

Сравнение отдельных серий позволяет выявить общие черты и некоторые различия. Так, образцы с наибольшими начальными значениями ε' при +20 °С (серии О.4 и О.6) демонстрируют наиболее резкое относительное снижение при замораживании. В то же время серии с более умеренными начальными значениями (О.2 и О.5) характеризуются несколько меньшим относительным падением, хотя общая тенденция сохраняется. В данном случае во всех сериях исследованных образцов (О.1-О.6) наблюдается единообразная закономерность изменения действительной части диэлектрической проницаемости при понижении температуры от +20 °С до –40 °С: значения ε' систематически снижаются во всём частотном диапазоне, при этом степень снижения зависит от частоты. На низких частотах (0,12–1 кГц) проницаемость при

положительной температуре сохраняет высокие значения, которые для разных серий находятся в интервале от 100 до 260, тогда как при отрицательной температуре они уменьшаются до 80-150. Такое снижение составляет в среднем 20-30 % от исходного уровня и связано главным образом с ограничением межфазной и ионно-релаксационной поляризации, чувствительной к подвижности ионов в поровом растворе. В диапазоне частот от 2 до 20 кГц различие становится значительно более выраженным, так как в данном диапазоне частот задействуется релаксационный процесс во льду, для которого частота релаксации лежит в диапазоне от 0,5 до 10 кГц в зависимости от температуры. Если при +20 °С значения ε' составляют порядка 70-160, то при -40 °С они падают до 15-50, что соответствует уменьшению на 60-75 % и более. Так как при этом именно в этом интервале частот фиксируется наиболее резкий спад проницаемости при замораживании водонасыщенных образцов осадочных горных пород и уменьшении температуры, указывающий на снижении влияния релаксационных процессов в водонасыщенных порах при переходе влаги в замороженное состояние. В области высоких частот (100-1000 кГц) температурное расхождение достигает максимума: при положительной температуре значения стабилизируются в пределах 20–80 в зависимости от серии, тогда как при отрицательной удерживаются на уровне 7–16, что означает уменьшение в среднем в 3-5 раз, или на 70-85 %. Такая картина согласуется с теоретическими представлениями о дисперсии диэлектрической проницаемости, так как при замораживании снижается вклад релаксационных механизмов с большим временем релаксации, и материал ведёт себя ближе к идеальному диэлектрику с низкими значениями ε' , обусловленными только высокочастотной электронной и атомной поляризацией. Падение ε' при замерзании связано с исчезновением дипольной поляризации жидкой воды и доминированием межфазной поляризации, при этом при охлаждении ниже 0 °С ε' снижается, а дисперсия усиливается в диапазоне кГц-МГц [136].

Таким образом, замораживание водонасыщенных горных пород осадочного генотипа сопровождается не только уменьшением абсолютных

значений действительной части диэлектрической проницаемости, но и изменением характера её частотной дисперсии, что отражает подавление релаксационных механизмов, связанных с водонасыщенностью и подвижностью ионов в поровом пространстве.

4.4 Выводы к главе 4

Полученные в данной главе результаты позволили сформулировать следующие научные положения:

- установлено, что при полном водонасыщении образцов горных пород осадочного генотипа с пористостью от 3,2 % до 25 % помимо резкого возрастания значений действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости в десятки раз наблюдается смещение верхней границы частотного диапазона проявления дисперсии до 100-500 кГц.

- понижение температуры от +20 °С до -40 °С водонасыщенных осадочных горных пород с пористостью от 3,2 % до 25 % приводит к систематическому снижению действительной части диэлектрической проницаемости, величина которого возрастает с увеличением частоты: от умеренного (20-30 %, или 1,2-1,3 раза) на частотах 0,1-1 кГц до резкого (60-75 %, или 2,5-4 раза) в частотной области 2-20 кГц и максимального (80-85 %, или 4-5 раз) на частотах 100-1000 кГц.

- экспериментально установлено, что тангенс угла диэлектрических потерь в исследуемом частотном диапазоне известняков и песчаников и в полностью водонасыщенном состоянии при отрицательной температуре изменяется в диапазоне от 0,1 до 0,6, а в полностью водонасыщенном состоянии при нормальных условиях – от 2,2 до 0,1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований содержится решение актуальной научной задачи по изучению закономерностей изменения электрических свойств (комплексной диэлектрической проницаемости, удельной электропроводности, тангенса угла диэлектрических потерь, удельного сопротивления) горных пород различных генотипов с разномасштабными структурными неоднородностями и при флюидонасыщении в низкочастотном диапазоне 100 Гц – 1 МГц, что имеет существенное значение для интерпретации данных электроразведки, радиоволнового каротажа, георадиолокации.

Основные научные и практические результаты работы и выводы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1) Выполнен анализ и проведена систематизация теоретических и экспериментальных данных по дисперсии электрических свойств, а именно комплексной диэлектрической проницаемости, удельной проводимости и тангенса угла диэлектрических потерь горных пород различного генотипа;

2) Разработана методика прецизионного определения диэлектрической проницаемости и удельной проводимости горных пород на образцах неправильной формы в лабораторных условиях.

3) Проведена апробация разработанной методики на модельных образцах (стеклах) с отсутствующей частотной дисперсией в диапазоне 100 Гц – 1 МГц.

4) Экспериментально исследована низкочастотная дисперсия электрических свойств горных пород различного генотипа, выявлены различия в закономерностях уменьшения значений действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости в частотных диапазонах 120 Гц – 10 кГц и 10 кГц-1 МГц в сухом состоянии горных пород;

5) Установлено, что для пород-коллекторов, пористость которых изменяется в пределах 15-30 %, зависимость значений действительной части диэлектрической проницаемости неводонасыщенных образцов от пористости имеет экспоненциальный вид; при этом для образцов с пористостью 0,7-1,5 % значения диэлектрической проницаемости отличаются в среднем на 20 % во всем исследуемом частотном диапазоне;

6) Экспериментально установлено, что при полном водонасыщении пористых образцов (до 25 %) действительная часть диэлектрической проницаемости увеличивается в несколько раз во всем частотном диапазоне, а также происходит смещение верхней границы частотного диапазона проявления дисперсии.

7) Экспериментально установлено, что понижение температуры от +20 °С до -40 °С водонасыщенных горных пород приводит к снижению действительной части диэлектрической проницаемости, а характер ее снижения зависит от частотной области.

8) Экспериментально установлено, что тангенс угла диэлектрических потерь в исследуемом частотном диапазоне сухих известняков и песчаников и в полностью водонасыщенном состоянии при отрицательной температуре изменяется в диапазоне от 0,1 до 0,6, а в полностью водонасыщенном состоянии при нормальных условиях – от 2,2 до 0,1.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Barreto A., Dias C. Fluid salinity, clay content, and permeability of rocks determined through complex resistivity partition fraction decomposition // *Geophysics*. – 2014. – Vol. 79, No. 5. – P. D333-D347.
- 2 Пархоменко Э. Электрические свойства горных пород. – Москва: Наука, 1965. – 164 с.
- 3 Chelidze T., Gueguen Y. Electrical spectroscopy of porous rocks: a review-I. Theoretical models // *Geophysical Journal International*. – 1999. – Vol. 137, No. 1. – P. 1-15.
- 4 Jakosky J. *Exploration Geophysics*. – Trija Pub. Co, 1950.
- 5 Dentith M., Mudge S. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- 6 Bobrov P., Golikov N., Repin A. Dielectric Spectroscopy is a Perspective Method for Researching the Petrophysical Characteristics of Rocks // *Geomodel*. – 2020. – Vol. 2020. – P. 1-5.
- 7 Kremer F., Schönhals A. *Broadband Dielectric Spectroscopy*. – Heidelberg: Springer Berlin, 2003.
- 8 Moser C., Morra di Cella U., Hauck C., Orozco A. Spectral induced polarization survey for the estimation of hydrogeological parameters in an active rock glacier // *The Cryosphere*. – 2025. – Vol. 19. – P. 143-171.
- 9 Брандт А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963.
- 10 Eremin I., Eremina V., Kostyukov N., Moiseenko V. Elastic electron polarization of condensed dielectrics // *Doklady Physics*. – 2010. – Vol. 55. – P. 257-260.
- 11 Сканави Г. Релаксационная диэлектрическая поляризация и внутреннее поле в твёрдых диэлектриках // *Известия Томского ордена*

Трудового Красного Знамени Политехнического института им. С. М. Кирова. – 1956. – Т. 91. – С. 219-238.

12 Губкин А. Релаксационная поляризация и электретный эффект в твёрдых диэлектриках. – Москва, 1979.

13 Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела. – Москва: Наука, 1978.

14 Lesmes D., Morgan F. Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks // Journal of Geophysical Research. – 2001. – P. 13329-13346.

15 Mironov V., Bobrov P., Fomin S., Karavaiskii A. Generalized refractive mixing dielectric model of moist soils considering ionic relaxation of soil water // Russian Physics Journal. – 2013. – Vol. 56. – P. 319-324.

16 Chelidze T., Gueguen Y., Ruffet C. Electrical spectroscopy of porous rocks: A review-II. Experimental results and interpretation // Geophysical Journal International. – 1 999. – Vol. 137. – P. 16-34.

17 Tabbagh A., Cosenza P., Ghorbani A., Guerin R., Florsch N. Modelling of Maxwell–Wagner induced polarisation amplitude for clayey materials // Journal of Applied Geophysics. – 2009. – Vol. 67, No. 2. – P. 109-113.

18 Nordsiek S., Weller A. A new approach to fitting induced-polarization spectra // Geophysics. – 2008. – Vol. 73, No. 6. – P. F235-F245.

19 Дебай П. Полярные молекулы. – Гос. науч.-техн. изд-во, 1931. – 247 с.

20 Костюков Н., Еремина Н., Ратсгяев Е. Частотные зависимости характеристик диэлектриков по теории Дебая и волновой теории // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2012. – Т. 59. – С. 26-33.

21 Alvarez F., Arbe A., Colmenero J. The Debye's model for the dielectric relaxation of liquid water and the role of cross-dipolar correlations: A MD-simulations study // The Journal of Chemical Physics. – 2023. – Vol. 159. – N. 134505.

- 22 Mantas P. Dielectric response of materials: extension to the Debye model // *Journal of the European Ceramic Society*. – 1999. – Vol. 19, No. 12. – P. 2079-2086.
- 23 Revil A., Leroy P., Ghorbani A., Florsch N., Rik Niemeijer A. Compaction of quartz sands by pressure solution using a Cole-Cole distribution of relaxation times // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2006. – Vol. 111. – N. B09205.
- 24 Vaudelet P., Revil A., Schmutz M., Franceschi M., Begassat P. Induced polarization signature of the presence of copper in saturated sands // *Water Resources Research*. – 2011. – Vol. 47. – N. W02526.
- 25 Cole K. S., Cole R. H. Dispersion and Absorption in Dielectrics. I. Alternating Current Characteristics // *Journal of Chemical Physics*. – 1941. – Vol. 9. – P. 341-351.
- 26 Liu W., Chen R., Yang L. Cole-Cole Model Parameter Estimation from Multi-frequency Complex Resistivity Spectrum Based on the Artificial Neural Network // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2021. – Vol. 26, No. 1. – P. 71-77.
- 27 Tarasov A., Titov K. Relaxation time distribution from time domain induced polarization measurements // *Geophysical Journal International*. – 2007. – Vol. 170, No. 1. – P. 31-43.
- 28 Sengwa R., Soni A. Low-frequency dielectric dispersion and microwave dielectric properties of dry and water-saturated limestones of the Jodhpur region // *Geophysics*. – 2006. – Vol. 71, No. 5. – P. G269-G277.
- 29 Davidson D., Cole R. Dielectric Relaxation in Glycerol, Propylene Glycol and n-Propano // *The Journal of Chemical Physics*. – 1951. – Vol. 19. – P. 1484-1490.
- 30 Havriliak S., Negami S. A Complex Plane Representation of Dielectric and Mechanical Relaxation Processes in Some Polymers // *Polymer*. – 1967. – Vol. 8. – P. 161-210.

- 31 Florsch N., Camerlynck C., Revil A. Direct estimation of the distribution of relaxation times from induced-polarization spectra using a Fourier transform analysis // *Near Surface Geophysics*. – 2012. – Vol. 10. – P. 517-531.
- 32 Matsumoto A., Higasi K. Dielectric Relaxation of Nonrigid Molecules at Lower Temperature // *The Journal of Chemical Physics*. – 1962. - Vol. 36. – P. 1776-1780.
- 33 Barsoukov E., Macdonald J. R. *Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications*. – John Wiley & Sons, 2005.
- 34 Williams G., Watt D. C. Non-symmetrical dielectric relaxation behaviour arising from a simple empirical decay function // *Transactions of the Faraday Society*. – 1970. – Vol. 66. – P. 80-85.
- 35 Ishida T., Makino T., Wang C. Dielectric-relaxation spectroscopy of kaolinite, montmorillonite, allophane and imogolite under moist conditions // *Clays and Clay Minerals*. – 2000. – Vol. 48, No. 1. – P. 75-84.
- 36 Kavian M., Slob E., Mulder W. Measured electric responses of unconsolidated layered and brine-saturated sand and sand-clay packs under continuous fluid flow conditions // *Journal of Applied Geophysics*. – 2012. – Vol. 80. – P. 83-90.
- 37 Бобров П., Красноухов В., Крошка Е., Лапина А. Моделирование процессов диэлектрической релаксации во влажных песчаных породах // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2017. – Т. 60, № 4. – С. 135-140.
- 38 Maxwell-Garnett J. C. Colours in Metal Glasses and Metallic Films // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*. – 1904. – Vol. 203. – P. 385-420.
- 39 Samet M., Boiteux G., Seytre G., Kallel A., Serghei A. Interfacial polarization in composite materials with spherical fillers: characteristic frequencies and scaling laws // *Colloid and Polymer Science*. – 2014. – Vol. 292. – P. 1977-1988.

- 40 Markel V. Introduction to the Maxwell Garnett approximation: tutorial // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2016. – Vol. 33, No. 7. – P. 1244-1256.
- 41 Asami K. Characterization of heterogeneous systems by dielectric spectroscopy // *Progress in Polymer Science*. – 2002. – Vol. 27, No. 8. – P. 1617-1659.
- 42 Asami K., Hanai T., Koizumi N. Dielectric approach to suspensions of ellipsoidal particles covered with a shell in particular reference to biological cells // *Journal Applied Physics*. – 1980. – Vol. 19. – P. 359-365.
- 43 Altshuller A. P. The Shapes of Particles from Dielectric Constant Studies of Suspensions // *The Journal of Physical Chemistry*. – 1954. – Vol. 58, No. 7. – P. 544-547.
- 44 Fricke H. The Maxwell-Wagner Dispersion in a Suspension of Ellipsoids // *The Journal of Physical Chemistry*. – 1953. – Vol. 57. – P. 934-937.
- 45 Samet M., Kallel A., Serghei A. Maxwell-Wagner-Sillars interfacial polarization in dielectric spectra of composite materials: Scaling laws and applications // *Journal of Composite Materials*. – 2022. – Vol. 56, No. 20. – P. 3197-3217.
- 46 Berg C. An effective medium algorithm for calculating water saturation at any frequency // *Geophysics*. – 2007. – Vol. 72, No. 2. – P. E59-E67.
- 47 Cosenza P., Ghorbani A., Camerlynk C., Rejiba F., Guerin R., Tabbagh A. Effective medium theories for modelling the relationships between electromagnetic properties and hydrological variable in geomaterials: A review // *Near Surface Geophysics*. – 2009. – Vol. 7. – P. 563-578.
- 48 Berryman J., Hoversten G. Modelling electrical conductivity for earth media with macroscopic fluid-filled fractures // *Geophysical Prospecting*. – 2013. – Vol. 61, No. 2. – P. 471-493.
- 49 Han T., Clennell M., Pervukhina M. Modelling the low-frequency electrical properties of pyrite-bearing reservoir sandstones // *Marine and Petroleum Geology*. – 2015. – Vol. 68. – P. 341-351.

50 Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The Rock Physics Handbook. – Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

51 Han T., Yang Y. Numerical and theoretical simulations of the dielectric properties of porous rocks // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 159. – P. 186-192.

52 Revil A. Effective conductivity and permittivity of unsaturated porous materials in the frequency range 1 mHz-1 GHz // Water Resources Research. – 2013. – Vol. 49, No. 1. – P. 306-327.

53 Улитин Р., Башмаков А., Скурихина В., Титлинов В. Методика поисков сульфидных месторождений методом частотной дисперсии (на примере колчеданных месторождений Урала) // Электрометрия при поисках сульфидных месторождений. Свердловск: УФАН АН СССР, 1968. – С. 55-69.

54 Pelton W., Ward S., Hallof P., Sill W., Nelson P. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // Geology. – 1978. – Vol. 43. – P. 588-609.

55 Ельцов Т., Голиков Н., Эпов М., Доровский В., Табаровский Л. Измерение водонефтяного соотношения и пористости формации, используя диэлектрическую спектроскопию в скважинных условиях // Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE по разведке и добыче: материалы конференции. – Москва, 2014.

56 Anderson B., BarberThomas D., Luling M. Observations of Large Dielectric Effects on Induction Logs, or Can Source Rocks Be Detected with Induction Measurements // Geology, Physics. – 2006.

57 Крылов С., Бобров Н. Частотная дисперсия электрических свойств при электромагнитном зондировании с вертикальным магнитным диполем // Физика Земли. – 1997. – Т. 3. – С. 64-70.

58 Шестаков А. К оценке поляризованных характеристик среды по данным многочастотных измерений в методе сопротивлений на переменном

токе // Известия Уральского государственного горного университета. – 2021. – Т. 1, № 61. – С. 102-108.

59 Guo C., Liu R., Chen X., Mavko G., He Z. An Ultra-Wideband Measurement Method for the Dielectric Property of Rocks // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2019. – Vol. 16, No. 6. – P. 874-878.

60 Chen S., Ke S., Jia J., Cheng L., Shi H., Zhang Y. A laboratory study on the dielectric spectroscopy of sandstone and the improvement of dispersion model // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 216. – Article 110655.

61 Hloupis G., Stavrakas I., Vassillis S., Triantis D., Vallianatos F., Stonham J. Identification of contamination in sandstone by means of dielectric and conductivity measurements // WSEAS Transactions on Circuits and Systems. – 2005. – Vol. 4, No. 3. – P. 148-156.

62 Church R., Webb W., Salsman J. Dielectric properties of low-loss minerals. – Bureau of Mines. United States Department of the Interior, 1988.

63 Abbas Z., Pollard R. D., Kelsall R. W. Complex permittivity measurements at Ka-Band using rectangular dielectric waveguide // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2001. – Vol. 50, No. 5. – P. 1334-1342.

64 Gorriti A., Slob E. A new tool for accurate S-parameters measurements and permittivity reconstruction // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2005. – Vol. 43, No. 8. – P. 1727-1735.

65 Bore T., Yan G., Mishra P., Brierre T., Placencia-Gomez E., Revil A., Wagner N. A flow through coaxial cell to investigate high frequency broadband complex permittivity: Design, calibration and validation // Measurement. – 2024. – Vol. 237. – Article 115198.

66 Adous M., Queffelec P., Laguerre L. Coaxial/cylindrical transition line for broadband permittivity measurement of civil engineering materials // Measurement Science and Technology. – 2006. – Vol. 17, No. 8. – Article 2241.

67 Lauer K., Wagner N., Felix-Henningsen P. A new technique for measuring broadband dielectric spectra of undisturbed soil samples // *European Journal of Soil Science*. – 2012. – Vol. 63. – P. 224-238.

68 Миронов В., Савин И. Метод калибровки полоскового резонатора при измерениях комплексной диэлектрической проницаемости влажных почв и грунтов // *Приборы и техника эксперимента*. – 2006. – Т. 1. – С. 128-134.

69 Oliveira J. G., Duarte Junior J. G., Pinto E. N., Silva Neto V., D'Assuncao A. G. A New Planar Microwave Sensor for Building Materials Complex Permittivity Characterization // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, No. 21. – Article 6328.

70 Zheng Y., Zhao X., Li J., Zhang Q. Dielectric properties of hard rock minerals and implications for microwave-assisted rock fracturing // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. – 2020. – Vol. 6. – Article number 22.

71 Zheng Y.-C., Shojoe W., Ziyuan O., Li X. Measurement of the Dielectric Properties of Volcanic Scoria and Basalt at 9370 MHz // *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. – 2010. – Vol. 79, No. 2. – P. 291-296.

72 Levitskaya T., Sternberg B. Polarization processes in rocks: 1. Complex Dielectric Permittivity method // *Radio Science*. – 1996. – Vol. 31, No. 4. – P. 755-779.

73 Olatinsu O., Olorode D. Radio frequency dielectric properties of limestone and sandstone from Ewekoro, Eastern Dahomey Basin // *Advances in Applied Science Research*. – 2013. – Vol. 4, No. 6. – P. 150-158.

74 Волков А., Копосов Г., Перфильев Р., Тягунин А. Анализ экспериментальных результатов по модели Гаврилика–Негами в диэлектрической спектроскопии // *Журнал технической физики*. – 2018. – Т. 124, № 2. – С. 206-209.

75 Zhdanov M. Generalized effective-medium theory of induced polarization // *Geophysics*. – 2008. – Vol. 73, No. 5. – P. F197-F211.

76 Zhdanov M., Burtman V., Endo M., Lin W. Complex resistivity of mineral rocks in the context of the generalized effective-medium theory of the

induced polarization effect // *Geophysical Prospecting*. – 2017. – Vol. 66, No. 4. – P. 798-817.

77 Alfouzan F., Alotaibi A., Cox L., Zhdanov M. Spectral Induced Polarization Survey with Distributed Array System for Mineral Exploration: Case Study in Saudi Arabia // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. – P. 769-795.

78 Zhdanov M., Burtman V., Endo M., Wilson G. Laboratory-based GEMTIP analysis of spectral IP data for mineral discrimination // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. – 2012. – P. 1-4.

79 Wang S., Wang T., Yang J. Spectral characteristics analysis of rocks and ores based on the generalized effective medium theory of induced polarization // *Frontiers in Earth Science*. – 2023. – Vol. 11. – Article 1190243.

80 Triantis D., Stavrakas I., Anastasiadis C., Vallianatos F., Kershaw S. Dielectric spectroscopy in crustal rocks: Preliminary results from northeastern Sicily (Italy) and the Gulf of Corinth (Greece) // *Bulletin of the Geological Society of Greece*. – 2004. – Vol. 36, No. 4. – P. 1925-1931.

81 Epov M., Mironov V., Bobrov P., Savin I., Repin A. Dielectric spectroscopy of oil-bearing rocks at 0.05-16 GHz // *Russian Geology and Geophysics*. – 2009. – Vol. 50, No. 5. – P. 470-474.

82 Эпов М., Савин И., Миронов В. Диэлектрическая температурная модель влажных нефтесодержащих пород в диапазоне частот от 0,5 до 15 ГГц // *Геология и геофизика*. – 2012. – Т. 53, № 7. – С. 912-919.

83 Anastasiadis C., Stavrakas I., Kyriazopoulos A., Ninos D., Triantis D. Non-Destructive Damage Estimation on Rocks with Laboratory Measurements of Dielectric Loss ($\tan \delta$) // *The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing*. – Slovenia, 2005.

84 Olhoeft G. Electrical properties of natural clay permafrost // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 1977. – Vol. 14, No. 1. – P. 16-24.

85 Petrenko V., Whitworth R. *Physics of Ice*. – Oxford University Press, 1999. – 384 p.

86 Bakian-Dogaheh K., Zhao Y., Kimball J. S., Moghaddam M. Coupled hydrologic-electromagnetic framework to model permafrost active layer organic soil dielectric properties // Remote Sensing of Environment. – 2025. – Vol. 318. – Article 114560.

87 Thomson L. I., Osinski G., Pollard W. The dielectric permittivity of terrestrial ground ice formations: Considerations for planetary exploration using ground-penetrating radar // Journal of Geophysical Research: Planets. – 2012. – Vol. 117, No. E9. – Article E09003.

88 Bittelli M., Flury M., Roth K. Use of dielectric spectroscopy to estimate ice content // Water Resources Research. – 2004. – Vol. 40, No. 4. – Article W04212.

89 Hickson D., Boivin A., Tsai C., Daly M., Ghent R. Modeling the Dielectric Properties of Minerals From Crystals to Bulk Powders for Improved Interpretation of Asteroid Radar Observations // Journal of Geophysical Research: Planets. – 2020. – Vol. 125. – Article e2019JE006141.

90 Arcone S. A., Delaney A. J. Dielectric properties of thawed active layers overlying permafrost using radar at VHF // Radio Science. – 1982. – Vol. 17, No. 3. – P. 618-626.

91 Sun Y., Goldberg D. Dielectric method of high-resolution gas hydrate estimation // Geophysical Research Letters. – 2005. – Vol. 32, No. 4. – P. L04313.

92 Kurylyk B., Watanabe K. The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils // Advances in Water Resources. – 2013. – Vol. 60. – P. 160-177.

93 Brecher A., Briggs P. L., Simmons G. The low-temperature electrical properties of carbonaceous meteorites // Earth and Planetary Science Letters. – 1975. – Vol. 28, No. 1. – P. 37-45.

94 Stillman D., Grimm R. Dielectric Signatures of Adsorbed and Salty Liquid Water at the Phoenix Landing Site, Mars // Journal of Geophysical Research. – 2011. – Vol. 116, No. E9. - Article E09005.

95 Grimm R., Stillman D., Dec S., Bullok M. Low-Frequency Electrical Properties of Polycrystalline Saline Ice and Salt Hydrates // The Journal of Physical Chemistry B. – 2008. – Vol. 112, No. 48. – P. 15382-15390.

96 Kaatze U. Reference Liquids for the Calibration of Dielectric Sensors and Measurement Instruments // Measurement Science and Technology. – 2007. – Vol. 18, No. 4. – P. 967-976.

97 Romanovsky V., Osterkamp T. Effects of Unfrozen Water on Heat and Mass Transport Processes in the Active Layer and Permafrost // Permafrost and Periglacial Processes. – 2000. – Vol. 11, No. 3. – P. 219-239.

98 Lu C., Sun Q., Zhang W., Hao S. Effects of NaCl Concentration on Electrical Resistivity of Clay with Cooling // Journal of Applied Geophysics. – 2019. – Vol. 170. – Article 103843.

99 Фролов А. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. – Пушино, 1998. – 513 с.

100 Campbell M., Ulrichs J. Electrical Properties of Rocks and Their Significance for Lunar Radar Observations // Journal of Geophysical Research. – 1969. – Vol. 74, No. 25. – P. 5867-5881.

101 Zorin N., Ageev D. Electrical Properties of Two-Component Mixtures and Their Application to High-Frequency IP Exploration of Permafrost // Near Surface Geophysics. – 2017. – Vol. 15, No. 6. – P. 603-618.

102 Luo H., Teng J., Zhang S., Sheng D. Study on the Relationship between Unfrozen Water Content and Electrical Conductivity in Frozen Soils // Journal of Rock Mechanics and Engineering. – 2021. – Vol. 40, No. 5. – P. 1068-1079.

103 Stillman D., Grimm R., Dec S. Low-frequency electrical properties of ice-silicate mixtures // The Journal of Physical Chemistry B. – 2010. – Vol. 114, No. 18. – P. 6065-6073.

104 Bittelli M., Flury M., Roth K. Use of Dielectric Spectroscopy to Estimate Ice Content in Frozen Porous Media // Water Resources Research. – 2004. – Vol. 40. – Article W04212.

- 105 Moore J., Maeno N. Dielectric Properties of Frozen Clay and Silt Soils // Cold Regions Science & Technology. – 1993. – Vol. 21, No. 3. – P. 265-273.
- 106 Ландау Л., Лифшиц Е. Теоретическая физика. Т. VIII: Электродинамика сплошных сред. - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 656 с.
- 107 Dorzhiev V., Dragunov V., Ostertak D. Raschet emkosti MEMS v 2D-priblizhenii [Calculation of MEMS capacity in 2D-approximation] // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета – Transactions of scientific papers of the Novosibirsk State Technical University. – 2010. – Т. 4, № 62. – С. 73-80.
- 108 Ostertak D. Analiz elektrostatcheskikh vzaimodeistvii v ploskoparallel'nykh MEMS s uchetom kraevykh effektov v 3D-priblizhenii [An analysis of electrostatic interactions in parallel-plate MEMS with regard to fringing field effects within a 3D-approach] // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации – Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences. – 2017. – Т. 1, № 34. – С. 116-132.
- 109 Dragunov V., Dorzhiev V. Vliyanie kraevykh effektov na funktsionirovanie MEMS [Fringing field effects influence on MEMS functioning] // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации – Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences. – 2016. – Т. 1. – С. 48-61.
- 110 Palmer H. The Capacitance of a Parallel-Plate Capacitor by the Schwartz-Christoffel Transformation // Electrical Engineering. – 1937. – P. 363-366.
- 111 Love E. The electrostatic field of two equal circular co-axial conducting disks // Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics. – 1949. – Vol. 2, No. 4. – P. 428-451.
- 112 Hosseini M., Zhu G., Peter Y.-A. A new formulation of fringing capacitance and its application to the control of parallel-plate electrostatic micro actuators // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. – 2007. – Vol. 53, No. 2. – P. 119-128.

113 Reichert B., Ristivojevic Z. Analytical results for the capacitance of a circular plate capacitor // *Physical Review Research*. – 2020. – Vol. 2, No. – Article 013289.

114 Ishai P., Talary M., Caduff A., Levy E., Feldman Y. Electrode polarization in dielectric measurements: a review // *Measurement Science and Technology*. – 2013. – Vol. 24, No. 10. - Article 102001.

115 Mannequin C., Gonon P., Vallee C., Bsiesy A., Grampeix H., Jousseau V. Dielectric Relaxation in Hafnium Oxide: A Study of Transient Currents and Admittance Spectroscopy in HfO₂ Metal-Insulator-Metal Devices // *Journal of Applied Physics*. – 2011. – Vol. 110. – Article 104108.

116 Scott J., Carroll R., Cunningham D. Dielectric constant and electrical conductivity measurements of moist rock: a new laboratory method // *Journal of Geophysical Research*. – 1967. – Vol. 72, No. 20. – P. 5105-5115.

117 Wojcik N., Barczynski R. The influence of thin gold electrodes on the high-temperature impedance of oxide glasses // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12, No. 6. – Article 784.

118 Awasthi P., Das S. Reduced electrode polarization at the electrode and analyte interface in impedance spectroscopy using carbon paste and paper // *Review of Scientific Instruments*. – 2019. – Vol. 90, No. 12. – Article 124103.

119 Wang R., He F., Chen C., Dai L. Evaluation of electrode-sample contact impedance under different curing humidity conditions during measurement of AC impedance of cement-based materials // *Scientific Reports*. – 2020. – Vol. 10. – Article 17968.

120 Bona N., Rossi E., Capaccioli S., Lucchesi M. Electrical measurements: considerations on the performance of 2- and 4-contact systems // *Symposium of the Society of Core Analysts held in Abu Dhabi*. – Abu Dhabi, 2008.

121 Chassagne C., Dubois E., Jimenez M., van der Ploeg J. M., van Turnhout J. Compensating for Electrode Polarization in Dielectric Spectroscopy Studies of Colloidal Suspensions: Theoretical Assessment of Existing Methods // *Frontiers in Chemistry*. – 2016. – Vol. 4. – Article 30.

- 122 Kranc S., Sagues A. Polarization current distribution and electrochemical impedance response of reinforced concrete when using guard ring electrodes // *Electrochimica Acta*. – 1993. – Vol. 38, No. 14. – P. 2055-2061.
- 123 Law D., Millard S., Bungey J. Galvanostatic Pulse Measurements of Passive and Active Reinforcing Steel in Concrete // *Corrosion*. – 2000. – Vol. 56, No. 1. – P. 48-56.
- 124 Бобров П., Беляева Т., Крошка Е., Родионова О. Диэлектрическая спектроскопия слабозасоленных песков // *Геология и геофизика*. – 2022. – Т. 63, № 7. – С. 988-1004.
- 125 Wakamatsu H. A dielectric spectrometer for liquid using the electromagnetic induction method // *Hewlett-Packard Journal*. – 1997. – P. 37-44.
- 126 Emmert S., Wolf M., Gulich R., Krohns S., Kastner S., Lunkenheimer P., Loidl A. Electrode Polarization Effects in Broadband Dielectric Spectroscopy // *The European Physical Journal B*. – 2011. – Vol. 83. – P. 157-165.
- 127 Дяденко М., Быченко Д., Василевич Е., Горохов Г., Сидоревич А. Высоочастотные электромагнитные свойства боросиликатных стекол с добавками La_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. – 2022. – Т. 65, № 9. – С. 55-63.
- 128 Григорьев И., Мейлихова Е. Физические величины. Справочник. – Москва: Энергоатомиздат, 1991.
- 129 Гапеев А. А., Черепецкая Е. Б., Кудинов И. А., Семенов Я. Г., Васильевых В. В. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости и удельной проводимости пород-коллекторов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2024. – № 9. – С. 117–128. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_9_0_117.
- 130 Knight R., Nur A. Geometrical effects in the dielectric response of partially saturated sandstones // *The Log Analyst*. – 1987. – Vol. 28, No. 6. – P. 513-519.

131 Kenyon W. Texture Effects on Megahertz Dielectric Properties of Calcite Rock Samples // Journal of Applied Physics. – 1984. – Vol. 55, No. 8. – P. 3153-3159.

132 Atif M. Studies on the magnetic, magnetostrictive and electrical properties of sol–gel synthesized Zn doped nickel ferrite // Journal of Alloys and Compounds. – 2011. – Vol. 509, No. 18. – P. 5720-5724.

133 Гапеев А.А. Экспериментальные исследования комплексной диэлектрической проницаемости гранита и известняка в сухом и водонасыщенном состоянии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 1. – С. 114-127. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_1_0_114.

134 Гапеев А.А. Дисперсия диэлектрической проницаемости и удельной проводимости карбонатных горных пород // Труды РАНМИИ. – Донецк, 2024. – № 3 (41). – Том 1. – 288 с.

135 Olhoeft G. Electrical properties of natural clay permafrost // Canadian Journal of Earth Sciences. – 2011. – Vol. 14, No. 1. – P. 16-24.

136 Гапеев А.А. Исследование диэлектрической проницаемости осадочных горных пород при отрицательной температуре // Вестник науки, 2025. – № 9 (90). – Том 4. – С. 731-740.

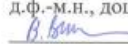
ПРИЛОЖЕНИЕ А

РАЗРАБОТАННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И УДЕЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД НА ОБРАЗЦАХ НЕПРАВИЛЬНОЙ ФОРМЫ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
НИТУ МИСИС,
д-р техн. наук, профессор
 М.Р. Филонов
2024 г.

Методика определения диэлектрической проницаемости и удельной
проводимости горных пород на образцах неправильной формы
в лабораторных условиях

Заведующий кафедрой ФизГео,
д.ф.-м.н., доцент
 В.А. Винников

Профессор кафедры ФизГео,
д.т.н., профессор
 Е.Б. Черепецкая

Инженер научного проекта
 И.А. Кудинов

Инженер научного проекта,
аспирант кафедры ФизГео
 А.А. Гапеев

г. Москва, 2024

Рисунок А.1 – Титульный лист разработанной методики

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ	3
1.1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	3
1.2 ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ	3
2 НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	3
3 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К УСЛОВИЯМ, ОБЕСПЕЧЕНИЮ И ПРОВЕДЕНИЮ ИСПЫТАНИЙ	4
4 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ.....	6
4.1 Подготовка к испытанию	6
4.2 Порядок проведения испытания.....	7
4.3 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ	8

Рисунок А.2 – Разработанная методика

1 НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

1.1 Общие положения

Настоящий документ устанавливает порядок и алгоритм проведения испытаний по определению диэлектрической проницаемости и удельной проводимости твердых горных пород в лабораторных условиях.

Настоящий документ разработан и основан на ГОСТ 25495-82 «Породы горные. Метод определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь» и ГОСТ 25494-82 «Породы горные. Метод определения удельного электрического сопротивления».

Настоящий документ устанавливает метод определения диэлектрической проницаемости и удельной проводимости в диапазоне частот от 20 Гц до 200 кГц для контроля качества минерального сырья.

Настоящий документ может быть применен при невозможности изготовления образцов необходимой формы и размеров по ГОСТ 25495-82.

1.2 Объект испытаний

Объектами испытаний являются образцы твердых (консолидированных) горных пород.

2 НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей методике использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

- ГОСТ 25495-82 Породы горные. Метод определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь;
- ГОСТ 25494-82 Породы горные. Метод определения удельного электрического сопротивления;
- ГОСТ 6507-90 Микрометры. Технические условия.

Рисунок А.3 – Разработанная методика

3 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К УСЛОВИЯМ, ОБЕСПЕЧЕНИЮ И ПРОВЕДЕНИЮ ИСПЫТАНИЙ

3.1 Условия испытаний

Испытания должны проводиться в лаборатории при следующих климатических условиях:

- температура окружающего воздуха от +15 до +25 °С;
- относительная влажность воздуха от 40 до 80 % при +25 °С.

Отопление и вентиляция должны соответствовать требованиям СНиП 41-01 и санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам СанПиН 2.2.4.3359-16.

Освещение должно соответствовать требованиям СП 52.13330.2016.

3.2 Средства испытаний и оборудование

При проведении испытаний должны применяться следующие средства измерений и оборудование:

– прецизионный анализатор компонентов RLC-Meter, обеспечивающий возможность измерения RLC параметров в широком диапазоне (типа АКТАКОМ АММ-3046 или другой), отвечающий требованиям:

- измеряемая емкость конденсатора C – 0,00001 пФ...9,99999 Ф;
 - измеряемая проводимость G – 0,00001 мкСм..99,9999 См;
 - возможность установки тестовой частоты в диапазоне от 20 Гц до 200 кГц (или больше), точность установки – 0,01 % или лучше;
 - напряжение тестового сигнала – от 10 мВ до 2 В.
- 4-х проводной модуль с двумя зажимами типа АСА-3012;
 - медная фольга с проводящим клейким слоем скотча;
 - паяльная станция;
 - микрометр с пределом измерения от 0 до 25 мм, с ценой деления 0,01 по ГОСТ 6507-90;

Рисунок А.4 – Разработанная методика

- шкаф сушильный;
- вспомогательное оборудование для подготовки образцов:
 - отрезной станок;
 - шлифовально-полировальный станок.

3.3 Требования к персоналу, осуществляющему подготовку к испытанию и испытание

К подготовке и проведению испытаний допускаются лица, прошедшие инструктаж по охране труда и промышленной безопасности, изучившие эксплуатационную документацию используемых технических средств, а также настоящую методику испытаний.

3.4 Требования безопасности

При проведении испытаний должны быть соблюдены требования охраны труда для защиты персонала от поражения электрическим током.

Запрещается проводить испытания:

- при неисправности системы электропитания;
- при неисправности контрольно-измерительных приборов, если нет возможности определить параметры по другим приборам;
- при поврежденной изоляции проводов.

При подключении и эксплуатации комплектующих необходимо соблюдать требования следующих нормативных документов:

- правила эксплуатации технических средств;
- правила по охране труда;
- ГОСТ 12.2.003-91 Система безопасности труда. Оборудование производственное. Общие требования безопасности;
- правила противопожарного режима, утвержденные постановлением Правительства РФ от 16.09.2020 N 1479.

Рисунок А.5 – Разработанная методика

4 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Данная методика устанавливает возможность использования в качестве образцов для испытаний как образцы горной породы в виде керна, так и образцов неправильной формы.

Измерение диэлектрической проницаемости и проводимости образцов производится по схеме измерения емкости и потерь двухэлектродного плоскопараллельного конденсатора с учетом краевых эффектов.

В качестве диэлектрического материала, свойства которого измеряются, выступают образцы горной породы. Значение диэлектрической проницаемости образцов определяется из значений измеренной емкости. Значение удельной проводимости образцов определяют из значений измеренной проводимости.

4.1 Подготовка к испытанию

Образцы горных пород изготавливают в виде пластин неправильной формы или дисков, толщина образцов для испытаний должна быть в диапазоне от 3,5 мм до 7 мм.

Образцы шлифуют до снятия видимых дефектов. Рабочие поверхности не должны иметь дефектов (сколов, трещин и т.д.), внесенных резкой образцов.

Толщину образца измеряют микрометром и определяют как среднее арифметическое результатов не менее 5 измерений в разных точках по поверхности образца. Допускаемое отклонение параллельности двух плоскостей 0,05 мм. При превышении допускаемого отклонения необходимо произвести дополнительную операцию шлифования для того, чтобы добиться необходимой параллельности плоскостей, и вновь повторить измерения толщины образца.

Рисунок А.6 – Разработанная методика

Образцы, предназначенные для испытания, сушат до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 105-110 °С, затем оставляют их на 12-24 часа в нормальных условиях.

Для возможности подключения образцов в схему для измерения емкости и проводимости изготавливаются электроды из медной фольги с проводящим клейким слоем скотча и медной проволоки. Для этого из медной фольги изготавливаются две пластины прямоугольной формы со сторонами *a* и *b*, на которые при помощи паяльной станции припаиваются медные провода.

Перед процедурой наклеивания на образцы медной фольги с проводящим клейким слоем скотча поверхность образцов обезжиривают.

Далее производится процедура наклеивания с двух сторон образца данных электродов друг напротив друга. Добиваются, чтобы между поверхностью образца и скотчем не осталось воздушных пузырьков.

Прецизионный анализатор компонентов RLC-Meter подключают к сети и прогревают в течение 15-30 минут перед проведением испытаний.

4.2 Порядок проведения испытания

Устанавливают на прецизионном анализаторе компонентов RLC-Meter напряжение тестового сигнала, равное 1 В.

Для дальнейшей обработки и учета паразитных значений емкости и проводимости необходимо снять данные значения на воздухе без образца при всех требуемых частотах. Записать паразитные значения в ведомость измерений.

Для проведения испытаний образца подключают электроды с образцом при помощи 4-х проводного модуля с двумя зажимами к прецизионному анализатору компонентов RLC-Meter. Устанавливают на приборе требуемую частоту. Снятие показаний емкости и проводимости производится через 1 минуту после подключения образца к прецизионному анализатору компонентов RLC-Meter.

Рисунок А.7 – Разработанная методика

Изменяют тестовую частоту на прецизионном анализаторе компонентов RLC-Meter и проводят следующее измерение.

Результаты измерений $C_{изм}$ и $G_{изм}$ заносят в ведомость измерений для дальнейшей обработки.

4.3 Обработка результатов измерений

Для расчетов диэлектрической проницаемости используется формула для вычисления емкости плоского конденсатора с прямоугольными электродами с учетом краевых эффектов и с учетом паразитной емкости:

$$C_{изм} - C_{паразит} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon' ab}{d} F_x, \quad (1)$$

где $C_{изм}$ – измеренная при помощи прецизионного анализатора компонентов RLC-Meter емкость конденсатора, Ф;

a, b – размеры электрода, м;

d – расстояние между электродами, являющееся толщиной образца, вносимого в схему измерения в качестве диэлектрика, м;

ε_0 – электрическая постоянная, принимаемая $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

ε' – диэлектрическая проницаемость,

$$\varepsilon' = \frac{(C_{изм} - C_{паразит})d}{\varepsilon_0 ab F_x}, \quad (2)$$

где $C_{паразит}$ – измеренная паразитная емкость, Ф;

F_x – поправочный коэффициент, зависящий от размеров применяемых электродов, определяемый по формуле:

$$F_x = 1 + \frac{d}{\pi b} \left[1 + \ln \left[2\pi \left(\frac{b}{d} + \frac{3}{4} \left(1 + \frac{b}{a} \right) \right) \right] \right] + \frac{d}{\pi a} \left[1 + \ln \left[2\pi \left(\frac{a}{d} + \frac{3}{4} \left(1 + \frac{a}{b} \right) \right) \right] \right] \quad (3)$$

Формула для вычисления удельной проводимости с учетом измеренного значения проводимости и измеренного значения паразитного сигнала имеет вид:

$$G_{уд} = (G_{изм} - G_{паразит}) * \frac{ab}{d}, \quad (4)$$

где $G_{уд}$ – удельная проводимость образца, мкСм·м;

$G_{изм}$ – измеренная проводимость, мкСм;

Рисунок А.8 – Разработанная методика

$G_{\text{паразит}}$ – измеренная паразитная проводимость, мкСм.

Значения диэлектрической проницаемости и удельной проводимости вычисляются как среднее арифметическое n измерений (n не менее 5) по формулам:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sum_{l=1}^n \epsilon_l}{n}, \quad (5)$$

$$\overline{G_{\text{уд}}} = \frac{\sum_{l=1}^n G_{\text{уд}l}}{n}. \quad (6)$$

Рисунок А.9 – Разработанная методика

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ИЗМЕРЕННЫЕ И ВЫЧИСЛЕННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Таблица Б.1 – Расчетные значения диэлектрических и электрических свойств образцов серии О.1 в сухом состоянии

Частота, кГц	Действительная часть ДП $\varepsilon'_{0.1}$		Мнимая часть ДП $\varepsilon''_{0.1}$		Тангенс диэлектрических потерь $tg \delta_{0.1}$		Удельная электропроводность $\sigma'_{0.1}$, мкСм/м	
	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО
0,12	26,2	1,6	8,3	0,9	0,34	0,05	0,06	0,01
0,24	22,1	1,1	8,3	0,8	0,42	0,05	0,11	0,02
0,36	20,0	0,9	8,3	0,8	0,46	0,05	0,17	0,03
0,48	18,6	0,7	8,3	0,9	0,49	0,06	0,22	0,03
0,60	17,6	0,7	8,2	0,9	0,52	0,06	0,27	0,04
0,72	16,7	0,6	8,1	0,9	0,54	0,06	0,33	0,05
0,84	16,0	0,6	8,0	0,8	0,55	0,06	0,38	0,06
1,0	15,3	0,5	7,9	0,8	0,57	0,06	0,44	0,07
2,0	12,5	0,4	7,1	0,7	0,60	0,06	0,78	0,12
3,0	11,2	0,3	6,4	0,7	0,60	0,06	1,1	0,17
4,0	10,4	0,3	5,9	0,6	0,59	0,06	1,3	0,20
5,0	9,8	0,3	5,5	0,6	0,58	0,06	1,5	0,23
6,0	9,4	0,3	5,1	0,5	0,57	0,05	1,7	0,26
7,0	9,0	0,3	4,9	0,5	0,55	0,05	1,9	0,29
8,0	8,8	0,3	4,7	0,5	0,54	0,05	2,1	0,31
9,0	8,6	0,2	4,5	0,4	0,53	0,05	2,2	0,33
10	8,4	0,2	4,3	0,4	0,52	0,05	2,4	0,35
11,5	8,2	0,2	4,1	0,4	0,51	0,05	2,6	0,39
12,5	8,1	0,2	4,0	0,4	0,51	0,05	2,8	0,41
13,5	7,9	0,2	3,9	0,4	0,50	0,05	2,9	0,42
15	7,8	0,2	3,7	0,4	0,49	0,05	3,1	0,45
15,8	7,7	0,2	3,7	0,4	0,48	0,05	3,2	0,47
16,7	7,7	0,2	3,6	0,3	0,48	0,05	3,3	0,48
17,7	7,6	0,2	3,5	0,3	0,47	0,05	3,5	0,50
18,8	7,5	0,2	3,4	0,3	0,47	0,04	3,6	0,52
20	7,4	0,2	3,4	0,3	0,46	0,04	3,7	0,53
21,5	7,3	0,2	3,3	0,3	0,45	0,04	3,9	0,56
23	7,2	0,2	3,2	0,3	0,45	0,04	4,1	0,58
25	7,1	0,2	3,1	0,3	0,44	0,04	4,3	0,61
26	7,1	0,2	3,0	0,3	0,44	0,04	4,4	0,62
27	7,0	0,2	3,0	0,3	0,43	0,04	4,5	0,63
28,5	6,9	0,2	2,9	0,3	0,43	0,04	4,7	0,65
30	6,9	0,2	2,9	0,3	0,42	0,04	4,8	0,67
31,5	6,9	0,2	2,8	0,3	0,41	0,04	4,9	0,69
33	6,8	0,2	2,8	0,3	0,41	0,04	5,1	0,70
35	6,7	0,2	2,7	0,2	0,41	0,04	5,3	0,73
37,5	6,7	0,2	2,7	0,2	0,40	0,04	5,5	0,76

40	6,6	0,2	2,6	0,2	0,39	0,04	5,8	0,79
43	6,5	0,2	2,5	0,2	0,39	0,04	6,0	0,83
46	6,5	0,2	2,5	0,2	0,38	0,04	6,3	0,86
50	6,4	0,2	2,4	0,2	0,38	0,04	6,7	0,90
52	6,3	0,2	2,4	0,2	0,37	0,04	6,8	0,92
54,5	6,3	0,2	2,3	0,2	0,37	0,04	7,0	0,95
57	6,3	0,2	2,3	0,2	0,36	0,03	7,2	0,97
60	6,2	0,2	2,2	0,2	0,36	0,03	7,4	1,0
63	6,2	0,2	2,2	0,2	0,35	0,03	7,7	1,0
67	6,2	0,2	2,1	0,2	0,35	0,03	8,0	1,1
70,5	6,1	0,2	2,1	0,2	0,35	0,03	8,3	1,1
75	6,1	0,2	2,1	0,2	0,34	0,03	8,6	1,2
80	6,0	0,2	2,0	0,2	0,34	0,03	9,0	1,2
85	6,0	0,2	2,0	0,2	0,33	0,03	9,3	1,2
92	5,9	0,2	1,9	0,2	0,33	0,03	9,9	1,3
100	5,9	0,2	1,9	0,2	0,32	0,03	10,4	1,4
105	5,8	0,2	1,9	0,2	0,32	0,03	10,8	1,4
110	5,8	0,2	1,8	0,2	0,31	0,03	11,2	1,5
115	5,8	0,2	1,8	0,2	0,31	0,03	11,5	1,5
120	5,8	0,2	1,8	0,2	0,31	0,03	11,8	1,6
126	5,7	0,1	1,7	0,2	0,30	0,03	12,2	1,6
133	5,7	0,1	1,7	0,1	0,30	0,03	12,7	1,7
141	5,7	0,1	1,7	0,1	0,30	0,03	13,2	1,7
150	5,7	0,1	1,7	0,1	0,29	0,03	13,8	1,8
160	5,6	0,1	1,6	0,1	0,29	0,03	14,5	1,9
171	5,6	0,1	1,6	0,1	0,28	0,03	15,2	2,0
184	5,6	0,1	1,6	0,1	0,28	0,03	16,0	2,1
200	5,6	0,1	1,5	0,1	0,27	0,03	17,1	2,2
300	5,6	0,1	1,5	0,1	0,26	0,03	24,7	3,3
400	5,6	0,1	1,4	0,1	0,26	0,03	32,3	4,4
500	5,6	0,1	1,4	0,1	0,25	0,03	39,8	5,5
600	5,6	0,1	1,4	0,1	0,25	0,03	47,4	6,6
700	5,6	0,1	1,4	0,1	0,25	0,03	54,1	7,7
800	5,6	0,1	1,4	0,1	0,24	0,03	61,4	8,8
900	5,6	0,1	1,4	0,1	0,24	0,03	68,6	9,9
1000	5,6	0,1	1,4	0,1	0,24	0,03	75,7	11,1

Таблица Б.2 – Расчетные значения диэлектрических и электрических свойств образцов серии О.2 в сухом состоянии

Частота, кГц	Действительная часть ДП $\epsilon'_{0.2}$		Мнимая часть ДП $\epsilon''_{0.2}$		Тангенс диэлектрических потерь $tg \delta_{0.2}$		Удельная электропроводность $\sigma'_{0.2}$, мкСм/м	
	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО
0,12	162,1	9,4	44,6	3,6	0,27	0,02	1,1	0,2
0,24	147,6	8,1	48,5	3,6	0,33	0,02	2,0	0,4
0,36	140,1	7,4	52,2	3,8	0,37	0,02	2,8	0,6
0,48	135,0	7,0	55,0	4,0	0,41	0,02	3,6	0,7
0,60	131,1	6,7	57,4	4,3	0,44	0,01	4,4	0,9
0,72	127,9	6,4	59,2	4,5	0,46	0,01	5,1	1,0
0,84	125,2	6,2	60,7	4,7	0,48	0,01	5,9	1,2
1,0	122,1	6,0	62,2	5,0	0,51	0,01	6,8	1,4
2,0	108,7	5,2	65,2	5,9	0,59	0,02	12,1	2,5
3,0	99,9	4,8	63,5	6,2	0,62	0,03	16,7	3,4
4,0	93,3	4,5	60,6	6,1	0,64	0,04	20,8	4,2
5,0	87,6	4,2	57,3	5,9	0,64	0,04	24,4	4,9
6,0	82,7	4,0	53,9	5,6	0,64	0,04	27,6	5,5
7,0	78,4	3,8	50,8	5,3	0,63	0,04	30,5	6,0
8,0	74,8	3,6	48,2	5,0	0,63	0,04	33,3	6,5
9,0	71,6	3,4	45,7	4,7	0,62	0,04	35,8	6,9
10	68,8	3,2	43,5	4,5	0,62	0,04	38,3	7,2
11,5	65,8	3,0	41,1	4,2	0,61	0,04	42,1	7,8
12,5	63,6	2,9	39,4	4,0	0,61	0,04	44,2	8,1
13,5	61,2	2,8	37,5	3,8	0,60	0,04	46,0	8,3
15	58,6	2,6	35,5	3,5	0,59	0,04	48,9	8,7
15,8	57,2	2,5	34,4	3,4	0,59	0,04	50,3	8,8
16,7	55,8	2,4	33,3	3,3	0,59	0,04	51,9	9,0
17,7	54,3	2,3	32,2	3,1	0,58	0,04	53,5	9,2
18,8	52,8	2,2	31,0	3,0	0,58	0,04	55,2	9,3
20	51,2	2,1	29,8	2,8	0,57	0,04	56,9	9,5
21,5	49,5	2,0	28,5	2,7	0,57	0,04	59,2	9,7
23	47,7	1,9	27,1	2,5	0,56	0,04	61,1	9,8
25	45,8	1,8	25,7	2,3	0,55	0,04	63,8	10,0
26	44,7	1,7	24,9	2,2	0,55	0,04	64,6	10,0
27	43,7	1,7	24,2	2,2	0,55	0,04	65,6	10,0
28,5	42,7	1,6	23,4	2,1	0,54	0,04	67,6	10,2
30	41,6	1,5	22,6	2,0	0,54	0,04	69,5	10,3
31,5	40,6	1,5	21,9	1,9	0,53	0,04	71,1	10,3
33	39,5	1,4	21,1	1,8	0,53	0,04	72,5	10,3
35	38,4	1,3	20,3	1,7	0,52	0,04	74,7	10,4
37,5	37,2	1,3	19,5	1,6	0,52	0,03	77,6	10,6
40	36,0	1,2	18,6	1,5	0,51	0,03	80,2	10,7
43	34,8	1,1	17,8	1,4	0,51	0,03	83,3	10,8
46	33,6	1,0	16,9	1,3	0,50	0,03	85,9	10,9
50	32,3	1,0	16,1	1,2	0,49	0,03	89,8	11,0
52	31,6	0,9	15,6	1,2	0,49	0,03	91,5	11,0
54,5	31,0	0,9	15,2	1,1	0,49	0,03	93,9	11,1
57	30,3	0,8	14,7	1,1	0,48	0,03	96,1	11,2

60	29,6	0,8	14,2	1,0	0,48	0,03	99,0	11,3
63	28,9	0,8	13,8	1,0	0,47	0,03	101,4	11,3
67	28,2	0,7	13,3	0,9	0,47	0,03	105,2	11,5
70,5	27,5	0,7	12,9	0,9	0,46	0,03	107,9	11,5
75	26,8	0,6	12,4	0,8	0,46	0,03	111,7	11,6
80	26,0	0,6	11,9	0,8	0,45	0,03	115,8	11,7
85	25,3	0,6	11,4	0,7	0,45	0,03	119,5	11,7
92	24,5	0,5	10,9	0,7	0,44	0,03	125,4	11,9
100	23,7	0,5	10,4	0,6	0,44	0,03	131,9	12,1
105	23,3	0,5	10,2	0,6	0,43	0,03	136,2	12,3
110	22,9	0,4	9,9	0,6	0,43	0,02	140,2	12,4
115	22,5	0,4	9,7	0,6	0,43	0,02	144,0	12,5
120	22,1	0,4	9,4	0,5	0,42	0,02	147,5	12,6
126	21,7	0,4	9,2	0,5	0,42	0,02	151,9	12,6
133	21,3	0,4	8,9	0,5	0,42	0,02	157,3	12,8
141	20,8	0,4	8,6	0,5	0,41	0,02	163,5	13,0
150	20,4	0,3	8,4	0,4	0,41	0,02	170,6	13,2
160	20,0	0,3	8,1	0,4	0,40	0,02	178,0	13,4
171	19,6	0,3	7,9	0,4	0,40	0,02	186,3	13,7
184	19,2	0,3	7,6	0,4	0,39	0,02	196,4	14,0
200	18,8	0,3	7,3	0,4	0,39	0,02	209,6	14,5
300	18,5	0,3	7,1	0,3	0,38	0,02	309,1	21,3
400	18,2	0,3	6,8	0,3	0,37	0,02	404,9	27,6
500	17,9	0,3	6,5	0,3	0,36	0,02	497,0	33,7
600	17,7	0,3	6,4	0,3	0,36	0,02	591,0	40,0
700	17,5	0,3	6,3	0,3	0,36	0,02	683,1	46,3
800	17,4	0,3	6,2	0,3	0,36	0,02	773,4	52,5
900	17,2	0,3	6,1	0,3	0,35	0,02	861,9	58,7
1000	17,1	0,3	6,0	0,3	0,35	0,02	948,6	64,9

Таблица Б.3 – Расчетные значения диэлектрических и электрических свойств образцов серии О.3 в сухом состоянии

Частота, кГц	Действительная часть ДП $\epsilon'_{0.3}$		Мнимая часть ДП $\epsilon''_{0.3}$		Тангенс диэлектрических потерь $tg \delta_{0.3}$		Удельная электропроводность $\sigma'_{0.3}$, мкСм/м	
	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО
0,12	10,6	2,5	2,66	0,40	0,248	0,024	0,018	0,003
0,24	9,3	2,1	2,42	0,39	0,251	0,028	0,03	0,01
0,36	8,5	1,9	2,30	0,38	0,255	0,031	0,05	0,01
0,48	8,1	1,7	2,16	0,35	0,252	0,030	0,06	0,01
0,60	7,7	1,5	2,06	0,34	0,251	0,032	0,07	0,01
0,72	7,4	1,4	1,98	0,33	0,252	0,031	0,08	0,02
0,84	7,2	1,3	1,92	0,31	0,249	0,031	0,09	0,02
1,0	6,9	1,2	1,82	0,29	0,248	0,027	0,10	0,02
2,0	6,0	0,9	1,50	0,25	0,234	0,031	0,17	0,03
3,0	5,5	0,7	1,30	0,21	0,220	0,029	0,22	0,04
4,0	5,3	0,6	1,20	0,19	0,212	0,030	0,27	0,05
5,0	5,1	0,6	1,11	0,18	0,206	0,028	0,31	0,06
6,0	4,9	0,5	1,05	0,17	0,201	0,028	0,35	0,06
7,0	4,8	0,5	0,99	0,16	0,195	0,028	0,39	0,07
8,0	4,7	0,4	0,95	0,15	0,190	0,027	0,42	0,08
9,0	4,6	0,4	0,91	0,14	0,186	0,027	0,46	0,08
10	4,6	0,4	0,88	0,13	0,184	0,025	0,49	0,09
11,5	4,5	0,4	0,84	0,13	0,178	0,026	0,54	0,10
12,5	4,5	0,4	0,82	0,12	0,176	0,025	0,57	0,10
13,5	4,4	0,3	0,79	0,12	0,172	0,024	0,60	0,10
15	4,4	0,3	0,77	0,11	0,169	0,024	0,64	0,11
15,8	4,3	0,3	0,75	0,11	0,167	0,023	0,66	0,11
16,7	4,3	0,3	0,74	0,11	0,165	0,023	0,69	0,12
17,7	4,3	0,3	0,73	0,11	0,163	0,023	0,72	0,12
18,8	4,3	0,3	0,71	0,10	0,160	0,022	0,74	0,12
20	4,2	0,3	0,70	0,10	0,160	0,023	0,78	0,13
21,5	4,2	0,3	0,68	0,10	0,155	0,022	0,81	0,14
23	4,2	0,3	0,66	0,09	0,154	0,021	0,85	0,14
25	4,1	0,3	0,65	0,10	0,151	0,022	0,91	0,15
26	4,1	0,3	0,64	0,09	0,149	0,021	0,92	0,15
27	4,1	0,2	0,63	0,09	0,150	0,020	0,95	0,15
28,5	4,1	0,2	0,62	0,09	0,148	0,020	0,98	0,16
30	4,0	0,2	0,59	0,09	0,143	0,020	0,99	0,17
31,5	4,0	0,2	0,60	0,08	0,144	0,019	1,05	0,16
33	4,0	0,2	0,58	0,08	0,140	0,019	1,06	0,17
35	4,0	0,2	0,56	0,08	0,137	0,019	1,09	0,18
37,5	3,9	0,2	0,56	0,08	0,136	0,019	1,16	0,19
40	3,9	0,2	0,54	0,07	0,134	0,018	1,21	0,19
43	3,9	0,2	0,53	0,07	0,131	0,018	1,26	0,20
46	3,9	0,2	0,51	0,07	0,128	0,018	1,31	0,21
50	3,8	0,2	0,50	0,07	0,126	0,017	1,39	0,22
52	3,8	0,2	0,49	0,06	0,125	0,017	1,42	0,22
54,5	3,8	0,2	0,48	0,06	0,123	0,016	1,46	0,22
57	3,8	0,2	0,47	0,06	0,120	0,016	1,48	0,23

60	3,8	0,2	0,45	0,06	0,117	0,016	1,52	0,24
63	3,8	0,2	0,45	0,06	0,117	0,016	1,58	0,25
67	3,8	0,2	0,44	0,06	0,115	0,016	1,64	0,25
70,5	3,7	0,2	0,43	0,06	0,113	0,015	1,69	0,26
75	3,7	0,1	0,42	0,05	0,112	0,015	1,77	0,26
80	3,7	0,1	0,41	0,05	0,109	0,015	1,84	0,28
85	3,7	0,1	0,40	0,05	0,107	0,014	1,91	0,29
92	3,7	0,1	0,39	0,05	0,105	0,014	2,00	0,30
100	3,7	0,1	0,38	0,05	0,102	0,013	2,11	0,31
105	3,6	0,1	0,37	0,05	0,100	0,013	2,18	0,32
110	3,6	0,1	0,37	0,05	0,099	0,013	2,25	0,33
115	3,6	0,1	0,36	0,05	0,097	0,013	2,31	0,34
120	3,6	0,1	0,35	0,04	0,096	0,013	2,36	0,35
126	3,6	0,1	0,35	0,04	0,094	0,012	2,43	0,35
133	3,6	0,1	0,34	0,04	0,092	0,012	2,51	0,36
141	3,6	0,1	0,33	0,04	0,091	0,012	2,61	0,37
150	3,6	0,1	0,32	0,04	0,089	0,012	2,71	0,39
160	3,6	0,1	0,32	0,04	0,087	0,011	2,82	0,40
171	3,6	0,1	0,31	0,04	0,084	0,011	2,94	0,42
184	3,6	0,1	0,30	0,04	0,082	0,011	3,08	0,43
200	3,6	0,1	0,29	0,04	0,080	0,010	3,26	0,46
300	3,6	0,1	0,25	0,03	0,072	0,010	4,11	0,64
400	3,6	0,1	0,23	0,03	0,069	0,010	5,12	0,86
500	3,6	0,1	0,23	0,03	0,067	0,010	6,26	1,05
600	3,6	0,1	0,22	0,03	0,065	0,009	7,35	1,23
700	3,6	0,1	0,22	0,03	0,063	0,009	8,38	1,41
800	3,6	0,1	0,21	0,03	0,062	0,009	9,36	1,58
900	3,6	0,1	0,20	0,03	0,061	0,009	10,24	1,74
1000	3,6	0,1	0,20	0,03	0,060	0,009	11,12	1,89

Таблица Б.4 – Расчетные значения диэлектрических и электрических свойств образцов серии О.4 в сухом состоянии

Частота, кГц	Действительная часть ДП $\epsilon'_{0.4}$		Мнимая часть ДП $\epsilon''_{0.4}$		Тангенс диэлектрических потерь $tg \delta_{0.4}$		Удельная электропроводность $\sigma'_{0.4}$, мкСм/м	
	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО
0,12	32,1	2,4	21,7	2,2	0,67	0,03	0,15	0,02
0,24	24,1	1,4	16,2	1,8	0,67	0,04	0,22	0,03
0,36	20,7	1,0	13,5	1,5	0,65	0,05	0,27	0,03
0,48	18,7	0,8	11,7	1,3	0,62	0,05	0,31	0,03
0,60	17,4	0,7	10,5	1,1	0,6	0,05	0,35	0,04
0,72	16,4	0,6	9,6	1	0,58	0,05	0,38	0,04
0,84	15,7	0,5	8,9	0,9	0,57	0,05	0,42	0,04
1,0	14,9	0,5	8,1	0,8	0,55	0,04	0,45	0,05
2,0	12,4	0,4	5,8	0,5	0,47	0,03	0,64	0,05
3,0	11,3	0,3	4,8	0,4	0,42	0,03	0,80	0,06
4,0	10,6	0,3	4,2	0,3	0,4	0,03	0,94	0,07
5,0	10,2	0,3	3,8	0,3	0,38	0,02	1,06	0,07
6,0	9,8	0,3	3,5	0,2	0,36	0,02	1,18	0,07
7,0	9,5	0,3	3,3	0,2	0,35	0,02	1,29	0,08
8,0	9,3	0,3	3,1	0,2	0,34	0,02	1,39	0,08
9,0	9,1	0,3	3	0,2	0,33	0,02	1,50	0,08
10	9,0	0,3	2,9	0,2	0,32	0,01	1,60	0,08
11,5	8,8	0,3	2,8	0,1	0,31	0,01	1,76	0,08
12,5	8,7	0,3	2,7	0,1	0,31	0,01	1,85	0,09
13,5	8,6	0,3	2,6	0,1	0,3	0,01	1,93	0,08
15	8,4	0,3	2,5	0,1	0,3	0,01	2,07	0,09
15,8	8,4	0,3	2,4	0,1	0,29	0,01	2,14	0,09
16,7	8,3	0,3	2,4	0,1	0,29	0,01	2,21	0,09
17,7	8,2	0,3	2,3	0,1	0,28	0,01	2,29	0,09
18,8	8,2	0,3	2,3	0,1	0,28	0,01	2,38	0,09
20	8,1	0,2	2,2	0,1	0,28	0,01	2,48	0,1
21,5	8,0	0,2	2,2	0,1	0,27	0,01	2,60	0,11
23	7,9	0,2	2,1	0,1	0,27	0,01	2,71	0,11
25	7,9	0,2	2,1	0,1	0,27	0,01	2,90	0,12
26	7,8	0,2	2,1	0,1	0,26	0,01	2,97	0,12
27	7,7	0,2	2	0,1	0,26	0,01	3,03	0,13
28,5	7,7	0,2	2	0,1	0,26	0,01	3,14	0,14
30	7,6	0,2	1,9	0,1	0,25	0,01	3,20	0,13
31,5	7,6	0,2	1,9	0,1	0,25	0,01	3,33	0,13
33	7,5	0,2	1,8	0,1	0,25	0,01	3,38	0,16
35	7,4	0,2	1,8	0,1	0,24	0,01	3,53	0,16
37,5	7,4	0,2	1,8	0,1	0,24	0,01	3,70	0,17
40	7,3	0,2	1,7	0,1	0,24	0,01	3,85	0,18
43	7,2	0,2	1,7	0,1	0,23	0,01	4,03	0,19
46	7,2	0,2	1,6	0,1	0,23	0,01	4,20	0,21
50	7,1	0,2	1,6	0,1	0,23	0,01	4,44	0,22
52	7,1	0,2	1,6	0,1	0,22	0,01	4,55	0,24
54,5	7,0	0,2	1,5	0,1	0,22	0,01	4,68	0,25
57	7,0	0,2	1,5	0,1	0,21	0,01	4,77	0,27

60	7,0	0,2	1,5	0,1	0,21	0,01	4,91	0,29
63	6,9	0,2	1,4	0,1	0,21	0,01	5,10	0,29
67	6,9	0,2	1,4	0,1	0,21	0,01	5,31	0,32
70,5	6,8	0,2	1,4	0,1	0,2	0,01	5,47	0,33
75	6,8	0,2	1,4	0,1	0,2	0,01	5,70	0,36
80	6,7	0,2	1,3	0,1	0,2	0,01	5,94	0,39
85	6,7	0,2	1,3	0,1	0,2	0,01	6,16	0,41
92	6,6	0,2	1,3	0,1	0,19	0,01	6,49	0,44
100	6,6	0,2	1,2	0,1	0,19	0,01	6,85	0,47
105	6,6	0,2	1,2	0,1	0,18	0,01	7,08	0,5
110	6,5	0,2	1,2	0,1	0,18	0,01	7,30	0,52
115	6,5	0,2	1,2	0,1	0,18	0,01	7,50	0,54
120	6,5	0,1	1,1	0,1	0,18	0,01	7,69	0,57
126	6,5	0,1	1,1	0,1	0,18	0,01	7,93	0,59
133	6,4	0,1	1,1	0,1	0,17	0,01	8,21	0,62
141	6,4	0,1	1,1	0,1	0,17	0,01	8,5	0,7
150	6,4	0,1	1,1	0,1	0,17	0,01	8,9	0,79
160	6,4	0,1	1,0	0,1	0,16	0,01	9,3	0,7
171	6,4	0,1	1,0	0,1	0,16	0,01	9,7	0,8
184	6,4	0,1	1,0	0,1	0,16	0,01	10,2	0,8
200	6,4	0,1	1,0	0,1	0,15	0,01	10,8	0,9
300	6,4	0,1	0,9	0,1	0,14	0,01	15,1	1,3
400	6,4	0,1	0,8	0,1	0,13	0,01	18,7	1,8
500	6,4	0,1	0,8	0,1	0,13	0,01	22	2
600	6,4	0,1	0,8	0,1	0,13	0,01	26	2
700	6,4	0,1	0,8	0,1	0,12	0,01	30	3
800	6,3	0,1	0,8	0,1	0,12	0,01	34	3
900	6,3	0,1	0,8	0,1	0,12	0,01	38	4
1000	6,3	0,1	0,7	0,1	0,12	0,01	41	4

Таблица Б.5 – Расчетные значения диэлектрических и электрических свойств образцов серии О.5 в сухом состоянии

Частота, кГц	Действительная часть ДП $\varepsilon'_{0.5}$		Мнимая часть ДП $\varepsilon''_{0.5}$		Тангенс диэлектрических потерь $tg \delta_{0.5}$		Удельная электропроводность $\sigma'_{0.5}$, мкСм/м	
	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО
0,12	5,69	0,12	1,01	0,23	0,177	0,036	0,0068	0,00051
0,24	5,57	0,12	0,74	0,17	0,133	0,028	0,0099	0,00076
0,36	5,51	0,11	0,64	0,14	0,116	0,023	0,0128	0,00092
0,48	5,47	0,11	0,56	0,12	0,102	0,020	0,0149	0,0010
0,60	5,44	0,11	0,50	0,11	0,092	0,019	0,0168	0,0012
0,72	5,41	0,11	0,46	0,10	0,085	0,017	0,0186	0,0013
0,84	5,40	0,11	0,43	0,10	0,080	0,018	0,020	0,0016
1,0	5,37	0,11	0,41	0,08	0,0758	0,014	0,0227	0,0015
2,0	5,31	0,11	0,31	0,06	0,0579	0,011	0,034	0,0024
3,0	5,27	0,11	0,26	0,05	0,0500	0,0094	0,044	0,0030
4,0	5,25	0,11	0,24	0,049	0,0455	0,0087	0,053	0,0036
5,0	5,23	0,11	0,23	0,046	0,0431	0,0082	0,063	0,0042
6,0	5,22	0,11	0,21	0,040	0,0410	0,0072	0,072	0,0045
7,0	5,21	0,11	0,20	0,039	0,0390	0,0070	0,079	0,0051
8,0	5,20	0,11	0,19	0,038	0,0373	0,0069	0,086	0,0056
9,0	5,19	0,11	0,19	0,036	0,0365	0,0065	0,095	0,0060
10	5,19	0,11	0,19	0,035	0,0357	0,0063	0,103	0,0065
11,5	5,18	0,11	0,18	0,035	0,0344	0,0064	0,114	0,0075
12,5	5,18	0,11	0,17	0,033	0,0337	0,0060	0,121	0,0076
13,5	5,17	0,11	0,17	0,031	0,0333	0,0057	0,130	0,0078
15	5,17	0,11	0,17	0,031	0,0325	0,0056	0,141	0,0086
15,8	5,17	0,11	0,17	0,031	0,0321	0,0055	0,146	0,0089
16,7	5,16	0,11	0,16	0,030	0,0317	0,0055	0,153	0,0094
17,7	5,16	0,11	0,16	0,030	0,0313	0,0055	0,160	0,010
18,8	5,16	0,11	0,16	0,029	0,0311	0,0052	0,168	0,010
20	5,16	0,11	0,16	0,028	0,0306	0,0051	0,176	0,010
21,5	5,16	0,11	0,16	0,028	0,0303	0,0051	0,187	0,011
23	5,16	0,11	0,15	0,028	0,0299	0,0051	0,198	0,012
25	5,16	0,11	0,15	0,027	0,0296	0,0050	0,212	0,013
26	5,16	0,11	0,16	0,027	0,0303	0,0050	0,225	0,013
27	5,16	0,11	0,15	0,027	0,0299	0,0048	0,231	0,013
28,5	5,15	0,11	0,15	0,026	0,0289	0,0048	0,235	0,014
30	5,16	0,11	0,14	0,026	0,0265	0,0048	0,227	0,015
31,5	5,17	0,11	0,14	0,025	0,0266	0,0047	0,240	0,015
33	5,16	0,11	0,14	0,026	0,0271	0,0047	0,256	0,016
35	5,16	0,11	0,14	0,026	0,0272	0,0047	0,272	0,017
37,5	5,15	0,11	0,14	0,025	0,0272	0,0046	0,291	0,018
40	5,15	0,11	0,14	0,025	0,0267	0,0046	0,305	0,018
43	5,15	0,11	0,14	0,024	0,0266	0,0045	0,326	0,019
46	5,14	0,11	0,14	0,024	0,0266	0,0044	0,348	0,020
50	5,14	0,11	0,14	0,024	0,0272	0,0044	0,386	0,022
52	5,13	0,11	0,14	0,024	0,0268	0,0043	0,320	0,018
54,5	5,13	0,11	0,13	0,023	0,0259	0,0042	0,401	0,023
57	5,13	0,11	0,12	0,023	0,0238	0,0042	0,386	0,024

60	5,14	0,11	0,12	0,023	0,0237	0,0042	0,404	0,025
63	5,14	0,11	0,12	0,022	0,0242	0,0041	0,364	0,022
67	5,14	0,11	0,12	0,022	0,0240	0,0041	0,458	0,028
70,5	5,14	0,11	0,12	0,023	0,0235	0,0042	0,472	0,030
75	5,13	0,11	0,12	0,022	0,0241	0,0040	0,513	0,030
80	5,13	0,11	0,12	0,022	0,0242	0,0040	0,550	0,032
85	5,12	0,11	0,12	0,022	0,0240	0,0040	0,580	0,034
92	5,12	0,11	0,12	0,022	0,0238	0,0039	0,622	0,037
100	5,11	0,11	0,12	0,021	0,0235	0,0039	0,668	0,039
105	5,11	0,11	0,12	0,021	0,0233	0,0039	0,697	0,041
110	5,10	0,11	0,12	0,021	0,0232	0,0038	0,725	0,043
115	5,10	0,11	0,12	0,021	0,0230	0,0038	0,752	0,045
120	5,09	0,11	0,12	0,021	0,0227	0,0038	0,777	0,046
126	5,09	0,11	0,12	0,021	0,0226	0,0038	0,811	0,048
133	5,08	0,11	0,12	0,021	0,0224	0,0037	0,851	0,051
141	5,08	0,11	0,11	0,020	0,0221	0,0037	0,894	0,053
150	5,07	0,11	0,11	0,020	0,0218	0,0037	0,938	0,056
160	5,07	0,11	0,11	0,020	0,0218	0,0036	1,00	0,060
171	5,06	0,11	0,11	0,020	0,0214	0,0036	1,06	0,064
184	5,06	0,11	0,11	0,020	0,0210	0,0036	1,12	0,069
200	5,05	0,11	0,11	0,020	0,0203	0,0035	1,19	0,073
300	5,05	0,11	0,10	0,019	0,0200	0,0035	1,69	0,10
400	5,04	0,11	0,10	0,019	0,0197	0,0035	2,22	0,14
500	5,04	0,11	0,10	0,019	0,0194	0,0035	2,73	0,17
600	5,03	0,11	0,10	0,019	0,0191	0,0035	3,22	0,21
700	5,03	0,11	0,10	0,019	0,0188	0,0035	3,69	0,24
800	5,02	0,11	0,09	0,019	0,0185	0,0035	4,15	0,27
900	5,02	0,11	0,09	0,018	0,0182	0,0035	4,58	0,31
1000	5,01	0,11	0,09	0,018	0,0179	0,0035	5,01	0,34

Таблица Б.6 – Расчетные значения диэлектрических и электрических свойств образцов серии О.6 в сухом состоянии

Частота, кГц	Действительная часть ДП $\varepsilon'_{0.6}$		Мнимая часть ДП $\varepsilon''_{0.6}$		Тангенс диэлектрических потерь $tg \delta_{0.6}$		Удельная электропроводность $\sigma'_{0.6}$, мкСм/м	
	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО
0,12	25,4	2,37	14,7	2,08	0,576	0,0449	0,0983	0,00694
0,24	20,4	1,84	11,2	1,54	0,543	0,0408	0,149	0,0103
0,36	18,2	1,47	9,52	1,22	0,521	0,0389	0,191	0,0122
0,48	16,7	1,34	8,53	1,07	0,509	0,0359	0,228	0,0143
0,60	15,7	1,21	7,85	0,973	0,497	0,0366	0,262	0,0162
0,72	14,9	1,12	7,30	0,895	0,486	0,0364	0,292	0,0179
0,84	14,3	1,06	6,91	0,823	0,479	0,0342	0,323	0,0192
1,0	13,6	1,00	6,40	0,777	0,468	0,0358	0,356	0,0216
2,0	11,3	0,737	4,99	0,555	0,438	0,0320	0,556	0,0309
3,0	10,2	0,627	4,31	0,464	0,419	0,0313	0,719	0,0387
4,0	9,57	0,556	3,90	0,402	0,406	0,0295	0,869	0,0448
5,0	9,07	0,508	3,61	0,365	0,397	0,0289	1,01	0,0507
6,0	8,70	0,478	3,38	0,343	0,387	0,0293	1,13	0,0572
7,0	8,39	0,448	3,19	0,321	0,378	0,0293	1,24	0,0625
8,0	8,16	0,427	3,06	0,301	0,373	0,0280	1,36	0,0669
9,0	7,96	0,407	2,94	0,289	0,367	0,0284	1,47	0,0723
10	7,79	0,396	2,84	0,269	0,364	0,0260	1,58	0,0747
11,5	7,62	0,383	2,74	0,263	0,359	0,0271	1,75	0,0841
12,5	7,49	0,368	2,66	0,249	0,354	0,0261	1,85	0,0867
13,5	7,36	0,358	2,59	0,246	0,350	0,0268	1,94	0,0923
15	7,22	0,348	2,50	0,235	0,345	0,0261	2,09	0,0979
15,8	7,15	0,340	2,46	0,228	0,343	0,0257	2,16	0,100
16,7	7,08	0,335	2,42	0,224	0,341	0,0256	2,25	0,104
17,7	7,00	0,327	2,37	0,217	0,338	0,0252	2,34	0,107
18,8	6,92	0,321	2,32	0,225	0,334	0,0283	2,42	0,118
20	6,84	0,315	2,29	0,206	0,333	0,0244	2,54	0,115
21,5	6,75	0,308	2,22	0,204	0,329	0,0252	2,66	0,122
23	6,66	0,299	2,17	0,195	0,325	0,0246	2,78	0,125
25	6,61	0,295	2,14	0,189	0,323	0,0238	2,98	0,132
26	6,55	0,290	2,12	0,187	0,322	0,0238	3,06	0,135
27	6,47	0,287	2,07	0,186	0,320	0,0244	3,12	0,140
28,5	6,42	0,280	2,05	0,182	0,318	0,0242	3,25	0,145
30	6,33	0,275	1,99	0,175	0,313	0,0238	3,32	0,146
31,5	6,31	0,272	1,97	0,169	0,311	0,0227	3,44	0,148
33	6,23	0,265	1,93	0,172	0,309	0,0241	3,55	0,158
35	6,16	0,261	1,89	0,166	0,306	0,0233	3,68	0,161
37,5	6,10	0,255	1,85	0,161	0,303	0,0233	3,87	0,168
40	6,03	0,250	1,82	0,158	0,300	0,0233	4,04	0,176
43	5,95	0,243	1,77	0,153	0,296	0,0231	4,23	0,183
46	5,88	0,238	1,73	0,149	0,293	0,0230	4,42	0,191
50	5,79	0,232	1,68	0,142	0,290	0,0222	4,68	0,198
52	5,75	0,228	1,66	0,139	0,287	0,0220	4,79	0,202
54,5	5,71	0,224	1,63	0,140	0,285	0,0228	4,94	0,212
57	5,66	0,222	1,60	0,136	0,281	0,0221	5,07	0,215

60	5,62	0,219	1,57	0,135	0,278	0,0223	5,24	0,225
63	5,58	0,215	1,54	0,129	0,276	0,0215	5,41	0,226
67	5,53	0,212	1,52	0,128	0,274	0,0218	5,66	0,239
70,5	5,48	0,208	1,49	0,122	0,271	0,0208	5,83	0,240
75	5,43	0,204	1,46	0,120	0,268	0,0208	6,08	0,250
80	5,38	0,200	1,43	0,118	0,265	0,0208	6,36	0,262
85	5,32	0,197	1,39	0,114	0,261	0,0205	6,59	0,269
92	5,27	0,193	1,36	0,110	0,257	0,0202	6,96	0,283
100	5,22	0,189	1,32	0,107	0,253	0,0201	7,37	0,299
105	5,19	0,188	1,31	0,106	0,251	0,0201	7,63	0,311
110	5,16	0,185	1,29	0,104	0,249	0,0199	7,88	0,319
115	5,13	0,181	1,27	0,102	0,247	0,0197	8,11	0,327
120	5,10	0,178	1,25	0,100	0,244	0,0194	8,33	0,333
126	5,07	0,176	1,23	0,098	0,242	0,0194	8,60	0,345
133	5,04	0,174	1,21	0,096	0,239	0,0192	8,93	0,357
141	5,02	0,171	1,19	0,094	0,236	0,0190	9,29	0,370
150	4,99	0,169	1,16	0,092	0,232	0,0188	9,70	0,384
160	4,96	0,166	1,14	0,090	0,229	0,0186	10,1	0,402
171	4,94	0,164	1,12	0,088	0,226	0,0183	10,6	0,418
184	4,92	0,166	1,09	0,085	0,222	0,0179	11,2	0,435
200	4,92	0,164	1,07	0,083	0,217	0,0177	11,9	0,463
300	4,90	0,164	1,02	0,082	0,207	0,0177	17,0	0,681
400	4,88	0,164	0,964	0,080	0,197	0,0177	21,4	0,891
500	4,86	0,164	0,926	0,079	0,190	0,0177	25,7	1,10
600	4,84	0,164	0,904	0,080	0,186	0,0184	30,2	1,34
700	4,82	0,164	0,883	0,081	0,183	0,0192	34,4	1,59
800	4,80	0,164	0,862	0,083	0,179	0,0200	38,4	1,84
900	4,78	0,164	0,842	0,084	0,176	0,0208	42,1	2,11
1000	4,76	0,164	0,821	0,086	0,172	0,0216	45,7	2,38

Таблица Б.7 – Расчетные значения диэлектрических и электрических свойств образцов серии Мг.1 в сухом состоянии

Частота, кГц	Действительная часть ДП $\varepsilon'_{\text{Мг.1}}$		Мнимая часть ДП $\varepsilon''_{\text{Мг.1}}$		Тангенс диэлектрических потерь $\text{tg } \delta_{\text{Мг.1}}$		Удельная электропроводность $\sigma'_{\text{Мг.1}}$, мкСм/м	
	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО
0,12	8,38	0,53	2	0,3	0,236	0,024	0,0135	0,0021
0,24	7,66	0,41	1,57	0,24	0,201	0,021	0,021	0,0032
0,36	7,33	0,36	1,41	0,2	0,189	0,019	0,0283	0,0041
0,48	7,10	0,33	1,27	0,18	0,176	0,017	0,034	0,0048
0,60	6,95	0,31	1,19	0,16	0,169	0,016	0,0398	0,0054
0,72	6,83	0,30	1,13	0,15	0,163	0,015	0,0453	0,006
0,84	6,74	0,28	1,07	0,15	0,157	0,016	0,0501	0,0068
1,0	6,69	0,27	1,04	0,13	0,154	0,014	0,0579	0,0073
2,0	6,23	0,23	0,857	0,095	0,136	0,011	0,0973	0,011
3,0	6,02	0,21	0,776	0,079	0,128	0,009	0,134	0,0137
4,0	5,89	0,20	0,728	0,071	0,123	0,008	0,166	0,016
5,0	5,79	0,20	0,695	0,064	0,119	0,007	0,200	0,018
6,0	5,71	0,19	0,669	0,058	0,116	0,007	0,232	0,020
7,0	5,64	0,19	0,643	0,055	0,113	0,006	0,262	0,022
8,0	5,59	0,18	0,627	0,053	0,111	0,006	0,291	0,024
9,0	5,55	0,18	0,613	0,050	0,11	0,006	0,320	0,026
10	5,51	0,18	0,6	0,048	0,108	0,006	0,345	0,028
11,5	5,47	0,17	0,585	0,047	0,106	0,006	0,375	0,030
12,5	5,44	0,17	0,576	0,045	0,105	0,005	0,400	0,032
13,5	5,42	0,17	0,566	0,044	0,104	0,005	0,429	0,033
15	5,39	0,17	0,555	0,043	0,103	0,005	0,463	0,036
15,8	5,37	0,17	0,549	0,042	0,102	0,005	0,482	0,037
16,7	5,35	0,17	0,543	0,042	0,101	0,005	0,503	0,038
17,7	5,33	0,17	0,538	0,041	0,100	0,005	0,528	0,040
18,8	5,32	0,16	0,529	0,04	0,099	0,005	0,552	0,042
20	5,30	0,16	0,522	0,039	0,098	0,005	0,581	0,043
21,5	5,27	0,16	0,516	0,038	0,097	0,005	0,615	0,046
23	5,26	0,16	0,509	0,037	0,096	0,005	0,653	0,048
25	5,24	0,16	0,501	0,037	0,095	0,004	0,697	0,051
26	5,19	0,16	0,498	0,036	0,096	0,004	0,723	0,053
27	5,18	0,16	0,492	0,036	0,095	0,004	0,747	0,054
28,5	5,16	0,16	0,483	0,035	0,093	0,004	0,768	0,056
30	5,15	0,15	0,469	0,033	0,091	0,004	0,784	0,056
31,5	5,15	0,15	0,467	0,034	0,09	0,004	0,821	0,059
33	5,13	0,15	0,464	0,034	0,09	0,004	0,861	0,062
35	5,11	0,15	0,461	0,033	0,09	0,004	0,905	0,065
37,5	5,09	0,15	0,456	0,032	0,089	0,004	0,951	0,068
40	5,08	0,15	0,449	0,032	0,088	0,004	0,998	0,071
43	5,06	0,15	0,443	0,031	0,087	0,004	1,06	0,075
46	5,04	0,15	0,437	0,031	0,086	0,004	1,12	0,079
50	5,01	0,15	0,434	0,031	0,086	0,004	1,21	0,085
52	5,00	0,15	0,429	0,03	0,085	0,004	1,24	0,086
54,5	4,99	0,14	0,42	0,03	0,084	0,004	1,27	0,09
57	4,98	0,14	0,407	0,029	0,081	0,004	1,294	0,094

60	4,98	0,14	0,405	0,029	0,081	0,004	1,351	0,097
63	4,97	0,14	0,402	0,029	0,081	0,004	1,41	0,11
67	4,95	0,14	0,398	0,028	0,08	0,004	1,48	0,11
70,5	4,94	0,14	0,392	0,028	0,079	0,004	1,54	0,11
75	4,92	0,14	0,390	0,028	0,079	0,004	1,63	0,12
80	4,92	0,14	0,386	0,027	0,078	0,004	1,72	0,12
85	4,90	0,14	0,381	0,027	0,077	0,004	1,82	0,13
92	4,89	0,14	0,375	0,027	0,076	0,004	1,92	0,14
100	4,88	0,14	0,368	0,026	0,075	0,004	2,05	0,15
105	4,88	0,14	0,365	0,026	0,075	0,004	2,12	0,15
110	4,87	0,14	0,361	0,026	0,074	0,004	2,19	0,16
115	4,87	0,14	0,357	0,026	0,073	0,003	2,27	0,16
120	4,87	0,14	0,353	0,025	0,072	0,003	2,36	0,17
126	4,87	0,13	0,350	0,025	0,072	0,003	2,46	0,18
133	4,86	0,13	0,346	0,025	0,071	0,003	2,57	0,19
141	4,86	0,13	0,342	0,025	0,07	0,003	2,68	0,19
150	4,86	0,13	0,337	0,025	0,069	0,003	2,81	0,21
160	4,87	0,13	0,333	0,024	0,068	0,003	2,97	0,22
171	4,87	0,13	0,328	0,024	0,067	0,003	3,13	0,23
184	4,87	0,13	0,324	0,024	0,066	0,003	3,33	0,25
200	4,88	0,13	0,319	0,024	0,065	0,003	3,55	0,26
300	4,89	0,13	0,305	0,024	0,063	0,003	5,09	0,36
400	4,88	0,13	0,305	0,023	0,060	0,003	6,78	0,48
500	4,86	0,13	0,291	0,023	0,058	0,003	8,09	0,58
600	4,85	0,13	0,280	0,023	0,056	0,003	9,34	0,67
700	4,85	0,13	0,270	0,230	0,055	0,003	10,6	0,79
800	4,86	0,13	0,267	0,022	0,054	0,003	11,9	0,86
900	4,88	0,13	0,262	0,022	0,053	0,003	13,1	0,94
1000	4,89	0,13	0,256	0,022	0,052	0,003	14,3	1,0

Таблица Б.8 – Расчетные значения диэлектрических и электрических свойств образцов серии Мр.1 в сухом состоянии

Частота, кГц	Действительная часть ДП $\varepsilon'_{\text{Мр.1}}$		Мнимая часть ДП $\varepsilon''_{\text{Мр.1}}$		Тангенс диэлектрических потерь $\text{tg } \delta_{\text{Мр.1}}$		Удельная электропроводность $\sigma'_{\text{Мр.1}}$, мкСм/м	
	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО
0,12	6,51	0,22	0,0374	0,0086	0,0058	0,0021	0,00026	0,00016
0,24	6,5	0,22	0,0361	0,0074	0,0055	0,0017	0,00048	0,0003
0,36	6,5	0,22	0,0406	0,0055	0,0062	0,0013	0,00081	0,00033
0,48	6,5	0,22	0,0287	0,0044	0,0043	0,0009	0,00077	0,00036
0,60	6,49	0,22	0,0354	0,0031	0,0055	0,00073	0,00118	0,00031
0,72	6,49	0,22	0,0274	0,0031	0,0042	0,00066	0,0011	0,00037
0,84	6,49	0,22	0,0301	0,0035	0,0046	0,00079	0,00141	0,00049
1,0	6,48	0,22	0,02	0,0045	0,0031	0,0011	0,00111	0,00074
2,0	6,48	0,22	0,0338	0,0037	0,0052	0,00079	0,0038	0,0013
3,0	6,46	0,22	0,0318	0,0032	0,0049	0,00074	0,0055	0,0017
4,0	6,46	0,22	0,0352	0,0032	0,0054	0,00062	0,0081	0,0022
5,0	6,45	0,22	0,0358	0,0042	0,0055	0,0009	0,01	0,0036
6,0	6,45	0,22	0,0396	0,0034	0,0061	0,00072	0,0138	0,0035
7,0	6,45	0,22	0,0391	0,0039	0,006	0,00076	0,0159	0,0048
8,0	6,45	0,21	0,04	0,0034	0,0062	0,00065	0,0186	0,0048
9,0	6,44	0,22	0,04	0,0041	0,0062	0,00083	0,0209	0,0064
10	6,44	0,21	0,0423	0,0034	0,0065	0,00069	0,0243	0,0058
11,5	6,44	0,21	0,0409	0,0036	0,0063	0,00072	0,0263	0,0069
12,5	6,44	0,21	0,0421	0,0037	0,0065	0,0007	0,0293	0,0077
13,5	6,44	0,21	0,0426	0,0037	0,0066	0,00071	0,0323	0,0084
15	6,44	0,21	0,044	0,0038	0,0068	0,00073	0,0367	0,0095
15,8	6,44	0,21	0,044	0,0038	0,0068	0,00074	0,0386	0,01
16,7	6,44	0,21	0,0449	0,004	0,0069	0,00075	0,0417	0,011
17,7	6,44	0,21	0,0457	0,0038	0,007	0,00073	0,0448	0,011
18,8	6,44	0,21	0,0454	0,0041	0,007	0,00079	0,0474	0,013
20	6,44	0,21	0,0466	0,0042	0,0072	0,00083	0,0518	0,014
21,5	6,45	0,21	0,0478	0,0039	0,0074	0,00077	0,057	0,014
23	6,45	0,21	0,0484	0,004	0,0075	0,00078	0,0622	0,016
25	6,45	0,21	0,0491	0,0044	0,0076	0,00086	0,0683	0,018
26	6,41	0,21	0,0563	0,0041	0,0087	0,00074	0,0817	0,018
27	6,41	0,21	0,0551	0,004	0,0085	0,00073	0,0836	0,018
28,5	6,4	0,21	0,0491	0,0041	0,0076	0,00079	0,0781	0,02
30	6,41	0,21	0,0361	0,0034	0,0056	0,00069	0,0603	0,017
31,5	6,42	0,21	0,04	0,0039	0,0062	0,00077	0,0703	0,021
33	6,42	0,21	0,0422	0,0046	0,0065	0,00094	0,0783	0,026
35	6,41	0,21	0,0495	0,0043	0,0077	0,00084	0,0973	0,025
37,5	6,41	0,21	0,051	0,004	0,0079	0,00077	0,106	0,025
40	6,41	0,21	0,05	0,0041	0,0077	0,00078	0,111	0,027
43	6,41	0,21	0,0519	0,0041	0,008	0,00079	0,124	0,029
46	6,41	0,21	0,0535	0,0043	0,0083	0,00083	0,137	0,033
50	6,4	0,21	0,0602	0,0042	0,0094	0,00078	0,168	0,035
52	6,4	0,21	0,0581	0,0043	0,009	0,0008	0,169	0,038
54,5	6,4	0,21	0,0535	0,0042	0,0083	0,0008	0,162	0,038
57	6,4	0,21	0,0394	0,0044	0,0061	0,00093	0,125	0,042
60	6,42	0,21	0,0437	0,0041	0,0068	0,00082	0,146	0,041
63	6,42	0,21	0,047	0,0046	0,0073	0,00091	0,165	0,048

67	6,42	0,21	0,0491	0,0041	0,0076	0,00082	0,182	0,046
70,5	6,41	0,21	0,0476	0,0047	0,0074	0,00095	0,187	0,055
75	6,41	0,21	0,0516	0,0043	0,008	0,00086	0,215	0,054
80	6,42	0,21	0,0546	0,0044	0,0084	0,00086	0,243	0,059
85	6,42	0,21	0,0556	0,0045	0,0086	0,00088	0,265	0,065
92	6,43	0,21	0,0559	0,0046	0,0086	0,00088	0,287	0,07
100	6,44	0,21	0,0559	0,0045	0,0086	0,00088	0,311	0,076
105	6,44	0,21	0,056	0,0046	0,0086	0,0009	0,325	0,08
110	6,45	0,21	0,0555	0,0045	0,0085	0,00087	0,337	0,082
115	6,45	0,21	0,0552	0,0045	0,0085	0,00086	0,351	0,085
120	6,46	0,21	0,0548	0,0045	0,0084	0,00087	0,366	0,09
126	6,45	0,21	0,055	0,0045	0,0084	0,00087	0,386	0,095
133	6,44	0,21	0,0549	0,0045	0,0084	0,00088	0,407	0,101
141	6,43	0,21	0,0545	0,0045	0,0083	0,00087	0,428	0,106
150	6,43	0,21	0,0532	0,0044	0,0081	0,00086	0,444	0,111
160	6,43	0,21	0,0539	0,0044	0,0082	0,00084	0,48	0,118
171	6,43	0,21	0,0524	0,0043	0,0079	0,00081	0,5	0,123
184	6,43	0,21	0,0506	0,0041	0,0076	0,00077	0,519	0,126
200	6,43	0,22	0,0469	0,0038	0,007	0,00071	0,522	0,126
300	6,42	0,21	0,0481	0,0038	0,0075	0,00071	0,804	0,19
400	6,42	0,21	0,0479	0,0038	0,0075	0,00067	1,07	0,26
500	6,42	0,21	0,046	0,0038	0,0072	0,00067	1,28	0,31
600	6,42	0,21	0,0491	0,0038	0,0077	0,00067	1,64	0,39
700	6,42	0,21	0,046	0,0035	0,0072	0,00066	1,79	0,43
800	6,42	0,21	0,0446	0,0035	0,0069	0,00066	1,98	0,48
900	6,42	0,21	0,0442	0,0035	0,0069	0,00066	2,21	0,53
1000	6,42	0,21	0,0416	0,0035	0,0065	0,00065	2,32	0,56

Таблица Б.9 – Расчетные значения диэлектрических и электрических свойств образцов серии Мр.2 в сухом состоянии

Частота, кГц	Действительная часть ДП $\varepsilon'_{\text{Мр.2}}$		Мнимая часть ДП $\varepsilon''_{\text{Мр.2}}$		Тангенс диэлектрических потерь $\text{tg } \delta_{\text{Мр.2}}$		Удельная электропроводность $\sigma'_{\text{Мр.2}}$, мкСм/м	
	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО
0,12	6,07	0,14	0,074	0,039	0,0121	0,0016	0,00049	0,00026
0,24	5,91	0,17	0,042	0,034	0,0071	0,0015	0,00056	0,00046
0,36	5,91	0,16	0,08	0,016	0,01362	0,0007	0,00161	0,00031
0,48	5,89	0,17	0,067	0,021	0,01137	0,00092	0,00179	0,00056
0,60	5,89	0,16	0,064	0,014	0,01082	0,00058	0,00213	0,00046
0,72	5,88	0,17	0,062	0,013	0,01057	0,00057	0,00249	0,00054
0,84	5,87	0,17	0,063	0,023	0,01072	0,00099	0,0029	0,0011
1,0	5,86	0,15	0,041	0,039	0,007	0,0017	0,0023	0,0022
2,0	5,85	0,16	0,062	0,012	0,01067	0,00047	0,0071	0,0013
3,0	5,83	0,16	0,066	0,0074	0,01126	0,00034	0,0113	0,0013
4,0	5,81	0,16	0,069	0,0097	0,01184	0,00039	0,0157	0,0022
5,0	5,8	0,16	0,07	0,008	0,0121	0,00032	0,0202	0,0023
6,0	5,79	0,16	0,072	0,012	0,0125	0,00048	0,0252	0,0041
7,0	5,78	0,16	0,074	0,0069	0,01273	0,00028	0,03	0,0028
8,0	5,78	0,16	0,079	0,0053	0,01372	0,00026	0,0367	0,0025
9,0	5,77	0,16	0,076	0,0076	0,01317	0,00032	0,0397	0,0039
10	5,77	0,16	0,078	0,0076	0,01357	0,00032	0,045	0,0044
11,5	5,76	0,16	0,074	0,0076	0,01284	0,00033	0,0475	0,0049
12,5	5,76	0,16	0,075	0,0065	0,01293	0,00026	0,0518	0,0045
13,5	5,76	0,16	0,075	0,0063	0,01304	0,00027	0,057	0,0047
15	5,76	0,16	0,074	0,0068	0,0128	0,0003	0,0615	0,0057
15,8	5,76	0,16	0,075	0,0058	0,01295	0,00024	0,0655	0,0051
16,7	5,75	0,16	0,074	0,0053	0,01289	0,00022	0,0688	0,0049
17,7	5,75	0,16	0,074	0,0061	0,01288	0,00026	0,0728	0,006
18,8	5,75	0,16	0,073	0,0066	0,01267	0,00027	0,076	0,0069
20	5,75	0,16	0,074	0,0075	0,01282	0,00029	0,0821	0,0084
21,5	5,75	0,16	0,074	0,0056	0,01286	0,00024	0,0882	0,0067
23	5,75	0,16	0,075	0,0059	0,01297	0,00024	0,0958	0,0076
25	5,75	0,16	0,074	0,0075	0,01288	0,00031	0,103	0,01
26	5,72	0,16	0,078	0,0059	0,01372	0,00024	0,114	0,0086
27	5,71	0,16	0,079	0,0061	0,01378	0,00027	0,119	0,0093
28,5	5,71	0,16	0,076	0,0076	0,01324	0,00034	0,12	0,012
30	5,71	0,16	0,061	0,007	0,0106	0,00032	0,101	0,012
31,5	5,72	0,16	0,062	0,0044	0,01087	0,00021	0,109	0,0077
33	5,72	0,16	0,066	0,0079	0,01152	0,00029	0,122	0,015
35	5,71	0,16	0,071	0,0051	0,01249	0,00023	0,14	0,01
37,5	5,71	0,16	0,07	0,0054	0,01229	0,00024	0,146	0,011
40	5,71	0,16	0,07	0,006	0,0122	0,00029	0,155	0,013
43	5,71	0,16	0,07	0,005	0,01223	0,0002	0,166	0,012
46	5,7	0,16	0,069	0,0045	0,01208	0,00019	0,177	0,012
50	5,7	0,16	0,075	0,0049	0,01316	0,00019	0,209	0,014
52	5,7	0,16	0,073	0,0043	0,01275	0,00016	0,211	0,013
54,5	5,69	0,16	0,068	0,006	0,01199	0,00026	0,207	0,018
57	5,7	0,16	0,055	0,0061	0,00963	0,00023	0,174	0,019
60	5,71	0,16	0,057	0,004	0,01	0,00016	0,19	0,013
63	5,71	0,16	0,061	0,0036	0,01063	0,00015	0,213	0,013

67	5,71	0,16	0,06	0,0039	0,01044	0,00016	0,221	0,015
70,5	5,7	0,16	0,059	0,0066	0,01038	0,00028	0,232	0,026
75	5,7	0,16	0,063	0,0043	0,011	0,00017	0,262	0,018
80	5,71	0,16	0,063	0,003	0,01109	0,00013	0,282	0,013
85	5,71	0,16	0,063	0,0037	0,01095	0,00014	0,298	0,017
92	5,72	0,16	0,062	0,0036	0,01085	0,00014	0,319	0,018
100	5,73	0,16	0,061	0,0035	0,01062	0,00013	0,338	0,019
105	5,73	0,16	0,06	0,0035	0,01053	0,00014	0,35	0,021
110	5,73	0,16	0,06	0,0034	0,01038	0,00013	0,361	0,02
115	5,74	0,16	0,059	0,0033	0,01024	0,00012	0,374	0,021
120	5,75	0,16	0,058	0,0034	0,01003	0,00013	0,385	0,023
126	5,76	0,16	0,057	0,0032	0,00995	0,00012	0,403	0,023
133	5,77	0,16	0,056	0,0032	0,00978	0,00012	0,419	0,024
141	5,79	0,16	0,055	0,0031	0,00956	0,00012	0,434	0,024
150	5,81	0,16	0,054	0,003	0,00923	0,00011	0,448	0,025
160	5,83	0,16	0,054	0,0031	0,00923	0,00011	0,479	0,027
171	5,86	0,16	0,052	0,003	0,00889	0,00011	0,497	0,029
184	5,9	0,16	0,05	0,003	0,00853	0,00011	0,517	0,031
200	5,96	0,16	0,0477	0,003	0,00799	0,00011	0,53	0,034
300	6,07	0,14	0,074	0,039	0,0121	0,0016	0,00049	0,00026
400	5,91	0,17	0,042	0,034	0,0071	0,0015	0,00056	0,00046
500	5,91	0,16	0,08	0,016	0,01362	0,0007	0,00161	0,00031
600	5,89	0,17	0,067	0,021	0,01137	0,00092	0,00179	0,00056
700	5,89	0,16	0,064	0,014	0,01082	0,00058	0,00213	0,00046
800	5,88	0,17	0,062	0,013	0,01057	0,00057	0,00249	0,00054
900	5,87	0,17	0,063	0,023	0,01072	0,00099	0,0029	0,0011
1000	5,86	0,15	0,041	0,039	0,007	0,0017	0,0023	0,0022

Таблица Б.10 – Расчетные значения диэлектрических и электрических свойств образцов серии О.1 в водонасыщенном состоянии при положительной температуре +20 °С

Частота, кГц	Действительная часть ДП $\varepsilon'_{0,1}$	Мнимая часть ДП $\varepsilon''_{0,1}$	Тангенс диэлектрических потерь $tg \delta_{0,1}$	Удельная электропроводность $\sigma'_{0,1}$, мкСм/м	Удельное сопротивление $\rho_{0,1}$, МОм·м
	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение
0,12	187	287	1,51	1,74	0,563
0,24	181	217	1,16	2,63	0,400
0,36	170	175	0,987	3,18	0,349
0,48	169	153	0,867	3,73	0,311
0,6	162	134	0,792	4,07	0,291
0,72	155	119	0,727	4,42	0,278
0,84	153	109	0,679	4,78	0,263
1	146	96,4	0,627	5,06	0,254
2	128	63,2	0,465	6,96	0,199
5,2	117	41,1	0,331	11,9	0,128
10	110	30,2	0,262	17,5	0,0885
15	107	26,6	0,237	23,0	0,0652
20	105	24,4	0,222	28,0	0,0513
25	105	23,5	0,213	33,5	0,0419
30	102	22,0	0,206	37,6	0,0359
40	99,6	20,5	0,198	45,5	0,0276
50	100	20,1	0,193	54,8	0,022
75	96,3	19,1	0,193	75,8	0,0147
80	96,1	19,1	0,193	80,7	0,0137
100	94,9	19,1	0,196	99,5	0,0108
150	92,1	19,7	0,209	150	0,00685
200	89,2	20,5	0,224	205	0,0049
300	86,5	21,6	0,244	320	0,0031
400	83,5	23,1	0,270	444	0,00218
500	82,5	26,2	0,310	630	0,00154
600	82,7	29,2	0,343	828	0,00116
700	81,1	30,4	0,365	1004	0,000954
800	80,0	32,0	0,389	1203	0,000795
900	81,0	35,0	0,420	1484	0,00065
1000	80,5	36,8	0,446	1741	0,000551

Таблица Б.11 – Расчетные значения диэлектрических и электрических свойств образцов серии О.2 в водонасыщенном состоянии при положительной температуре +20 °С

Частота, кГц	Действительная часть ДП $\varepsilon'_{0,2}$	Мнимая часть ДП $\varepsilon''_{0,2}$	Тангенс диэлектрических потерь $tg \delta_{0,2}^{вод}$	Удельная электропроводность $\sigma'_{0,2}$, мкСм/м	Удельное сопротивление $\rho_{0,2}^{вод}$, МОм·м
	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение
0,12	108	10,9	0,099	0,0773	15,6
0,24	104	9,72	0,0927	0,135	8,45
0,36	102	9,55	0,0935	0,198	5,65
0,48	100	9,59	0,0957	0,263	4,19
0,6	98,9	9,56	0,0969	0,328	3,35
0,72	97,9	9,78	0,100	0,399	2,73
0,84	97,1	9,94	0,103	0,471	2,3
1	96,2	10,1	0,106	0,573	1,9
2	92,5	11,7	0,128	1,32	0,825
5,2	87,1	15,3	0,180	4,27	0,258
10	82,0	19,5	0,244	10,2	0,107
15	78,3	22,4	0,295	17,3	0,0628
20	75,4	24,5	0,335	24,9	0,0429
25	73,0	26,0	0,369	32,9	0,032
30	70,8	27,2	0,397	40,8	0,0254
40	67,1	28,6	0,442	56,7	0,0178
50	64,1	29,4	0,477	72,4	0,0137
75	58,1	30,1	0,539	111	0,00871
80	57,1	30,1	0,547	118	0,00818
100	53,7	29,8	0,575	147	0,0066
150	47,5	28,7	0,621	216	0,00462
200	43,2	27,2	0,643	279	0,00373
300	37,0	23,9	0,644	381	0,00299
400	33,2	21,8	0,646	478	0,00255
500	30,7	21,1	0,663	587	0,00218
600	28,5	19,7	0,666	665	0,00194
700	27,1	18,8	0,668	741	0,00173
800	25,4	17,4	0,654	792	0,00166
900	24,6	17,2	0,670	880	0,00147
1000	23,6	16,6	0,671	947	0,00138

Таблица Б.12 – Расчетные значения диэлектрических и электрических свойств образцов серии О.3 в водонасыщенном состоянии при положительной температуре +20 °С

Частота, кГц	Действительная часть ДП $\varepsilon'_{0,3}$	Мнимая часть ДП $\varepsilon''_{0,3}$	Тангенс диэлектрических потерь $tg \delta_{0,3}$	Удельная электропроводность $\sigma'_{0,3}$, мкСм/м	Удельное сопротивление $\rho_{0,3}$, МОм·м
	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение
0,12	108	10,9	0,099	0,0773	15,6
0,24	104	9,72	0,0927	0,135	8,45
0,36	102	9,55	0,0935	0,198	5,65
0,48	100	9,59	0,0957	0,263	4,19
0,6	98,9	9,56	0,0969	0,328	3,35
0,72	97,9	9,78	0,100	0,399	2,73
0,84	97,1	9,94	0,103	0,471	2,3
1	96,2	10,1	0,106	0,573	1,9
2	92,5	11,7	0,128	1,32	0,825
5,2	87,1	15,3	0,180	4,27	0,258
10	82	19,5	0,244	10,2	0,107
15	78,3	22,4	0,295	17,3	0,0628
20	75,4	24,5	0,335	24,9	0,0429
25	73,0	26	0,369	32,9	0,032
30	70,8	27,2	0,397	40,8	0,0254
40	67,1	28,6	0,442	56,7	0,0178
50	64,1	29,4	0,477	72,4	0,0137
75	58,1	30,1	0,539	111	0,00871
80	57,1	30,1	0,547	118	0,00818
100	53,7	29,8	0,575	147	0,0066
150	47,5	28,7	0,621	216	0,00462
200	43,2	27,2	0,643	279	0,00373
300	37,0	23,9	0,644	381	0,00299
400	33,2	21,8	0,646	478	0,00255
500	30,7	21,1	0,663	587	0,00218
600	28,5	19,7	0,666	665	0,00194
700	27,1	18,8	0,668	741	0,00173
800	25,4	17,4	0,654	792	0,00166
900	24,6	17,2	0,670	880	0,00147
1000	23,6	16,6	0,671	947	0,00138

Таблица Б.13 – Расчетные значения диэлектрических и электрических свойств образцов серии О.4 в водонасыщенном состоянии при положительной температуре +20 °С

Частота, кГц	Действительная часть ДП $\varepsilon'_{0.4}$	Мнимая часть ДП $\varepsilon''_{0.4}$	Тангенс диэлектрических потерь $tg \delta_{0.4}^{вод}$	Удельная электропроводность $\sigma'_{0.4}$, мкСм/м	Удельное сопротивление $\rho_{0.4}$, МОм·м
	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение
0,12	260	0,686	179	1,19	0,848
0,24	188	0,435	81,4	1,09	0,924
0,46	168	0,332	55,5	1,11	0,9
0,48	159	0,278	44,0	1,17	0,852
0,6	153	0,244	37,3	1,25	0,802
0,72	150	0,223	33,3	1,34	0,748
0,84	147	0,208	30,5	1,43	0,701
1	145	0,193	28,0	1,56	0,643
2	138	0,176	24,3	2,75	0,363
5,2	130	0,224	29	8,35	0,12
10	122	0,323	39,5	22	0,0455
15	117	0,410	47,9	39,9	0,0251
20	112	0,485	54,3	60,4	0,0166
25	108	0,550	59,1	82,2	0,0122
40	103	0,605	62,5	104	0,00964
40	95,9	0,693	66,6	148	0,00681
50	89,4	0,757	67,8	189	0,00535
75	76,6	0,861	66,1	276	0,00367
80	74,3	0,869	64,7	288	0,00352
100	66,8	0,900	60,4	336	0,00303
150	53,9	0,928	50,2	419	0,00243
200	45,7	0,914	42	467	0,00218
400	35,7	0,841	30,1	503	0,00202
400	30,3	0,790	24	535	0,00189
500	27,2	0,768	21	583	0,00173
600	25,0	0,746	18,7	623	0,00162
700	23,6	0,731	17,3	674	0,00149
800	21,9	0,697	15,3	680	0,00148
900	21,2	0,706	15	751	0,00134
1000	20,3	0,694	14,1	783	0,00128

Таблица Б.14 – Расчетные значения диэлектрических и электрических свойств образцов серии О.5 в водонасыщенном состоянии при положительной температуре +20 °С

Частота, кГц	Действительная часть ДП $\varepsilon'_{0.5}{}^{\text{вод}}$	Мнимая часть ДП $\varepsilon''_{0.5}{}^{\text{вод}}$	Тангенс диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_{0.5}^{\text{вод}}$	Удельная электропроводность $\sigma'_{0.5}{}^{\text{вод}}$, мкСм/м	Удельное сопротивление $\rho_{0.5}{}^{\text{вод}}$, МОм·м
	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение
0,12	194	0,387	91,9	0,711	3,88
0,24	158	0,317	55,4	0,778	2,57
0,36	144	0,284	44,2	0,883	2,03
0,48	136	0,261	37,9	0,978	1,7
0,6	130	0,243	33,7	1,07	1,49
0,72	126	0,229	30,6	1,15	1,32
0,84	123	0,217	28,2	1,23	1,2
1	120	0,205	25,8	1,33	1,05
2	110	0,164	18,7	1,99	0,612
5,2	102	0,143	14,9	4,13	0,26
10	97,6	0,155	15,2	8,34	0,124
15	95,0	0,175	16,8	13,8	0,0744
20	93,2	0,197	18,4	20,4	0,0504
25	91,7	0,218	20,1	27,8	0,0369
30	90,4	0,238	21,6	36,1	0,0285
40	88,2	0,277	24,5	54,6	0,0189
50	86,3	0,312	27,1	75,4	0,0137
75	82,4	0,395	32,6	136	0,00755
80	81,6	0,41	33,6	149	0,00688
100	79,0	0,465	36,9	205	0,00501
150	73,1	0,585	42,9	354	0,00286
200	68,2	0,672	45,9	502	0,002
300	59,3	0,767	45,6	740	0,00134
400	52,9	0,827	43,7	938	0,00104
500	48,4	0,882	42,7	1136	0,000853
600	44,4	0,906	40,2	1293	0,000753
700	41,6	0,921	38,2	1452	0,000676
800	37,9	0,897	33,9	1449	0,000666
900	35,6	0,894	31,8	1522	0,000636
1000	33,7	0,894	30,2	1598	0,000604

Таблица Б.15 – Расчетные значения диэлектрических и электрических свойств образцов серии О.6 в водонасыщенном состоянии при положительной температуре +20 °С

Частота, кГц	Действительная часть ДП $\varepsilon'_{0.6 \text{ вод}}$	Мнимая часть ДП $\varepsilon''_{0.6 \text{ вод}}$	Тангенс диэлектрических потерь $tg \delta_{0.6 \text{ вод}}$	Удельная электропроводность $\sigma'_{0.6 \text{ вод}}$, мкСм/м	Удельное сопротивление $\rho_{0.6 \text{ вод}}$, МОм·м
	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение
0,12	238	2,18	517	3,45	0,290
0,24	224	2,09	467	6,24	0,161
0,36	216	2,04	438	8,77	0,114
0,48	208	1,99	411	11,0	0,0911
0,6	202	1,94	391	13,1	0,0766
0,72	189	1,89	356	14,3	0,0701
0,84	182	1,86	337	15,7	0,0635
1	171	1,81	308	17,1	0,0583
2	167	1,53	256	29,1	0,0345
5,2	157	1,14	179	51,4	0,0195
10	153	0,78	119	66,4	0,0152
15	149	0,68	102	84,8	0,0119
20	138	0,639	88,3	98,2	0,0103
25	131	0,622	81,7	114	0,00891
30	126	0,618	77,9	130	0,0078
40	119	0,628	74,5	166	0,00612
50	112	0,646	72,2	201	0,00505
75	99,8	0,7	69,8	291	0,00348
80	97,8	0,71	69,4	309	0,00328
100	91,4	0,747	68,2	379	0,00268
150	78,8	0,816	64,3	537	0,0019
200	70,1	0,857	60,2	670	0,00153
300	57,6	0,872	50,4	841	0,00122
400	49,9	0,876	43,9	977	0,00105
500	45,1	0,893	40,4	1120	0,000916
600	41,2	0,896	37,2	1240	0,000832
700	38,8	0,898	35,0	1360	0,000758
800	35,6	0,872	31,2	1390	0,000744
900	34,3	0,894	30,8	1540	0,00067
1000	32,4	0,886	28,9	1610	0,000644

ПРИЛОЖЕНИЕ В

СПРАВКА ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ



ООО «ССЛ»
105082, г. Москва, Спартаковская
пл.,
д. 16/15, стр. 2, пом. 1
Тел./факс (495) 788-65-51
e-mail: secretar@sslogik.ru

Исх. 591 от 24.10.2025г.

Справка

об использовании результатов диссертационной работы аспиранта кафедры
Физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ МИСИС
Гапеева Артема Андреевича

Результаты диссертационной работы Гапеева Артема Андреевича
«Изучение закономерностей изменения электрических свойств горных пород
в низкочастотном диапазоне» на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 2.8.3 «Горнопромышленная и
нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и
геометрия недр» в части разработанной методики «Методика определения
диэлектрической проницаемости и удельной проводимости горных пород на
образцах неправильной формы в лабораторных условиях» использовались
при выполнении научно-технических договоров по исследованию свойств
образцов горных пород.

С уважением,
Генеральный директор
ООО «ССЛ»

В.В. Золотарев

Рисунок В.1 – Скан справки об использовании результатов диссертационной
работы