

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

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»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Черепецкая Елена Борисовна

Москва – 2025

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, которая 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.

Основные научные положения и их новизна:

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 стабилизуются, 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 °С 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 0,6-0,1, а в полностью водонасыщенном состоянии при нормальных условиях – от 2,2 до 0,1.

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 научометрические базы данных.

Благодарности.

Автор выражает особую благодарность научному руководителю Черепецкой Елене Борисовне за сопровождение работы, ценные советы и обсуждения результатов; к.т.н. Шибаеву 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ современного состояния исследований частотной зависимости электрических свойств горных пород, рассмотрены понятия поляризации и релаксации в горных породах. Также приведены и рассмотрены различные модели поляризации, методы измерения электрических свойств в лабораторных условиях.

В последние два десятилетия особое внимание уделяется диэлектрической спектроскопии горных пород с целью повышения достоверности результатов геофизических исследований. Это особенно важно при разведке новых месторождений углеводородов и усложнении добычи твердых полезных ископаемых.

Согласно классической электродинамике, сплошные среды, включая горные породы, характеризуются электрическими (электромагнитными) свойствами. К этим свойствам относят такие параметры, как удельное электрическое сопротивление ρ , удельная электропроводность σ , действительная ϵ' и мнимая ϵ'' части относительной диэлектрической проницаемости, а также тангенс диэлектрических потерь $tg \delta$. Эти характеристики используются в различных геофизических методах, таких как диэлектрический каротаж скважин, микроволновое дистанционное зондирование для идентификации типов горных пород, георадарные исследования для построения радиолокационного изображения структуры материала и при поиске рудных месторождений с использованием электрической разведки на основе переменных электромагнитных полей. Электрические свойства горных пород зависят от их состава, пористости и флюидонасыщения водой или нефтью. Знание дисперсии этих свойств позволяет определять не только минеральный состав пород, но и соотношение воды и нефти в пористых материалах-коллекторах.

Для корректного измерения комплексной диэлектрической проницаемости, удельной проводимости и других электрических свойств в лабораторных условиях в различных частотных диапазонах применяются определенные методы. Так, в низкочастотном диапазоне (до 1 МГц) применяется конденсаторный метод с использованием измерителей импеданса (LCR или RLC-измеритель). В более высоком частотном диапазоне (5 МГц и выше) применяются волноводный метод с использованием прямоугольных и круглых волноводов, коаксиальный метод, резонансный метод.

Однако часто данные, полученные из натурных наблюдений, расходятся с измеренными в лабораторных условиях. Поэтому повышение достоверности оценки электрофизических характеристик исследуемой среды для восстановления ее параметров из данных натурных электромагнитных измерений предполагает измерение электрических характеристик материала в лабораторных условиях и установление их частотных зависимостей.

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.

Во второй главе были рассмотрены теоретические предпосылки частотной дисперсии электрических свойств горных пород и основы методики прецизионного измерения низкочастотной дисперсии электрических свойств горных пород.

Как известно, поведение диэлектрического материала, в том числе таких гетерогенных сред, как горные породы, в переменном электромагнитном поле описывается

системой уравнений Максвелла. Поскольку вектор поляризации $\vec{P}(t)$ определяется откликом связанных зарядов гетерогенной среды на внешнее электрическое 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:

$$\vec{P}(t) = \varepsilon_0 \int_0^\infty \chi(\tau) \vec{E}(t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, $\chi(\tau)$ – временная зависимость электрической восприимчивости, являющаяся в данном случае функцией отклика среды на внешнее электрическое поле.

Учитывая, что в правой части выражения (1) стоит свертка двух функций, отклик гетерогенной среды на каждую гармонику внешнего поля $\vec{E}(\omega)$ имеет вид:

$$\vec{P}(\omega) = \varepsilon_0 \chi(\omega) \vec{E}(\omega), \quad (2)$$

где $\chi(\omega)$ – Фурье-образ восприимчивости, определяющий частотную дисперсию электрических свойств и являющийся комплексной величиной. Поскольку связь восприимчивости и диэлектрической проницаемости (ДП) задается соотношением $\varepsilon(\omega) = 1 + \chi(\omega)$, то $\varepsilon(\omega)$ также является комплексной величиной:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega), \quad (3)$$

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

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)}. \quad (4)$$

Величина $\varepsilon(\omega)$ однозначно связана с комплексной удельной электропроводностью $\sigma(\omega) = \sigma'(\omega) - i\sigma''(\omega)$ соотношением:

$$\sigma(\omega) - i\omega\varepsilon(\omega)\varepsilon_0 = 0, \quad (5)$$

причем действительная часть электропроводности $\sigma'(\omega) = \omega\varepsilon_0\varepsilon''(\omega)$ определяет, в основном, затухание волн в среде, а мнимая часть $\sigma''(\omega) = \omega\varepsilon_0\varepsilon'(\omega)$. К тому же удельное сопротивление является величиной, обратной действительной части удельной электропроводности: $\rho(\omega) = 1/\sigma(\omega)$.

Таким образом, зная два независимых параметра электрических свойств ($\varepsilon'(\omega)$ и $\varepsilon''(\omega)$, или $\varepsilon'(\omega)$ и $\operatorname{tg} \delta$, или $\varepsilon'(\omega)$ и $\sigma'(\omega)$), можно определить остальные.

Для определения комплексной ДП и других электрических свойств в области частот до 1 МГц наиболее эффективен конденсаторный метод с использованием измерителей импеданса, который был выбран и использован в рамках диссертационной работы.

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

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon' ab}{d}, \quad (6)$$

где ε' – действительная часть ДП среды между электродами, a , b и d – длина, ширина электрода и величина межэлектродного зазора, соответственно.

Расчетное значение емкости, полученное с использованием формулы (6), имеет значительную погрешность, которая неуклонно растет с увеличением межэлектродного зазора d . Известно, что при использовании формулы (6) и соотношении $\frac{d}{b} < 0,02$ и $\frac{d}{b} < 0,05$ рассчитанные и экспериментально измеренные значения емкости конденсатора отличаются, соответственно, на 10 % и 16 %. Это связано с тем, что на границах электродов возникает искажение электрического поля и появляются краевые эффекты.

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 конденсатора методом конечных элементов (МКЭ) в различных программных пакетах. Однако процесс проведения моделирования трудоемок, поэтому больший интерес представляют приближенные аналитические формулы, учитывающие данные явления.

В рамках выполнения данной диссертационной работы были использованы 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 (10):

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon' ab}{d} \left\{ 1 + \frac{d}{\pi b} \left[1 + \ln \left[2\pi \left(\frac{b}{d} + \frac{3}{4} \left(1 + \frac{b}{a} \right) \right) \right] \right] + \frac{d}{\pi a} \left[1 + \ln \left[2\pi \left(\frac{a}{d} + \frac{3}{4} \left(1 + \frac{a}{b} \right) \right) \right] \right] \right\} \quad (7)$$

где d – расстояние между электродами, соответствующее толщине исследуемого образца, ε' – действительная часть относительной диэлектрической проницаемости.

На рисунке 1 приведены результаты сравнения численного моделирования и аналитических расчетов по формуле (7) нормированной емкости C/C_0 при различных отношениях межэлектродного зазора и ширины конденсатора d/b .

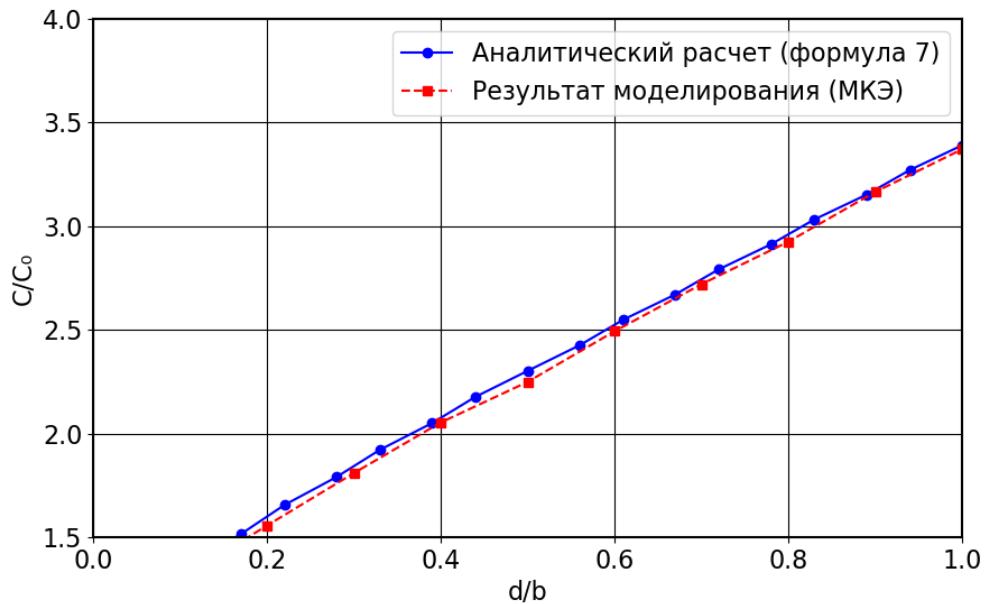


Рисунок 1 – Сравнение результатов расчета емкости плоского конденсатора методом конечных элементов и методом аналитического расчета по формуле (7)

Важным фактором, проявляющимся на низких (ниже 1 кГц) частотах при изучении электрических свойств горных пород, является электродная поляризация. Данный эффект проявляется при контакте изучаемой среды с измерительными электродами. На поверхности 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 рамках настоящего диссертационного исследования были использованы два способа уменьшения влияния электродной поляризации при проведении экспериментов: использование четырехпроводной схемы подключения и нанесение на поверхность образцов с двух сторон тонкого полимерного диэлектрического покрытия, выступающего в качестве «блокирующего слоя», электрические характеристики которого известны.

Таким образом, на основе вышеприведенной формулы (7) и учета электродной поляризации была разработана методика прецизионного определения диэлектрической проницаемости и удельной проводимости горных пород на образцах неправильной формы в лабораторных условиях.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований электрических свойств горных пород различного генотипа в сухом состоянии на частотах от 120 Гц до 1 МГц. Исследовались горные породы трех генотипов: осадочного типа с шести различных месторождений юга России, магматического интрузивного типа в качестве гранита и метаморфического типа двух видов мрамора. Для образцов горных

пород был определен элементный состав, их структурные и текстурные особенности. Измерения элементного состава проводились на подготовленных анилифах на сканирующем электронном микроскопе Phenom ProX с интегрированной системой энергодисперсионного микроанализа. Серии образцов (10-15 штук, соответствующие требованиям разработанной методики) были представлены:

- серия О.1 – песчаник красноватого цвета, породообразующим минералом, слагающим основную часть горной породы, является кварц (до 80-90 %), наблюдаются включение полевого шпата и железистые включения;
- 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 ;
- 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;
- серия О.4 – известняк светло-бежево-коричневого цвета. Большая часть горной породы представлена кальцитом $CaCO_3$ (около 95-97 %);
- 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 ;
- серия О.6 – доломит белого цвета со светло-розоватым оттенком. Горная порода представлена исключительно минералом доломитом $CaMg(CO_3)_2$;
- серия Mg.1 – бело-чёрный гранит, представленный кварцем, калиевым полевым шпатом и биотитом. Структура полнокристаллическая, крупно- и неравномернозернистая, текстура массивная;
- серия Mp.1 – белый мрамор, полностью состоящий из метаморфизованного кальцита $CaCO_3$. Структура гранобластовая, равномерно-зернистая; текстура массивная, пористость минимальная, встречаются единичные хаотичные микротрешины;
- серия Mp.2 – светло-белый мрамор из метаморфизованного кальцита $CaCO_3$ со средне- и крупнозернистой полнокристаллической структурой. Текстура мозаичная, блоковая, местами с микротрешинами по границам кристаллов.

Для измерения электрических свойств горных пород конденсаторным методом использовались два LCR-измерителя: анализатора компонентов АММ-3046 фирмы Aktakom с частотным диапазоном от 20 Гц до 200 кГц и измеритель импеданса East Tester

ET3510 с частотным диапазоном 10 Гц - 1 МГц. При выполнении экспериментальных исследований первоначально выполнялась калибровка аппаратуры.

Для апробации методики и подтверждения работоспособности собранной схемы использовались образцы материала с известным постоянным значением диэлектрической проницаемости в исследуемом частотном диапазоне и практически отсутствующей дисперсией. В качестве такого материала выступали образцы стекла. Геометрические размеры образцов составляли 31x31 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 измерялась емкость плоского конденсатора $C_{изм}$ и вычислялась величина действительной части ДП ϵ' образцов стекла.

В рассматриваемом диапазоне для образца № 1 (боросиликатное стекло) среднее измеренное значение действительной части комплексной ДП равнялось $\epsilon' = 6,00$ при среднеквадратичной погрешности 0,09, а для образца № 2 (оптическое стекло) – $\epsilon' = 5,82$ 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.

В процессе проведения эксперимента для подготовленных образцов горных пород выполнялись измерения емкости конденсатора и тангенса угла диэлектрических потерь, из которых в дальнейшем рассчитывались действительная $\epsilon'(\omega)$ и мнимая $\epsilon''(\omega)$ части диэлектрической проницаемости, удельная электропроводность $\sigma'(\omega)$ и удельное сопротивление $\rho(\omega)$.

На рисунке 2 приведены частотные зависимости усредненных значений действительной и мнимой частей ДП для образцов всех серий О.1-О.6 осадочного гепотипа, а на рисунке 3 – тангенса диэлектрических потерь с указанием среднеквадратичного отклонения на каждой из измеряемой частоте.

На низких частотах (до ~ 1 кГц) среднее значение $\epsilon'_{0.1}$ достигает максимума, равного 26,2 при СКО 1,6 на частоте 120 Гц. Высокие значения $\epsilon'_{0.1}$ свидетельствуют о вкладе в дисперсию ДП при низких частотах всех видов поляризации, причем основное влияние на дисперсию оказывает межфазная поляризация (поляризация Максвелла-Вагнера-Силларса (МВС)). С ростом частоты индуцированная поляризация уменьшается вследствие инерционности перемещения связанных зарядов, значение ϵ' снижается и выходит на более стабильный уровень.

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

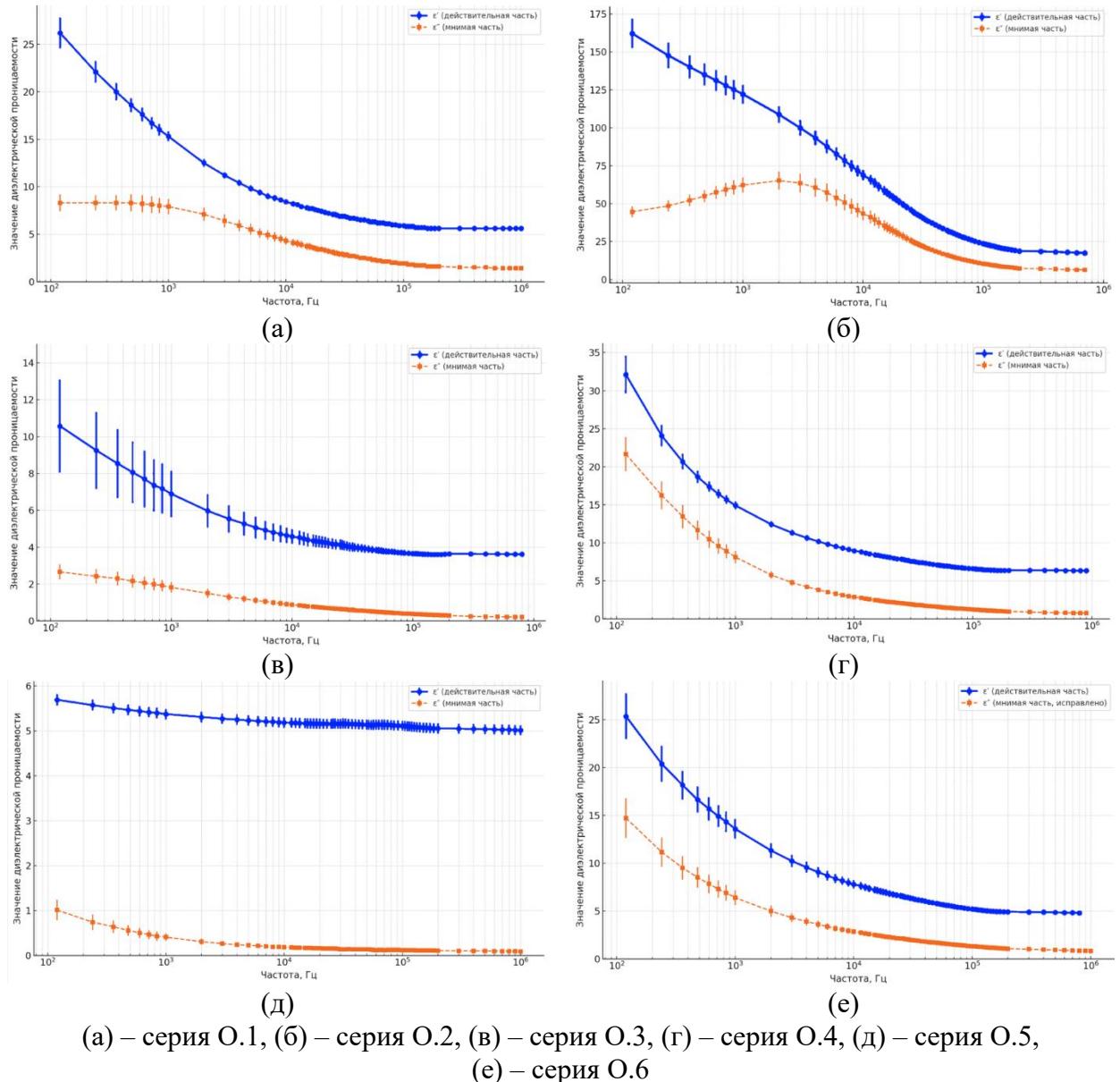


Рисунок 3 – Частотные зависимости действительной и мнимой частей исследованных горных пород осадочного генотипа серий О.1-О.6

Вклад влаги в открытых порах был устранен за счет высушивания образцов при температуре 105 °C, поэтому низкочастотная дисперсия ДП связана с межфазной поляризацией за счет более активного накопления заряда на границах фаз. На более высоких частотах (выше 10-20 кГц) связанные заряды не успевают «отслеживать»

изменение во времени электрического поля, что приводит к уменьшению индуцированной межфазной поляризации и уменьшению значений $\epsilon'(\omega)$ и $\epsilon''(\omega)$.

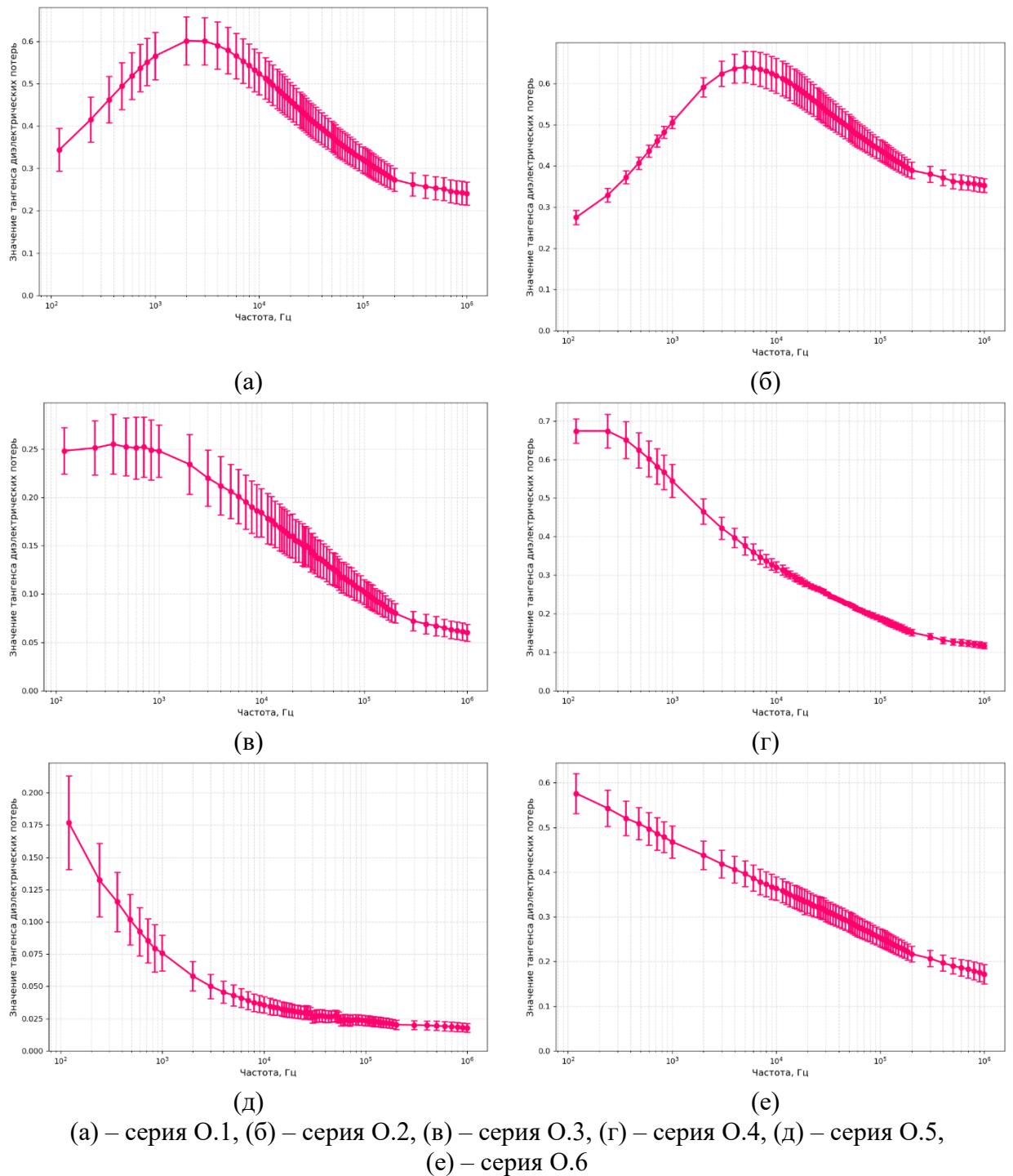


Рисунок 4 – Частотные зависимости тангенса диэлектрических потерь исследованных горных пород осадочного генотипа серий О.1-О.6

Как отмечалось выше, в горных породах, являющихся хорошими диэлектриками (обладающих малыми значениями удельной проводимости), основной вклад дает межфазная поляризация, времена релаксации которой в зависимости от структурных характеристик и химического состава могут меняться в очень широком диапазоне.

Проведение экспериментальных исследований показали, что для сухих образцов песчаника серии О.1 дисперсия наиболее сильно проявляется в частотном диапазоне от 0,12 до 10 кГц.

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 далее 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 $0,64\pm0,04$.

При увеличении частоты выше 100 кГц дисперсия комплексной диэлектрической проницаемости проявляется меньше, однако установившегося значения действительной части ДП не наблюдается и на 1 МГц.

Песчаник является полиминеральной горной породой, состоящей из кварца (преимущественно), полевого шпата, слюды, включений пирита. Для разных минералов характерны различные времена релаксации, что и приводит к частотной дисперсии электрических свойств во всем частотном диапазоне.

Для серии осадочной горной породы О.3 (известняк-ракушечник) значения действительной части ДП в области низких частот $\varepsilon'_{0.3}=9,0\pm1,6$, а далее происходит ее уменьшение в 2,7 раз до значения $\varepsilon'_{0.3}=3,3\pm0,4$ на частоте 1 МГц. Известняк серии О.3 в основной своей массе (до 95-98 %) представлен карбонатом кальция и является практически мономинеральной горной породой с высокой степенью пористости образцов, которая лежит в диапазоне от 20,2 % до 24,7 %. На границах «зерно-пора» происходит межфазная поляризация, как и на границах «зерно-зерно», однако большая пористость, а также мономинеральность приводят к снижению значений диэлектрических характеристик.

Для другого вида известняка серии О.4, отличающегося от серии О.3 пористостью ($P_{0.4}=12,5\pm0,3$ %), значения действительной части ДП в области низких частот составляют $\varepsilon'_{0.4}=32,1\pm2,4$ на частоте $f=120$ Гц, в то время как уже на частоте $f=1$ кГц – $\varepsilon'_{0.4}=14,9\pm0,5$, то есть происходит резкое снижение и далее после 1 кГц вплоть до частот 50-100 кГц. При дальнейшем увеличении частоты происходит стабилизация значений действительной части ДП значения $\varepsilon'_{0.4}=6,4\pm0,1$ на частоте 1 МГц (рисунок 3, г).

Максимум тангенса диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_{0.4}$ наблюдается на частотах 120 Гц и 240 Гц и составляет $0,67\pm0,04$, достигая значений $0,12\pm0,01$ на частоте 1 МГц. Значения мнимой части ДП $\varepsilon''_{0.4}$, которая также плавно снижается с максимумов в области частот порядка 1 кГц, достигая минимальных значений $\varepsilon''_{0.4}=0,77\pm0,08$ 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

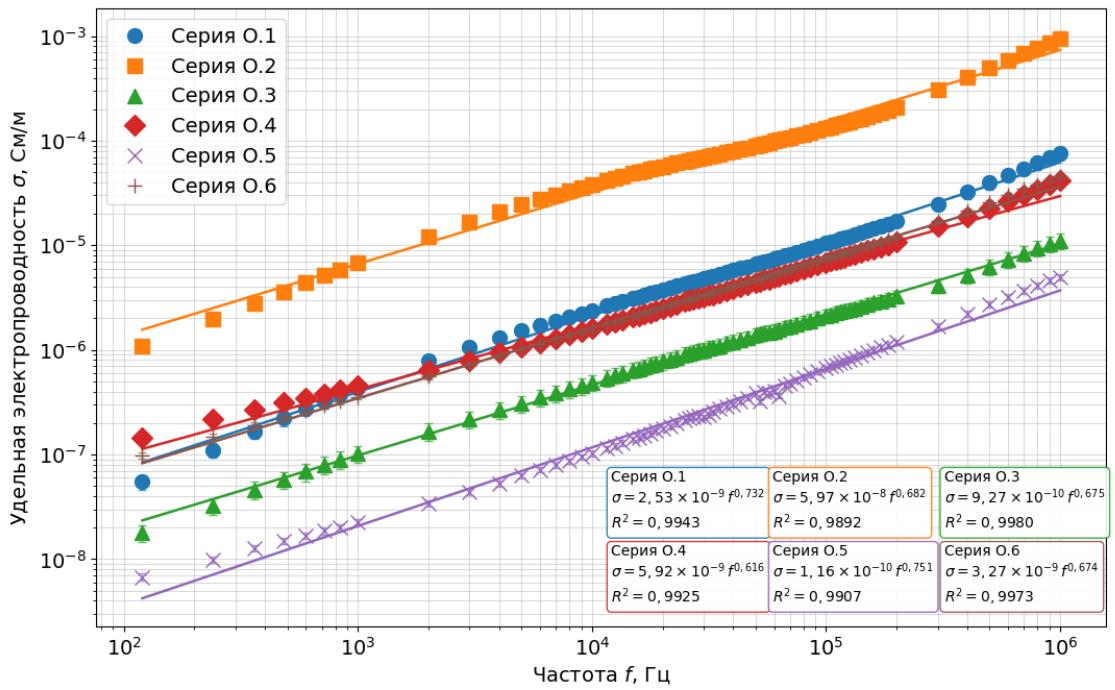
поляризации на границах «зерно-зерно», однако с межфазной поляризацией на границах «зерно-пора».

В еще более сцепленном 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 наблюдается на частотах до 1 кГц. Разница значений составляет всего лишь 12 %. После 10 кГц происходит выпадение значений и действительной и мнимой частей КП и составляют на 1 МГц – $\epsilon'_{0.5} = 5,0 \pm 0,1$ и $\epsilon''_{0.5} = 0,090 \pm 0,018$ (рисунок 3, д). Максимум тангенса диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_{0.5}$ 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. Значения мнимой части ДП $\epsilon''_{0.5}$ снижаются с максимальных значений в области низких частот до 1 кГц, достигая минимальных значений на частоте 1 МГц.

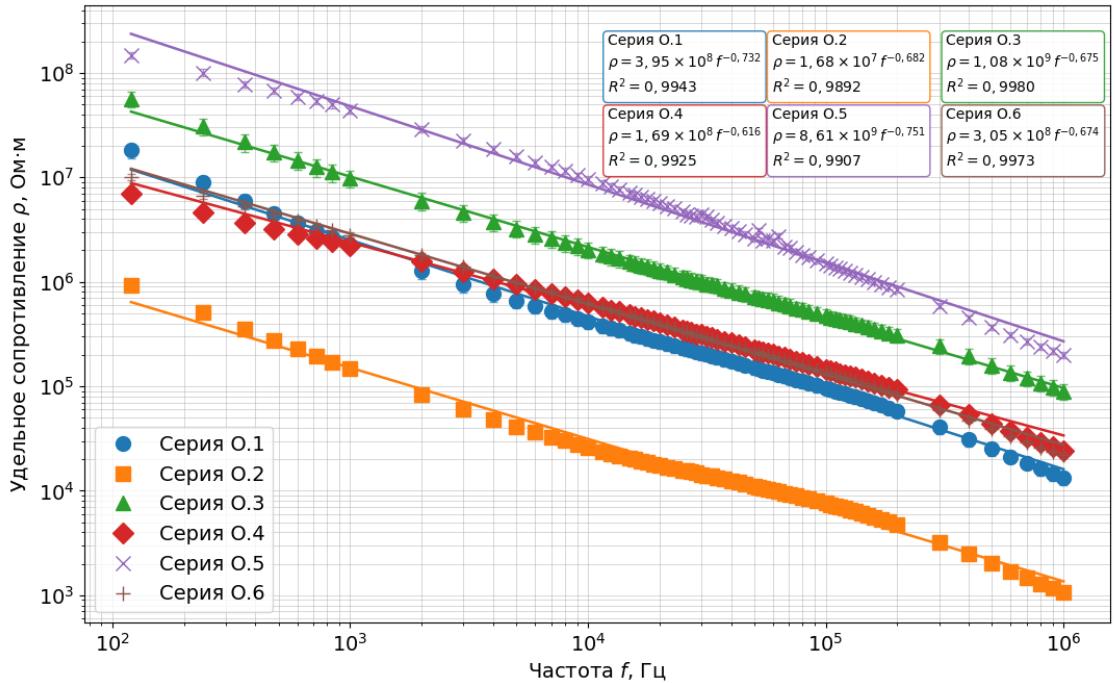
Экспериментальные данные для образцов серии О.6 выявили выраженную дисперсию диэлектрических характеристик. Действительная часть $\epsilon'_{0.6}$ уменьшается от $25,3 \pm 2,4$ на 0,12 кГц до $4,76 \pm 0,16$ при 1 МГц, а мнимая часть $\epsilon''_{0.6}$ от $14,7 \pm 2,1$ до $0,82 \pm 0,09$ на тех же частотах, что отражает ослабление релаксационных процессов. Тангенс диэлектрических потерь также снижается с 0,58 на низких частотах до 0,17 при 1 МГц.

Частотные зависимости удельной электропроводности и удельного сопротивления приведены на рисунке 5. 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 .

На основе полученных экспериментальных данных выполнена оценка изменения значений комплексной ДП известняка и песчаника в зависимости от пористости. Данные породы характеризуются значительным разбросом значений пористости. Поскольку диэлектрическая проницаемость воздуха принимается равной единице, то увеличение пористости при прочих равных условиях должно приводить к уменьшению значений как действительной, так и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости в сухих образцах.



(а)



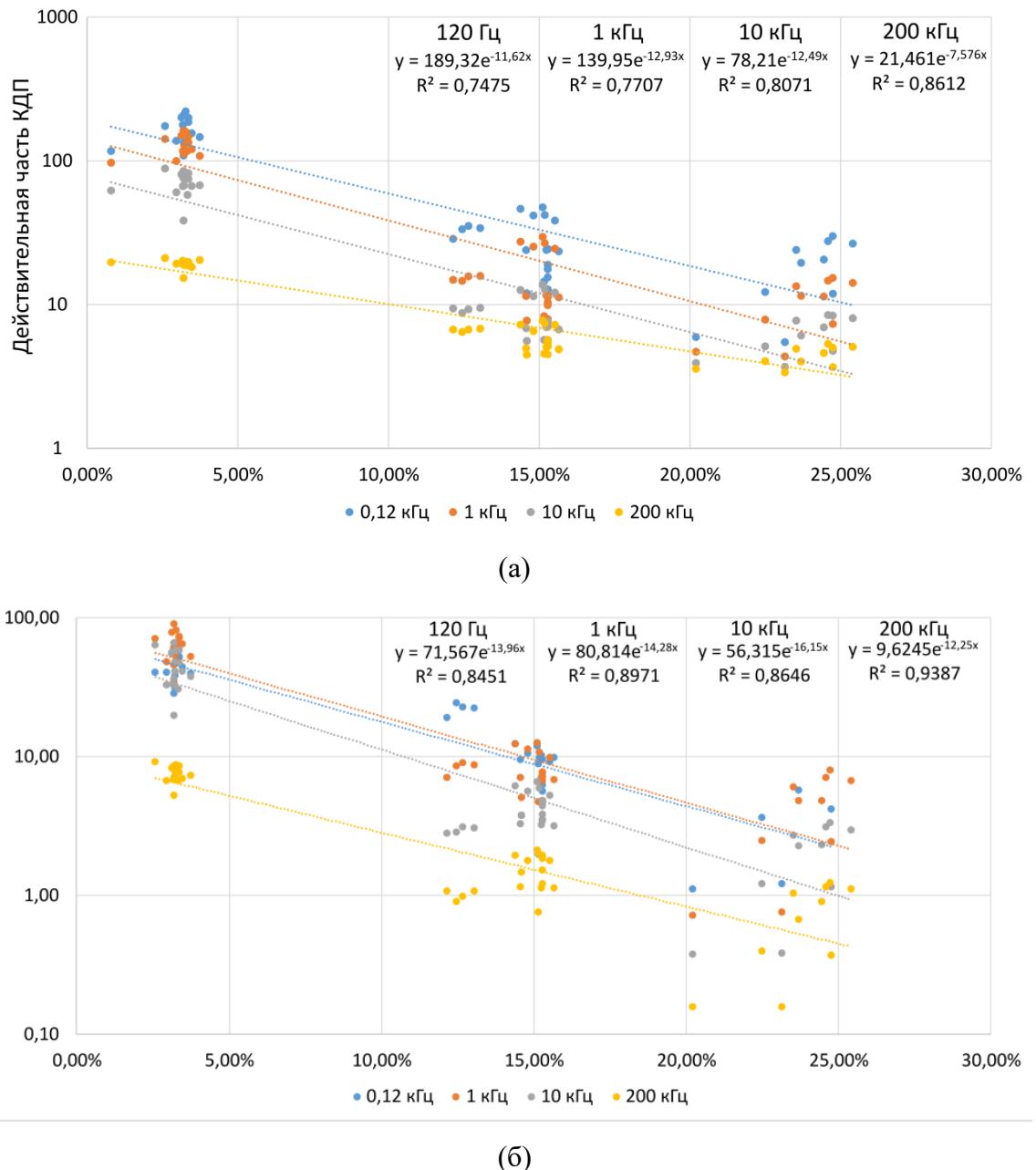
(б)

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

Рисунок 5 – Частотная зависимость электрических свойств осадочных горных пород

Данные для образцов с различной пористостью на разных частотах приведены на рисунке 6, где различными цветами обозначены значения для 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц и 200 кГц. Подобраны аппроксимирующие функции вида $\epsilon'(f) = ae^{-kp}$. 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.



(а) – действительная часть ДП, (б) – мнимая часть ДП

Рисунок 6 – Зависимость ДП от пористости исследуемых образцов песчаника и известняка пород на частотах 0,12 кГц, 1 кГц, 10 кГц и 200 кГц

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

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon}{(1+i\omega\tau)^{1-\alpha}}, \quad (8)$$

где $\epsilon(\omega)$ – диэлектрическая проницаемость, зависящая от частоты ω , ϵ_∞ – предельное значение ДП при высоких частотах, ω – круговая частота, равная $\omega = 2\pi f$, τ – время релаксации, $\Delta\epsilon$ – интенсивность релаксационного процесса, обусловленная влиянием различных видов поляризации и определяемая как $\Delta\epsilon = \epsilon_s - \epsilon_\infty$, где ϵ_s – значение ДП при приложении к диэлектрику постоянного электрического поля

Коэффициенты аппроксимации представлены в таблице.

Таблица – Коэффициенты аппроксимации модели Коула-Коула

Серия	Параметры поляризации				
	ϵ_∞	$\Delta\epsilon$	$\tau, \text{с}$	$f, \text{Гц}$	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 O.2, частота релаксации лежит в диапазоне до 5 кГц с временами релаксации поляризационного процесса 0,19-1,13 мс. Частотный диапазон до 5 кГц является тем диапазоном, в котором дисперсия описанных выше свойств проявляется наибольшим образом.

Полученные в данной главе результаты позволили выявить 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 и сформулировать первое положение.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований электрических свойств образцов песчаника и известняка как пород-коллекторов в полном водонасыщенном состоянии при нормальных условиях (температура +20 °C) и отрицательной -40 °C температурах.

Процессу водонасыщения подвергались те же самые образцы, которые до этого исследовались в сухом состоянии. Водонасыщенное состояние образцов горных достигалось путем первоначального удаления воздуха из порового пространства образцов с использованием вакуумного импрегнатора Struers CitoVac с давлением 0,05 бар с дальнейшим насыщением образцов дистиллированной.

Результаты частотных дисперсий действительной $\epsilon'(f)$, мнимой частей $\epsilon''(f)$ и тангенса диэлектрических потерь $\tan \delta$ приведены на рисунках 7-9.

Можно отметить, форма частотной дисперсии действительной $\epsilon'(f)$ и мнимой частей ДП $\epsilon''(f)$, а также тангенса диэлектрических потерь существенно меняется.

Водонасыщение образцов приводит к существенному возрастанию значений данных диэлектрических параметров.

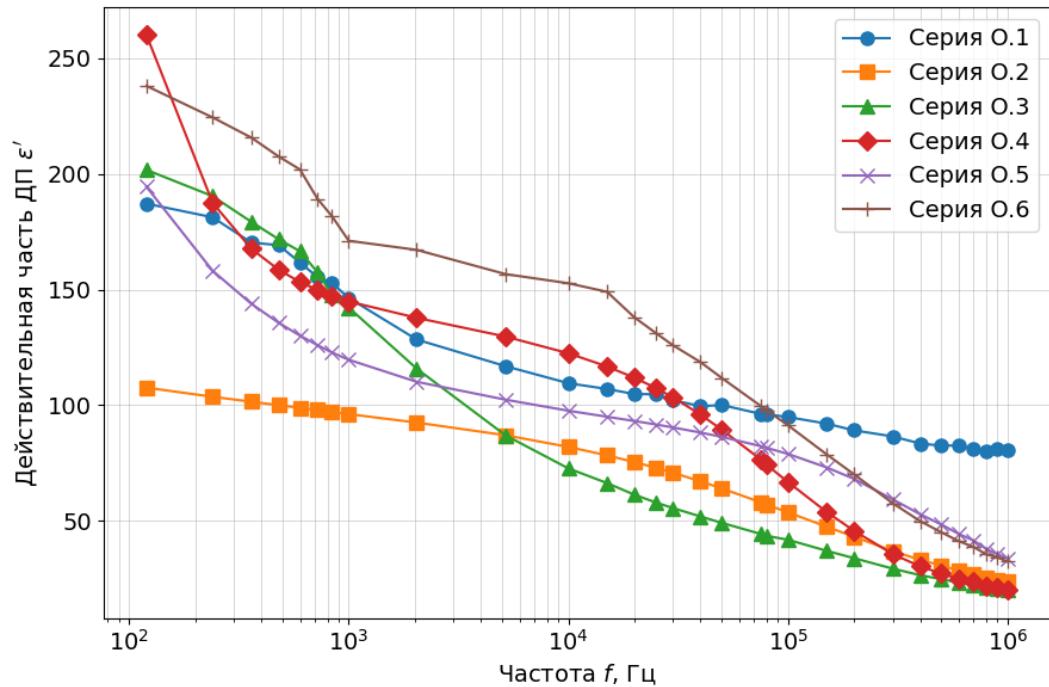


Рисунок 7 – Частотная зависимость действительной части ДП водонасыщенных образцов серий O.1-O.6 (известняка и песчаника) при температуре +20 °C

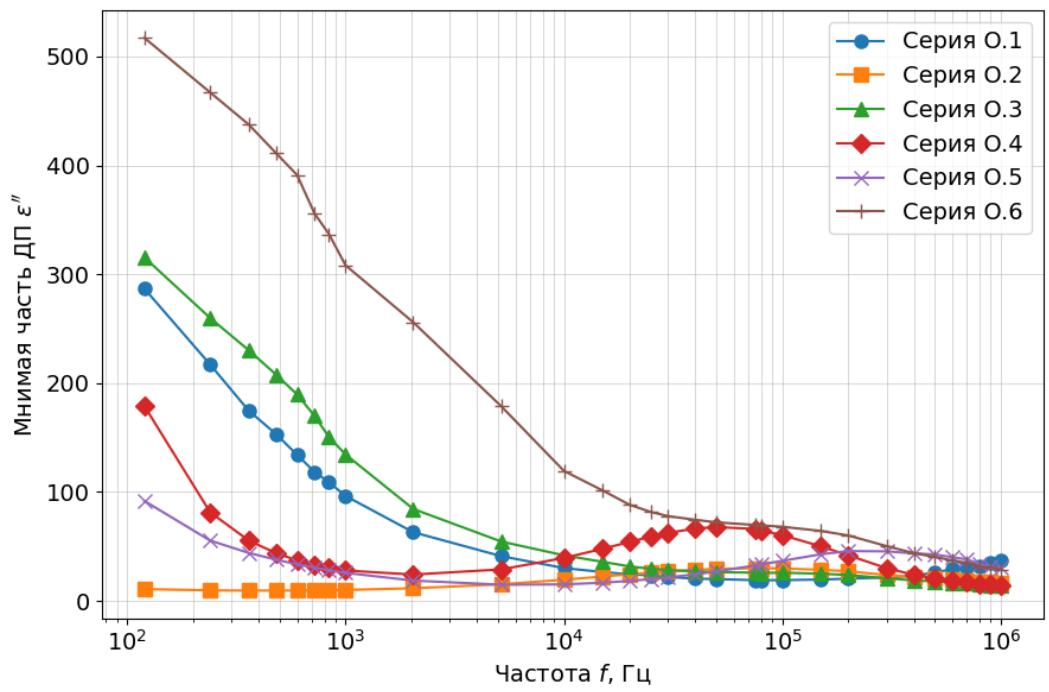


Рисунок 8 – Частотная зависимость мнимой части ДП водонасыщенных образцов серий O.1-O.6 (известняка и песчаника) при температуре +20 °C

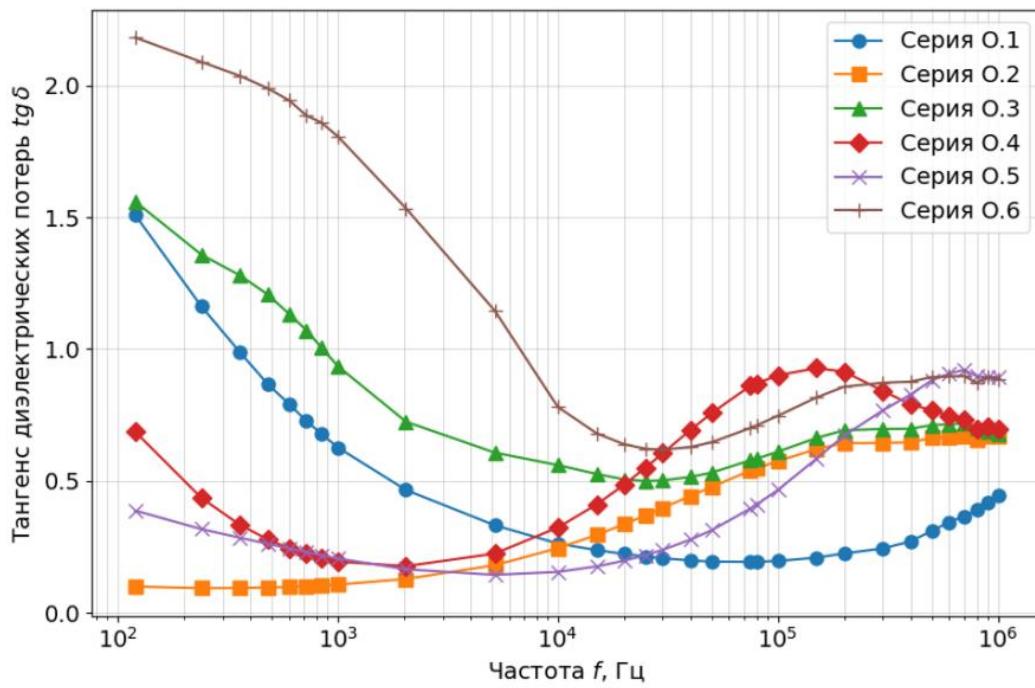


Рисунок 9 – Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь водонасыщенных образцов серий O.1-O.6 (известняка и песчаника) при температуре +20 °C

Можно отметить, что форма частотной дисперсии действительной $\epsilon'(f)$ и мнимой частей ДП $\epsilon''(f)$, а также тангенса диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ 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 O.1 значения $\epsilon'_{0.1}^{\text{вод}}$ возросли в водонасыщенном состоянии до 187 при 120 Гц и затем уменьшились до 80 к 1 МГц; а значение тангенса диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_{0.1}^{\text{вод}}$ составило максимально 1,5 на частоте 120 Гц, отражая активный процесс поляризации. Для образцов серии O.2 наблюдалась более низкие значения $\epsilon''_{0.2}^{\text{вод}}$ и $\operatorname{tg} \delta_{0.2}^{\text{вод}}$ ($\leq 0,7$) из-за низкой пористости и меньшего насыщения водой. Известняк-ракушечник серии O.3 демонстрирует самые высокие значения обеих частей ДП на частоте 120 Гц $\epsilon'_{0.3}^{\text{вод}} = 201$ и $\epsilon''_{0.3}^{\text{вод}} = 315$ и значения тангенса диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_{0.3}^{\text{вод}} > 1$ на частотах до 1 кГц благодаря процессам поляризации, а также ионной проводимости флюида вследствие высокой пористости образцов. В более плотном известняке серии O.4 максимальное значение тангенса диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_{0.4}^{\text{вод}}$ ($\sim 0,9$) сместился к ~ 200 кГц, что связано с тонкопленочной проводимостью в границах зерен. Известняк серии O.5 характеризуется пологим максимумом $\operatorname{tg} \delta_{0.5}^{\text{вод}} \approx 0,9$ в области от 600 до 800 кГц и самой высокой удельной электропроводностью $\sigma'_{0.2}^{\text{вод}} \approx 1,6 \cdot 10^3$ 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 $\varepsilon''_{0.6}^{\text{вод}}$ равным более 500 вследствие высокого значения тангенса угла диэлектрических потерь, который на частоте 120 Гц равен $\operatorname{tg} \delta = 2,2$ и $\rho \approx 6 \cdot 10^{-4}$ МОм·м из-за развитой трещиноватости.

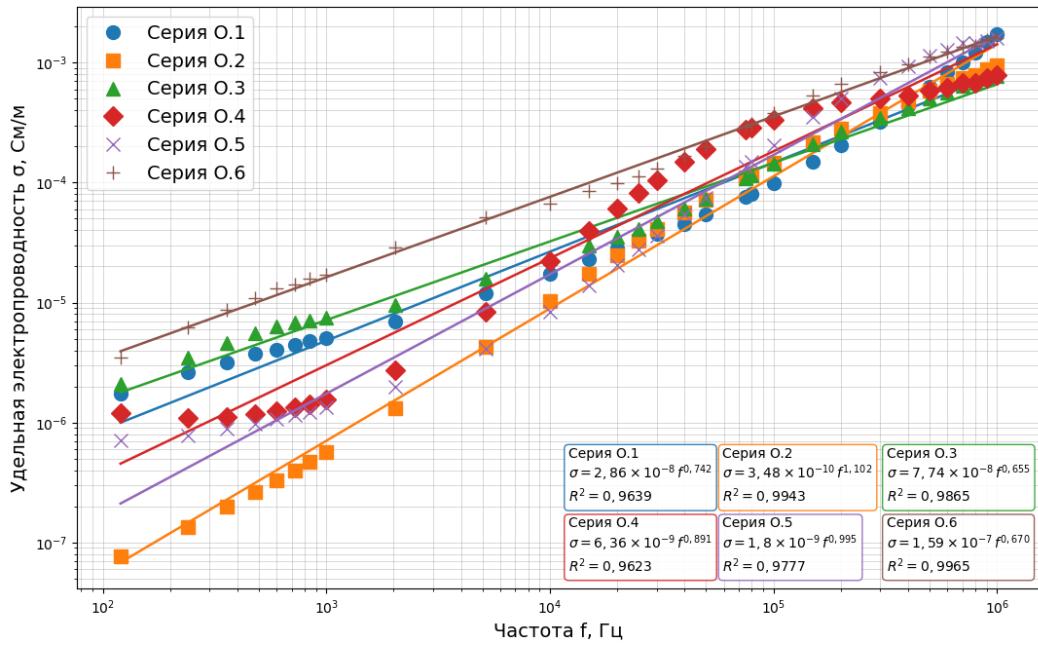
Одним из факторов, приводящим к сильной дисперсии диэлектрических свойств, является вклад самой жидкости. Полярная молекула воды имеет значение действительной части ДП $\varepsilon'_{\text{вода}} \approx 78-80$ при комнатной температуре, в то время как скелет пород, определенный в главе 3 на высоких частотах после выполнения значений диэлектрической проницаемости – 3,3-12. Заменяя воздух ($\varepsilon'_{\text{воздух}} \approx 1$) в порах, вода радикально увеличивает объёмную среднюю ε' по любому смесевому закону. 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 ДП, удельной проводимости и уменьшению удельного сопротивления.

Из-за резкого контраста электрической проводимости σ и диэлектрической проницаемости ε' между скелетом горных пород и заполненными электролитом порами на их границе усиливается межфазная поляризация. При наложении переменного поля ионы из порового раствора смещаются к поверхности минеральных зёрен, образуя плотный заряженный слой. Возникающая структура ведёт себя как конденсатор.

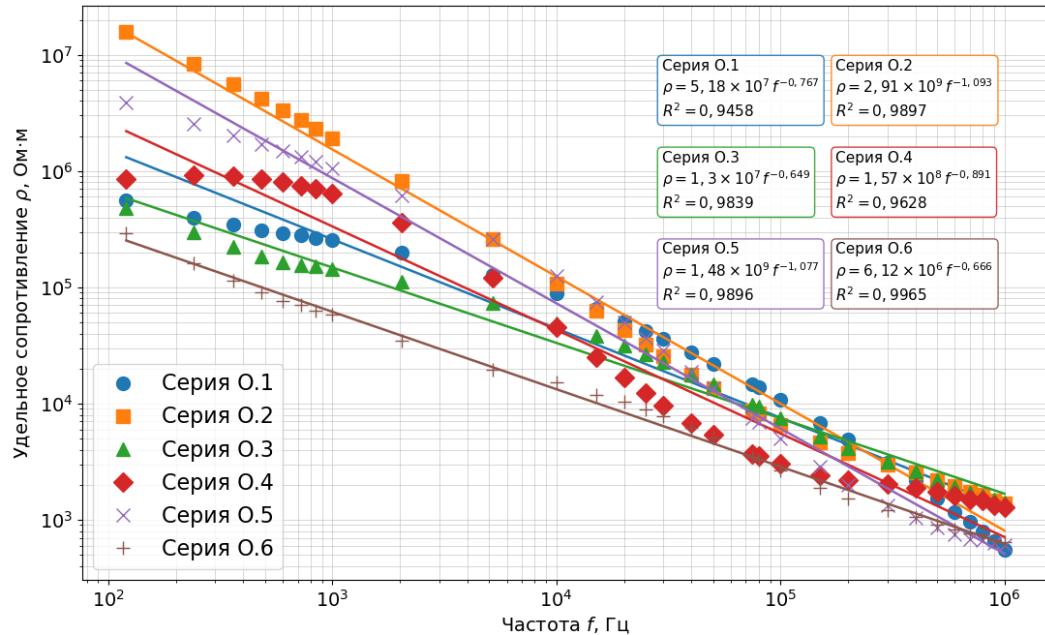
Также вода в порах образцов имеет более высокую проводимость, образуя проводящий канал, снижая общее удельное сопротивление системы (водонасыщенный образец) и увеличивая общую удельную электропроводность. Растворенные ионы и ионы воды дают объемную проводимость порового раствора и значения ε'' через 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 поляризацию, увеличивая значение ε' , вовлекает новые механизмы потерь (увеличивая ε'') и действует механизмы ионной проводимости σ , что при измерениях в диапазоне от 100 Гц до 1 МГц приводит к резко возросшим комплексным электрическим свойствам горных пород.

Зависимости удельной электропроводности и удельного сопротивления от частоты для образцов песчаника и известняка в водонасыщенном состоянии приведены на рисунке 10. Частотные зависимости данных величин хорошо аппроксимируются степенными функциями с коэффициентом корреляции в диапазоне 0,96-0,99.



(a)



(б)

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

Рисунок 10 – Частотная зависимость электрических свойств водонасыщенных образцов, определенная конденсаторным методом с учетом краевых эффектов

После изучения электрических свойств водонасыщенных образцов песчаника и известняка при нормальных условиях образцы замораживались при температуре -40°C в течение 2 ч для исследования их свойств. Зависимость действительной части ДП для образцов известняка и песчаника серий O.1-O.6 представлена на рисунке 11.

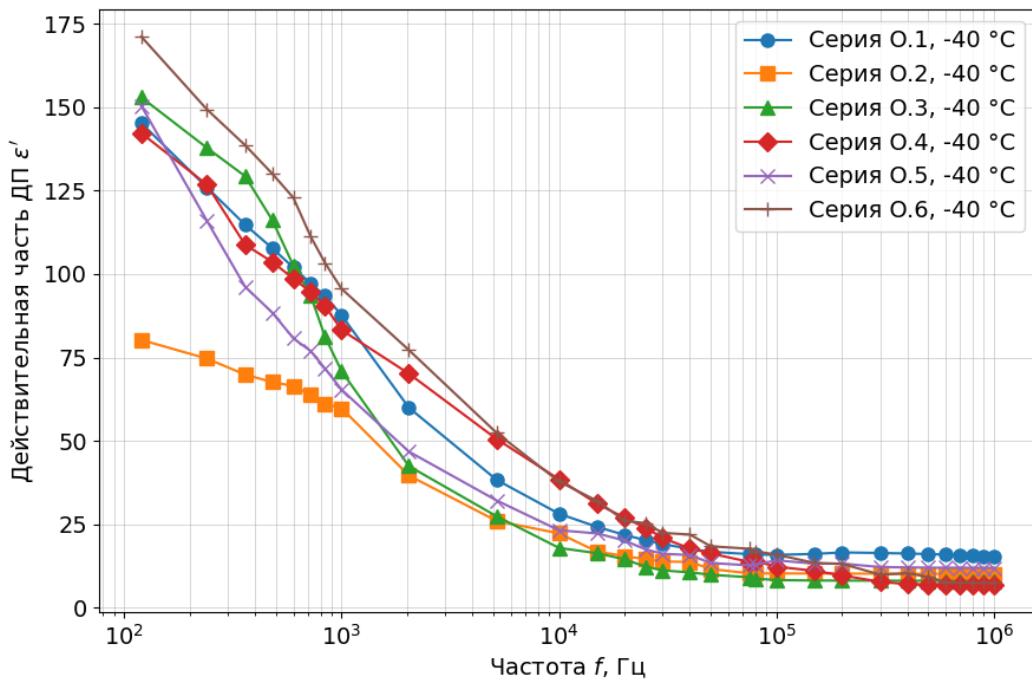


Рисунок 11 – Зависимость действительной части ДП от частоты для образцов песчаника и известняка при температуре -40°C

Во всех сериях исследованных образцов песчаника и известняка наблюдается единообразная закономерность изменения действительной части диэлектрической проницаемости при понижении температуры от $+20^{\circ}\text{C}$ до -40°C наблюдалось снижение значений ϵ' во всем частотном диапазоне при замораживании.

Сравнение отдельных серий позволяет выявить общие черты и некоторые различия. Так, образцы с наибольшими начальными значениями ϵ' при нормальных условиях и температуре $+20^{\circ}\text{C}$ (серии O.4 и O.6) демонстрируют наиболее резкое относительное снижение при замораживании до температур -40°C . В то же время серии с более умеренными начальными значениями (O.2 и O.5) характеризуются несколько меньшим относительным падением, хотя общая тенденция сохраняется. Значения ϵ' систематически снижаются во всём частотном диапазоне, при этом степень снижения зависит от частоты.

Так, на низких частотах (0,12-1 кГц) значения действительной части ДП при положительной температуре лежали в диапазоне от 100 до 260, тогда как при отрицательной температуре они уменьшились 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 лежат времена релаксации льда, изменяющиеся в пределах от 1 мс до 100 мкс в зависимости от температуры. Если при

+20 °C значения ϵ' составляют порядка 70-160, то при -40 °C 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) разница в значениях при положительной и отрицательной температурах достигает максимума. При нормальных условиях и температуре +20 °C значения действительной части ДП стабилизируются в пределах 20-80 в зависимости от образцов, тогда как при отрицательной температуре -40 °C сохраняются на уровне 7-16, что означает уменьшение в среднем в 4-5 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, которая в данной работе не рассматривается. Падение ϵ' при замерзании связано с исчезновением дипольной поляризации жидкой воды и доминированием межфазной поляризации.

Таким образом, замораживание водонасыщенных известняков и песчаников сопровождается не только уменьшением абсолютных значений действительной части диэлектрической проницаемости, но и изменением характера её частотной дисперсии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований содержится решение актуальной научной задачи изучения закономерностей изменения электрических свойств горных пород различных генотипов с разномасштабными структурными неоднородностями с учетом флюидонасыщения в низкочастотном диапазоне 100 Гц – 1 МГц, что имеет существенное значение для повышения достоверности интерпретации данных электроразведки, радиоволнового каротажа и 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 образцов известняка и песчаника, 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 образцов песчаника и известняка (с пористостью 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 образцов песчаника и известняка 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.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

Статьи, опубликованные в журналах из Перечня ВАК РФ и индексируемых международной базой Scopus:

1. 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.

2. 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.

В изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ:

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

В прочих изданиях:

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