

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 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  $-40^{\circ}\text{C}$  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 0,6-0,1, 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 наукометрические 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  $\rho$ , удельная электропроводность  $\sigma$ , действительная  $\epsilon'$  и мнимая  $\epsilon''$  части относительной диэлектрической проницаемости, а также тангенс диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$ . 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  $\varepsilon_0$  – 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  $\varepsilon'$  – 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,  $\varepsilon'$  – 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  $d/b$ .

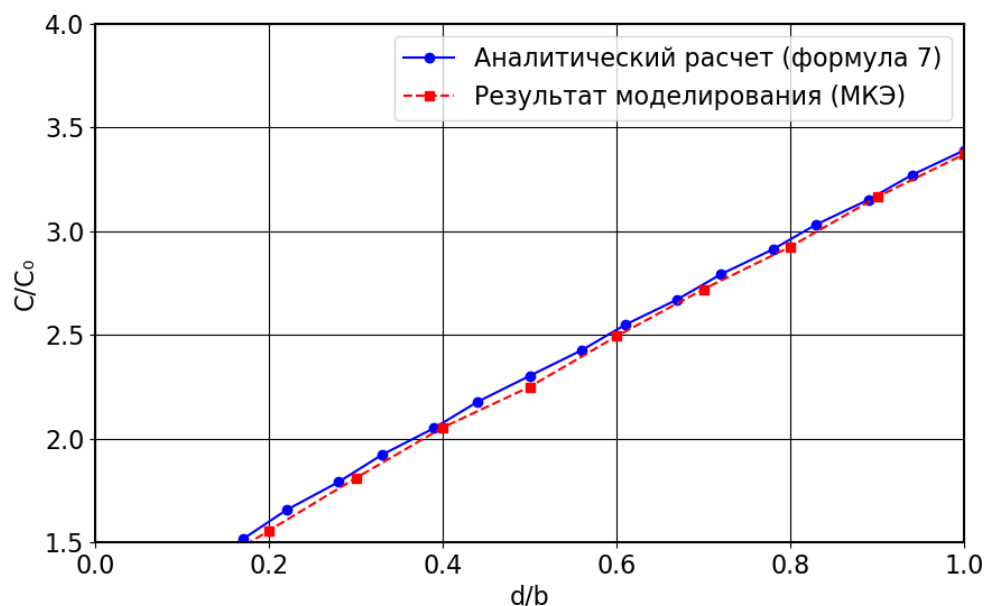


Рисунок 1 – Сравнение результатов расчета емкости плоского конденсатора методом конечных элементов и методом аналитического расчета по формуле (7)

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 поверхностной 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 аншлифах 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 включения 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  $\text{FeS}_2$ ;

- серия О.3 – известняк-ракушечник светло-серого цвета. Породообразующим минералом, которым сложена горная порода является кальцит  $\text{CaCO}_3$  (до 95-98 %), обнаружены включения кварца  $\text{SiO}_2$ , присутствуют калиево-натриевые следовые включения;

- серия О.4 – известняк светло-бежево-коричневого цвета. Большая часть горной породы представлена кальцитом  $\text{CaCO}_3$  (около 95-97 %);

- серия О.5 – известняк бежевого цвета, основная масса горной породы сложена карбонатом кальция  $\text{CaCO}_3$  (85-90 %), остальная часть представлена вкраплениями зерен кварца  $\text{SiO}_2$ ;

- серия О.6 – доломит белого цвета со светло-розоватым оттенком. Горная порода представлена исключительно минералом доломитом  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ;

- серия Мг.1 – бело-чёрный гранит, представленный кварцем, калиевым полевым шпатом и биотитом. Структура полнокристаллическая, крупно- и неравнозернистая, текстура массивная;

- серия Мр.1 – белый мрамор, полностью состоящий из метаморфизованного кальцита  $\text{CaCO}_3$ . Структура гранобластовая, равномерно-зернистая; текстура массивная, пористость минимальная, встречаются единичные хаотичные микротрещины;

- серия Мр.2 – светло-белый мрамор из метаморфизованного кальцита  $\text{CaCO}_3$  со средне- и крупнозернистой полнокристаллической структурой. Текстура мозаичная, блоковая, местами с микротрещинами по границам кристаллов.

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

ЕТ3510 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 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 измерялась емкость плоского конденсатора  $C_{\text{изм}}$  и вычислялась величина действительной части ДП  $\varepsilon'$  образцов стекла.

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

В процессе проведения эксперимента для подготовленных образцов горных пород выполнялись измерения емкости конденсатора и тангенса угла диэлектрических потерь, из которых в дальнейшем рассчитывались действительная  $\varepsilon'(\omega)$  и мнимая  $\varepsilon''(\omega)$  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  $\varepsilon'_{0,1}$  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, 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  $\varepsilon'$  снижается и выходит на более стабильный уровень.

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. На низких частотах средние значения  $\tan \delta_{0,1}$  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 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.

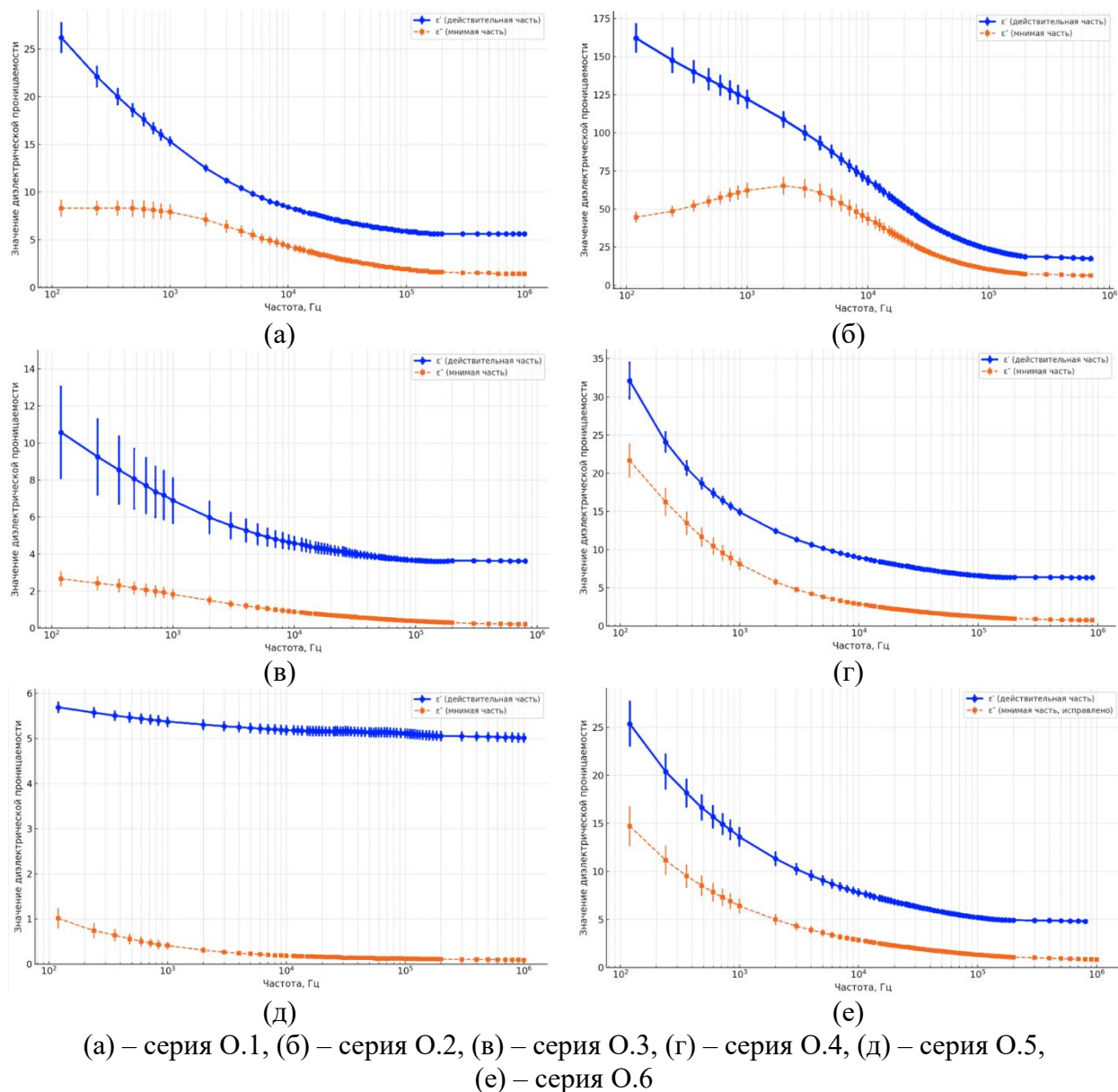


Рисунок 3 – Частотные зависимости действительной и мнимой частей исследованных горных пород осадочного генотипа серий О.1-О.6

Вклад влаги в открытых порах был устранен за счет высушивания образцов при температуре 105 °С, 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  $\varepsilon'(\omega)$  и  $\varepsilon''(\omega)$ .

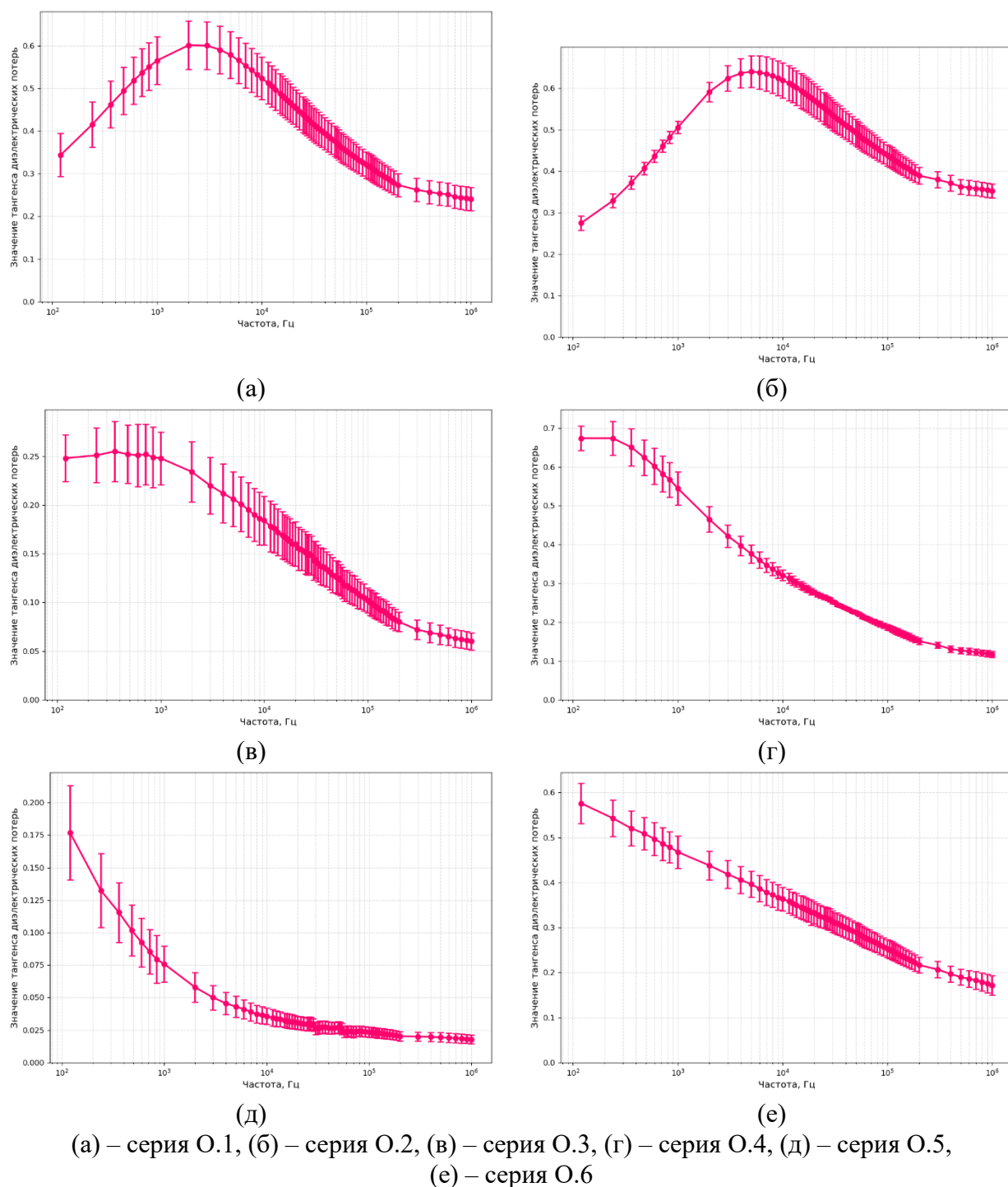


Рисунок 4 – Частотные зависимости тангенса диэлектрических потерь исследованных горных пород осадочного генотипа серий О.1-О.6

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  $tg \delta_{0,2}$  наблюдается в районе 5-10 кГц и составляет  $0,64\pm0,04$ .

При увеличении частоты свыше 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 составляет  $\varepsilon'_{0,4}=32,1\pm2,4$  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  $tg \delta_{0,4}$  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».

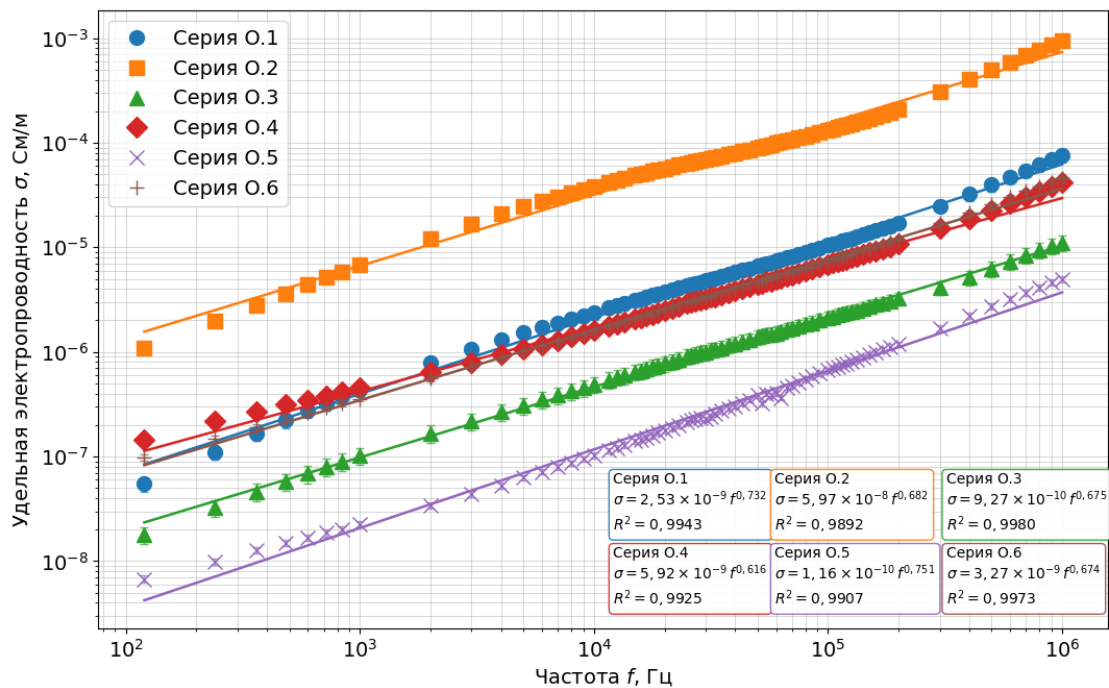
В еще более сцементированном известняке серии О.5 ( $P_{0.5} = 5,2 \pm 0,4 \%$ ) частотная дисперсия действительной части ДП проявляется меньше. Максимальные значения так же, как и для других серий образцов наблюдается на частотах до 1 кГц. Разница значений составляет всего лишь 12 %. После 10 кГц происходит 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, д). 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. Значения мнимой части ДП  $\varepsilon''_{0.5}$  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  $\varepsilon'_{0.6}$  уменьшается от  $25,3 \pm 2,4$  на 0,12 кГц до  $4,76 \pm 0,16$  при 1 МГц, а мнимая часть  $\varepsilon''_{0.6}$  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.

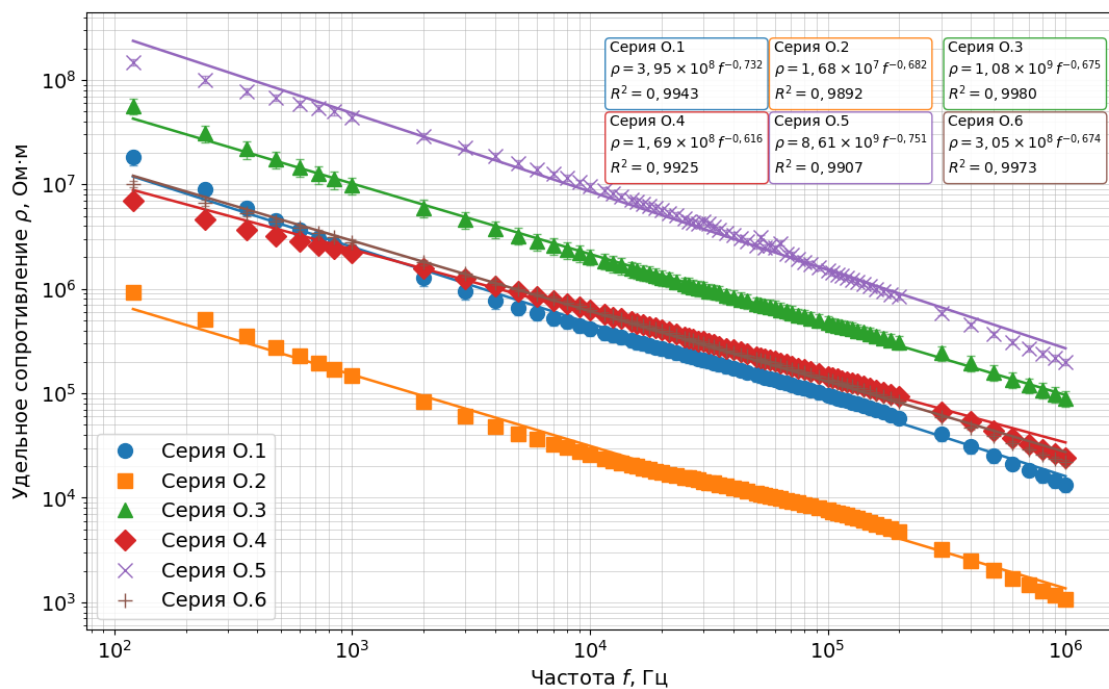
Частотные зависимости удельной электропроводности и удельного сопротивления приведены на рисунке 5. Для всех образцов разброс значений удельного сопротивления  $\rho$  и удельной электропроводности  $\sigma$  не превышает трёх порядков во всем изучаемом частотном диапазоне, что описывается степенным 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)



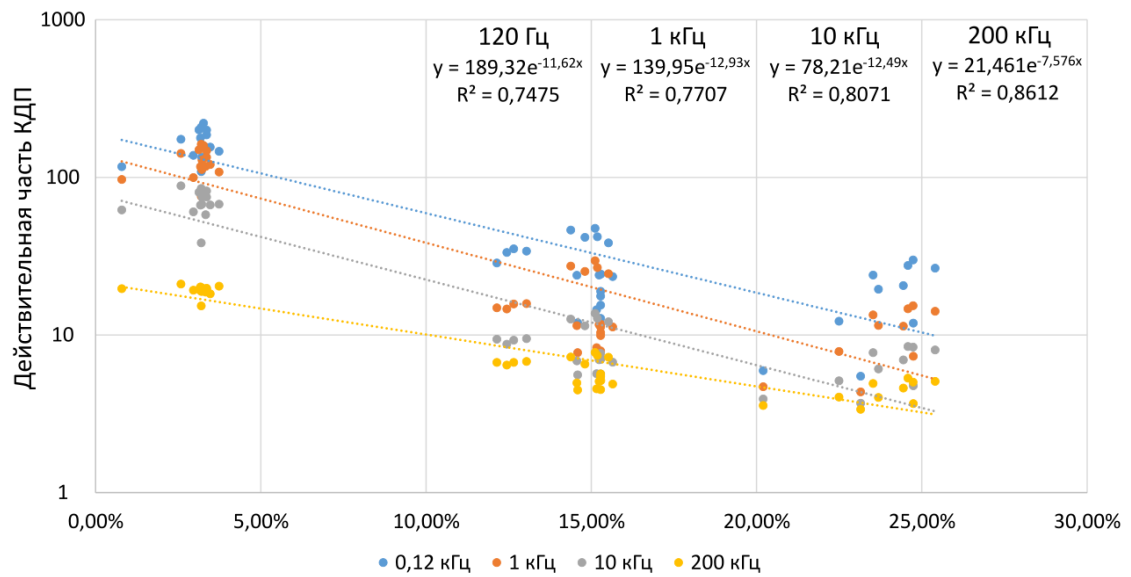
(б)

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

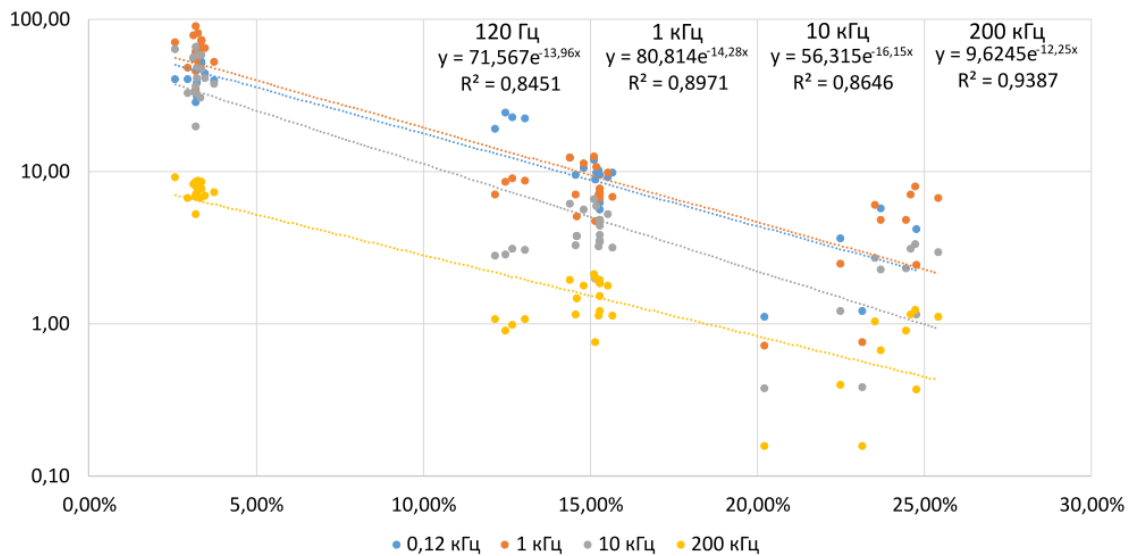
Рисунок 5 – Частотная зависимость электрических свойств осадочных горных пород

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  $\varepsilon'(f) = ae^{-kP}$ . 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)



(б)

(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  $\varepsilon(\omega)$  – диэлектрическая проницаемость, зависящая от частоты  $\omega$ ,  $\varepsilon_{\infty}$  – предельное значение ДП при высоких частотах,  $\omega$  – круговая частота, равная  $\omega = 2\pi f$ ,  $\tau$  – время релаксации,  $\Delta\varepsilon$  – интенсивность релаксационного процесса, обусловленная влиянием различных видов поляризации и определяемая как  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}$ , где  $\varepsilon_s$  – значение ДП при приложении к диэлектрику постоянного электрического поля

Коэффициенты аппроксимации представлены в таблице.

Таблица – Коэффициенты аппроксимации модели Коула-Коула

Серия	Параметры поляризации				
	$\varepsilon_{\infty}$	$\Delta\varepsilon$	$\tau$ , с	$f$ , Гц	$\alpha$
О.1	5,0	18,6	$2,10 \cdot 10^{-4}$	4761	0,45
О.2	11,95	96,2	$1,54 \cdot 10^{-5}$	64935	0,27
О.3	3,35	6,07	$1,99 \cdot 10^{-4}$	5025	0,46
О.4	5,46	7,01	$1,46 \cdot 10^{-3}$	685	0,05
О.5	5,01	0,11	$1,13 \cdot 10^{-3}$	885	0,04
О.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 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 °С) и отрицательной -40 °С 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  $\varepsilon'(f)$ , мнимой частей  $\varepsilon''(f)$  и тангенса диэлектрических потерь  $\tan \delta$  приведены на рисунках 7-9.

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

Водонасыщение образцов приводит к существенному возрастанию значений данных диэлектрических параметров.

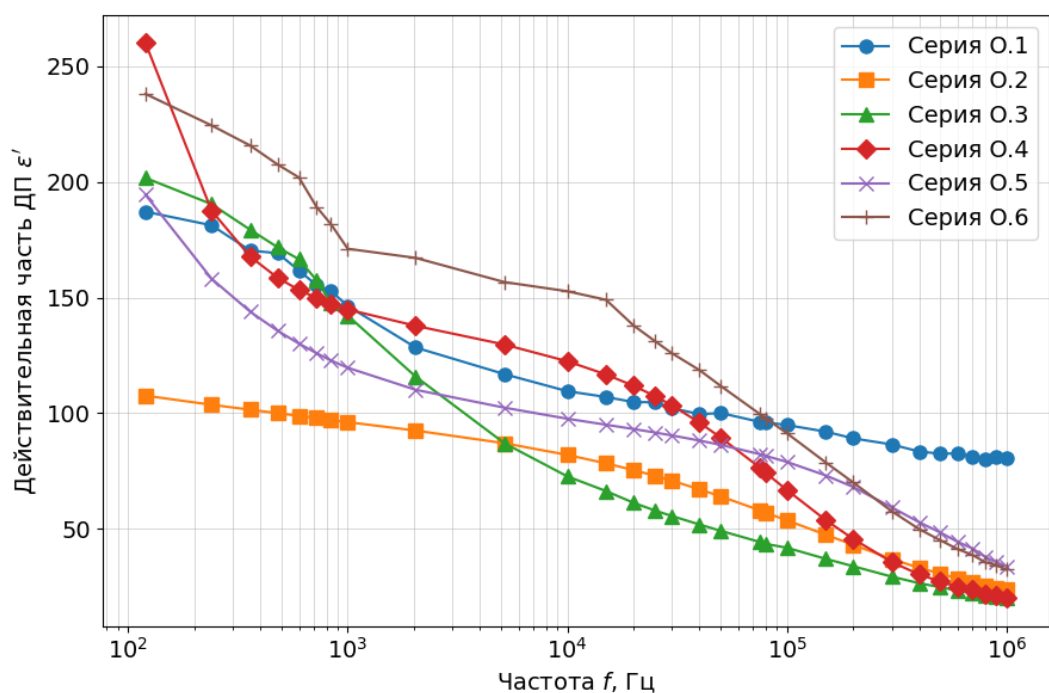


Рисунок 7 – Частотная зависимость действительной части ДП водонасыщенных образцов серий О.1-О.6 (известняка и песчаника) при температуре +20 °С

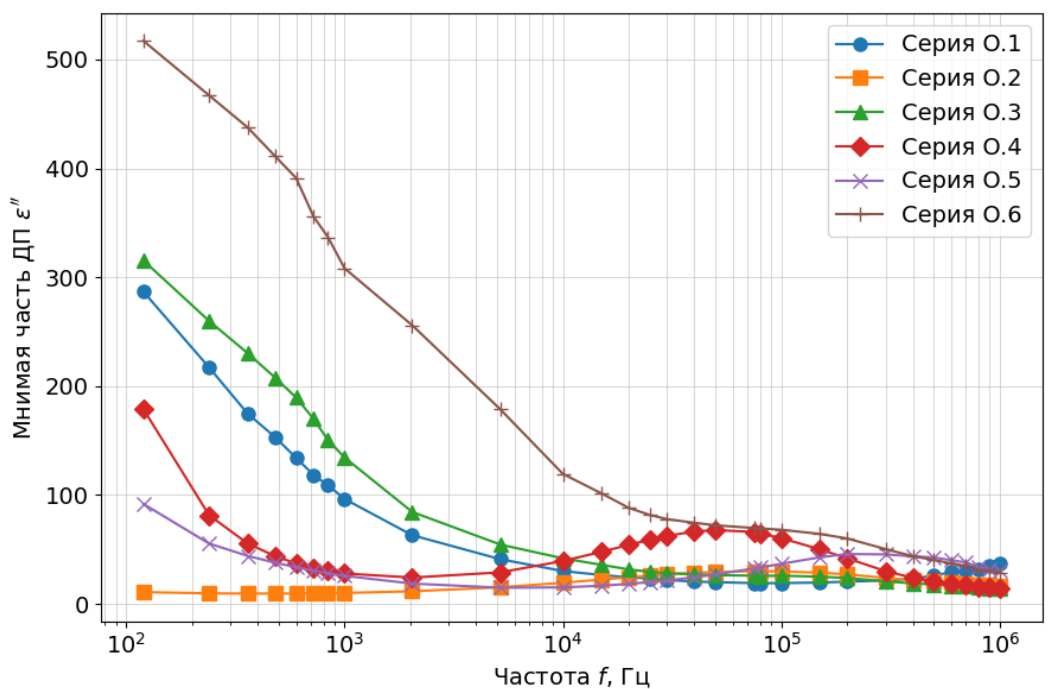


Рисунок 8 – Частотная зависимость мнимой части ДП водонасыщенных образцов серий О.1-О.6 (известняка и песчаника) при температуре +20 °С

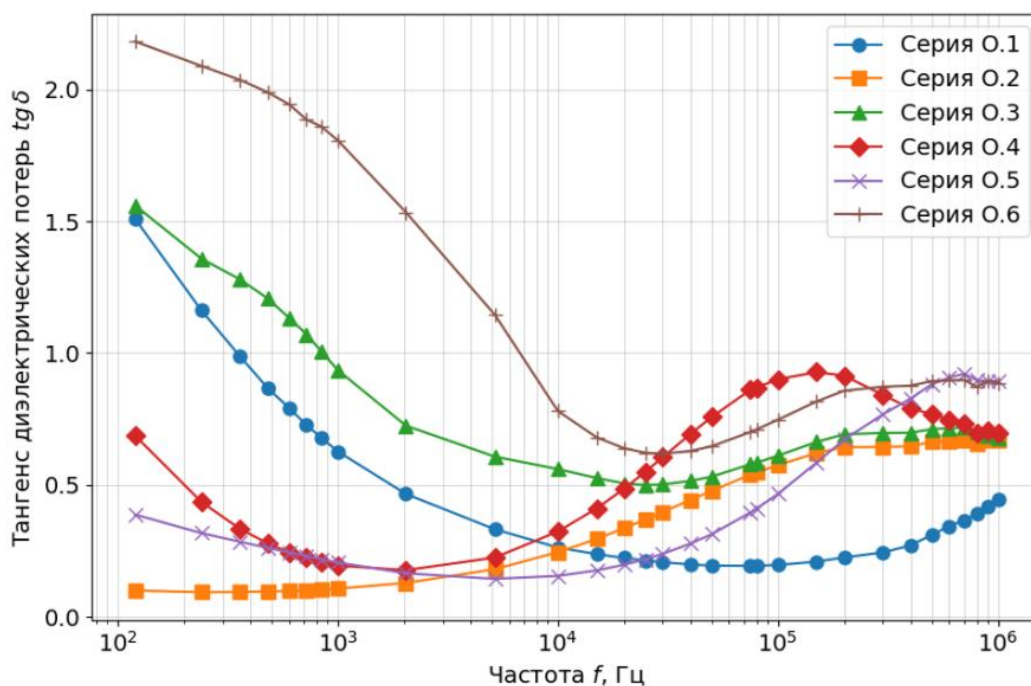


Рисунок 9 – Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь водонасыщенных образцов серий О.1-О.6 (известняка и песчаника) при температуре +20 °С

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  $\sim 200$  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  $CaMg(CO_3)_2$

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.

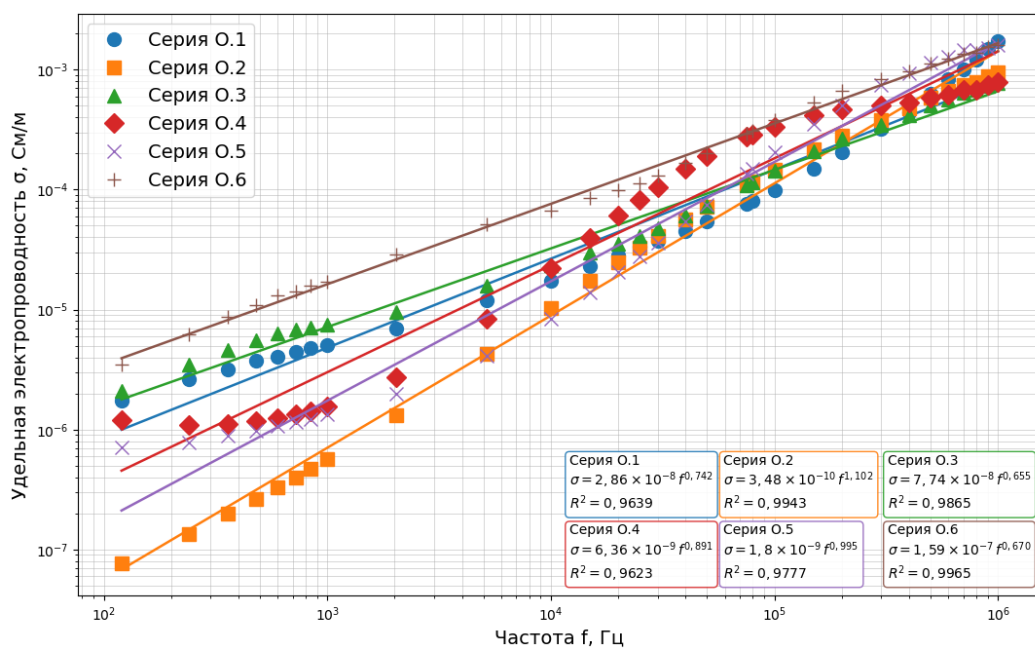
Одним из факторов, приводящим к сильной дисперсии диэлектрических свойств, является вклад самой жидкости. Полярная молекула воды имеет значение действительной части ДП  $\varepsilon'_{\text{вода}} \approx 78-80$  при комнатной температуре, в то время как скелет пород, определенный в главе 3 на высоких частотах после выполаживания значений диэлектрической проницаемости – 3,3-12. Заменяя воздух ( $\varepsilon'_{\text{воздух}} \approx 1$ ) в порах, вода радикально увеличивает объёмную среднюю  $\varepsilon'$  по любому смесовому закону. При низких частотах дипольная релаксация самой воды не успевает проявиться, однако статическая величина  $\varepsilon'$  воды остаётся в сумме смесовой формулы. Это приводит к увеличению значений ДП, удельной проводимости и уменьшению удельного сопротивления.

Из-за резкого контраста электрической проводимости  $\sigma$  и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'$  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.

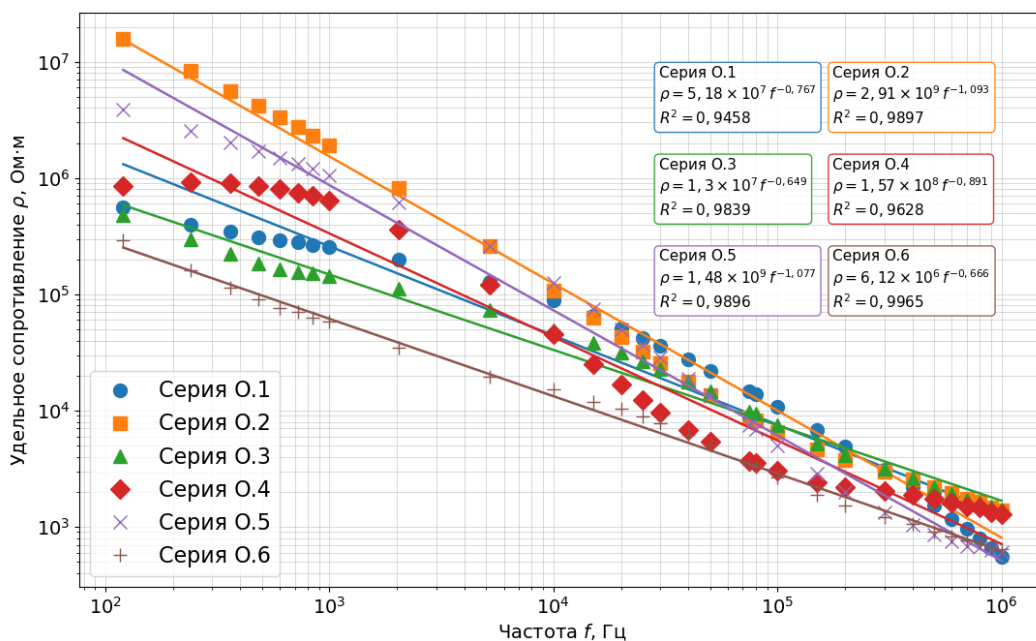
Также вода в порах образцов имеет более высокую проводимость, образуя проводящий канал, снижая общее удельное сопротивление системы (водонасыщенный образец) и увеличивая общую удельную электропроводность. Растворенные ионы и ионы воды дают объёмную проводимость порового раствора и значения  $\varepsilon''$  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  $\sigma$  на порядок приводит к увеличению значения тангенса диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$ .

Таким образом, водонасыщение одновременно увеличивает поляризацию, увеличивая значение  $\varepsilon'$ , вовлекает новые механизмы потерь (увеличивая  $\varepsilon''$ ) и задействует механизмы ионной проводимости  $\sigma$ , 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.



(а)



(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  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  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.

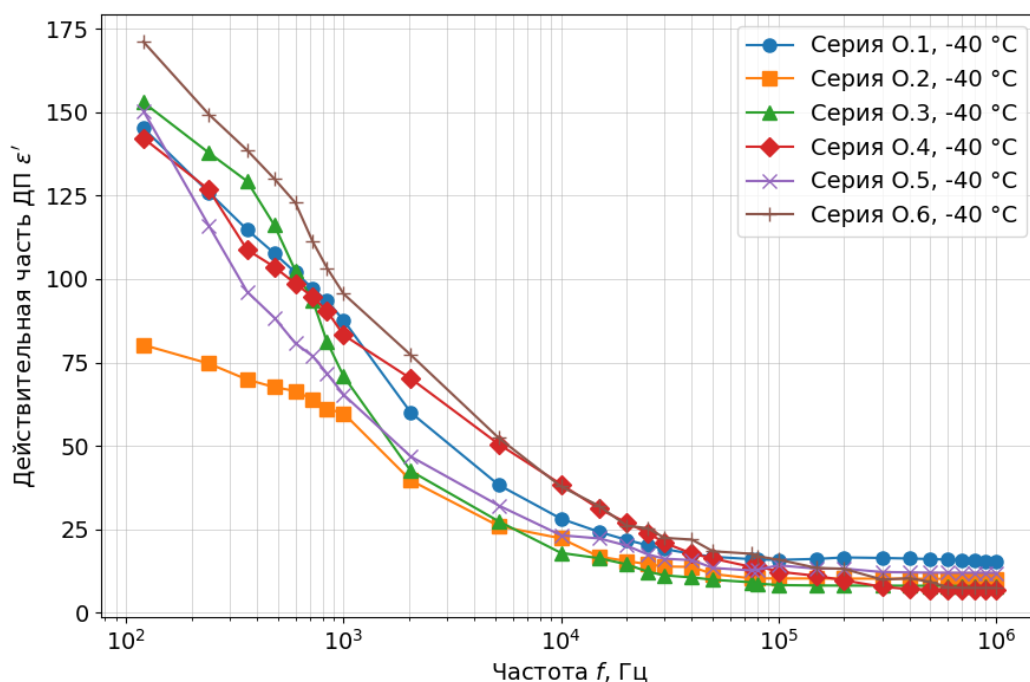


Рисунок 11 – Зависимость действительной части ДП от частоты для образцов песчаника и известняка при температуре  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

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

Сравнение отдельных серий позволяет выявить общие черты и некоторые различия. Так, образцы с наибольшими начальными значениями  $\epsilon'$  при нормальных условиях и температуре  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (серии О.4 и О.6) демонстрируют наиболее резкое относительное снижение при замораживании до температур  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В то же время серии с более умеренными начальными значениями (О.2 и О.5) характеризуются несколько меньшим относительным падением, хотя общая тенденция сохраняется. Значения  $\epsilon'$  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 °С значения  $\varepsilon'$  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) разница в значениях при положительной и отрицательной температурах достигает максимума. При нормальных условиях и температуре +20 °С значения действительной части ДП стабилизируются в пределах 20-80 в зависимости от образцов, тогда как при отрицательной температуре -40 °С 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  $\varepsilon'$ , обусловленными только высокочастотной электронной и атомной поляризацией, которая в данной работе не рассматривается. Падение  $\varepsilon'$  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.