

Санкт – Петербургский государственный университет
Институт наук о Земле
Кафедра геофизики

Емельянов Вячеслав Ильич

**Изучение электропроводности кимберлитов месторождения им.
Ломоносова на образцах**

Выпускная квалификационная работа бакалавра

Зав. кафедрой геофизики

д.г.-м.н., проф. К.В. Титов

Научный руководитель

д.г.-м.н., проф. К.В. Титов

Санкт – Петербург

2018

Содержание

	Стр.
Введение	3
1. Геолого-геофизическая характеристика кимберлитовых тел месторождения им. Ломоносова.....	4
2. Петрофизических свойства кимберлитов.....	8
3. Подготовка образцов и методика лабораторных измерений.....	17
4. Обработка лабораторных измерений	
4.1. Первичная обработка полученных данных.....	20
4.2. Подбор параметров распределения Дебая	26
5. Результаты и их интерпретация.....	30
Заключение.....	32
Литература.....	33

Введение

Геофизические методы активно применяются для поиска кимберлитовых тел. До недавнего времени определяющим в комплексе поисковых методов была магниторазведка. Данный метод хорошо выделяет неоднородности, связанные с кольцевыми структурами. Однако, аномалии, приуроченные к кольцевым структурам, не всегда соответствуют кимберлитовым телам. Кроме того, содержание магнетита в кимберлитовых породах может варьировать [Кононова, 2007] – это создает ограничение в применении магниторазведки для поиска кимберлитовых трубок. Поэтому в настоящее время активно применяется электроразведка в различных ее модификациях [Cunio, 2009; Kaminsky, 2016 и др.]. Как показывает практика, электроразведка позволяет выделять рудоконтролирующие структуры. Помимо этого, для понимания природы высокой электропроводности кимберлитовых пород следует изучать их петрофизические свойства, используя различные значения минерализации поровой влаги.

В связи с этим, целью работы является изучение электропроводности образцов кимберлитов месторождения им. Ломоносова в зависимости от электропроводности порового раствора.

При этом решались следующие задачи:

- 1) Ознакомление с литературными данными по геологии и петрофизике кимберлитов;
- 2) Изучение методики измерений комплексной электропроводности в частотной области на образцах;
- 3) Подготовка образцов;
- 4) Проведение лабораторных измерений кимберлитовых пород разных фаций;
- 5) Интерпретация полученных данных.

1. Геолого-геофизическая характеристика кимберлитовых тел месторождения им. Ломоносова

В пределах Архангельской алмазоносной провинции выделяют Золотицкое кимберлитовое поле. Одним из месторождений в пределах данного поля является месторождение имени Ломоносова. Геология трубок данного поля хорошо изучена. Трубочные тела прорывают породы венда и карбона осадочного чехла Восточно-Европейской платформы (рис.1).

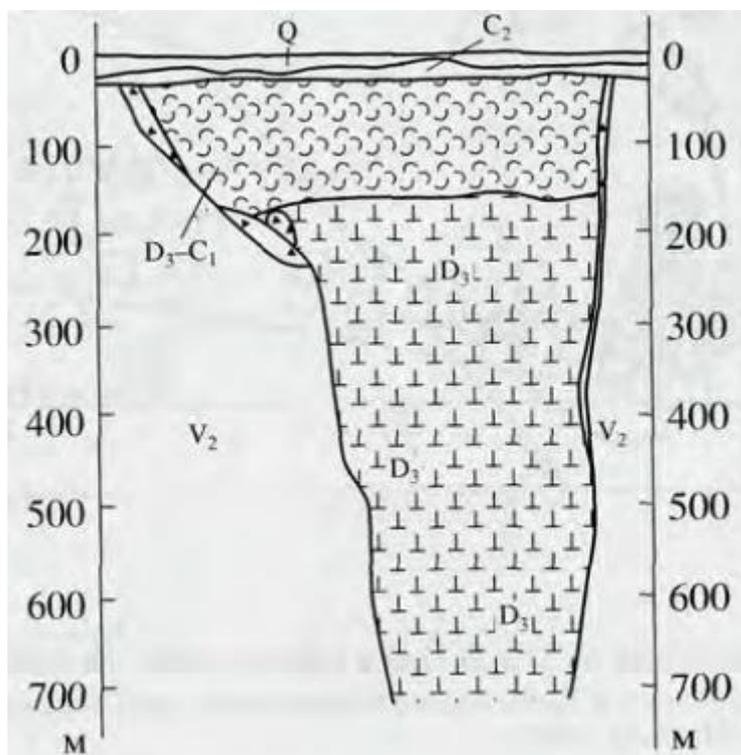


Рисунок 1. Схематический разрез трубки Архангельская [Кононова и др., 2007].

Породы вендской системы представлены песчано-глинистыми отложениями. Они повсеместно распространены в пределах месторождения. Отложения карбона перекрывают вендские толщи и представлены также терригенными отложениями с прослоями конгломератов и, реже, - карбонатных пород.

В июле 2017 года в рамках производственной практики в ЗАО КЦ «РОСГЕОФИЗИКА» автор участвовал в опытно-методических электроразведочных работах методами ТЭЗ-ВП и электропрофилирования установкой срединного градиента.

Электропрофилирование трубки Поморская было выполнено по трем профилям. Как видно из рис.2, контур трубки отмечен зоной пониженного кажущегося сопротивления. Однако, контраст со вмещающими породами слабый, из-за схожих геоэлектрических свойств. Это затрудняет четкое выделение границы кимберлитового тела.

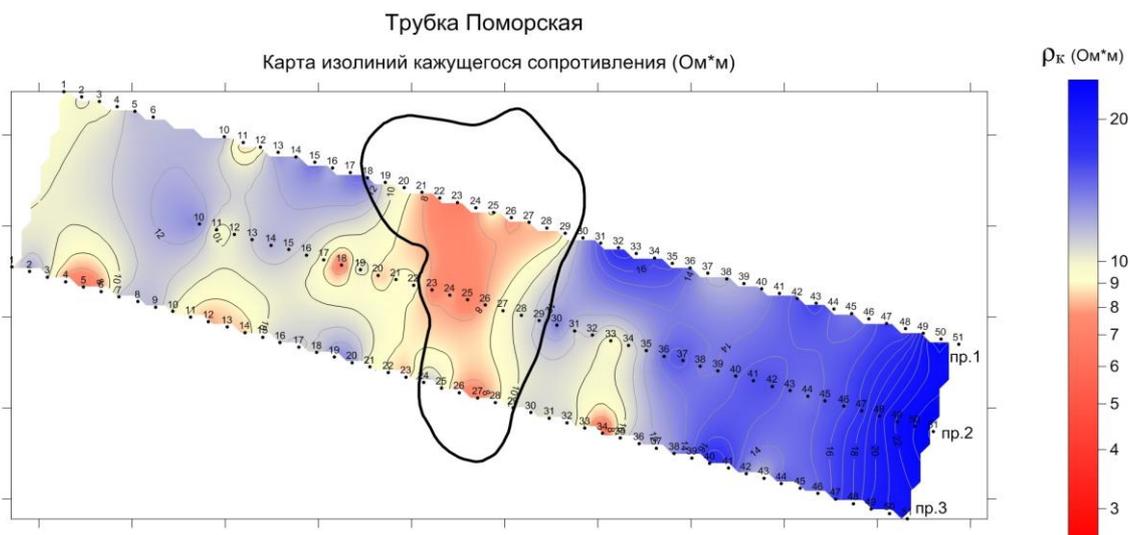


Рисунок 2. Карта изолиний кажущегося сопротивления.

По центральному профилю были выполнены работы методом трехэлектродного электрического зондирования с измерениями кажущегося сопротивления и поляризуемости. По результатам съемки построены геоэлектрические разрезы этих параметров с использованием программы 2d инверсии ZondRez2D (рис.3). На геоэлектрическом разрезе контур трубки имеет расплывчатые очертания. Параметр поляризуемости достаточно контрастно выделяет жерловую часть кимберлитового тела повышенными значениями поляризуемости.

На трубке Пионерская измерения проводились по той же методике. Электропрофилирование выполнялось по трем профилям: двум параллельным и расположенным вдоль короткой оси трубки и третьему - вдоль длинной оси. Трубка также выделяется пониженными значениями кажущегося сопротивления – менее 25 Ом на фоне примерно 60 Ом, характерном для вмещающих пород (рис.4).

По профилю вдоль длинной оси трубки были выполнены работы методом ТЭЗ-ВП и были построены геоэлектрические разрезы удельного сопротивления и поляризуемости (рис.5). В разрезе трубка также достаточно хорошо выделяется пониженными значениями

удельного сопротивления. Хорошо подчеркивается зональность кимберлитового тела. В разрезе поляризуемости, в отличие от трубки Поморская, наблюдается повышение значений в верхней кратерной части. На пикете 50 зафиксирована вертикальная зона высоких значений поляризуемости ($>2\%$), вероятно связанная с деформацией или приразломными изменениями пород.

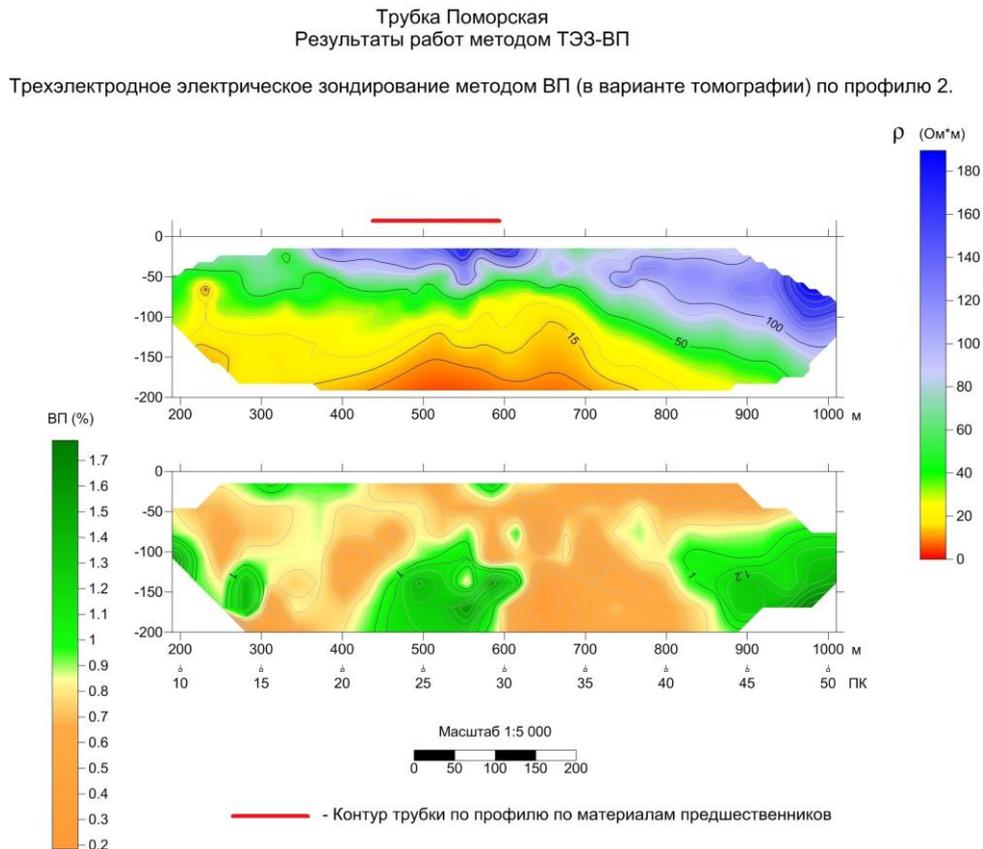


Рисунок 3. Геоэлектрические разрезы УЭС и поляризуемости.

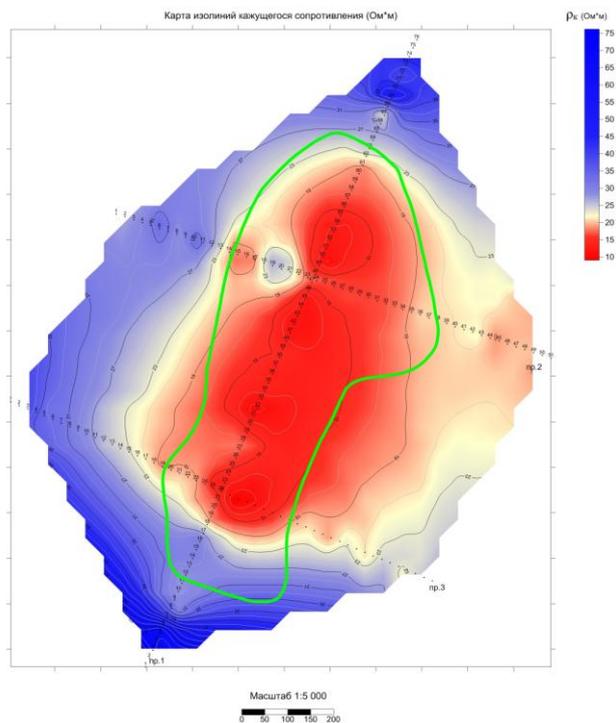


Рисунок 4. Карта изолиний кажущегося сопротивления по трубе Пионерская. Контуром показано положение трубы в плане.

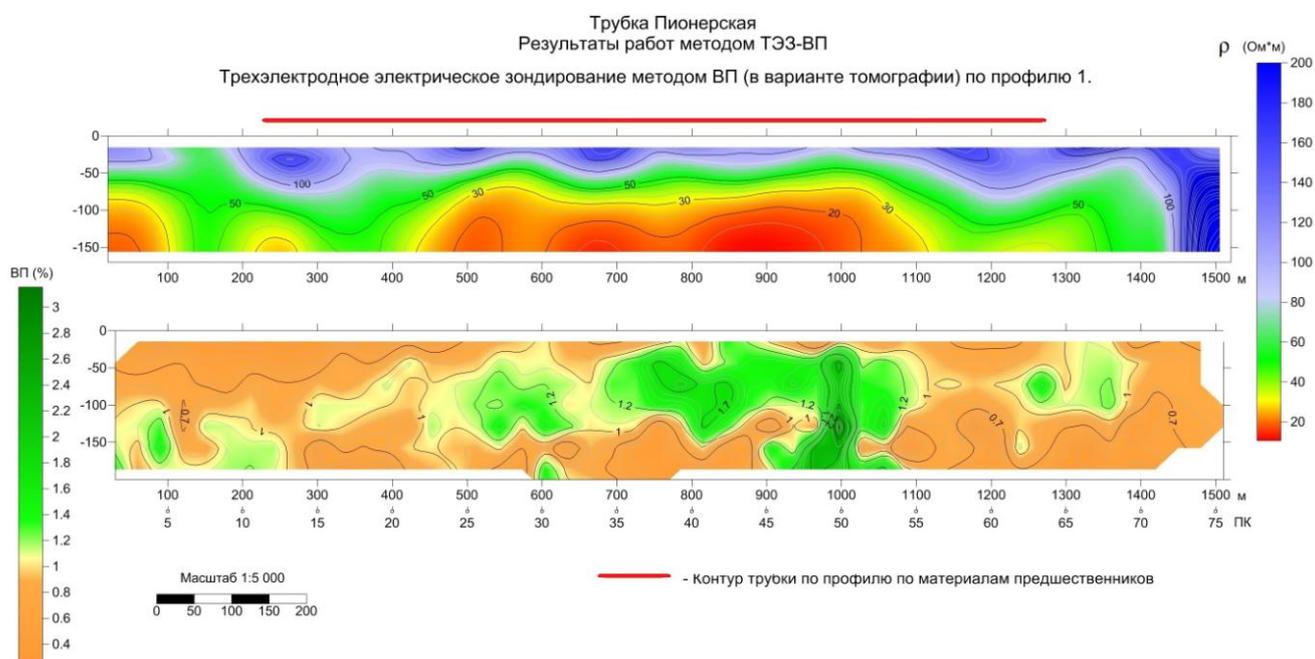


Рисунок 5. Геоэлектрический разрез трубы Пионерская.

2. Петрофизические свойства кимберлитов

Структурно-текстурные особенности (размер зерен, пористость, удельная поверхность и т.д.), а также минерализация подземных вод, вероятно, обуславливают пониженные значения их удельного электрического сопротивления (УЭС) относительно вмещающих пород. В то же время причина высокой электропроводности кимберлитов к настоящему времени не изучена. Производственные работы свидетельствуют о том, что трубочные тела создают заметные аномалии электрических параметров. Однако, существуют факторы, способные понижать или повышать значения УЭС кимберлитовых пород в условиях их естественного залегания. Аномалии проводимости над кимберлитовыми телами описаны во многих публикациях (Маснае, 1979; Reed, 1991; Pell 2013; Kaminski, 2016 и др.), которые будут рассмотрены ниже.

Арнотт и Костлин [Arnott and Kostlin, 2005] составили обобщенную модель УЭС кимберлитовых тел Восточной Сибири, Южной Африки и провинции Саскачеван в Канаде (рис.6).



Рисунок 6. Обобщенная модель УЭС кимберлитовых тел [Reed and Witherly, 2007] (с изменениями).

Они показали, что в зависимости от фаций значения УЭС варьируют от единиц до сотен омметров, увеличиваясь от кратерной части к гипабиссальной части кимберлитового тела. Из-за высокой пористости и проницаемости кимберлитовый материал особенно подвержен процессам выветривания [Маснае, 1979]. На основании этого Мэкней выделяет три зоны кимберлитового тела, начиная с наиболее измененной верхней фации, состоящей преимущественно из глинистого материала. В процессе выветривания формируется зона пониженных значений УЭС. В связи с этим, при параллельном проведении магниторазведочных и электроразведочных работ, аномалии УЭС, отвечающие кольцевой структуре, могут быть большего диаметра, чем аномалии магнитного поля [Маснае, 1979].

Да Коста описал результаты полевых исследований кимберлитовой трубки Палмиетфонтейн в Южной Африке (рис.7).

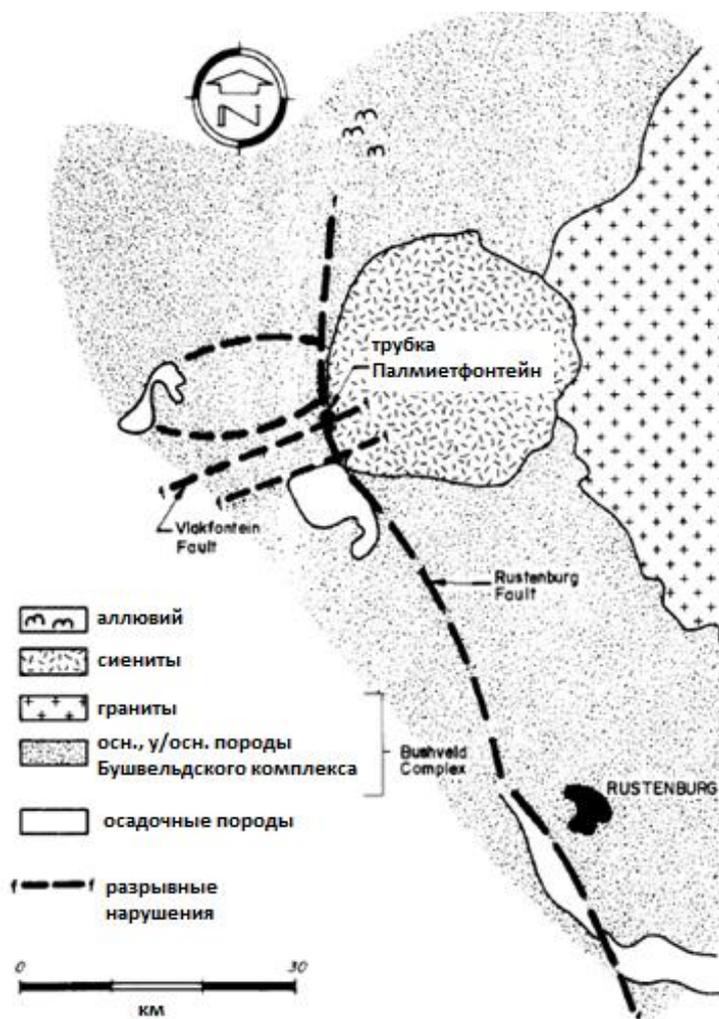


Рисунок 7. Схема расположения кимберлитовой трубки Палмиетфонтейн [Da Costa, 1989].

Электроразведка проводилась методом сопротивлений установкой Шлюмберже. По результатам работ была построена карта распределения УЭС (рис.8).

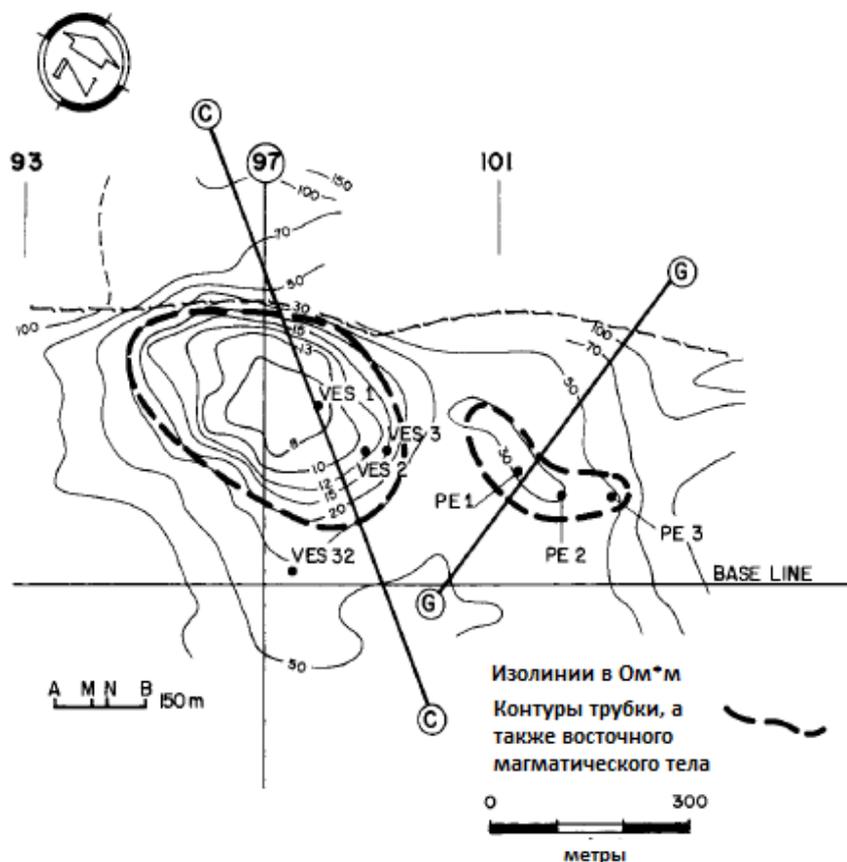


Рисунок 8. Карта изолиний УЭС над трубкой Палмиетфонтейн [Da Costa, 1989].

Низкие значения УЭС (до 10 омметров) наблюдаются в центральной части кимберлитового тела; значения постепенно повышаются при переходе на периферию, что связано с переходом из выветрелой фации кимберлитовой трубки в менее измененную. Таким образом, мы имеем схожую закономерность, с той, что ранее была описана Мэкнеем [Маснае, 1979].

В пределах Якутской алмазаносной провинции в 2014 году методом переходных процессов было изучено строение кимберлитовой трубки Амакинская (рис.9). Результатом инверсии стали планы распределения УЭС и заряжаемости (рис.10). Как видно из рис.10, пониженные значения УЭС и повышенные значения заряжаемости наблюдаются в верхних частях кимберлитового тела, что связано с повышенным содержанием глинистой составляющей в породах данной фации.



Рисунок 9. Схема района исследований с описанием вмещающих пород [Kaminski et al., 2016].

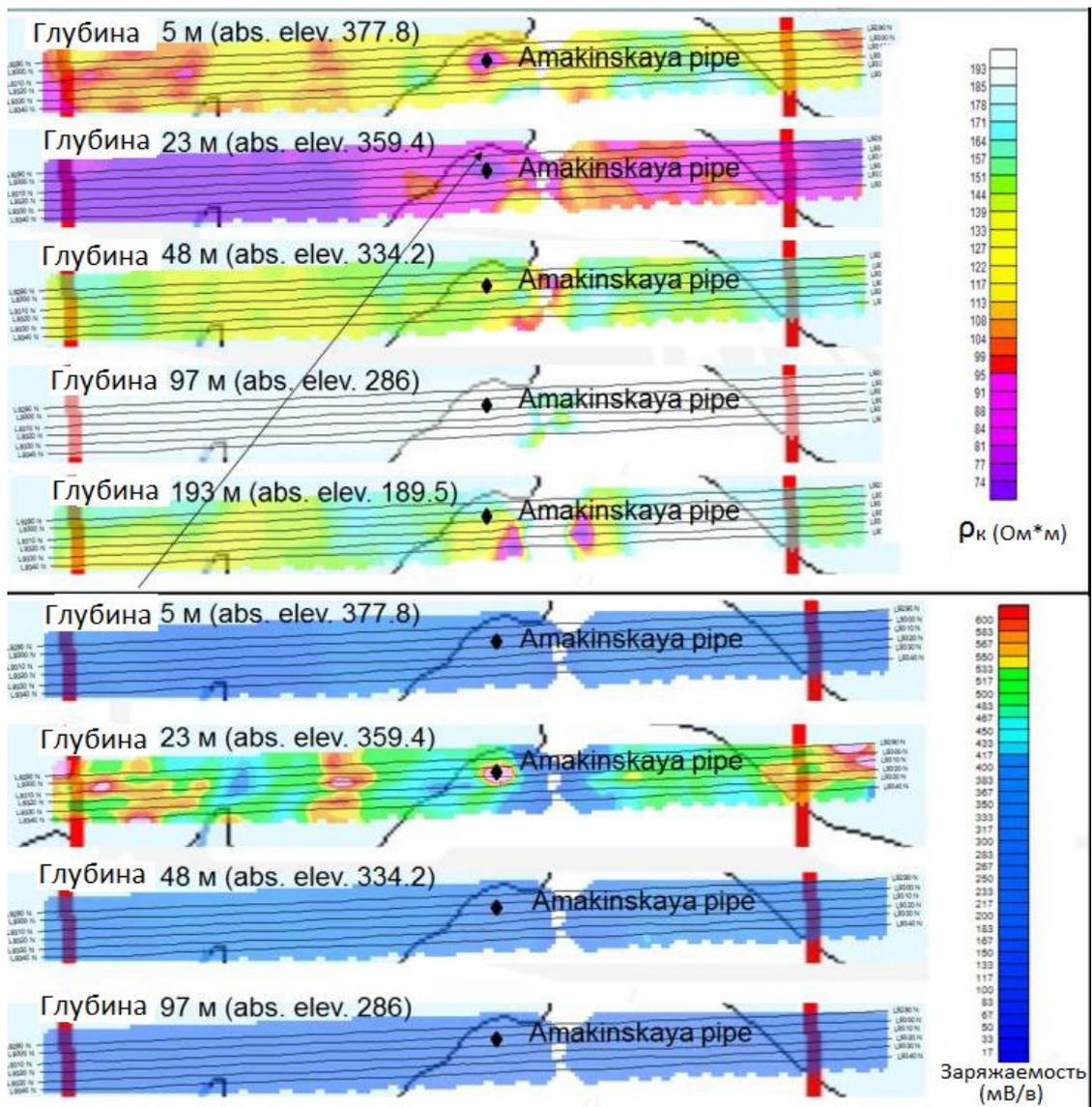


Рисунок 10. Распределение УЭС и заряжаемости с глубиной (черный ромб– расположение кимберлитовой трубки Амакинская) [Kaminski et al., 2016].

Эти же авторы провели лабораторные измерения образцов (табл.1). Полученные значения УЭС хорошо коррелируют с результатами полевых наблюдений.

Таблица 1. УЭС кимберлитов трубки Амакинская и вмещающих их пород по данным лабораторных измерений [Kaminski et al., 2016].

Тип породы	Формация	УЭС (В Ом*М)	Примечания
Кимберлит	Трубка Амакинская	30-60	Выветренная часть, глинистая
Кимберлит	Трубка Амакинская	500-1000	Кимберлитовая брекчия
Кимберлит	Трубка Амакинская	290-400	Кимберлиты с карбонатной составляющей
Глинистый известняк	J1	100-400	
Илистый песчаник	J1	100-400	

Как видно из табл. 1, значения УЭС повышаются от выветрелых, глинистых фаций кимберлитового тела к более глубоким и консолидированным фациям, оставаясь в то же время более низкими, чем типичные значения для магматических пород. Более низкие значения УЭС в полевых наблюдениях объясняются влиянием поровой минерализованной воды, которая является частью водоносного горизонта в толщах вмещающих пород.

Эд Кунион [Cunio, 2009] описал результаты исследования трубок мелового возраста кимберлитового поля Коконг, расположенного в южной части пустыни Калахари на территории республики Ботсвана (рис.11).



Рисунок 11. Расположение кимберлитового поля Коконг [Cunio, 2009].

Тела трубок перекрыты толщей неконсолидированных песков мощностью от 40 до 100 м со значениями УЭС более 2000 омметров. На глубине 40 метров происходит переход песка в литифицированный песчаник, удельное сопротивление которого варьирует в зависимости от водонасыщенности. Средние значения составляют более 1000 омметров, что указывает на низкую минерализацию грунтовых вод Калахари. Базальный слой мощностью от 5 до 20 метров характеризуется резким падением значений УЭС до 2-90 омметров, вызванным повышением минерализации вод, а также появлением глинистой составляющей. Данный проводящий слой залегает полого на эпикластической кратерной части кимберлитовой трубки, УЭС которой составляет от 3 до 31 омметров. Наименьшее значение УЭС (1 омметр) отмечено на трубке Коконг. Оно приурочено к нижней туфтовой фации (рис.12). Вероятно, крайне низкое значение УЭС данной толщи связано с насыщением высокопористых пород рассолами.

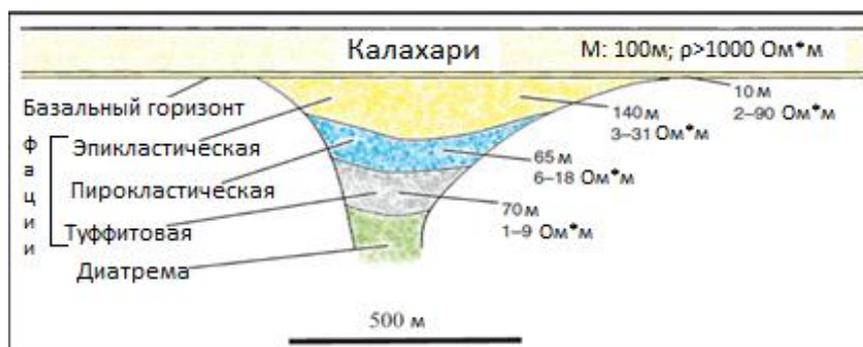


Рисунок 12. Упрощенный разрез трубки Коконг [Cunipon, 2009].

Значения петрофизических параметров были получены в результате лабораторного исследования образцов керна (табл.2).

Таблица 2. Петрофизические свойства кимберлитов трубки Коконг и перекрывающих пород по данным лабораторных измерений [Cunio, 2009].

Фация	УЭС (Ом*м)	Плотность (г/см ³)	Примечания
Эпикластическая	3-31	2.1-2.15	Наименее плотные
Пирокластическая	6-18	2.15-2.2	
Туффитовая + диатрема	1-9.1	2.25-2.38	Наименьшие значения УЭС
Калахари	2-2000+	2.12-2.35	Проводящий базальный слой
Кару	нет данных	2.24-2.33	

На том же участке были выполнены наблюдения методом переходных процессов. По результатам съемки был построен геоэлектрический разрез, который хорошо коррелирует с данными, полученными в результате лабораторных исследований (рис.13). Изменение поведения изолиний УЭС в центре отвечает кимберлитовому телу в осадочной толще Кару.

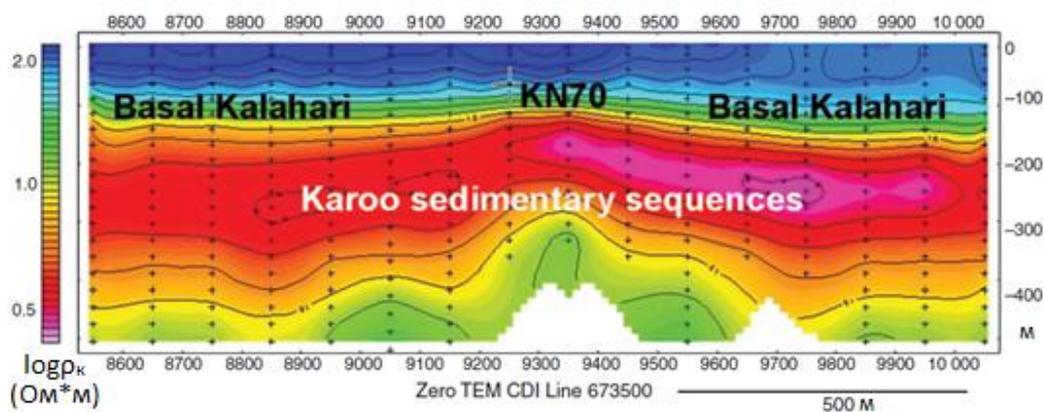


Рисунок 13. Геоэлектрический разрез над трубкой Коконг по данным МПП [Cunio, 2009].

Однако, значения удельного электрического сопротивления кимберлитовых тел не всегда лежат в пределах единиц и первых десятков омметров. В провинции Саскачеван в Канаде кимберлитовое поле Лак де Грас прорывает породы фундамента, представленные гранито-гнейсами с очень высокими значениями УЭС порядка 10000 омметров (рис.14).

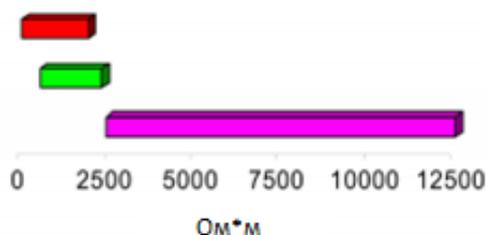


Рис.14 УЭС вмещающих и кимберлитовых пород Лак де Грас (красным цветом показана гипабиссальная фашия, зеленым - кратерная фашия, фиолетовым – вмещающие породы) [Power and Hildes, 2007].

Как для ранее описанных объектов, УЭС кимберлитовых пород контрастирует со значениями во вмещающих породах и повышается с глубиной, но не так значительно. Более высокие значения УЭС кимберлитовых тел данной области можно связать с особенностями геологического строения и климатическими условиями данного региона. Электроразведка кимберлитовых трубок в данном регионе осложнена образованием озер на месте депрессий в рельефе, возникших в результате внедрения кимберлитовых тел, а также, - схожими значениями электрического сопротивления кимберлитовых пород и флювиогляциальных отложений. В связи с этим, в провинции Саскачеван для поиска кимберлитовых тел чаще применяются магниторазведка и сейсморазведка.

Таким образом, аномалии проводимости над кимберлитовыми телами встречаются повсеместно, но характер и интенсивность этих аномалий различна. Эти различия связаны как с составом вмещающих пород, так и с минерализацией подземных вод. Для уточнения природы электропроводности кимберлитов в рамках настоящей работы выполнены эксперименты по ее измерению при разной электропроводности поровой влаги.

3. Подготовка образцов и методика лабораторных измерений

Для проведения лабораторных измерений первоначально были подготовлены 5 образцов кубической формы размером 25x25x25 мм (табл.3).

Таблица 3. Характеристика образцов.

Номер образца	Источник	Фация
К-134	Проба на поверхности	Ксенотуфобрекчия
К-164	Скважина	Автолитовая брекчия
К-174	Скважина	Автолитовая брекчия
К-133	Проба на поверхности	Ксенотуфобрекчия
К-173	Скважина	Автолитовая брекчия

Далее планировалось последовательное насыщение образцов водным раствором NaCl следующих концентраций: 0,1 г/л; 0,4 г/л, 0,6 г/л, 1 г/л, однако после первой серии измерений (при минерализации воды 0.1 г/л) при выемке из ячеек образцы рассыпались. Дальнейшие измерения проводились на образце К164, нарушенного сложения, который насыщался растворами с последовательно повышающейся минерализации. Насыщение этого образца вне естественного сложения производилось непосредственно в измерительной ячейке.

Измерения производились с помощью системы SIP Fuchs III (рис.15). Данная система позволяет получить зависимость комплексного удельного электрического сопротивления от частоты. Диапазон исследуемых частот составляет 1мГц – 20 кГц.



Рисунок 15. Система SIP Fuchs III.

В качестве лабораторной, использовалась пятиэлектродная симметричная установка (рис.16), представляющая собой два контейнера из органического стекла, которые заполнялись раствором, а также силиконовый держатель для образца с отверстиями под приёмные электроды. В качестве приемных электродов использовались хлорсеребряные электроды. Измерения напряжения выполняли относительно центрального приемного электрода.

Коэффициент установки был рассчитан путем тестового измерения водного раствора NaCl с известной электропроводностью. Имея сопротивление исходного раствора, а также импеданс, измеренный SIP Fuchs III, был рассчитан коэффициент установки. Как видно из рис.17 при измерениях на воде фаза комплексного сопротивления обращается в ноль в диапазоне частот от 1,43 мГц до 100 Гц, что свидетельствует о корректности измерения. В области более высоких частот наблюдается емкостная наводка между приемной и токовой линией, что характерно для данного типа аппаратуры.

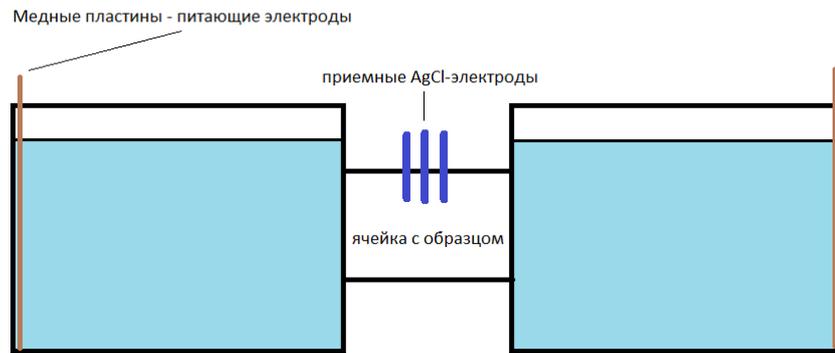


Рисунок 16. Схема лабораторной установки.

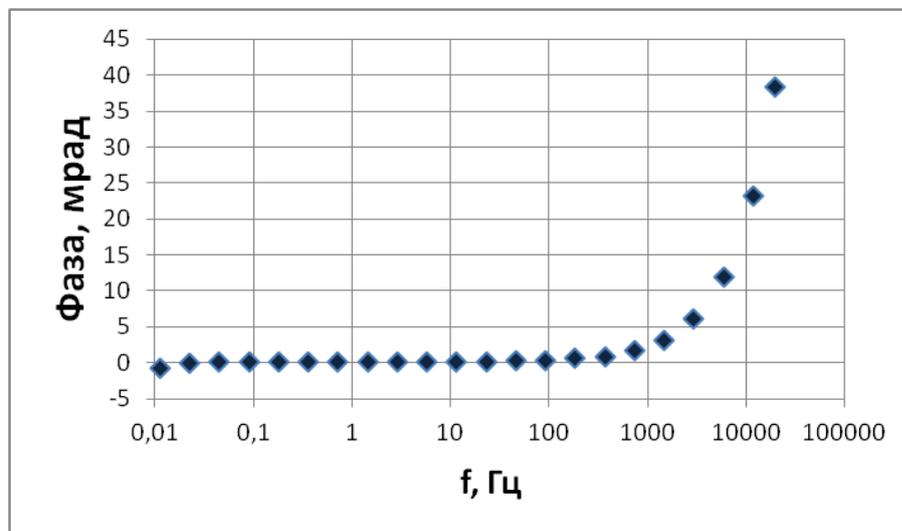


Рисунок 17. Зависимость фазы от частоты в растворе NaCl с минерализацией 0,1 г/л.

4. Обработка лабораторных измерений и результаты

4.1 Первичная обработка данных

По результатам лабораторных измерений были построены графики зависимостей $|\rho|$ и фазы от частоты (рис.18-23). Графики зависимостей представлены для пяти образцов в естественном сложении, при минерализации порового раствора 100 мг/л и 300 мг/л для образца К173, а также для образца разрушенного образца К164 материалом которого была заполнена ячейка.

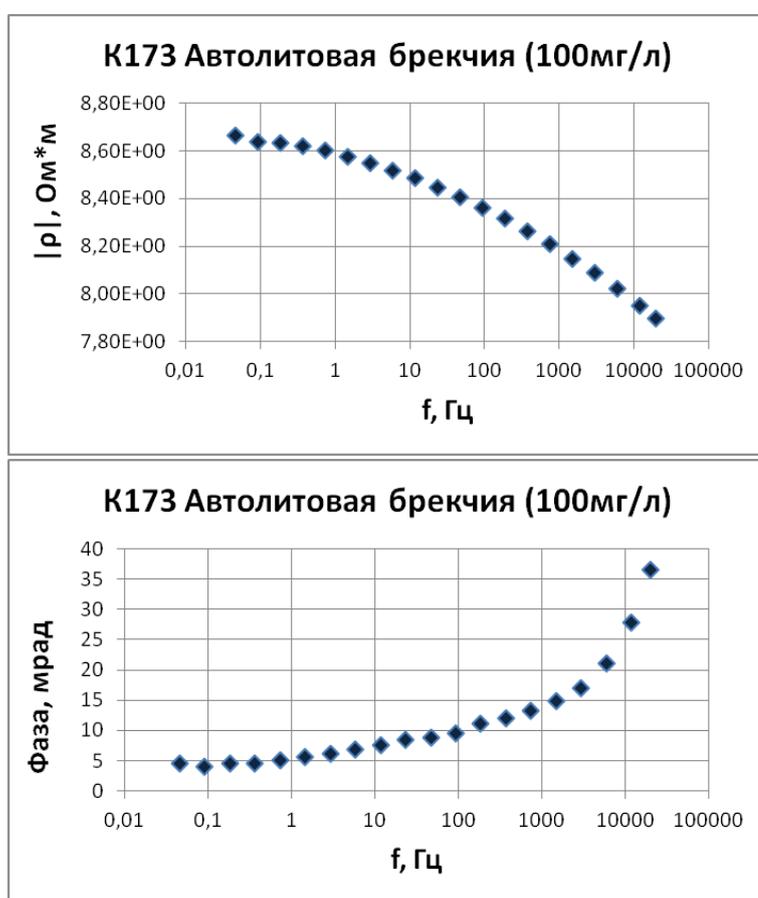


Рисунок 18. График зависимости комплексного сопротивления и фазы от частоты для образца К173.

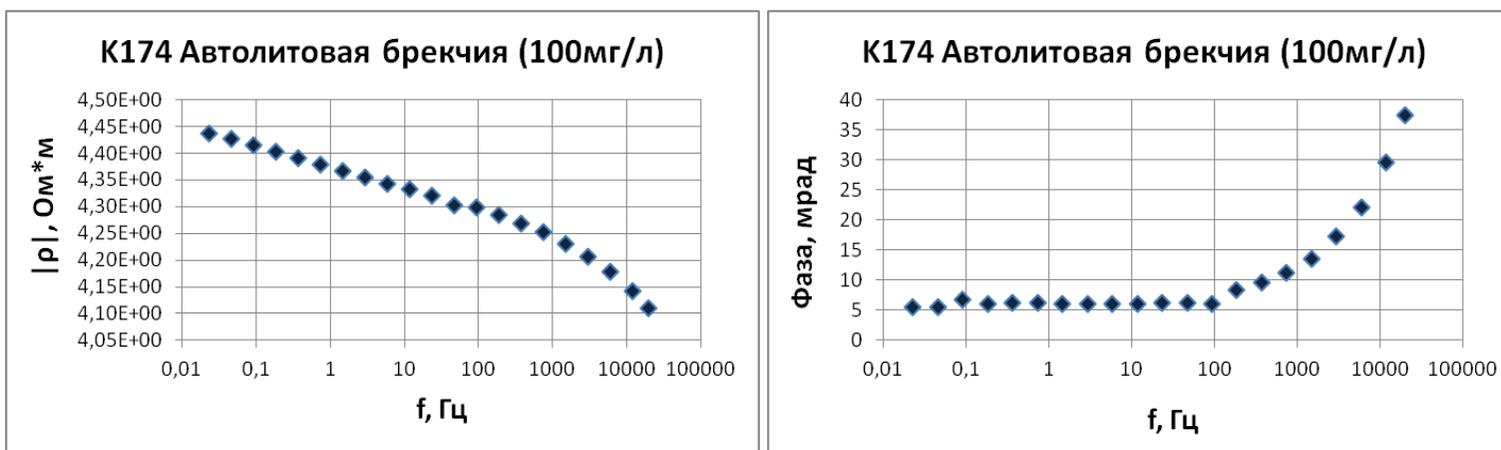


Рисунок 19. График зависимости комплексного сопротивления и фазы от частоты для образца K174.

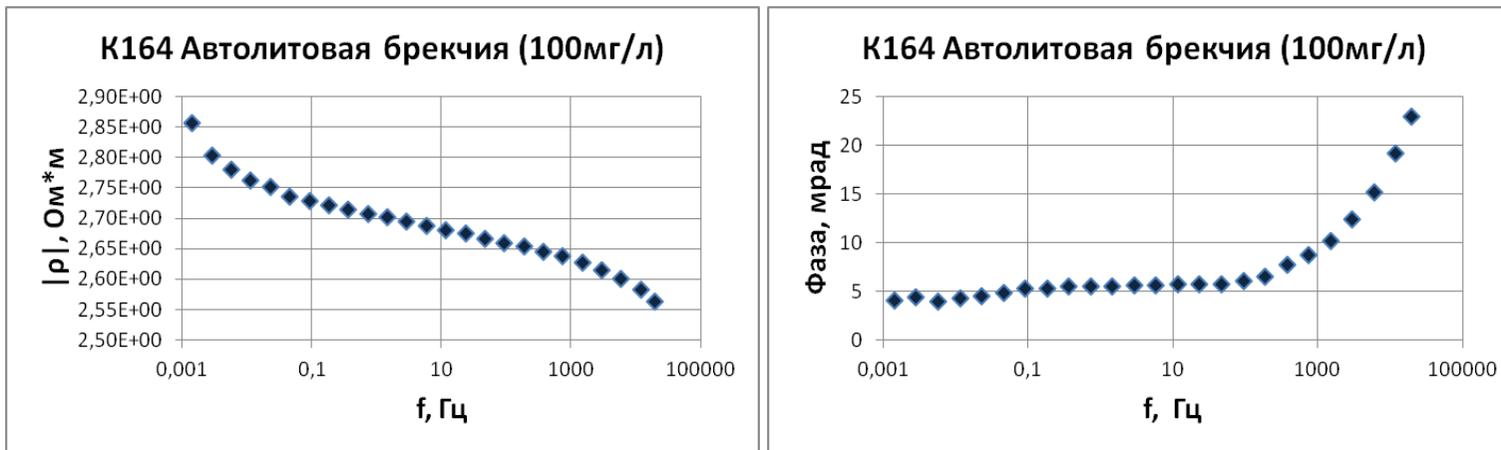


Рисунок 20. График зависимости комплексного сопротивления и фазы от частоты для образца K164.

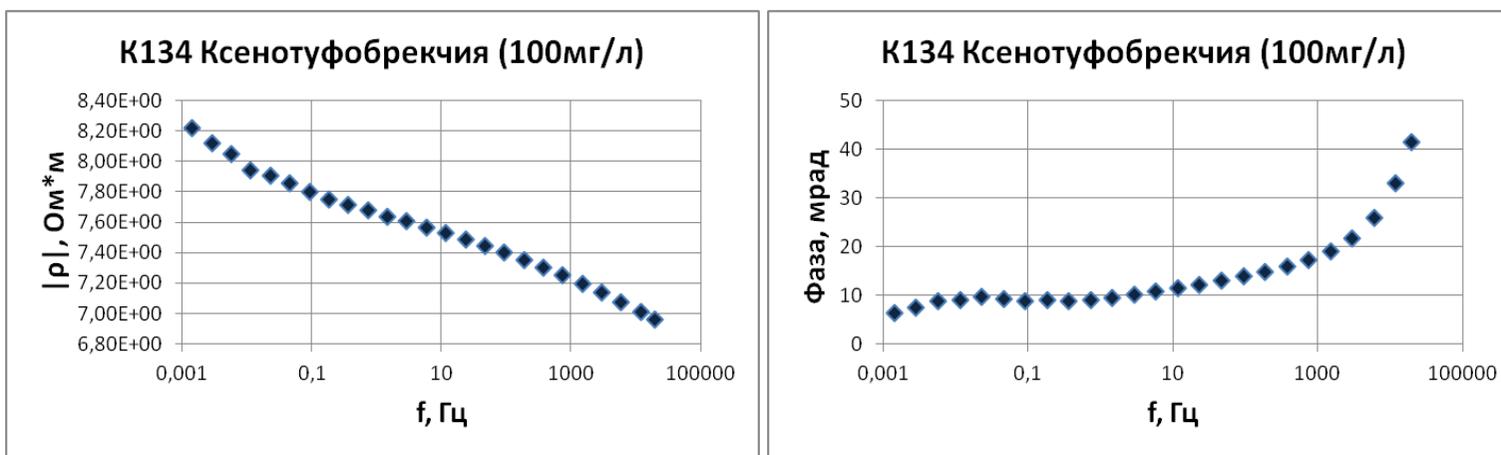


Рисунок 21. График зависимости комплексного сопротивления и фазы от частоты для образца K134.

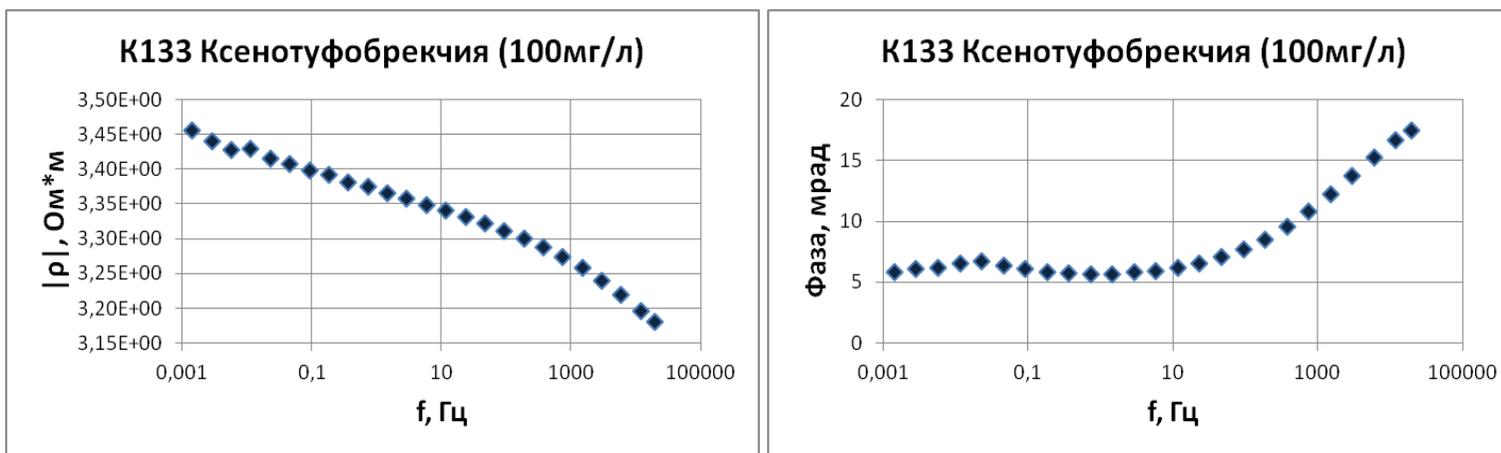


Рисунок 22. График зависимости комплексного сопротивления и фазы от частоты для образца K133.

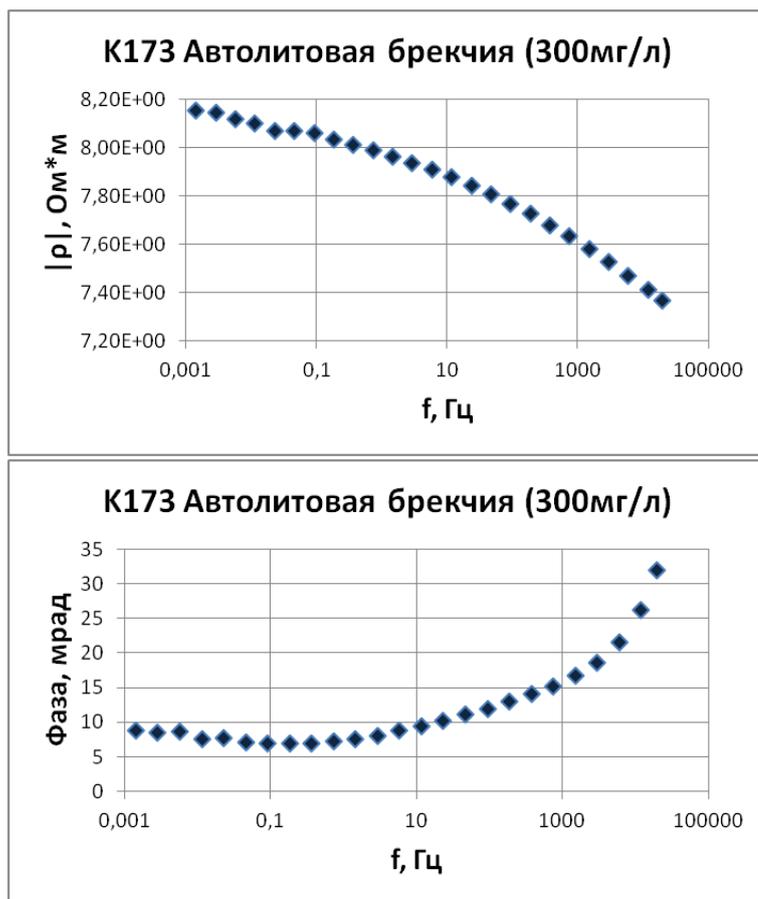


Рисунок 23. График зависимости комплексного сопротивления и фазы от частоты для образца К173.

Для образца К-164 для примера контроля качества измерений приведены графики по результатам трёх повторных измерений (рис.24-26). Как видно из рисунков результаты повторных измерений – близки.

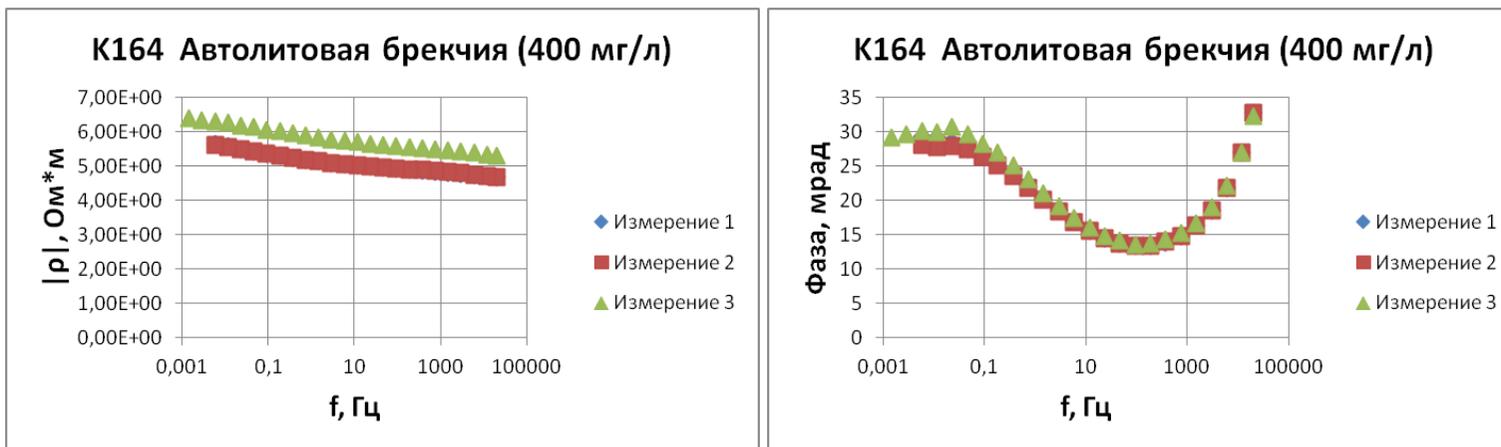


Рисунок 24. График зависимости комплексного сопротивления от частоты по результатам трех измерений при концентрации раствора 0,4 г/л.

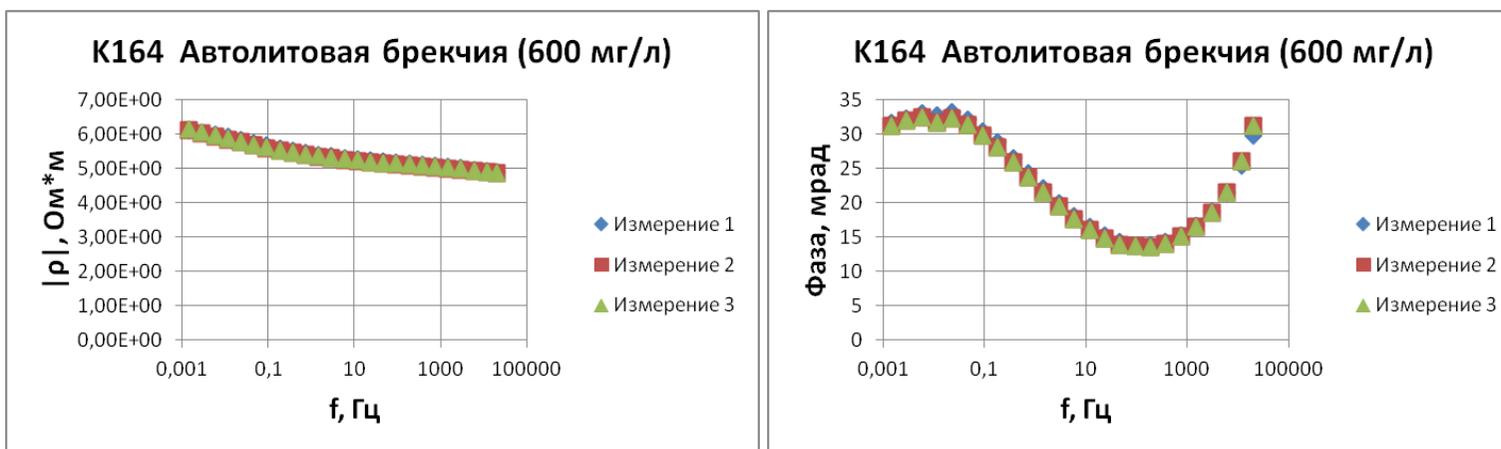


Рисунок 25. График зависимости комплексного сопротивления от частоты по результатам трех измерений при концентрации раствора 0,6 г/л.

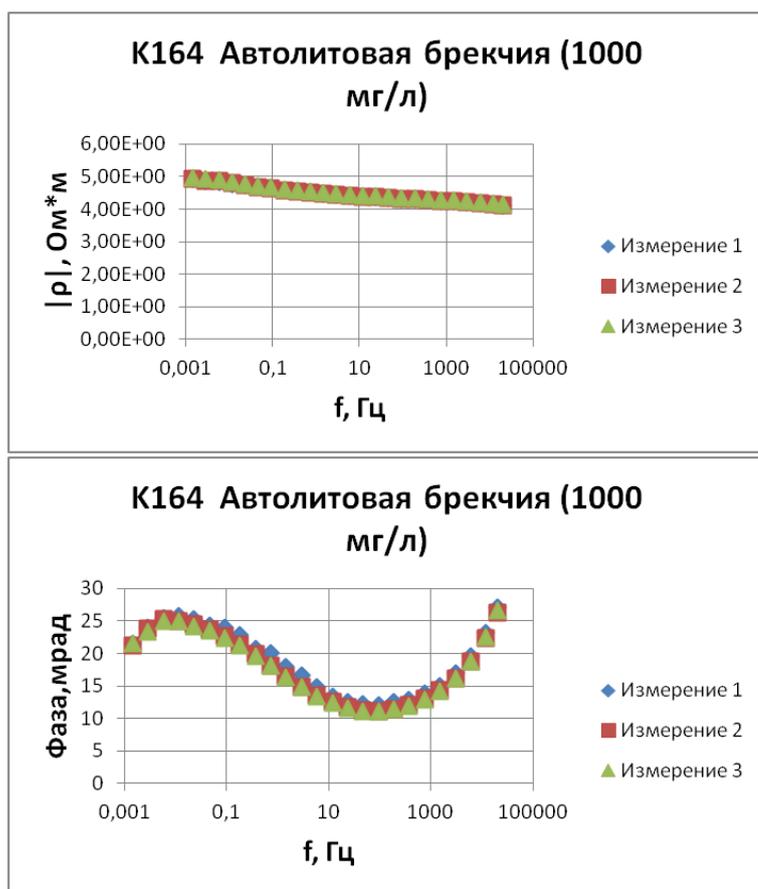


Рисунок 26. График зависимости комплексного сопротивления от частоты по результатам трех измерений при концентрации раствора 1 г/л.

Также были вычислены действительные и мнимые части электропроводности. В ходе первичной обработки был определен кажущийся параметр пористости,

$$F_k = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_0}, \quad (1)$$

где ρ_0 - значение сопротивления раствора насыщения, $\rho_{\text{п}}$ - удельное сопротивление породы на частоте 1.46 Гц. В сводной таблице (табл.4) приведены значения параметров УЭС и мнимой части электропроводности на частоте 1.46 Гц, а также значения стационарной поляризуемости (М) и F_k .

4.2 Подбор параметров распределения Дебая

Дебаевская декомпозиция позволяет получить распределение времен релаксации (РВР) и оценить стационарную поляризуемость. Подбор параметров и расчет РВР производился в программе FDSPEC (А.В. Тарасов). Исходными данными являлись действительная и мнимая части УЭС и соответствующие частоты.

В результате инверсии были получены значения РВР для подобранного диапазона времен релаксаций, τ . Диапазон определялся по следующей формуле:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f}, \quad (2)$$

где f - минимальная и максимальная частоты измерений. На основе полученных данных были построены графики зависимости РВР от τ (рис.27-32).

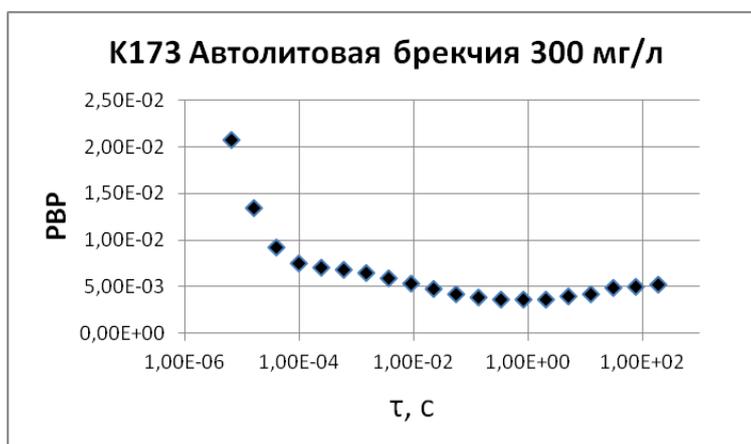


Рисунок 27. Графики зависимости РВР от τ для образца К173.

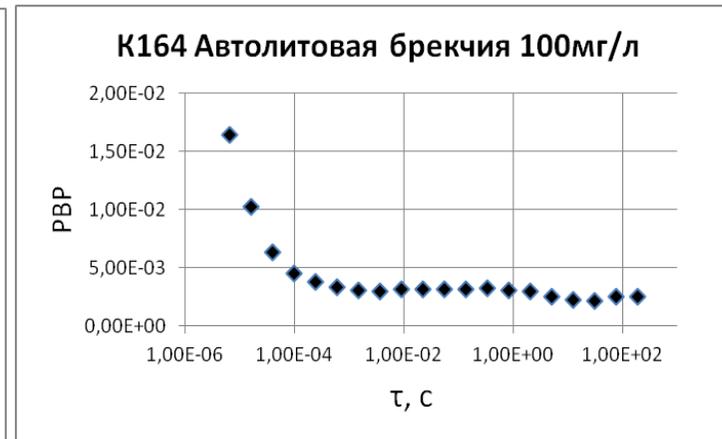


Рисунок 28. График зависимости РВР от τ для образца К174. Рисунок 29. График зависимости РВР от τ для образца К164.

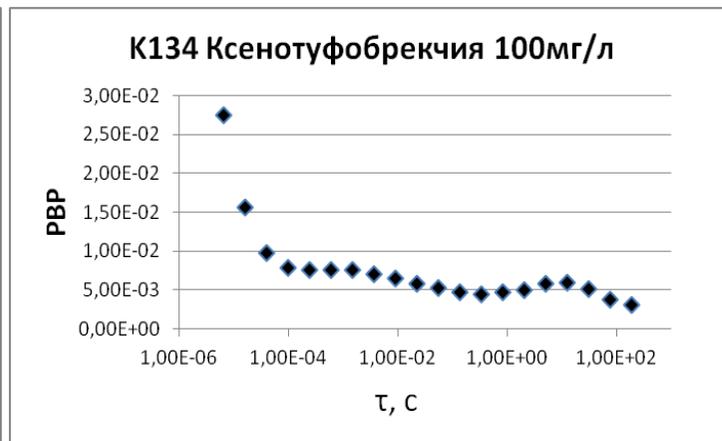
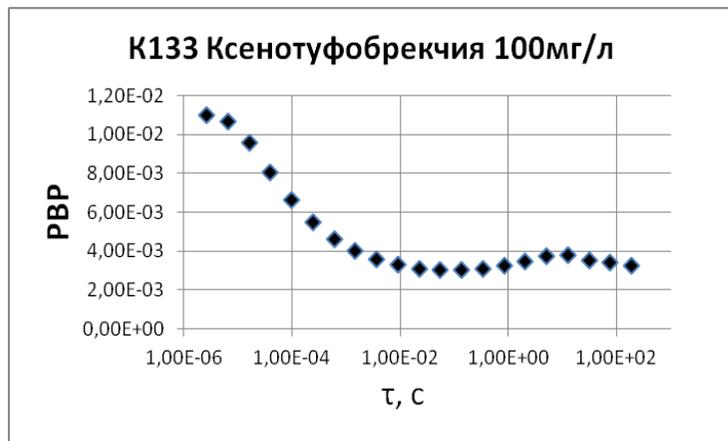


Рисунок 30. График зависимости РВР от τ для образца К133. Рисунок 31. График зависимости РВР от τ для образца К134.

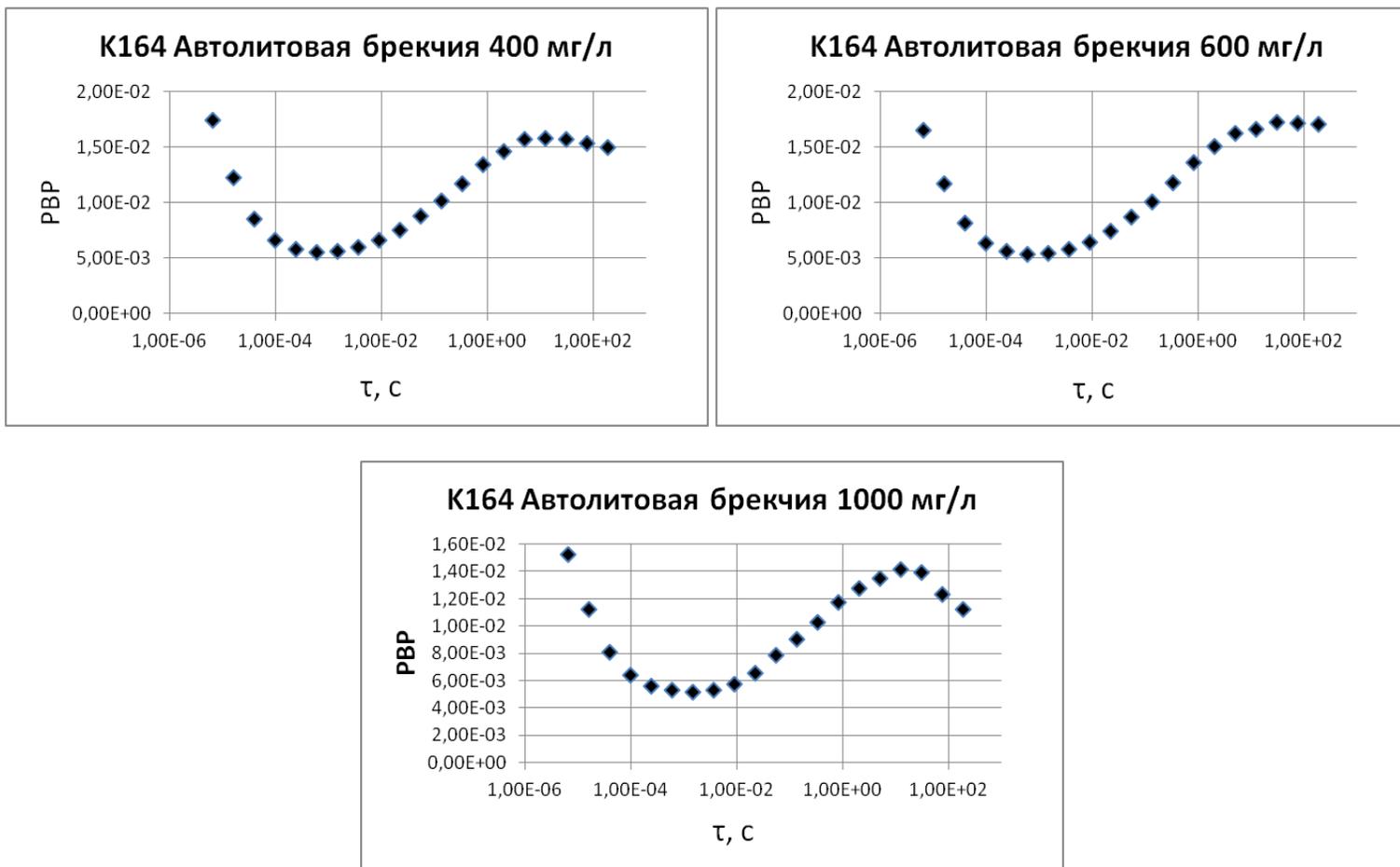


Рисунок 32. Графики зависимости PBR от τ для образца K164 в нарушенном сложении.

Для расчета стационарной поляризуемости, M , была использована следующая формула [Tarasov and Titov, 2007]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} Z(s)ds = M, \quad (3)$$

где $s=ln\tau$, Z – плотность распределения времен релаксаций. Интегрирование велось численно по правилу трапеций. Кроме того, вычислялось значение нормированной заряжаемости путем деления значения M на значение модуля УЭС на наименьшей частоте ($\rho_{\text{макс}}$). Такая нормировка позволяет оценить “чистый” эффект ВП, не связанный с электропроводностью.

5. Результаты и их интерпретация

Результаты измерений представлены в итоговой таблице (табл. 4).

Таблица 4. Электрические параметры, полученные в экспериментах

Образец	ρ 1.46Hz, Омм	ρ_v , Омм	F_k	M , отн.ед.	Mn , См/м	σ'' 1.46Hz, См/м
K173	8,58E+00	25	0,346517	0,101123	0,011733	6,52E-04
K174	4,37E+00	25	0,17744	0,098484	0,022186	1,38E-03
K164	2,70E+00	25	0,114267	0,076098	0,027502	2,06E-03
K134	7,64E+00	25	0,328863	0,135903	0,017035	1,25E-03
K133	3,37E+00	25	0,138244	0,083621	0,024189	1,69E-03
K173	7,96E+00	16,6	0,48935	0,121858	0,014821	9,50E-04
K164	5,13E+00	14,3	0,394467	0,196906	0,02997	3,95E-03
K164	5,40E+00	8,3	0,732643	0,200741	0,032854	4,10E-03
K164	4,48E+00	5	0,985508	0,173086	0,034833	4,01E-03

Как видно из табл.4 значения УЭС для всех представленных образцов - низкие и не превышают 10 Ом. Во всех случаях вычисленный кажущийся параметр пористости оказался меньше единицы, что является следствием того, что УЭС породы меньше, чем сопротивление насыщающего раствора. На рис. 33 представлен график зависимости F_k от сопротивления равновесного раствора в сравнении с результатами, полученными ранее на образце кимберлита трубки Архангельская [Титов, 2003]. Как видно из рисунка, данные полученные в настоящей работе соответствуют полученным ранее. Даже при достаточно низком значении сопротивления равновесного раствора (5 Ом), F_k не достигает единицы. Такая закономерность может быть объяснена явлением поверхностной проводимости (Фридрихсберг, 1984).

Значения мнимой части электропроводности на порядок отличаются от значений, типичных для осадочных пород. Например, для песчаников [Kruschwitz et al, 2010] порядок величин σ'' составляет $2 \times 10^{-5} - 7 \times 10^{-5}$ См/м, а в исследуемых образцах $6.5 \times 10^{-4} - 4.1 \times 10^{-3}$ См/м, то есть эффект ВП исследуемых образцов кимберлитов проявлен много больше, чем у песчаников. Значения стационарной поляризуемости для всех образцов - высоки и составляют 8–20%.

Анализируя рис. 27-30, необходимо отметить, что значения τ сходны для отдельных фаций. Для автолитовых брекчий характерно относительно равномерное распределение времен релаксации, а для ксенотуфобрекчий отмечается пик в диапазоне около 8 секунд. РВР для крошки образца К-164 имеет иной характер и характеризуется ярко выраженным пиком около 12 секунд и последующим спадом. Важно отметить резкое изменение характера спектра мнимой части электропроводности и фазы после разрушения образца при насыщении его пресной водой, что может быть признаком изменения исходного кимберлита в процессе его выветривания.

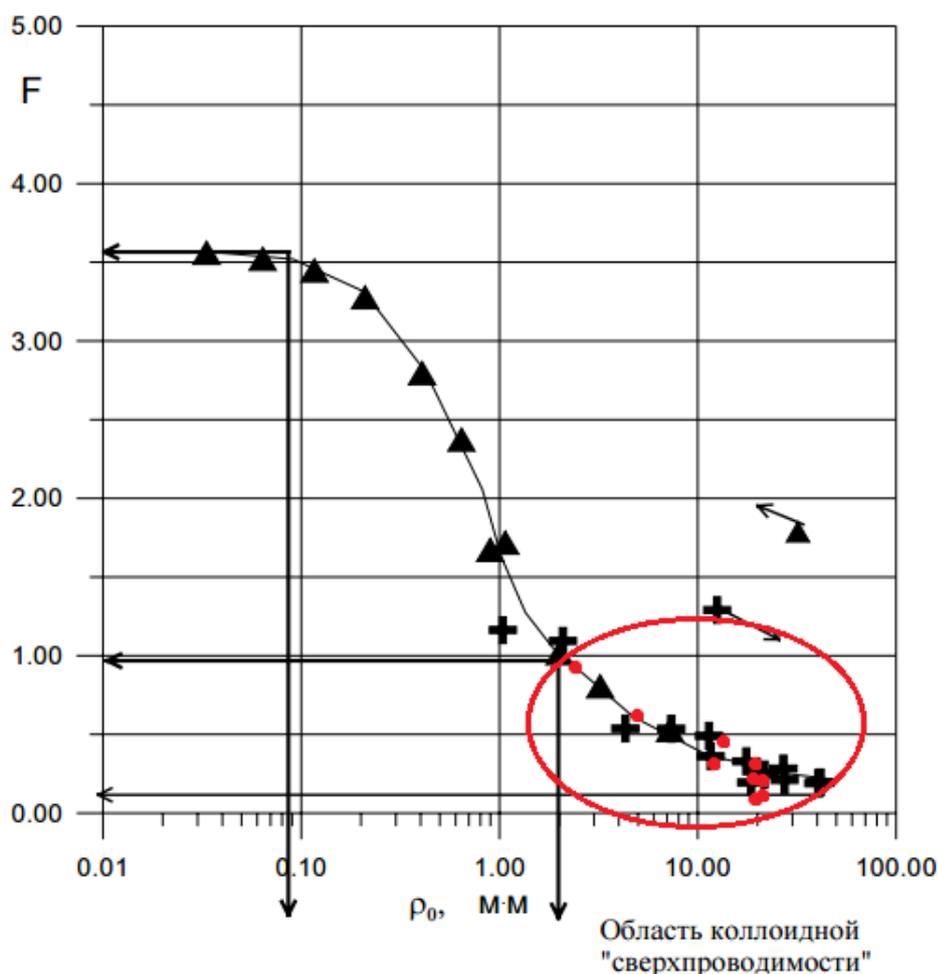


Рисунок 33. Зависимость параметра пористости от сопротивления равновесного раствора (красными точками показаны значения, полученные в настоящей работе, черными крестами и треугольниками – данные Титова (2003)).

Заключение

Данные по УЭС кимберлитов соответствуют ранее полученным и имеют низкие значения. Во всех случаях отмечается, что удельное сопротивление образцов меньше удельного сопротивления порового раствора. Мы предполагаем, что аномально низкие значения УЭС могут быть связаны как с высокой электропроводностью порового раствора, так и с явлением поверхностной проводимости. Изучение электропроводности на образцах правильной геометрии осложняется из-за неоднородности кимберлитовых пород и наличия глинистой составляющей.

Мнимая часть электропроводности для изученной коллекции на два порядка больше, чем у типичных осадочных пород, что объясняет возникновение аномалий ВП.

В целом, высокие значения электропроводности (выше, чем у раствора насыщения) объясняют аномалии проводимости, наблюдаемые в пределах Архангельской алмазоносной провинции, а также представленные в материалах многих авторов.

В дальнейшем для интерпретации электрических данных дополнительно необходимо произвести дополнительные измерения удельной поверхности, емкости катионного обмена, а также оптические и электронные микроскопические исследования.

Литература

1. Кононова В.А., Голубева Ю.Ю., Богатиков О.А., Каргин А.В. Алмазонасность кимберлитов Зимнебережного поля (Архангельская область) // Геология рудных месторождений. — 2007. — №6. — с. 483—505.
2. Титов К.В. О влиянии поверхностной проводимости на электропроводность горных пород // Электронный журнал «Исследовано в России». — 2003. — с. 1013—1026.
3. *Arnott, F. and Kostlin, E.* Petrophysics of Kimberlites, Canad. 8th Intern. Kimberlite Conference, Long Abstract, 2003.
4. *Cunio E.* Comparison of ground TEM and VTEM responses over kimberlites in the Kalahari of Botswana // *Exploration Geophysics*. —2009. — vol. 40(4). — p. 308—319.
5. *Da Costa* Palmietfontein kimberlite pipe, South Africa—A case history. // *GEOPHYSICS*. — vol. 54(6). — p. 689—700.
6. *Kaminski V. and Viezzoli A.* Airborne IP: examples from the Mount Milligan deposit, Canada, and the Amakinskaya kimberlite pipe, Russia // *Exploration Geophysics*. — 2016. — vol. 47(4). — p. 269—278.
7. *Kruschwitz S., Binley A., Lesmes D., and Elshenawy A.* Textural controls on low-frequency electrical spectra of porous media // *GEOPHYSICS*. —2010. — vol. 75(4). — p. 113—123.
8. *Macnae J.C.* Kimberlites and exploration geophysics // *GEOPHYSICS*. — 1979. — vol. 44(8). — p. 1395—1416.
9. *Power M., Hildes D.* Geophysical strategies for kimberlite exploration in northern Canada // In "Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration". — 2007. — p. 1025—1031.
10. *Reed, L. E., Witherly, K. E.* 50 Years of Kimberlite Geophysics, A Review // In "Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration". — 2007. — p. 679—689.
11. *Tarasov A., Titov K.* Relaxation time distribution from time domain induced polarization measurements // *Geophysical Journal International*. — 2007. — vol. 170. — p. 31—43