

39. Zakharov L. A., Martyushev D. A., Ponomareva I. N. Predicting dynamic formation pressure using artificial intelligence methods. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 253. pp. 23–32. DOI: 10.31897/PMI.2022.11
40. Belozerov I. P., Gubaydullin M. G. Concept of technology for determining the permeability and porosity properties of terrigenous reservoirs on a digital rock sample model. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 244. pp. 402–407.
41. Petrakov D. G., Penkov G. M., Zolotukhin A. B. Experimental study on the effect of rock pressure on sandstone permeability. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 254. pp. 244–251. DOI: 10.31897/PMI.2022.24
42. Cherdantsev G. A., Zharkov A. M. Prospects for the oil and gas content of the Upper Permian deposits of the southwestern part of the Vilyui syncline based on the analysis of sedimentary environments and geochemical conditions of oil and gas content. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 251. pp. 698–711. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.9
43. Dvoynikov M. V., Leusheva E. L. Modern trends in hydrocarbon resources development. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 258. pp. 879–880.
44. Dvoynikov M. V., Sidorkin D. I., Yurtaev S. L., Grokhotov E. I., Ulyanov D. S. Drilling of deep and ultra-deep wells for prospecting and exploration of new raw mineral fields. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 258. pp. 945–955. DOI: 10.31897/PMI.2022.55
45. Cherepovitsyn A. E., Tretyakov N. A. Development of New System for Assessing the Applicability of Digital Projects in the Oil and Gas Sector. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 262. pp. 628–642.

УДК 550.837

## ВАРИАТИВНОСТЬ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ НА ТОКАХ РАЗНОЙ ЧАСТОТЫ



**С. М. ДАНИЛЬЕВ,**  
доцент, канд. геол.-минерал. наук,  
Danilev\_sm@pers.spmi.ru



**Г. В. СМУК,**  
студент

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург, Россия

### Введение

С позиций общей физики *удельное электрическое сопротивление* (УЭС) есть коэффициент связи между плотностью постоянного тока проводимости  $\vec{j}$  в среде и создаваемого этим током электрического поля  $\vec{E}$  (закон Ома в дифференциальной форме) [1]:

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E},$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление, Ом·м.

Закон Ома в интегральной форме определяется следующим соотношением:

Рассмотрены результаты экспериментальных лабораторных исследований зависимости удельного электрического сопротивления от частоты пропускаемого тока через образцы горных пород.

Получены качественные и количественные соотношения для исследуемых образцов с общей величиной достоверности аппроксимации в основном более 0,97, что позволяет использовать данные зависимости для построения моделей геоэлектрических разрезов по результатам измерений на переменном токе и классических методов сопротивлений.

**Ключевые слова:** удельное электрическое сопротивление, частотная дисперсия, достоверность аппроксимации, линейная регрессия

DOI: 10.17580/gzh.2024.09.06

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E},$$

где  $I$  – сила тока, протекающего через проводник,  $U$  – полное напряжение в цепи постоянного тока (определяется электродвижущей силой и разностью потенциалов на концах проводника);  $R$  – так же, как и  $\rho$ , является коэффициентом пропорциональности – электрическим сопротивлением.

Очевидно, что электрическое сопротивление и УЭС связаны, и для проводников цилиндрической (правильной) формы зависимость имеет простой вид:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где  $l$  – длина проводника;  $S$  – площадь его сечения.

В соответствии с типом реакции веществ на электрические и электромагнитные поля, в петрофизике все минералы

можно разделять по соответствующему типу электропроводности, определяемому химическим составом каждого минерала (распределением электронов по энергетическим уровням), и они дифференцированы по значениям УЭС [2].

Поскольку горные породы являются в большинстве случаев трехфазными многокомпонентными гетерогенными термодинамическими системами, их электропроводность будет смешанной – механизм обусловлен электронной, ионной и смешанной проводимостью. Большинство пород являются диэлектриками, поэтому доминирующим типом электропроводности горных пород является ионный тип.

### Актуальность исследований

Методы электрической разведки являются важным инструментом при решении многих геологических, инженерно-технических, археологических и других задач [3–5]. При этом измеряют разные электрические свойства горных пород [6], в том числе и УЭС, изменяющиеся под влиянием различных факторов [7, 8], что служит одним из препятствий при решении обратных задач электроразведки (как наземной, так и скважинной) и интерпретации полученных данных. Связь УЭС с различными факторами до сих пор не выражена через аналитические функциональные зависимости. Широко используют [9, 10] модель Арчи – Дахнова, в которой основными факторами считаются УЭС поровой влаги и пористость породы:

$$\rho_n = \frac{a}{k_n^m} \rho_b,$$

где  $\rho_n$  – УЭС изучаемой породы;  $a$  – структурный индекс ( $0,4 < a < 1,4$ );  $\rho_b$  – УЭС поровой влаги;  $k_n$  – коэффициент пористости породы (изменяется от 3–5 до 30–40 %);  $m$  – показатель цементации ( $1,3 < m < 2,2$ ). При этом подходы к оценке параметров в данной зависимости продолжают развиваться [11].

В. Н. Дахнов включил в данную формулу большее число факторов, поэтому теоретически зависимость сопротивления от различных факторов выражается следующим образом:

$$\rho_n = P_n P_b P_r P_z P_t P_s \rho_b,$$

где  $P_n$  – параметр пористости;  $P_b$  – параметр влажности;  $P_r$  – параметр глинистости;  $P_z$  – параметр зернистости (гранулометрического состава);  $P_t$  – параметр температуры;  $P_s$  – параметр, учитывающий наличие электронной проводимости в породе.

Для выражения функциональных связей между сопротивлением и указанными факторами в большинстве случаев применяют уравнения регрессии, однако иногда анализ возможен лишь на качественном уровне, например сложная связь существует между УЭС и водонасыщенностью [12].

Естественно, существуют и иные модели [13] (к примеру, И. К. Овчинникова и А. С. Семенова или модель А. А. Рыжова), которые имеют более сложные интегральные функциональные

зависимости, однако требуют большого числа входных данных и не так просты в использовании. При этом ни одна из данных моделей не учитывает зависимость УЭС породы от частоты пропускаемого через нее тока, которая на самом деле присутствует и оказывает влияние на решение разнородных задач электроразведки [14–16].

В переменных электромагнитных полях [17] сопротивление пород может изменяться, а степень изменения определяется диапазоном частот, величиной сквозной проводимости и наличием включений минералов, имеющих электронный или дырочный характер проводимости. В песчаниках, доломитах, алевролитах и иных породах, обладающих сопротивлением менее  $10^4$  Ом·м в области частот 0– $10^5$  Гц, как правило, дисперсия УЭС мала, но она проявляется при наличии рудных включений в породе или в области более высоких частот [18].

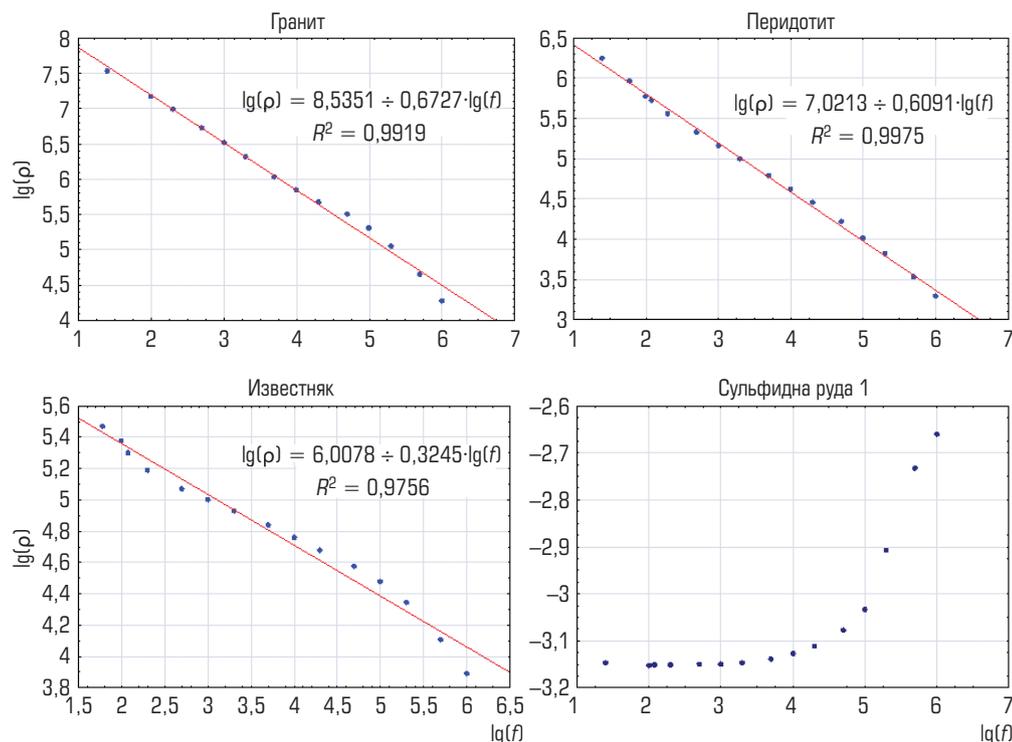
Объемные исследования частотной дисперсии в диапазоне частот 1–100 МГц представлены в монографии [19], в которой на основе графиков экспериментальных зависимостей авторами подобрано эмпирическое соотношение, выражающее функциональную связь между эффективным УЭС и частотой тока следующим образом:

$$\rho = \rho_0 \left( \frac{f}{f_0} \right)^{-(K \ln \rho_0 - 0,17)}$$

где  $\rho$  – УЭС на некоторой частоте  $f$ ;  $\rho_0$  – УЭС на частоте  $f_0 = 1$  МГц;  $K$  – некий коэффициент, характеризующий наклон кривой на графике  $\rho = F(f)$ .

Иными словами, коэффициент  $K$  характеризует интенсивность снижения сопротивления с ростом частоты тока – чем выше значения коэффициента, тем больше наклон кривой. Устойчивость полученного уравнения взаимосвязи параметров определяется значением измеряемого УЭС: чем более высокие значения получаются в результате измерений, тем выше ошибка в их определении по указанной формуле при неправильной оценке частотной дисперсии.

Интересной также является модель электрических свойств среды, объясняемых на основе фрактальной теории, т. е. самоподобия проводящих и непроводящих сред, которая подробно описана в работе [20]. Модель земной коры в таком случае представляется слоисто-однородной с заданными значениями проводимости и диэлектрической проницаемости каждого слоя, которые можно разбить на еще несколько слоев, каждый из которых будет обладать только либо проводящими, либо диэлектрическими свойствами, причем данные свойства будут чередоваться. На разных частотах разбиение на слои будет изменяться, что приведет к самоподобию структур. С позиций фрактальной геометрии проводящие участки образуют канторовское множество с фрактальной размерностью  $D$  менее единицы. В соответствии с данной теорией, частотное поведение сопротивления можно описать следующим степенным соотношением:



**Рис. 1.** Графики зависимостей удельного электрического сопротивления  $\rho$  исследуемых одиночных образцов от частоты пропускаемого тока  $f$  (первый этап измерений)

$$R \sim \omega \frac{1-\frac{3}{h}}$$

где  $\omega$  – круговая частота, рад/с;  $h$  – размерность блуждания электромагнитного поля по проводящим и непроводящим участкам, у.е., обратно пропорциональная фрактальной размерности распределения проводящих участков. Рассмотренное соотношение применимо, например, для обоснования частотных характеристик электрофизических параметров ствола живого дерева [21].

### Методика проведения измерений и обработки результатов

Прибор «ПетроОм» предназначен для измерения электрического сопротивления насыщенных солевыми растворами или пластовыми флюидами образцов горных пород и удельного электрического сопротивления растворов в атмосферных условиях и соответствует требованиям ГОСТ 25.494–82 «Породы горные. Методики определения УЭС образцов горных пород» [22]. Прибор позволяет выполнять измерения полного сопротивления при зондировании переменным током в диапазоне частот 25 Гц – 1 МГц.

На первом этапе для изучения влияния генетического фактора отобраны четыре единичных образца: кислая магматическая порода, представленная гранитом; ультраосновная магматическая порода, представленная перидотитом; образец руды, состоящей из различных оксидов и сульфидов железа и иных металлов (присутствуют пирит, халькопирит, борнит и т. д.) и осадочная порода, представленная неметаморфизованным известняком. На втором этапе для накопления

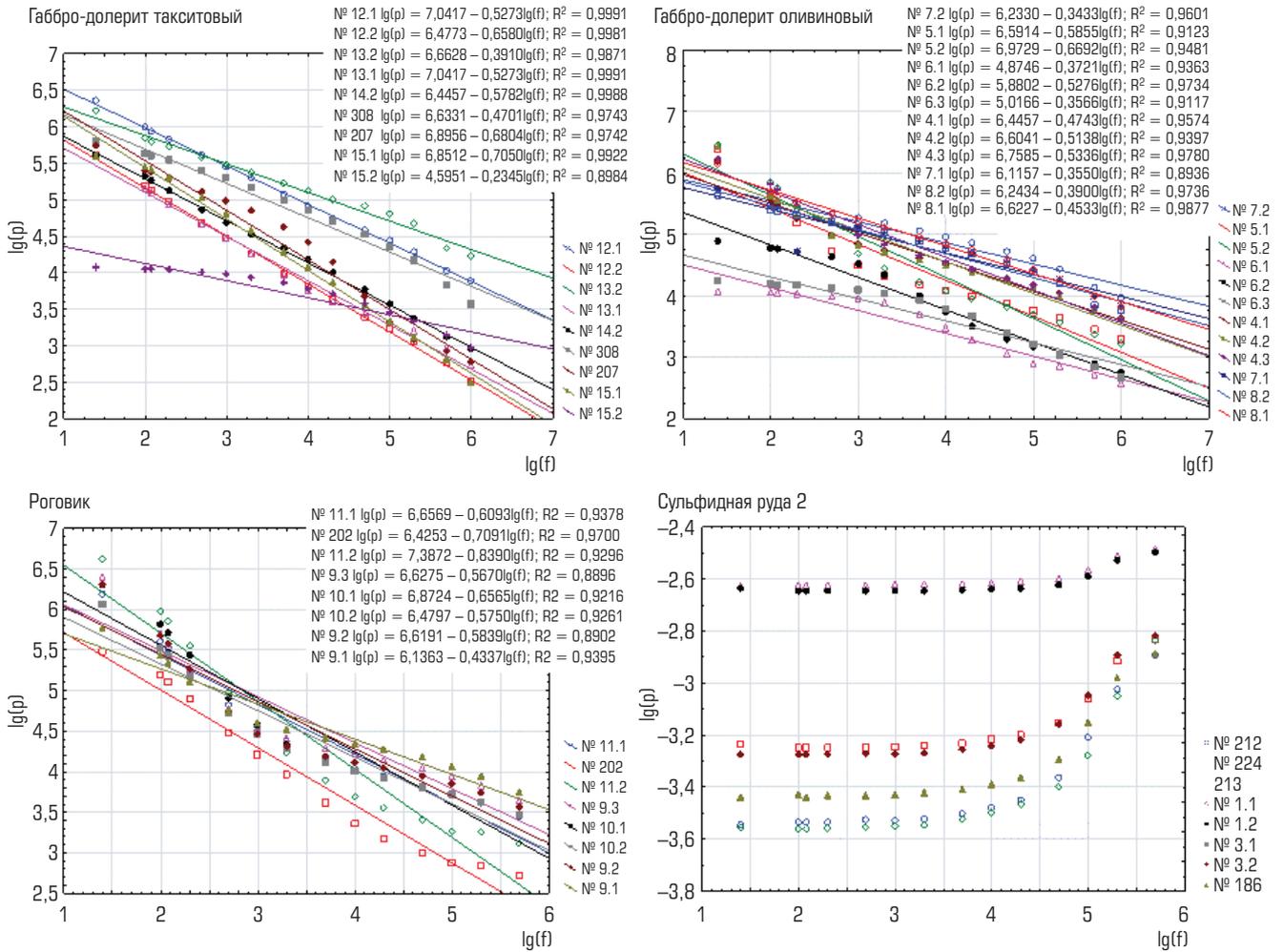
### Значения УЭС для исследуемых образцов

Горная порода	Справочный диапазон значений УЭС (измерения на образцах), Ом·м	Измеренный диапазон значений, Ом·м
Гранит	$10^6 - 10^8$	$10^4 - 10^8$
Перидотит	$10^6 - 10^7$	$10^3 - 10^7$
Известняк	$10^4 - 10^6$	$10^4 - 10^6$
Сульфидные руды	$10^{-4} - 10^{-1}$	$10^{-4} - 10^{-2}$
Габбро-долерит	$10^6 - 10^7$	$10^2 - 10^6$
Роговик	$10^6 - 10^7$	$10^3 - 10^7$

статистически достоверной информации исследованы четыре группы, содержащие по несколько (от 8 до 12) образцов. Первой группе соответствует богатая руда с содержанием сульфидов 70–90 %, второй – безрудная интрузия, представленная оливиновым габбро-долеритом, третьей – вкрапленная руда, соответствующая такситовым габбро-долеритам и четвертой – образцы роговиков. Эксперименты проводили в разное время, что постулирует независимость полученных результатов на первом и втором этапах.

Справочные таблицы со значениями УЭС для данных типов пород приведены в литературе [23, 24], значения УЭС для выбранных пород указаны в **таблице**. Значения при этом соответствуют измерениям в лабораторных условиях – для горного массива значения почти всегда отличаются в силу разнородных факторов, описанных ранее.

На **рис. 1** и **2** отображены графики полученных зависимостей в логарифмическом масштабе с привлечением



**Рис. 2. Графики зависимостей удельного электрического сопротивления исследуемых одиночных образцов от частоты пропускаемого тока (второй этап измерений)**

аппроксимационных элементов. Для их построения использован пересчет из измеренного на приборе сопротивления в удельное по изложенной ранее формуле. Абсолютные значения рассчитанных УЭС с определенной точностью соответствуют справочным данным.

### Обсуждение результатов

Для непроводящих образцов наблюдается близкое к линейному падению сопротивления в зависимости от частоты. В диапазоне от 25 до 10000 Гц тренд с высокой точностью накладывается на экспериментальные точки, в то время как на высоких частотах наблюдается более значимая дисперсия. Общая величина достоверности аппроксимации составляет 0,9919 для гранита, 0,9975 для перидотита и 0,9756 для известняка, что указывает на очень высокую точность выбранной аппроксимации. В результате для каждого из первых трех образцов (см. таблицу) можно составить уравнения линейной регрессии:

$$\begin{cases} \lg \rho_1 = -0,6727 \lg f + 8,5351, \\ \lg \rho_2 = -0,6091 \lg f + 7,0213, \\ \lg \rho_3 = -0,3245 \lg f + 6,0078, \end{cases}$$

где  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  и  $\rho_3$  – УЭС (Ом·м) гранита, перидотита и известняка соответственно.

В общем виде можно записать:  $\lg \rho = -k \lg f + \lg c$ , где  $k$  и  $c$  – коэффициенты, определяемые типом породы.

Если выполнить несложные математические преобразования, то можно получить следующую зависимость:

$$\rho(f) = c \cdot f^{-k}.$$

Коэффициент  $k$  является декрементом падения сопротивления с увеличением частоты тока и может быть связан с генетическим типом породы, поскольку для магматических пород он примерно одинаковый, а для осадочной породы заметно отличается. Этот факт подтверждается и литературными данными [23], к примеру, характер частотной дисперсии УЭС в зависимости от типа пород Норильского района, измеренной при одинаковых условиях (образцы водонасыщены

слабоминерализованной водой 0,5 г/л) на частотах 20 и 2500 Гц. Максимальное изменение 140–150 % отмечается у магматических пород, среднее 110–150 % – у вулканических и минимальное около 100 % – у осадочных.

Анализ трендовых составляющих для больших выборок (см. рис. 2) показывает, что коэффициент  $k$  для образцов в основном находится в узких пределах относительно среднего с редкими отклонениями. Так, для оливинового габбро-долерита среднее значение коэффициента  $k$  составляет 0,465; для такситового габбро-долерита – 0,539 и для роговика – 0,598.

При необходимости привлечения коэффициента  $k$  в отсутствие лабораторных исследований можно пользоваться среднестатистическим значением  $k = 0,53$ , поскольку выборка всех рассчитанных значений по всем образцам с вероятностью около 63 % удовлетворяет нормальному распределению (рис. 3) [24].

Можно заметить, что структура полученной аппроксимационной зависимости  $\rho(f)$ , а также диапазон изменения коэффициента  $k$  имеют сходство с электротехническим эквивалентом емкостного сопротивления  $X_C$ , определяемого по следующей формуле [25]:

$$X_C = 1/(2\pi fC),$$

где  $C$  – емкость в цепи, Ф.

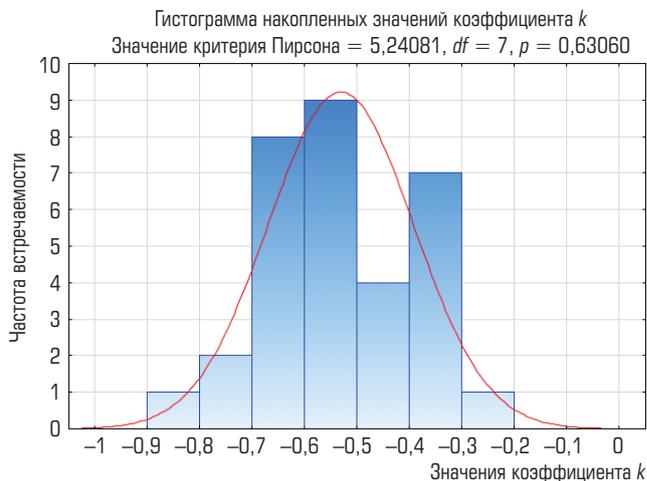
При справедливости данной гипотезы получаем, что экспериментальные значения коэффициента  $k$  стремятся к теоретическому, равному единице, однако не достигают его вследствие естественной неоднородности и анизотропии исследуемых образцов.

Если оценивать физический смысл коэффициента  $s$ , то очевидно, что он определяет удельное электрическое сопротивление  $\rho_0$  сухого образца при частоте  $f_0 = 1$  Гц, т. е. условно на постоянном токе. В исследуемом случае получаем, что для гранита  $\rho_0 = 3,47 \cdot 10^8$ , для перидотита  $\rho_{0_2} = 1,05 \cdot 10^7$  и  $\rho_{0_3} = 1,02 \cdot 10^6$  для известняка, т. е., вводя величину удельного сопротивления сухого образца диэлектрика при постоянном токе  $\rho_0$ , получаем следующее уравнение:

$$\rho(f) = \rho_0 (f/f_0)^{-k}.$$

Данное эмпирическое соотношение по своей структуре прекрасно согласуется с эмпирическим соотношением, полученным в монографии [19], что говорит о справедливости применения данной формулы с целью пересчета сопротивлений, полученных на высоких частотах. Однако диапазон исследуемых частот в нашем эксперименте составляет не 1–100 МГц, а условно 0–1 МГц, что свидетельствует о справедливости линейной или кусочно-линейной аппроксимации во всем диапазоне используемых в разведочной геофизике частот тока от 0 Гц до 100 МГц.

Следует также отметить, что абсолютно идентичное соотношение получено в результате лабораторного эксперимента по исследованию пород-коллекторов на частотном интервале 0,1–1000 Гц в работе [26], в которой вводят коэффициенты  $k$  (коэффициент частотной дисперсии сопротивления)



**Рис. 3. Проверка выборки значений декремента падения сопротивления на нормальность распределения:**

$df$  – число степеней свободы,  $p$  – вероятность верного принятия нулевой гипотезы, превышающее уровень значимости 0,05

и  $D_R$  (степенной показатель, определяющий градиент убывания сопротивления с ростом частоты тока).

Далее можно заметить, что полученное соотношение соответствует и фрактальной теории обоснования электрофизических свойств горных пород, в которой сопротивление среды также является степенной функцией частоты тока, где степень играет роль некоторой фрактальной размерности.

Если линейная аппроксимация справедлива на всей числовой оси, то можно записать уравнение прямой, проходящей через две точки: первую условно соотнесем с бесконечно маленькой частотой  $D_1(f_0, \rho_0)$ , а вторую – с бесконечно большой частотой  $D_2(f_\infty, \rho_\infty)$ , тогда

$$\frac{\lg(\rho) - \lg(\rho_0)}{\lg(\rho_\infty) - \lg(\rho_0)} = \frac{\lg(f) - \lg(f_0)}{\lg(f_\infty) - \lg(f_0)}.$$

После несложных математических преобразований можно получить следующее выражение:

$$\rho(f) = \rho_0 (f/f_0)^{\frac{\lg(\rho_\infty / \rho_0)}{\lg(f_\infty / f_0)}}.$$

При этом известны выражения для кажущейся поляризуемости  $\eta$ , используемой в методе вызванной поляризации (ВП), развитию которой способствуют многие работы уральских геофизиков [27, 28]:

$$\lg(1 - \eta) = \lg(\rho_\infty / \rho_0).$$

Тогда зависимость УЭС от частоты тока можно выразить через параметр поляризуемости:

$$\rho(f) = \rho_0 (f/f_0)^{\frac{\lg(1-\eta)}{\lg(f_\infty / f_0)}}.$$

Таким образом, полученный ранее степенной коэффициент можно определять через величины предельной частоты измерений и кажущейся поляризуемости:

$$k = \frac{\lg(1-\eta)}{\lg(f_\infty / f_0)}$$

Полученная формула качественно и количественно подтверждает результаты исследования частотной дисперсии УЭС различных почв [29–31], где соотношение объясняется тем, что почва по структуре относится к капиллярно-пористым материалам-диэлектрикам, которые обладают нестационарным процессом поляризации.

Результат, полученный для проводящих образцов, подтверждает то, что электрическое сопротивление сильно зависит от наличия электронных проводников в скелете породы. Для горной породы схожего генезиса значение УЭС оказывается на 8–10 порядков ниже при богатом оруденении. Однако отличие от образцов-диэлектриков, у которых механизм формирования частотной дисперсии УЭС, вероятно, связан с нестационарностью процесса поляризации (т. е. наличием переориентировки дипольных электрических моментов во времени), в данном случае, вероятно, важную роль играет поверхностный скин-эффект, заключающийся в уменьшении амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения в глубь проводящей среды. Толщину скин-слоя для металлических проводников определяют по известной аналитической зависимости, получаемой при решении уравнения Максвелла [32–34]:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \mu \pi f}}$$

где  $\Delta$  – толщина скин-слоя, м;  $\rho$  – УЭС проводника, Ом·м;  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды, ед. СИ,  $f$  – частота тока, Гц.

Это означает, что при увеличении частоты тока уменьшается область, в которой распространяется ток и, соответственно, изменяется наблюдаемое значение сопротивления, которое зависит от геометрических параметров проводника. Поэтому при пересчете обычного сопротивления в удельное появляется дополнительная погрешность, меняющая общий тренд. Таким образом, на высоких частотах скин-эффект проявляется сильнее всего, так как ток фактически протекает исключительно по поверхности образца, уменьшая эффективную площадь сечения. Вследствие этого растет сопротивление  $R$ , которое затем используют для расчета УЭС, повышая реальные значения. На низких же частотах наблюдается небольшое снижение  $\rho$  при увеличении частоты, однако оно настолько незначительно, что на графике отображено устойчивое значение, которое можно оценить по значению УЭС на самой низкой частоте.

Горная порода по своей сути является неоднородным многофазным и многокомпонентным веществом – аналог композита в теории материаловедения. Существуют результаты исследования влияния скин-эффекта на сопротивление композитных материалов [35], которые соотносятся с полученными

авторами зависимостями: на низких частотах однородный и композитный проводники имеют аналогичные свойства, поскольку постоянный и переменный низкочастотные (до 100 кГц) токи протекают преимущественно в объеме проводящего материала внутри композита, а на средних и высоких частотах композитный проводник (состоящий из проводящей и резистивной частей) имеет в 5–8 раз большее сопротивление, чем однородный проводник с аналогичными геометрическими параметрами.

## Выводы

В результате проведенного эксперимента получены качественные представления, а также количественные соотношения между УЭС горных пород различного генетического типа и частотой пропускаемого через них тока. Установлено, что основное влияние на тип изменения УЭС во внешнем переменном электрическом поле оказывает тип проводимости, доминирующий в исследуемом веществе.

При внесении пород с ярко выраженными диэлектрическими свойствами наблюдается снижение величины УЭС на порядок при увеличении частоты на порядок, что хорошо отображают графики в логарифмическом масштабе, приведенные в работе. При указанном типе проводимости возможно использование эмпирических соотношений, составленных на основе уравнений линейной регрессии – УЭС есть некоторая степенная функция частоты тока, степенной показатель которой имеет среднестатистическое значение, равное 0,53.

Полученные формулы с достаточной точностью соотносятся с зависимостями, приведенными в схожих исследованиях, и могут быть использованы при комплексировании электроразведочных методов на постоянном и переменном токе для сопоставления с УЭС. При этом важно отметить, что достоверность интерпретации геофизических данных повышается при совместном изучении полей разной физической природы, что позволяет, к примеру, проводить многопризнаковую петрофизическую классификацию горных пород [36].

Наличие электронной проводимости в горных породах значительно влияет на зависимость УЭС горных пород от частоты тока. В области довольно низких частот (25 Гц – 1 кГц) наблюдаются незначительные осцилляции относительно некоторой константы, которой соответствует значение УЭС на постоянном токе. При дальнейшем увеличении частоты наблюдается довольно резкий, близкий к экспоненциальному рост значений УЭС. Объяснение данному эффекту авторы находят в возникающем в проводниках электрического тока явлении поверхностного скин-эффекта, который не учитывают при пересчете из измеренного электрического сопротивления в удельное.

В соответствии с полученными в результате эксперимента эмпирическими соотношениями предлагается дополнить идею В. Н. Дахнова следующим образом:

$$\rho_n = P_n P_b P_r P_3 P_T P(\bar{e}, f) \rho_b.$$

В данной зависимости исходный параметр  $P_3$  заменен объединенным параметром  $P(\bar{\epsilon}, f)$ , который учитывает не только наличие электронных проводников  $e$  в структуре, но и дисперсию УЭС в зависимости от частоты  $f$ , которая, как показано в проведенном исследовании, зависит от типа проводимости, доминирующего в горных породах.

В заключение стоит отметить, что полученный результат имеет прямую корреляцию с зависимостью УЭС от температуры вещества. По аналогии с зависимостью от частоты тока

УЭС диэлектриков экспоненциально уменьшается с температурой, а УЭС проводников увеличивается [37], но линейно, что отличает указанные зависимости.

## Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2024, № 9, pp. 40–47  
DOI: 10.17580/gzh.2024.09.06

### Variability of specific electrical resistance in measurements at currents of different frequencies

#### Information about authors

**S. M. Daniliev**<sup>1</sup>, Associate Professor, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Daniliev\_sm@pers.spmi.ru

**G. V. Smuk**<sup>1</sup>, Student

<sup>1</sup>Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

#### Abstract

This paper deals with the results of laboratory experiments aimed at investigating the effect of current frequency on specific electrical resistivity. In measurements by the methods of electrical exploration, resistivity is the main electrophysical characteristic of a medium both on direct and alternating current. In practice, when solving inverse problems, geophysicists often incorrectly correlate resistivity values measured by the resistivity methods with the results of the high-frequency electromagnetic methods, which leads to the construction of obviously erroneous physical-and-geological models and petrophysical relations. Experimental and methodological electrical exploration works confirm the dependence of electrophysical properties of rocks on the current frequency and serve as a basis for the construction of probabilistic regression equations. However, the small number of laboratory studies on the frequency dispersion of electrophysical parameters of rocks disallow the statistical analysis of the data, including the methods of regression and correlation analysis.

To investigate the frequency dispersion of resistivity of different genesis samples, and to confirm or supplement the already known empirical functional relationships, experimental laboratory measurements were made at the Exploration Geophysics Laboratory at the Empress Catherine II St. Petersburg Mining University using the device PetrOhm for measuring the electrical properties of rocks. Cylindrical rock samples of different genetic type and electrical conductivity were prepared for measuring electrical resistance as a function of current frequency. As a result, the qualitative and quantitative relations are obtained for the studied samples with the total value of approximation reliability mostly more than 0.97, which allows using the obtained dependences for constructing the models of geoelectric sections based on the results of AC measurements and classical resistivity methods.

**Keywords:** electrical resistivity, frequency dispersion, approximation reliability, linear regression.

#### References

- Krizskii V. N., Kosarev O. V., Aleksandrov P. N., Luntovskaya Ya. A. Mathematical modeling of the electric field of an in-line diagnostic probe of a cathode-polarized pipeline. *Journal of Mining Institute*. 2024. Vol. 265. pp. 156–164.
- Zinchenko V. S. Basic Petrophysics for Hydrogeological and Engineering-Geological Interpretation of Geophysical Data : Tutorial. Moscow–Tver : AIS, 2005. 392 p.
- Glazunov V. V., Burlutsky S. B., Shuvalova R. A., Zhdanov S. V. Improving the reliability of 3D modelling of a landslide slope based on engineering geophysics data. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 771–782.
- Glazunov V. V., Ageev A. S., Gorelik G. D., Sarapulkina T. V. Results of comprehensive geophysical studies on the search for crypts on the territory of suburban necropolis of tauric chersonese in the Karantinnaya Balka. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 247. pp. 12–19.
- Mingaleva T. A., Shakuro S. V., Egorov A. S. Features of the structure and nature of pollution of the upper part of the section of oil storage facilities in the Volga river valley. *Bulletin of the*

*Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2023. Vol. 334, No. 7. pp. 137–147.

- Shevnin V. A., Kvon D. A., Ryzhov A. A. Petrophysical approach to electrical properties of loose soils. *Journal of Mining Institute*. 2017. Vol. 226. pp. 397–404.
- Suzuki T., Yoshimura R., Yamazaki K., Minami T., Sawayama K. et al. Dependence of resistivity of natural rock samples on humidity. *Journal of Applied Geophysics*. 2024. Vol. 220. ID 105271.
- Iselidze O. V., Zhukov V. S., Tsybulsky S. P., Bayanova N. G. Influence of temperature on specific electroresistance of the water-saturated sandstone. *News of Gas Science : Problems of Development of Gas, Gas Condensate and Oil/Gas/Condensate Fields : Scientific and Technical Collection of Papers*. Moscow : Gazprom VNIIGAZ, 2014. No. 4(20). pp. 184–187.
- Grigorev G. S., Salishchev M. V., Senchina N. P. On the applicability of electromagnetic monitoring of hydraulic fracturing. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 250. pp. 492–500.
- Yu Z., Jun J., Hua H., Yao D., Hongyi A. et al. Resistivity correction and water saturation evaluation for calcareous tight sandstone reservoir: A case study of G oil field in Sichuan Basin. *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. ID 1099848.
- Al-Ofi S., Ma S., Kesserwan H., Jin G. A New Approach to estimate Archie parameters  $m$  and  $n$  independently from dielectric measurements. *SPWLA 63rd Annual Logging Symposium*. Stavanger, 2022. DOI: 10.30632/SPWLA-2022-0002
- Pan B., Ruhan A., Guo Y., Zhang L., Wei B. et al. An experimental study on the complex resistivity of fractured rock under different saturation conditions. *Acta Geophysica*. 2022. Vol. 70, Iss. 3. pp. 1061–1081.
- Khmelevskiy V. K., Shevnin V. A. (Eds.). *Electric Exploration by Resistivity Method : Tutorial*. Moscow : Izdatelstvo MGU, 1994. 160 p.
- Ermolin E. Yu., Ingerov O., Yankilevich A. A., Pokrovskaya N. N. AMT soundings in the dead band within the Chukotka region (Russian Far East). *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 236. pp. 125–132.
- Ananyev V. V., Grigoryev G. S., Gorelik G. D. Physical modeling of the Bazhenov formation in combination with CSEM and seismic methods. *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*. 2021. E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 266. ID 07003.
- Haugland S. M. Frequency dispersion effects on LWD propagation resistivity measurements. *Annual Technical Conference and Exhibition*. Dallas, 2005.
- Epov M. I., Antonov E. Yu. Forward problems of electromagnetic soundings with allowance for the dispersion of geoelectrical parameters. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 1999. Vol. 35, No. 4. pp. 298–305.
- Dortman N. B. (Ed.). *Petrophysics : Handbook*. Moscow : Nedra, 1992. Book. 1. Rocks and Minerals. 391 p.
- Zinchuk N. N., Bondarenko A. T., Garat M. N. *Petrophysics of Kimberlites and Enclosing Rocks*. Moscow : Nedra, 2002. 695 p.
- Balkhanov V. K. *Basic Fractal Geometry and Fractal Computation*. Ulan-Ude : Izdatelstvo Buryatskogo gosuniversiteta, 2013. 224 p.
- Balkhanov V. K., Advokatov V. R., Bashkuev Yu. B. Frequency and spatial characteristics of the electrophysical parameters of a living tree trunk. *Technical Physics*. 2010. Vol. 55, No. 2. pp. 303–305.
- Pecherin V. N., Demchenko N. P. Determination of Electric Resistivity and Acoustic Properties of Rocks : Procedural Guidelines. Ukhta : UGGA, 2014. 23 p.
- Kalinin D. F., Yanovskaya Yu. A., Dolgal A. S. Statistical methods for potential fields interpretation: studies of structural and tectonic architecture of oil and gas promising territories. *Geologiya Nefti i Gaza*. 2021. No. 2. pp. 27–36.
- Yakovleva A. A., Movchan I. B., Medinskaia D. K., Sadykova Z. I. Quantitative interpretations of potential fields: from parametric to geostructural recalculations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2023. Vol. 334, No. 11. pp. 198–215.

25. Sychev Yu. A., Kostin V. N., Serikov V. A., Aladin V. A. Nonsinusoidal modes in power-supply systems with nonlinear loads and capacitors in mining. *MIAB*. 2023. No. 1. pp. 159–179.
26. Liu H., Jie T., Li B., Youming D., Chunning Q. Study of the low-frequency dispersion of permittivity and resistivity in tight rocks. *Journal of Applied Geophysics*. 2017. Vol. 143. pp. 141–148.
27. Shestakov A. F. On the relation of the polarization characteristics of the medium in the frequency areas and their evaluation according to multi-frequency measurements. *Uralskiy geofizicheskiy vestnik*. 2022. No. 3(49). pp. 4–13.
28. Shestakov A. F. To estimation of polarization characteristics of the medium on the data of multi-frequency measurements in the method alternating current resistance. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2021. No. 1(61). pp. 102–108.
29. Levshin M. V. Influence of the frequency of the electric signal on the measured specific resistance in the electrophysical approach to estimate the properties of soils in the humid zone. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. 2020. No. 3(51). pp. 26–31.
30. Han Y., Wang Y., Tan C., Du L. Experimental study on influencing factors of soil complex resistivity. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. Vol. 2651. ID 012104.
31. Sternberg B. K., Levitskaya T. M. Electrical parameters of soils in the frequency range from 1 kHz to 1 GHz, using lumped-circuit methods. *Radio Science*. 2001. Vol. 36, No. 4. pp. 709–719.
32. Shakhnazarov K. Yu., Vologzhanina S. A., Khuznakhmetov R. M. A relationship between abnormal electrical properties in non-ferrous alloys and phase equilibrium diagrams. *Tsvetnye Metally*. 2024. No. 2. pp. 53–59.
33. Shklyarskiy Ya. E., Skamyin A. N., Shklyarskiy A. Ya. Effect of higher harmonics on electric power metering in a steel maker's power networks. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 10. pp. 64–69.
34. Mikhalev Yu. G., Zharinova N. Yu. Mass transfer regimes during polarization of liquid metal electrode in molten salts and current efficiency. *Tsvetnye Metally*. 2019. No. 9. pp. 32–36.
35. Buvakov S. Yu., Suvorov D. V., Gololobov G. P., Tarabrin D. Yu., Slivkin E. V. Study of frequency dependence of composite conductor electrical resistance. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017. Vol. 66, No. 1. pp. 147–158.
36. Senchina N. P., Mingaleva T. A. Multi-feature petrophysical classification of rocks as a basis for interpretation of geophysical data. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Nauki o Zemle*. 2022. Vol. 22, Iss. 3. pp. 208–218.
37. Zhamaletdinov A. A. The Earth crust conductance inside Russia and in adjacent countries. *Voprosy geofiziki*. 2006. No. 39. pp. 69–90.

УДК 622.83:620.179.17

## ГЕОМЕТРИЯ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СОБЫТИЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД ХИБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ



**В. В. ГЛАЗУНОВ**,  
проф., д-р техн. наук



**М. М. САЙТГАЛЕЕВ**,  
аспирант-исследователь,  
Saitgaleev\_MM@pers.spmi.ru



**Д. Н. ПЕТРОВ**,  
доцент, канд. техн. наук



**А. О. РОЗАНОВ**,  
старший научный сотрудник

Исследован процесс разрушения горных пород Хибинского месторождения в камере всестороннего давления с регистрацией событий акустической эмиссии. Рассчитаны координаты гипоцентров событий акустической эмиссии в процессе эксперимента, проанализирован процесс формирования образа катастрофического макроразрушения и определены сопутствующие напряжения. Установлено, что доминирующей геометрией хрупкого разрушения горных пород является диагональный макроразрыв. Определено, что процесс разрушения происходит не мгновенно, а с развитием очага разрушения во времени. Результаты исследований имеют важное практическое значение для своевременного обнаружения критической стадии развития очага разрушения.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, локация гипоцентров акустической эмиссии, механика хрупкого разрушения, геометрия хрупкого разрушения, Хибинский массив, трехосное сжатие, образ макроразрыва, массивные уртиты  
**DOI:** 10.17580/gzh.2024.09.07

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург, Россия

### Введение

На месторождениях за весь период эксплуатации были зарегистрированы техногенные землетрясения, горно-тектонические удары, горные удары и микроудары. Под влиянием техногенных факторов и повышения темпов разработки

месторождений, а также под действием естественных факторов происходит изменение геомеханического и геодинамического состояния массива пород, что влечет за собой изменение сейсмической обстановки [1].

Активные тектонические нарушения, трещиноватость и другие структурные неоднородности являются одним из важных факторов геодинамической опасности, указанные явления могут быть причиной проявления удароопасности на рудниках, так как по ним может происходить относительное смещение блоков, мгновенные подвижки по границам