

К оценке поляризационных характеристик среды по данным многочастотных измерений в методе сопротивлений на переменном токе

Алексей Федорович ШЕСТАКОВ*

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность работы обусловлена необходимостью извлечения дополнительной информации при изучении поляризационных свойств геологической среды из экспериментальных данных в методе сопротивлений на переменном токе с использованием многочастотных измерений. Во введении приводится краткий обзор литературы по проблеме изучения поляризационных свойств горных пород в частотной области и методе частотной дисперсии, успешно применяемом при поисково-разведочных работах на сульфидных и медноколчеданных месторождениях. Обсуждаются вопросы определения поляризуемости среды в частотной области и параметра поляризационного процесса, зависящего от структурно-петрофизических характеристик.

Цель работы – сравнить характерные особенности изучения поляризационных свойств среды в частотной области и установить взаимосвязь между поляризуемостью с коэффициентом частотной дисперсии электросопротивления; предложить алгоритм определения поляризационных характеристик среды по данным многочастотных измерений в методе сопротивлений на переменном токе.

Методология исследования: обоснование выбора модели вызванной электрической поляризации в частотной области и особенности ее применения для установления связи между коэффициентом частотной дисперсии и кажущейся поляризуемостью среды. **Методы исследования:** теоретические расчеты и сравнительный анализ полученных зависимостей от параметров модели.

Результаты работы. Обоснован выбор модели вызванной электрической поляризации в частотной области Cole-Cole для установления связи между коэффициентом частотной дисперсии и кажущейся поляризуемостью среды. Показана возможность использования многочастотных измерений электрического сопротивления для изучения поляризационных характеристик среды на основе этой модели. Разработан алгоритм и получены выражения, позволяющие определить поляризуемость среды и параметр времени релаксации по данным измерения кажущегося сопротивления на трех частотах в методе электроразведки на переменном токе.

Область применения. Полученные результаты могут найти применение при обработке данных кондуктивных электроразведок на переменном токе, для корректного истолкования частотного эффекта и изучения поляризационных свойств среды, в частности при проведении исследований методом частотной дисперсии.

Ключевые слова: электроразведка, метод сопротивлений, переменный ток, спектральная вызванная поляризация, кажущееся электросопротивление, поляризуемость.

Введение

Известно, что метод сопротивлений на переменном токе – это модификация классического метода сопротивлений (разработанного братьями Шлюмберже в начале 1930-х гг.), который стал применяться в кондуктивной электроразведке с появлением соответствующей генераторной и приемно-регистрирующей аппаратуры и хорошо себя зарекомендовал при поиске рудных месторождений в различных регионах СССР как аналог метода вызванной поляризации (ВП) на переменном токе [1].

Это связано с тем, что использование метода сопротивлений на переменном токе открывает новые возможности по выявлению дополнительных параметров, отражающих электрофизические и петрофизические свойства среды. К их числу относится, прежде всего, изучение поляризуемости, ранее определяемой в методах

вызванной поляризации (ВП), модификации ВЭЗ-ВП [2, 3] на постоянном токе, а также оценка поляризационных свойств среды в частотной области по дисперсии электросопротивления (коэффициенту частотной дисперсии – КЧД), характеризующих петрофизические особенности структуры среды, лежащие в основе разработки метода частотной дисперсии [4–6]. Следует отметить, что единство природы эффектов ВП и частотной дисперсии (ЧД) электрического сопротивления неоднократно обсуждалось в приведенных и других научных публикациях, но более полно теоретические аспекты их взаимосвязи изложены в монографии [7].

В последние годы метод сопротивлений на переменном токе стал активнее развиваться благодаря совершенствованию электроразведочной аппаратуры,

*alxsh@mail.ru

а разработка новых технологий применения и методик обработки экспериментальных данных привела к расширению возможностей его использования не только при изучении электрофизических свойств геосреды в рудных районах, но также в геоэкологических исследованиях, в частности при геоэлектрической диагностике состояния грунтовых гидротехнических сооружений [8].

В современной серийной электроразведочной аппаратуре для методов сопротивлений, например «ЭРА-МАКС» (производство НПП «ЭРА», г. Санкт-Петербург), используется целый ряд частот – от 1,22 до 2500 Гц с шагом удвоения частоты в низкочастотном и высокочастотном диапазонах. Если диапазон низких частот расширяет возможности применения традиционных кондуктивных электроразведочных методов с гальваническими заземлениями, то использование повышенных частот позволяет развивать новые технологии обработки измерений полезного сигнала.

Ранее было показано, что для трехполюсной и четырехполюсной установок Шлюмберже, расположенных на однородном проводящем полупространстве, структура выражения для электрической составляющей напряженности переменного электромагнитного (ЭМ) поля позволяет напрямую использовать ее для определения кажущегося сопротивления на переменном токе [9, 10]. Достаточно простой аналитический вид его аппроксимации для малого параметра позволил получить формулу вычисления кажущегося сопротивления на переменном токе по измерениям модуля напряженности электрического поля, которая учитывает помехообразующее влияние вклада в измеряемом сигнале, обусловленное частотной зависимостью мнимой компоненты.

Проведение многочастотных измерений лежит в основе метода SIP (Spectral Induced Polarization), или MIP (Multifrequency Induced Polarization), являющегося аналогом классического метода ВП, но дающего в ряде случаев больше возможностей для изучения поляризационных параметров, связанных со структурно-петрофизическими характеристиками геосреды, в частности, с содержанием и размером зерен электропроводящих включений, размером пор и влагонасыщенности флюидом порового пространства и другими факторами [11–13].

К таким параметрам относятся в первую очередь поляризуемость среды η и параметр времени релаксации поляризационного процесса τ . Если первый параметр успешно определяется в методе ВП на постоянном токе и обобщенно (неявно) характеризует поляризационные свойства среды в целом (зависящие от множества факторов), то второй параметр в большей степени зависит от структурно-петрофизических характеристик, а его определение основано на выборе поляризационной модели среды в спектральной области.

Экспериментальному исследованию электропроводности горных пород в частотной области с учетом различных моделей поляризации посвящено большое количество работ. Так, например, в [12] в лабораторных условиях исследуется низкочастотная комплексная проводимость образцов песчаных и глинистых материалов, погруженных в электролит, для проверки поляризации

слоя Штерна. Приведенные графики фазовых характеристик комплексной электропроводности образцов (насыщенных природными грунтовыми водами), измеренной установкой Венера, наглядно показывают существенное различие в морфологии, зависящей от петрофизических характеристик образцов.

В работе [13] отмечается, что модель вызванной поляризации Cole-Cole хорошо описывает поляризационный эффект в пористых материалах (особенно безглинистых), обусловленный особенностями двойного слоя на границе твердой и жидкой фаз на фоне незначительного вклада поляризации Максвелла-Вагнера. Кроме того, установлено, что эта модель соответствует большому количеству экспериментальных данных, известных из литературных источников.

Возможность определения параметра релаксации τ играет важную роль в понимании особенностей поляризационного процесса, поскольку он является дополнительной его характеристикой, зависящей от свойств и структуры среды. Так, например, в работе [14] приведены графики изменения параметра τ для поляризационной модели Cole-Cole в зависимости от характерного размера пор, причем для большинства образцов пород наблюдается линейная пропорциональная зависимость, а также от влагонасыщенности образцов песчаника. Выявлена значительная обратная корреляция между отношением площади поверхности к объему пор и параметром релаксации.

Здесь следует отметить, что влияние водонасыщения на поляризационные эффекты наблюдалось и ранее многими исследователями [3, 15, 16], однако в приведенной ранее работе удалось установить количественную связь постоянной времени релаксации τ с гидравлической проводимостью и влагонасыщенностью. В частности, в насыщенных образцах наблюдается изменение параметра τ на один порядок для трех порядков изменения гидравлической проводимости и от одного до двух порядков увеличения τ в интервале водонасыщения от 100 до 25 %.

Проведенные в работе [14] исследования являются подтверждением того, насколько важным является возможность определения постоянной времени τ в качестве дополнительного параметра для изучения структурно-петрофизических характеристик среды.

В настоящей работе обсуждаются выбор модели вызванной электрической поляризации в частотной области (SIP) и особенности ее применения для установления связи между КЧД и поляризуемостью среды.

Кроме того, показана возможность использования многочастотных измерений электрического сопротивления в кондуктивной электроразведке для изучения поляризационных характеристик геологической среды на основе этой модели.

Модель ВП среды в частотной области и ее параметры

Известно, что одна из наиболее распространенных моделей вызванной электрической поляризации в частотной области (SIP – Spectral Induced Polarization) – модель Cole-Cole [17], впоследствии развитая во многих работах, в частности [11], где установлена эмпирическая зависимость комплексной электропроводности σ от круговой

частоты колебаний ω возбуждающего электромагнитного поля, поляризуемости среды η , параметров процесса: времени релаксации τ и степенной зависимости c , а также стационарной электропроводности σ_0 , измеренной при постоянном токе;

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 \frac{1 + (i\omega\tau)^c}{1 + (1 - \eta)(i\omega\tau)^c}. \tag{1}$$

В работе [11] рассчитаны теоретические кривые амплитудных и фазовых частотных зависимостей от входящих в (1) типичных значений параметров c и η , позволяющие выявить некоторые их характерные морфологические особенности. Например, характер поведения асимптотической зависимости модуля $|\sigma(\omega)|$ при $\omega \rightarrow \infty$ и экстремум фазовой характеристики наиболее ярко выражены с увеличением поляризуемости и параметра релаксации в пределах их допустимых интервалов изменения от 0 до 1.

В частном случае при $c = 1$ из (1) следует Дебаевская модель вызванной поляризации (ВП), описываемая соотношением

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 \frac{1 + i\omega\tau}{1 + i\omega\tau(1 - \eta)}, \tag{2}$$

которой соответствует экспоненциальный спад сигнала ВП во временной области, регулируемый постоянной времени τ [11]. Для этой модели дисперсионные искажения амплитудной и фазовой характеристик взаимного импеданса наиболее ярко выражены, что дает возможность определить входящие в нее параметры η и τ с большей определенностью при решении обратной задачи.

Известно, что породы с одной и той же электропроводностью могут обладать различной поляризуемостью, зависящей от множества факторов: пористости, влагонасыщенности, минерализации флюида, заполняющего поровое пространство (для ионопроводящих пород), а также от содержания вкрапленности электропроводящих минералов, когда возникают дополнительные электрохимические процессы на контактах электролита с изолятором и электронным проводником [3, 7, 18].

Эти особенности, установленные большей частью эмпирическим путем, как при физическом моделировании, так и экспериментально в натуральных условиях предопределили широкое распространение методов ВП и частотной дисперсии для решения рудно-поисковых, поисково-разведочных, инженерно-геологических и гидрогеологических задач.

В частности, установлено, что динамика нарастания и спада ВП (характеризующаяся параметром релаксации τ) существенно зависит от структурно-петрофизических характеристик среды, водонасыщенности и минерализации порового флюида, примесей глинистых фракций и электронно-проводящих включений, размера зерен породы и других факторов. Это дает принципиальную возможность для определения или оценки некоторых из этих характеристик при решении обратной задачи по измеренным значениям электросопротивления на разных частотах.

Из общей эмпирической зависимости (1) вытекают следующие предельные соотношения при $\omega \rightarrow \infty$:

$$\sigma_\infty = \sigma_0 \frac{1}{1 - \eta}; \eta = 1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_\infty} = 1 - \frac{\rho_\infty}{\rho_0}, \tag{3}$$

где σ_∞ , ρ_∞ – проводимость и электросопротивление на «бесконечно» большой частоте; ρ_0 – удельное электрическое сопротивление, определяемое в стационарном электрическом поле в отсутствие поляризационных эффектов.

Из (1) путем очевидных преобразований нетрудно получить формулы «обращения» относительно комплексного электросопротивления среды ρ_ω на частоте ω :

$$\rho_\omega = \rho_0 \left[1 - \eta \frac{(i\omega\tau)^c}{1 + (i\omega\tau)^c} \right]; \rho_\omega = \rho_\infty \left[1 + \frac{\eta}{(1 - \eta)[1 + (i\omega\tau)^c]} \right], \tag{4}$$

а также соотношение, определяющее поляризуемость:

$$\eta = \frac{(\rho_0 - \rho_\omega)}{\rho_0} \cdot \frac{[1 + (i\omega\tau)^c]}{(i\omega\tau)^c}, \tag{5}$$

Это выражение более полно и адекватно характеризует поляризационные свойства среды в зависимости от входящих в него параметров, чем ранее предложенное определение процентного частотного фактора PFF (Percent Frequency Factor), обсуждаемое в [3] в качестве кажущейся поляризуемости по измерениям кажущегося электросопротивления на двух частотах ω_1 и ω_2 с учетом $\omega_1 < \omega_2$:

$$PFF = \eta_k(\omega_1, \omega_2) = \frac{\rho_k(\omega_1) - \rho_k(\omega_2)}{\rho_k(\omega_1)}. \tag{6}$$

Это связано с тем, что определенная таким образом кажущаяся поляризуемость может варьировать для различных пар частот, и сохраняется неопределенность в дальнейшей интерпретации частотного фактора PFF без критерия выбора оптимальных значений ω_1 и ω_2 . Аналогичное замечание касается частотного эффекта FE (Frequency Effect), предложенного в работе [19], который определяется как отношение разности кажущихся сопротивлений $\rho_k(\omega_1) - \rho_k(\omega_2)$ к величине $\rho_k(\omega_2)$.

Взаимосвязь параметров поляризационного процесса с коэффициентом частотной дисперсии

Хорошо известно, что один из вариантов учета вызванной поляризации на переменном токе сводится к представлению комплексного сопротивления среды, зависящего от круговой частоты возбуждения ЭМ поля [7, 20]:

$$\rho(\omega) = \rho'(\omega) + i\rho''(\omega). \tag{7}$$

На основе анализа большого количества экспериментальных данных по частотным характеристикам удельного электрического сопротивления пород (в том числе содержащих электропроводные материалы) в работе [20] приведена эмпирическая зависимость для активной составляющей сопротивления пород на частотах от 1 до 1000 единиц:

$$\rho'(\omega) = \rho(\omega_0) \left(1 - k \lg \frac{\omega}{\omega_0} \right), \quad (8)$$

где k – коэффициент, характеризующий вызванную поляризацию включений, названный коэффициентом частотной дисперсии пород» [20]. Отмечается, что угол наклона частотной зависимости $\rho'(\omega)/\rho(\omega_0)$ от аргумента $\lg(\omega/\omega_0)$ напрямую зависит от объема электропроводящих включений в горной породе, что позволило в дальнейшем широко использовать метод частотной дисперсии при поисках и разведке рудных полезных ископаемых [4, 6, 18, 21].

При установлении эмпирической зависимости (8) предполагалось, что выбор ω_0 соответствует удельному сопротивлению сред без учета поляризации включений. В работе [18] приведены способы изучения комплексной электропроводности горных пород на звуковых частотах для случая $\omega_0 = 1$ и установлена корреляционная связь между коэффициентом частотной дисперсии (КЧД) и поляризуемостью при объемном содержании электропроводящих минералов до 25–30 %.

В данном разделе будем также предполагать, что поляризационные процессы возникают преимущественно в низкочастотном звуковом диапазоне от 1 до 1000 Гц, что подтверждается большим объемом экспериментальных данных, полученных методом сопротивлений в кондуктивной электроразведке. Тогда в первом приближении можно считать, что $\rho(\omega_0) = \rho(1) = \rho_0$ определяет удельное электросопротивление среды на постоянном токе и частотная зависимость для активной составляющей принимает вид:

$$\frac{\rho'(\omega)}{\rho_0} = (1 - k \lg \omega). \quad (9)$$

Аналогичная форма представления достаточно продуктивно использовалась ранее при изучении частотной дисперсии электросопротивления в реальных геологических средах [4, 6].

Проведем сопоставление (9) с выражением (4), определяющим комплексное сопротивление среды на основе модели вызванной поляризации Cole-Cole. Для установления характерных особенностей связи КЧД с основными параметрами поляризационного процесса рассмотрим частный случай Дебаевской релаксации ($c = 1$), когда дисперсионные искажения наиболее ярко выражены [7]. Тогда

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left(1 - \eta \frac{i\omega\tau}{1 + i\omega\tau} \right) = \rho_0 \left(1 - \eta \frac{i\omega\tau + \omega^2\tau^2}{1 + \omega^2\tau^2} \right). \quad (10)$$

Переходя к действительной и мнимой частям этого выражения

$$\frac{\rho'(\omega)}{\rho_0} = 1 - \eta \frac{\omega^2\tau^2}{1 + \omega^2\tau^2}; \quad \frac{\rho''(\omega)}{\rho_0} = -\eta \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (11)$$

и учитывая частотную зависимость (9), находим искомое соотношение связи КЧД с параметрами поляризационного процесса η и τ :

$$\eta = k \frac{1 + \omega^2\tau^2}{\omega^2\tau^2} \lg \omega. \quad (12)$$

Анализируя это соотношение, можно заметить, что значение параметра поляризуемости η существенно преобладает над величиной коэффициента частотной дисперсии k при $\omega > 10$, что подтверждается экспериментальными данными [18].

Алгоритм определения поляризационных характеристик среды по данным измерения на трех частотах

Ранее предполагалось, что измерению на частоте $\omega_0 = 1$ соответствует действительное значение электросопротивления среды, вычисленное по известной формуле для стационарного электрического поля в методе сопротивлений [2]. Это не так далеко от истины, поскольку в современной серийной электроразведочной аппаратуре для кондуктивных методов электроразведки, в частности «ЭРА-МАКС», низкочастотный диапазон начинается со значения 1,22 Гц, а поляризационные свойства среды на этой частоте слабо выражены [18].

Поскольку КЧД в формуле (8) характеризует ВП по данным измерения реальной части комплексного сопротивления среды, то для адекватного применения поляризационной модели Cole-Cole в качестве примера также ограничимся данными по реальной части кажущегося сопротивления, полученными на частотах ω_1 и ω_2 ($\omega_1 < \omega_2$).

Обозначим $\rho_1 = \rho'(\omega_1)$; $\rho_2 = \rho'(\omega_2)$ и, подставляя их в выражение (11) для действительной части, получаем систему двух уравнений с неизвестными η и τ :

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = 1 - \eta \frac{\omega_1^2\tau^2}{1 + \omega_1^2\tau^2}; \quad \frac{\rho_2}{\rho_0} = 1 - \eta \frac{\omega_2^2\tau^2}{1 + \omega_2^2\tau^2} \quad (13)$$

или в другом виде после очевидных преобразований:

$$\eta = \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_0} \right) \frac{1 - \omega_1^2\tau^2}{\omega_1^2\tau^2}; \quad (14)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_0} \right) \frac{1 - \omega_2^2\tau^2}{\omega_2^2\tau^2}. \quad (15)$$

Приравняв левые части выражений (14)–(15), получаем алгебраическое уравнение для определения квадрата параметра релаксации, решив которое, находим

$$\tau^2 = \frac{(\rho_0 - \rho_1)\omega_2^2 - (\rho_0 - \rho_2)\omega_1^2}{\omega_1^2\omega_2^2(\rho_1 - \rho_2)}. \quad (16)$$

Из экспериментальных данных [20] можно заметить, что с ростом ω наблюдается линейная тенденция уменьшения сопротивления, так что правая часть выражения (16) больше нуля, что позволяет вычислить параметр τ , а затем после его подстановки в любое из уравнений – (14) или (15) – найти искомую поляризуемость η .

Такова общая принципиальная схема алгоритма определения поляризационных характеристик по данным измерения электросопротивления среды на трех частотах в методах кондуктивной электроразведки.

Выводы

В настоящей работе показана возможность использования многочастотных измерений электрического сопротивления для изучения поляризационных характеристик среды на основе модели вызванной электрической поляризации в частотной области Cole-Cole.

Установлена связь между коэффициентом частотной дисперсии электрического сопротивления и поляризуемостью среды на основе этой модели и эмпирической

зависимости от частоты для активной составляющей электросопротивления пород.

Разработан алгоритм и выведены формулы, позволяющие определить поляризуемость среды и параметр времени релаксации по данным измерения кажущегося сопротивления на трех частотах в методе электроразведки на переменном токе.

Полученные результаты могут найти применение при изучении поляризационных характеристик среды на основе анализа и обработки данных многочастотных ЭМ зондирований в кондуктивной электроразведке, в том числе при проведении исследований методом частотной дисперсии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кононенко И. И., Родионов П. Ф., Человечков А. И. Применение метода ВП на переменном токе на рудных месторождениях // Фазовые и амплитудные измерения вызванной поляризации на рудных месторождениях. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. С. 86–111.
2. Заборовский А. И. Электроразведка. М.: Гостоптехиздат, 1963. 424 с.
3. Комаров В. А. Электроразведка методом вызванной поляризации. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Недра, 1980. 391 с.
4. Улитин Р. В., Астраханцев Г. В. О частотной дисперсии электрического сопротивления и поляризуемости горных пород // Электрометрия при поисках сульфидных месторождений. Свердловск: УФАН АН СССР, 1968. С. 49–54.
5. Астраханцев Г. В., Улитин Р. В. Феноменологические соотношения при вызванной поляризации электропроводящих минералов // Фазовые и амплитудные измерения вызванной поляризации на рудных месторождениях. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. С. 18–22.
6. Кононенко И. И., Родионов П. Ф., Улитин Р. В., Человечков А. И. Методика и техника полевых работ и камеральной обработки в методе ВП на переменном токе // Фазовые и амплитудные измерения вызванной поляризации на рудных месторождениях. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. С. 71–85.
7. Кормильцев В. В., Мезенцев А. Н. Электроразведка в поляризующихся средах. Свердловск: УрО АН СССР, 1989. 128 с.
8. Fedorova O. I., Gorshkov V. Yu. New technique of electrical soundings: theoretical modeling and experimental application in study of state of the soil dam // Acta Geodaetica et Geophysica. 2020. Vol. 55, issue 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s40328-019-00277-1>
9. Шестаков А. Ф. К вопросу об использовании метода сопротивлений на переменном токе // Уральский геофизический вестник. 2018. № 1 (31). С. 42–48. <https://doi.org/10.25698/UGV.2018.1.6.42>
10. Shestakov A. F. On the alternating current resistivity technique with the use of the Schlumberger array // Изв. вузов. Горный журнал. 2019. № 2. С. 59–69. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-2-59-69>
11. Pelton W. H., Wards S. H., Hallow P. G., Sills W. R., Nelson P. H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // Geophysics. 1978. Vol. 43. № 3. P. 588–600. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1440839>
12. Revil A., Epehimer J. D., Skold M., Karaoulis M., Godinez L., Prasad M. Low-frequency complex conductivity of sandy and clayey materials // Journal of Colloid and Interface Science. 2013. Vol. 398. P. 193–209. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.01.015>
13. Revil A. Effective conductivity and permittivity of unsaturated porous materials in the frequency range 1 mHz–1GHz // Water Resources Research. 2013. Vol. 49. Issue 1. P. 306–327. <https://doi.org/10.1029/2012WR012700>
14. Binley A., Slater L. D., Fukes M., Cassiani G. Relationship between spectral induced polarization and hydraulic properties of saturated and unsaturated sandstone // Water Resources Research. 2005. Vol. 41, issue 12. P. 1–13. W12417. <http://dx.doi.org/10.1029/2005WR004202>
15. Titov K., Komarov V., Tarasov V., Levitski A. Theoretical and experimental study of time domain-induced polarization in water-saturated sands // Journal of Applied Geophysics. 2002. Vol. 50, issue 4. P. 417–433. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00168-4](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00168-4)
16. Ulrich C., Slater L. D. Induced polarization measurements on unsaturated, unconsolidated sands // Geophysics. 2004. Vol. 69, № 3. P. 762–771. <https://doi.org/10.1190/1.1759462>
17. Cole K. S., Cole R. H. Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics // Journal of Chemical Physics. 1941. Vol. 9, issue 4. P. 341–351. <https://doi.org/10.1063/1.1750906>
18. Астраханцев Г. В., Улитин Р. В. Комплексная электропроводность горных пород на звуковых частотах и способы ее изучения в полевых условиях // Электрометрия при поисках сульфидных месторождений. Свердловск: УФАН АН СССР, 1968. С. 41–47.
19. Hallof P. G. A comparison of the various parameters employed in the variable-frequency induce-polarization method // Geophysics. 1964. Vol. 29. № 3. P. 425–433. <https://doi.org/10.1190/1.1439376>
20. Кормильцев В. В. Вызванная поляризация моделей и образцов горных пород на переменном токе // Фазовые и амплитудные измерения вызванной поляризации на рудных месторождениях. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. С. 23–34.
21. Улитин Р. В., Башмаков А. А., Скурихина В. М., Титлинов В. С. Методика поисков сульфидных месторождений методом частотной дисперсии (на примере колчеданных месторождений Урала) // Электрометрия при поисках сульфидных месторождений. Свердловск: УФАН АН СССР, 1968. С. 55–69.

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2020 года

To estimation of polarization characteristics of the medium on the data of multi-frequency measurements in the method alternating current resistance

Aleksey Fedorovich SHESTAKOV*

Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract

The relevance of the work is due to the need to extract additional information in the study of the polarization properties of the geological environment from experimental data in the method of ac resistance using multifrequency measurements. The introduction provides a brief review of the literature on the problem of studying the polarization properties of rocks in the frequency domain and the method of frequency dispersion, which is successfully used in prospecting and exploration works in sulfide and copper pyrite deposits. The questions of determining the polarizability of the medium in the frequency domain and the parameter of the polarization process depending on the structural and petrophysical characteristics are discussed.

Purpose of this research is to compare the characteristic features of studying the polarization properties of a medium in the frequency domain and to establish the relationship between polarizability and the frequency dispersion coefficient of electrical resistance. To propose an algorithm for determining the polarization characteristics of a medium from the data of multifrequency measurements in the method of resistances on alternating current.

Research methodology: substantiation of the choice of the model of induced electric polarization in the frequency domain and the peculiarities of its application to establish the relationship between the frequency dispersion coefficient and the apparent polarizability of the medium. Research methods: theoretical calculations and comparative analysis of the obtained dependences on the model parameters.

Results of work. The choice of the model of induced electric polarization Cole-Cole in the frequency domain is substantiated to establish a relationship between the frequency dispersion coefficient and the apparent polarizability of the medium. The possibility of using multifrequency measurements of electrical resistance to study the polarization characteristics of a medium based on this model is shown. An algorithm has been developed and expressions have been obtained that make it possible to determine the polarizability of the medium and the parameter of the relaxation time from the data of measuring the apparent resistance at three frequencies in the method of electric sounding on alternating current.

Application area. The obtained results can find application in the processing of data from conductive electrical soundings on alternating current, for the correct interpretation of the frequency effect and the study of the polarization properties of the medium, in particular, when research by the method of frequency dispersion.

Keywords: electrical survey, resistivity method, alternating current, spectral induced polarization, apparent resistance, chargeability (polarizability).

REFERENCES

1. Kononenko I. I., Rodionov P. F., Chelichkov A. I. 1973, Application of the VP method on alternating current in ore deposits. Phase and amplitude measurements of induced polarization in ore deposits. Sverdlovsk, pp. 86–111. (In Russ.)
2. Zaborovskiy A. I. 1963, Electrical survey. Moscow, 424 p. (In Russ.)
3. Komarov V. A. 1980, Prospecting by the method of induced polarization. 2-nd ed. Leningrad, 391 p. (In Russ.)
4. Ulitin R. V., Astrakhantsev G. V. 1968, On frequency dispersion of electrical resistance and polarizability of rocks. *Electrometry in the search for sulfide deposits*. Sverdlovsk, pp. 49–54. (In Russ.)
5. Astrakhantsev G. V., Ulitin R. V. 1973, Phenomenological relations in induced polarization of electrically conducting minerals. *Phase and amplitude measurements of induced polarization in ore deposits*. Sverdlovsk, pp. 18–22. (In Russ.)
6. Kononenko I. I., Rodionov P. F., Ulitin R. V., Chelichkov A. I. 1973, Methods and techniques of field work and cameral processing in the method of VP on alternating current. *Phase and amplitude measurements of induced polarization in ore deposits*. Sverdlovsk, pp. 71–85. (In Russ.)
7. Kormiltsev V. V., Mezentsev A. N. 1989, *Electrical exploration in polarizing environments*. Sverdlovsk, 128 p. (In Russ.)
8. Fedorova O. I., Gorshkov V. Yu. 2020, New technique of electrical soundings: theoretical modeling and experimental application in study of state of the soil dam. *Acta Geodaetica et Geophysica*, vol. 55, issue 1, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s40328-019-00277-1>
9. Shestakov A. F. 2018, To the question of the method of resistance on alternating current with application of Schlumberger array. *Uralskii geofizicheskii vestnik*, no.1(31), pp. 42–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.25698/UGV.2018.1.6.42>
10. Shestakov A. F. 2019, On the alternating current resistivity technique with the use of the Schlumberger array. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 2, pp. 59–69. (In English) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-2-59-69>
11. Pelton W. H., Wards S.H., Hallow P. G., Sills W. R., Nelson P. H. 1978, Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, vol 43, no. 3, pp. 588–600. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1440839>

✉alxsh@mail.ru

12. Revil A., Eppehimer J. D., Skold M., Karaoulis M., Godinez L., Prasad M. 2013, Low-frequency complex conductivity of sandy and clayey materials. *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 398, pp. 193–209. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.01.015>
13. Revil A. 2013, Effective conductivity and permittivity of unsaturated porous materials in the frequency range 1 mHz–1GHz. *Water Resources Research*, vol. 49, issue 1, pp. 306–327. <https://doi.org/10.1029/2012WR012700>
14. Binley A., Slater L. D., Fukes M., Cassiani G. 2005, Relationship between spectral induced polarization and hydraulic properties of saturated and unsaturated sandstone. *Water Resources Research*, vol. 41, issue 12, pp. 1–13. W12417. <http://dx.doi.org/10.1029/2005WR004202>
15. Titov K., Komarov V., Tarasov V., Levitski A. 2002, Theoretical and experimental study of time domain-induced polarization in water-saturated sands. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 50, issue 4, pp. 417–433. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00168-4](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00168-4)
16. Ulrich C., Slater L. D. 2004, Induced polarization measurements on unsaturated, unconsolidated sands. *Geophysics*, vol. 69, no. 3. P. 762–771. <https://doi.org/10.1190/1.1759462>
17. Cole K. S., Cole R. H. 1941, Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics. *Journal of Chemical Physics*, vol. 9, issue 4, pp. 341–351. <https://doi.org/10.1063/1.1750906>
18. Astrakhantsev G. V., Ulitin R. V. 1968, Complex electrical conductivity of rocks at sound frequencies and ways to study it in the field. *Electrometry in the search for sulfide deposits*. Sverdlovsk, pp. 41–47. (In Russ.)
19. Hallof P. G. 1964, A comparison of the various parameters employed in the variable-frequency induce-polarization method. *Geophysics*, vol. 29, no. 3, pp. 425–433. <https://doi.org/10.1190/1.1439376>
20. Kormiltsev V. V. 1973, Induced polarization of models and samples of rocks at alternating current. *Phase and amplitude measurements of induced polarization in ore deposits*. Sverdlovsk, pp. 23–34. (In Russ.)
21. Ulitin R. V., Bashmakov A. A., Skurikhina V. M., Titinov V. S. 1968, Method of searching for sulfide deposits by the method of frequency dispersion (on the example of pyrite deposits in the Urals). *Electrometry in the search for sulfide deposits*. Sverdlovsk, pp. 55–69. (In Russ.)

The article was received on December 25, 2020