

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34.013.4

ОСОБЕННОСТИ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ  
В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

(по результатам двумерного численного моделирования)

Г.В. Гурин<sup>1</sup>, А.В. Тарасов<sup>1,2</sup>, Ю.Т. Ильин<sup>2</sup>, К.В. Титов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ЗАО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика», 197046, Санкт-Петербург, Петроградская наб., 18, корп. 3 В, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле,  
199155, Санкт-Петербург, пер. Декабристов, 16, Россия

Приведены результаты двумерного математического моделирования данных профилирования и электротомографии методом вызванной поляризации (ВП) в кусочно-однородных средах, неоднородности в которых различаются строением, размерами, глубиной залегания, а также значениями времени релаксации, заряжаемости и удельного электрического сопротивления.

Проведено сопоставление стандартного и спектрального подхода к анализу данных ВП. Рассмотрены случаи, когда анализ временных характеристик ВП позволяет получить дополнительную информацию, в определенных геологических ситуациях имеющую важное практическое значение.

На основе результатов моделирования установлены основные особенности временных характеристик ВП в двумерных неоднородных средах. Показано, что анализ временных характеристик ВП наиболее эффективен в том случае, когда глубина залегания аномалеобразующих тел минимальна, а их электропроводность на порядок меньше, чем у вмещающей среды.

*Вызванная поляризация, математическое моделирование, время релаксации, заряжаемость, вкрапленные руды.*

TRANSIENT CHARACTERISTICS OF INDUCED POLARIZATION IN INHOMOGENEOUS MEDIA  
(from results of 2D numerical modeling)

G.V. Gurin, A.V. Tarasov, Yu.T. Il'in, and K.V. Titov

The paper presents results of 2D mathematical modeling of induced polarization (IP) in the cases of profiling and tomography for piecewise media containing orebodies with different structures, sizes, depths, relaxation times, chargeability, and electrical resistivity. The standard and spectral approaches to data analysis are compared. The cases when analysis of transient IP characteristics yields new information of practical importance are considered.

The main features of transient IP characteristics in 2D inhomogeneous media are determined from the modeling results. Analysis of transient IP characteristics yields the best results when the depth of occurrence of polarizable bodies is minimum and their electrical conductivity is an order of magnitude lower than that of the host rock.

*Induced polarization, mathematical modeling, relaxation time, chargeability, disseminated ores*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время метод вызванной поляризации (ВП) широко используется при решении различных геологических, гидрогеологических, экологических, археологических и других задач [Pelton et al., 1978; Luo, Zhang, 1998; Kirsch, 2006; Kemna et al., 2012; Florsch et al., 2012; и др.]. Важнейшим преимуществом метода ВП по сравнению с методом сопротивления является то, что его параметры связаны с петрофизическими свойствами пород, слабо влияющими на их удельное электрическое сопротивление (УЭС). Это позволяет проводить оценку свойств пород, имеющих важное практическое значение: объемное содержание зерен электропроводящих минералов, их преобладающий размер, преобладающий

размер пор или зерен диэлектриков, глинистость, коэффициент фильтрации и др. [Pelton et al., 1978; Mahan et al., 1986; Vanhala, Peltoniemi, 1992; Revil, Florsch, 2010; Zisser et al., 2010; Kemna et al., 2012; Gurin et al., 2015; и др.]. В простых случаях для качественной оценки этих свойств можно использовать стандартные методики работ и обработки данных ВП (определяя значения кажущейся поляризуемости или заряжаемости, фазового угла и др.). Однако анализ временных или частотных характеристик ВП позволяет существенно повысить достоверность оценок, а в некоторых случаях получить новую информацию. Это связано с тем, что в общем случае параметр, характеризующий интенсивность процессов ВП (стационарная поляризуемость ( $M$ ), и скорость (время релаксации ( $\tau$ )) независимы [Gurin et al., 2015]. Поэтому при использовании стандартных подходов к анализу данных ВП часть информации может быть пропущена.

Первые работы по изучению временных и частотных характеристик ВП относятся к концу 1960-х — началу 1970-х годов [Marshall, Madden, 1959; Постельников, 1964; Комаров, 1965, 1972; Шейнман, 1969; Геннадиник и др., 1971; Шаповалов, 1972; Кормильцев, Мезенцев, 1989; и др.]. В этих работах было установлено, что время релаксации ВП связано с размером зерен электропроводящих минералов. Это позволило предположить, что анализ временных характеристик ВП в ряде случаев может значительно повысить информативность метода [Геннадиник и др., 1971; Комаров, 1972; Шаповалов, 1972; Zonge, Wynn, 1975; и др.]. **В частности, было предложено использовать установленные зависимости времени релаксации от размера зерен электропроводящих минералов для решения разнообразных поисковых и картировочных задач.** К их числу относится разделение пород по типу распределения электропроводящих минералов на массивный, прожилковый и вкрапленный типы. Кроме того, в то же время появилась идея о разделении аномалий ВП, обусловленных графитизированными породами и сульфидной минерализацией [Карасев и др., 1973; Шаповалов и др., 1976; Pelton et al., 1978; Комаров, 1980; Кормильцев, 1980; Шерешевский, Литманович, 1983; Sigel et al., 1997; и др.]. В настоящее время эти утверждения не потеряли своей актуальности. Однако основное внимание исследователей в последние десятилетия было сконцентрировано на решении не геолого-разведочных (поисковых), а инженерных, гидрогеологических и экологических задач. Появляется все больше примеров, где для решения перечисленных задач используются не только заряжаемость и удельное электрическое сопротивление, но и другие параметры: время релаксации, показатель степени формулы Коул-Коул и др. [Kemna et al., 2012; Gazoty et al., 2012; Fiandaca et al., 2012, 2013; и др.]. При этом примеров работ, в которых аналогичные методики анализа данных ВП используются для решения поисково-разведочных задач, гораздо меньше.

Большинство опубликованных в последнее время статей, где анализируются временные или частотные характеристики ВП, посвящены описанию результатов лабораторных работ и используемых алгоритмов решения обратных задач метода ВП в 1D, 2D и 3D пространстве. Эти алгоритмы обычно тестируются на относительно простых моделях, в которых неоднородности представлены одной или двумя призмами [Oldenburg, Yaoguo, 1994; Routh et al., 1998; Loke et al., 2006; Fiandaca et al., 2012]. Несмотря на различные подходы к решению обратных задач, тестовые примеры показывают, что все они позволяют с высокой точностью проводить оценку истинных параметров аномалеобразующих тел. При этом чаще всего рассматриваются модели, содержащие приповерхностные тела (глубина исследования ограничивается первыми десятками метров). Это связано с тем, что большая часть исследователей занимается решением инженерно-гидрогеологических и экологических задач, когда изучается верхняя часть геологического разреза.

Для случая геолого-разведочных работ поисковые глубины составляют первые сотни метров, а поисковые объекты (минерализованные зоны или тела) характеризуются более сложным строением, изменяется тип распределения сульфидов (прожилковый, вкрапленный и др.), размер их зерен, объемное содержание и т. д. **Таким образом, для оценки применимости и информативности временных характеристик ВП при проведении поисковых работ методом ВП в различных геологических обстановках необходимо изучать более сложные модели.**

Для выявления основных трудностей и оценки возможностей использования временных характеристик ВП применительно к поисково-разведочным и картировочным работам необходимо провести математическое моделирование.

Анализ опубликованной литературы показывает, что изучение особенностей временных характеристик ВП на математических моделях простейших горизонтально-слоистых и кусочно-однородных сред проводилось в ограниченном объеме [Геннадиник, 1971; Pelton et al., 1978; Guptasarma, 1983; Soininen, 1984, 1985; Liu, Vozoff, 1985; Luo, Zhang, 1998, и др.].

В работах Х. Сойнайнен [Soininen, 1984, 1985] на основе математического моделирования данных профилирования с различными электроразведочными установками над призмами, погруженными в однородное полупространство, было проведено сравнение кажущихся спектров комплексного удельного электрического сопротивления ( $\rho_k^*(\omega)$ ) с эталонными ( $\rho^*(\omega)$ ). Для анализа частотных характеристик

ВП он использовал модель Коул-Коул (сформулированную В.Х. Пелтоном для УЭС [Pelton et al., 1978]). В его работах сделан ряд важных практически значимых выводов. Установлено, что показатель степени в модели Коул-Коул ( $c$ ) и время релаксации ( $\tau$ ) удается оценить по  $\rho_k^*(\omega)$  с удовлетворительной точностью для различных электроразведочных установок, вне зависимости от формы поляризуемого тела (для геоэлектрической модели, содержащей одно тело). Следовательно, форма спектров  $\rho^*(\omega)$  хорошо воспроизводится по  $\rho_k^*(\omega)$  [Soininen, 1984, 1985]. Кроме того, проводя моделирование над двумя призмами, различающимися значениями параметров модели Коул-Коул, было показано, что их можно уверенно выделять по спектрам  $\rho_k^*(\omega)$ , даже если различие в значениях постоянной времени между ними мало и составляет одну декаду [Soininen, 1985]. С. Хекки также отметил, что по мере уменьшения контраста значений УЭС аномалеобразующее тело — вмещающая среда интенсивность процессов ВП увеличивается, а различие между спектрами  $\rho_k^*(\omega)$  и  $\rho^*(\omega)$  уменьшается. Однако при значительном контрасте по электропроводности между аномалеобразующим телом и вмещающей средой форма спектров  $\rho_k^*(\omega)$  может существенно искажаться. В работе С. Лиу и К. Возоффа [Liu, Vozoff, 1985] показано, что зависимость интенсивности поляризации аномалеобразующих тел от электропроводности вмещающей их среды описывается нелинейной функцией, а суммарный вклад в  $\rho_k^*(\omega)$  от тел, различающихся частотными характеристиками, можно рассматривать как суперпозицию.

В настоящей статье на основе математического моделирования проведен анализ особенностей временных характеристик ВП в кусочно-однородных средах на различных моделях. Изучено влияние контраста геоэлектрических разрезов по значениям УЭС, глубины залегания аномалеобразующих тел и их строения. Проведено сопоставление стандартного и спектрального подхода к анализу данных, а также дана оценка информативности спектральных параметров ВП, которые ранее практически не использовались для анализа полевых данных.

### ВЫЗВАННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

В зависимости от типа источника тока (переменного или постоянного) изучение вторичных электрических полей, сформировавшихся в породах за счет сторонних токов, проводят во временной или частотной области.

Для описания ВП во временной области используется понятие переходной характеристики ( $f(t)$ ), под которой понимается реакция среды на ступенчатое изменение тока [Комаров, 1980]. Согласно данному определению, кривую спада напряжения вторичного электрического поля ВП после наложения бесконечно длинной ступени тока можно записать в виде [Tarasov, Titov, 2007]

$$U_{\text{ВП}}(t) = M \cdot U_0 (1 - f(t)/U_0) = M \cdot U_0 \cdot F(t), \quad (1)$$

где  $t$  — время, отсчитываемое от момента выключения тока;  $F(t)$  — нормированная переходная характеристика ВП;  $U_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} U(t)$  — асимптотическое значение напряжения, отвечающее бесконечно длинному импульсу тока;  $M$  — стационарная поляризуемость.

Стационарная поляризуемость в выражении (1) характеризует интенсивность процессов ВП:

$$M = \frac{U_0 - U_\infty}{U_0}, \quad (2)$$

где  $U_\infty = \lim_{t \rightarrow 0} U(t)$  — значение напряжения после выключения тока (за исключением омической составляющей, обусловленной токами проводимости).

Тогда кривую спада поляризуемости можно представить следующим образом:

$$\eta(t) = M \cdot F(t). \quad (3)$$

На практике для анализа данных используется интегральный параметр ВП — заряжаемость:

$$m = \frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_1}^{t_2} \eta(t) dt, \quad (4)$$

где  $t_1, t_2$  — время начала и конца измерения кривой спада поляризуемости.

Параметром, характеризующим скорость протекания процессов ВП, является время релаксации ( $\tau$ ), определяемое по положению максимума основного пика на кривых дифференциальной поляризуемости или другими способами. С физико-химической точки зрения  $\tau$  характеризует время, за которое большая часть избыточных зарядов — источников вторичных электрических полей ВП — нейтрализуется, а их общее распределение в объеме пород приближается к термодинамическому равновесию.

### МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВП

В настоящее время можно выделить три основных подхода к анализу временных характеристик ВП: анализ кривых дифференциальной поляризуемости; аппроксимация кривых  $\eta(t)$  некоторой функцией, отвечающей выбранной модели ВП (Коул-Коул [Pelton et al., 1978], Вонга [Wong, 1979] и др.); разложение  $\eta(t)$  на сумму моделей Дебая (дебаевская декомпозиция (ДД) [Wait, 1984; Nordsiek, Weller, 2008]) или моделей Коула-Коула (мульти-Коул-Коул [Pelton et al., 1978; Florsch et al., 2012; и др.]). Все перечисленные методы позволяют проводить анализ временных характеристик ВП, но наибольшее распространение получили два последних.

На протяжении нескольких десятилетий для описания частотных (временных) характеристик ВП и аппроксимации наблюдаемых данных используется эмпирическая модель Коул-Коул, описывающая зависимость комплексной электропроводности среды от частоты электромагнитного поля. Во временной области нормированная переходная характеристика модели Коул-Коул может быть представлена следующим образом [Guptasarma, 1982; Wait, 1984]:

$$F(t, \tau) = M \cdot \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i \frac{(t/\tau)^{ic}}{\Gamma(1+ic)}, \quad (5)$$

где  $\Gamma(1+ic)$  — гамма-функция с аргументом  $(1+ic)$ ,  $c$  — показатель степени, характеризующий скорость затухания  $F(t, \tau)$ .

Популярность этой модели объясняется простотой (для описания временных характеристик ВП используются всего три параметра:  $M$ ,  $\tau$ ,  $c$ ), а также возможностью аппроксимации кривых спада поляризуемости различного вида. Однако в общем случае процесс релаксации избыточных (относительно равновесного состояния) зарядов в породах является суперпозицией вкладов от различных источников (электропроводящих зерен, пор — простейших структурных элементов породы, где происходит накопление избыточных зарядов). Поэтому для количественной характеристики пород использование модели (Коул-Коул, Вонга и др.) с одним преобладающим временем релаксации чаще всего недостаточно. В общем случае необходимо анализировать динамику процесса релаксации вторичных электрических полей ВП — изучать распределение времен релаксации (РВР). Этот постулат лежит в основе методов математического анализа данных ВП, которые используют разложение кривых  $\eta(t)$  на суперпозицию моделей, описывающих релаксацию избыточных зарядов в элементарных ячейках. В настоящей работе используется дебаевская декомпозиция, в которой нормированная переходная характеристика  $F(t, \tau)$  описывается экспоненциальной функцией [Wait, 1984; Nordsiek, Weller, 2008; Гурин и др., 2014]:

$$\eta(t) = \sum_{k=1}^N g(\tau_k) F(t, \tau_k) = \sum_{k=1}^N g(\tau_k) \exp\left(\frac{-t}{\tau_k}\right), \quad (6)$$

где  $M = \sum_{k=1}^N g(\tau_k)$  — стационарная поляризуемость породы;  $g(\tau_k)$ ,  $\tau_k$  — стационарная поляризуемость и время релаксации в  $k$ -м элементарном структурном элементе.

Согласно введенным обозначениям, кривая спада поляризуемости после пропускания разнополярных импульсов тока (длительность импульса и паузы равна) может быть записана в виде интеграла свертки [Tarasov, Titov, 2007]:

$$\eta(t) = \int_0^{\infty} g(\tau) \int_0^t I(t_0, T, NI) F(t-t_0, \tau) dt_0 d\tau = \int_0^{\infty} g(\tau) F^*(t, \tau, T, NI) d\tau, \quad (7)$$

где  $I(t_0, T, NI)$  — функция, описывающая зависимость тока от времени;  $F^*(t, \tau, T, NI)$  — свертка модельного спада, описывающего элементарный поляризационный процесс  $F(t, \tau)$ , с функцией, описывающей разнополярные импульсы тока  $I(t, T, NI)$ ;  $t$  — время, отсчитываемое от момента окончания токового импульса;  $T$  — длительность импульса;  $NI$  — число импульсов тока.

Учитывая то, что время релаксации ВП изменяется в широком диапазоне от  $10^{-6}$  до  $10^3$  с и более, используется логарифмический масштаб времени. Проводя замену переменных  $s = \ln(\tau)$  и  $p = \ln(t)$ , вводятся новые функции, описывающие РВР ( $Z(s)$ ) и свертку  $F(p, s)$  с  $I(p, s, T, IN)$ :

$$\int_0^{\infty} g(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} Z(s) ds = M, \quad (8)$$

$$F^*(t, \tau, T, NI) = \Phi(p, s, T, NI), \quad (9)$$

где  $g(\tau) = Z(s) / \tau$ .

С учетом введенных обозначений выражение (7) записывается в виде

$$\eta(p) = \int_{-\infty}^{\infty} Z(s) \cdot \Phi(p, s, T, NI) ds. \quad (10)$$

Функция  $\Phi(p, s, T, NI)$  известна, следовательно, выражение (10) является уравнением Фредгольма первого рода, которое может быть решено относительно распределения  $Z(s)$ . Подробное описание алгоритма, используемого для решения (10), и оценка его устойчивости приведены в работе [Tarasov, Titov, 2007].

В качестве основных параметров, характеризующих РВР, обычно используются стационарная поляризуемость (8) и среднее взвешенное время релаксации ( $\tau^*$ ) [Nordsiek, Weller, 2008]:

$$\tau^* = \exp \left[ \frac{\sum_k (Z_k \cdot \ln(\tau_k))}{\sum_k Z_k} \right]. \quad (11)$$

В ряде работ для анализа временных (частотных) характеристик ВП используется суперпозиция нескольких моделей Коул-Коул (мульти-Коул-Коул [Pelton et al., 1978; Florsch et al., 2012; и др.]). По мнению авторов, этот подход применим для анализа единичных измеренных кривых спада поляризуемости (например, данных экспериментальных работ), но при большом количестве данных, характерных для полевых исследований, их анализ существенно усложняется. Кроме того, увеличение количества используемых моделей Коул-Коул приводит к значительному росту числа параметров (для двух моделей их шесть, а для трех — уже девять), что делает анализ полевых данных ВП на основе мульти-Коула крайне сложным и неустойчивым. Методики определения распределения времен релаксации и кривых дифференциальной поляризуемости лишены этого недостатка, но их использование приводит к другим сложностям. К ним относится то, что методы их анализа разработаны недостаточно, и чаще всего он проводится визуально (выделяются определенные особенности РВР, например, пики и др.). Очевидно, что анализ временных характеристик ВП рядовых съемок с большим количеством измеренных кривых спада кажущейся поляризуемости (тысячи и десятки тысяч точек наблюдения) на основе визуального анализа — крайне трудоемкая работа. В то же время аппроксимацию кривых  $\eta_k(t)$  моделью Коул-Коул можно выполнять в автоматическом или полуавтоматическом режиме (примеры подобных программ многочисленны (например, алгоритм А. Хорбани [Ghorbani et al., 2007])).

### **СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ВП С ОСНОВНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПОРОД И РУД, СОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕКТРОНОПРОВОДЯЩИЕ МИНЕРАЛЫ**

Применительно к случаю геолого-разведочных работ, где в качестве поисковых объектов часто выступают зоны гидротермально-метасоматически измененных пород, содержащих сульфидную минерализацию, целесообразно рассмотреть связь параметров ВП с основными параметрами пород, содержащих электропроводящие минералы: их объемным содержанием ( $\xi$ ), размером (радиусом ( $r$ )), а также электропроводностью поровой влаги  $\sigma_v$ .

Обычно для оценки вклада зерен электропроводящих минералов в наблюдаемое вторичное электрическое поле ВП (исключая вклад матрицы — вмещающих пород) используют модель смеси Максвелла [Булашевич, 1956; Кормильцев, 1978], а в качестве параметра, характеризующего суммарную интенсивность ВП — стационарную поляризуемость. В наших предшествующих работах [Гурин и

др., 2013, 2014; Gurin et al., 2013, 2015] показано хорошее соответствие между экспериментальной и теоретической зависимостью  $M$  от  $\xi$ , которая выражается

$$M = 0.055 \cdot \xi. \quad (12)$$

В отличие от стационарной поляризуемости основные полевые параметры метода ВП — заряжаемость или поляризуемость — зависят не только от  $\xi$ , но и от  $r$ ,  $\sigma_b$ , минерального состава, а также от режима измерений. В частности, для нормированной переходной характеристики ВП (без учета влияния токового режима) показано [Гурин и др., 2014], что заряжаемость зависит от стационарной поляризуемости, времени релаксации и интервала времени измерения кривой спада поляризуемости (при условии  $t_1 = 0$ ;  $t_2 \gg \tau$ ):

$$m = t_2 \cdot M / \tau, \quad (13)$$

где  $t_2$  — наибольшее время измерения кривой спада поляризуемости.

Анализ экспериментальных данных авторов и других исследователей позволил предложить простое эмпирическое уравнение, описывающее взаимосвязь времени релаксации с основными параметрами пород, содержащих электропроводящие минералы [Gurin et al., 2015]:

$$\tau = a \cdot r^2 / \sigma_b, \quad (14)$$

где  $a$  — коэффициент, учитывающий влияние минерального состава (для сульфидов  $a = 10^3$ — $10^4$  Ф/м<sup>3</sup>).

Согласно уравнению (14), зависимость времени релаксации от размера вкрапленников неоднозначна. Однако с практической точки зрения  $\sigma_b$  и  $a$  в пределах участка работ можно считать неизменными (при условии постоянного минерального состава включений), поэтому основное влияние на временные характеристики ВП оказывает форма и размеры электропроводящих минералов ( $r$ ). В этих условиях связь времени релаксации с радиусом зерен становится однозначной и ее можно использовать на практике.

Таким образом, применительно к случаю полевых работ основными петрофизическими параметрами, значительно влияющими на интенсивность и скорость релаксации вторичного электрического поля ВП, являются  $r$  и  $\xi$ .

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ ПОЛЕВЫХ РАБОТ

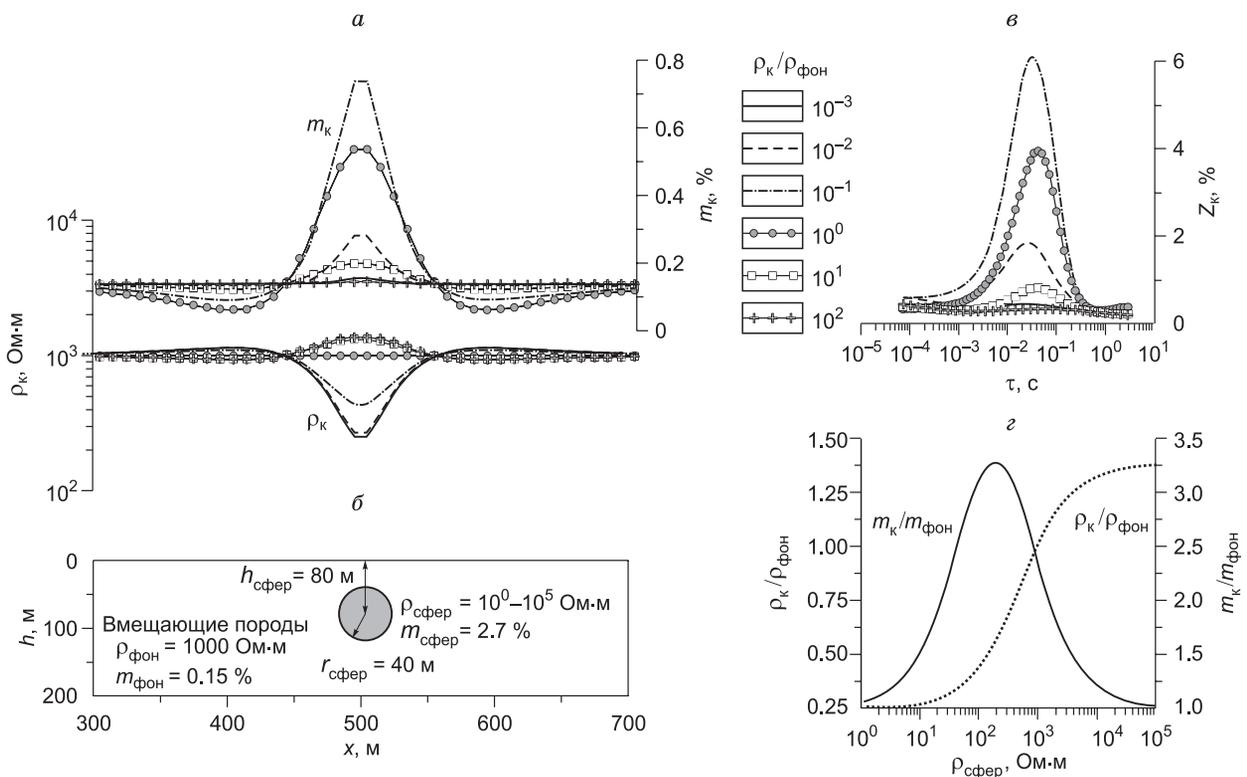
Для надежной оценки петрофизических свойств пород, слагающих геологический разрез (отдельные тела, слои и др.), необходимо перейти от кажущихся параметров ( $\eta_k(t)$ ,  $\rho_k$ ) к их истинным значениям ( $\eta(t)$ ,  $\rho$ ). Это обусловлено тем, что форма кривых спада поляризуемости ( $\eta(t)$ ) в общем случае зависит не только от петрофизических свойств пород, но и от взаимного расположения тел, их объема, контраста пород по значениям УЭС и поляризуемости, а также от используемой электроразведочной установки и т. д. Для перехода от кажущихся параметров к их истинным значениям необходимо решить обратную задачу метода ВП. Очевидно, что одним из основных параметров, влияющих на достоверность решения обратной задачи, является количество точек измерений и точек, в которых располагаются источники электрического поля на профиле (2D) или площади работ (3D). На этом подходе основана методика электротомографии (ЭТ), используемая для решения широкого круга геологических задач.

Применительно к случаю поисковых работ на твердые полезные ископаемые, по мнению авторов, анализ временных характеристик ВП целесообразно проводить лишь на опорных интерпретационных профилях или перспективных участках, в пределах которых ведутся детализационные работы. Кроме того, проведение работ по методике ЭТ с измерением кривых  $\eta(t)$  в широком временном диапазоне непроизводительно. Поэтому оптимальным является проведение ЭТ по стандартной методике (вычисляя  $m$  или  $\eta$ ) для определения пространственного положения поляризующихся объектов и их геометрических параметров. Затем целесообразно проводить изучение временных характеристик ВП на наиболее перспективных участках, используя менее трудоемкие методики работ профилирования или вертикальных электрических зондирований. Это позволит проводить качественные измерения кривых  $\eta(t)$  в широком временном диапазоне и дать более детальную петрофизическую характеристику пород, слагающих аномалеобразующие тела.

По этой причине основной объем математического моделирования был проведен для электроразведочных установок профилирования как наиболее простых и производительных.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для моделирования данных профилирования методом ВП использовалась программа IPolygon-2.5D (ООО НПК «Элгео»), позволяющая решать прямую задачу электроразведки методом граничных



**Рис. 1.** Результаты моделирования данных профилирования методом ВП ( $AB = 1000$  м,  $MN = 10$  м,  $\Delta_{MN} = 20$  м) вдоль профиля, пересекающего изометричную область ИП, содержащую вкрапленность электропроводящих минералов.

а — графики  $m_k$  и  $\rho_k$ ; б — геоэлектрическая модель; в — кажущиеся РВП, восстановленные по кривым  $\eta_k$  над центром сферы ( $x = 500$  м) при разных значениях отношения  $\rho_k/\rho_{\text{фон}}$ ; г — графики отношения  $m_k/m_{\text{фон}}$  и  $\rho_k/\rho_{\text{фон}}$  в центре аномалии ( $x = 500$  м) при разных значениях  $\rho_{\text{сфер}}$ .

элементов в 2.5-мерном пространстве [Тарасов, Каминский, 2008]. Алгоритм, по которому выполняются расчеты в IPolygon-2.5D детально описан в работах [Xu et al., 1998; Xu, 2001]. Вычисление кривых спада кажущейся поляризуемости проведены для режима РПИ-2 с длительностью импульса 1 с (для моделей 1, 2) и 32 с (для модели 3).

Учитывая то, что решение обратной задачи профилирования методом ВП в сложных кусочно-однородных средах характеризуется существенной эквивалентностью, для анализа временных характеристик ВП использованы кажущиеся кривые спада поляризуемости ( $\eta_k(t)$ ) и восстановленные по ним РВП, которые также являются «кажущимися» ( $Z_k(\tau)$ ).

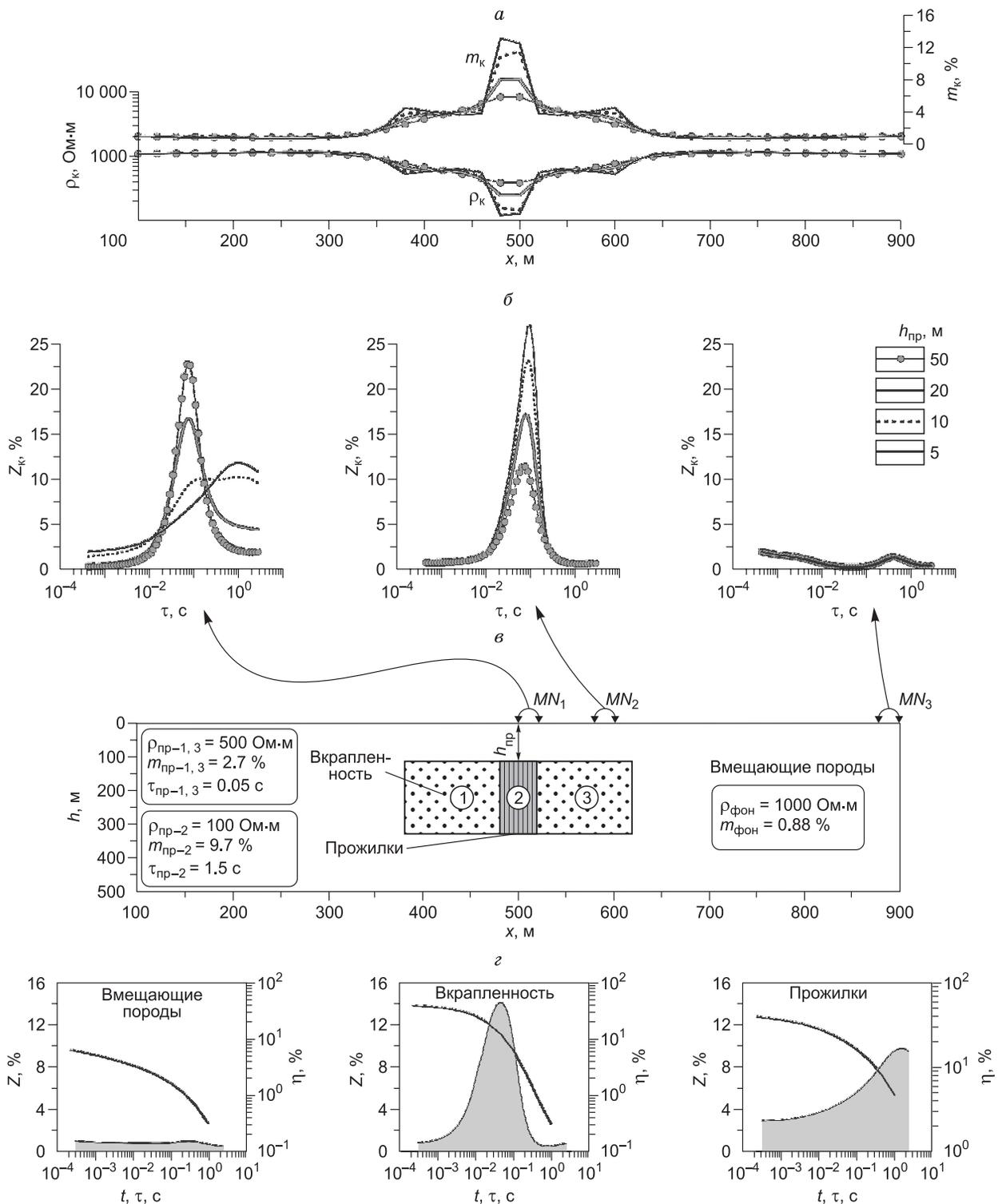
Математическое моделирование данных профилирования методом ВП с последующим анализом временных характеристик ВП проведено на трех моделях кусочно-однородных сред (рис. 1—4). Неоднородности в моделях 2, 3 представлены четырехугольными призмами, различающимися строением, размером, глубиной залегания и значениями  $m$ ,  $\rho$ ,  $\tau$ , а в модели 1 — сферой, имеющей разные значения УЭС ( $\rho_{\text{сфер}}$ ).

Применительно к рассматриваемому случаю геолого-разведочных работ неоднородности в разрезе (призмы и сфера) имитируют тела гидротермально измененных пород (ИП), содержащие электропроводящие минералы (обычно сульфиды) и невыходящие на поверхность, — типичный поисковый объект для месторождений различных полезных ископаемых.

В качестве истинных кривых спада поляризуемости  $\eta(t)$  призм, сферы и однородного полупространства использовались результаты параметрических измерений на образцах (см. рис. 2, 4)\*:

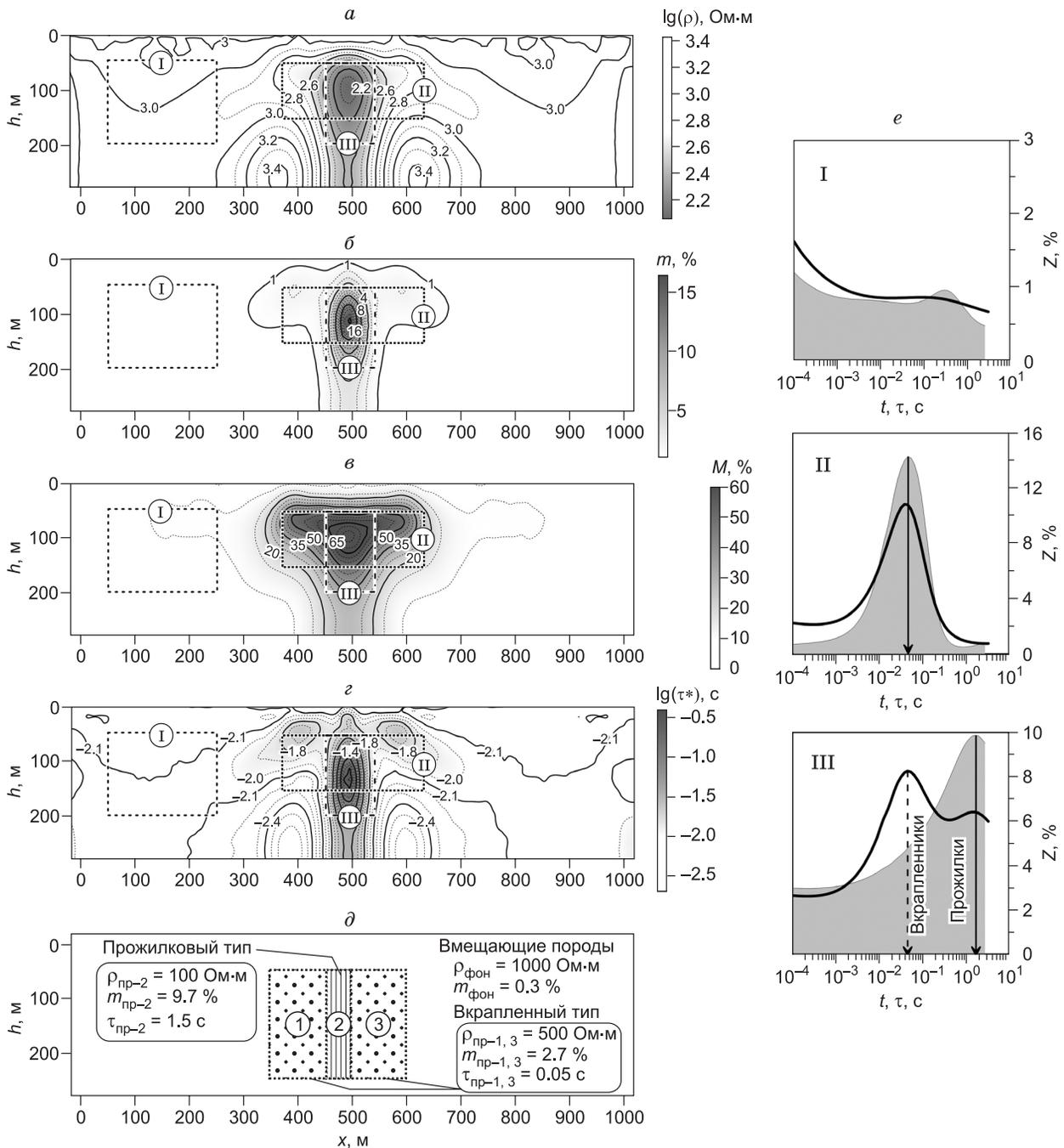
— слабоизмененный гидротермально-метасоматическими процессами андезит (вмещающие породы);

\* Интенсивность процессов поляризации эталонных кривых спада поляризуемости изменялась введением масштабных множителей (значения поляризуемости для всех временных задержек умножались на определенный коэффициент).



**Рис. 2.** Результаты моделирования данных профилирования методом ВП ( $AB = 2000$  м,  $MN = 40$  м,  $\Delta_{MN} = 20$  м) вдоль профиля, пересекающего тело ИП зонального строения, содержащее вкрапленность и прожилки электропроводящих минералов.

*а* — графики кажущейся зарядаемости и удельного электрического сопротивления; *б* — кажущиеся РВР; *в* — геоэлектрическая модель (здесь и далее: содержит тело, состоящее из трех соприкасающихся призм, моделирующих зоны ИП, цифры в кружках — номера призм); *з* — эталонные кривые спада поляризуемости и соответствующие им РВР.



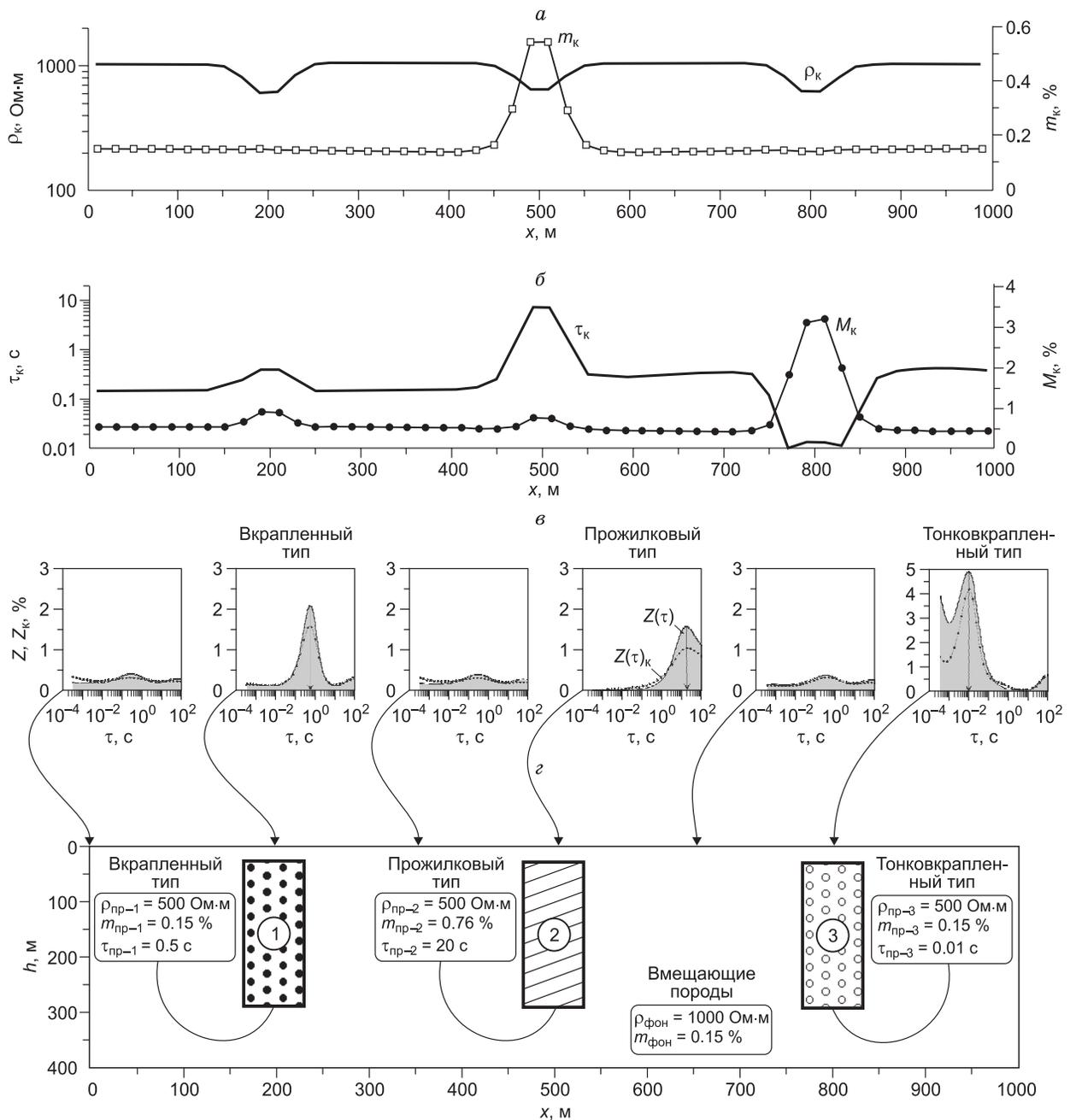
**Рис. 3. Результаты инверсии данных электротомографии методом ВП вдоль профиля, пересекающего область ИП зонального строения, содержащую вкрапленность и прожилки электропроводящих минералов.**

Разрез распределения: *a* — УЭС, *b* — заряжаемости, *c* — стационарной поляризуемости, *d* — средневзвешенного времени релаксации; *e* — геoeлектрическая модель; *e* — эталонные (закрашенные серым цветом) и осредненные (жирные черные линии) в пределах блоков РВР (блоки I, II и III показаны на разрезах *a*—*d* прямоугольниками).

– измененные гидротермально-метасоматическими процессами дациты, содержащие прожилки пирита (прожилковый тип);

– синтетические образцы вкрапленной руды (смесь песка с зернами электропроводящих минералов радиусом 0.550 мм (вкрапленный тип) и 0.045 мм (тонковкрапленный тип)).

**Первая модель** (см. рис. 1) отвечает изометричному телу ИП, аппроксимируемому сферой радиусом 40 м (центр которой залегает на глубине 80 м), расположенной в однородной среде ( $\rho_{\text{фон}} = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,



**Рис. 4.** Результаты моделирования данных профилирования методом ВП ( $AB = 3000 \text{ м}$ ,  $MN = 20 \text{ м}$ ,  $\Delta_{MN} = 20 \text{ м}$ ) вдоль профиля, пересекающего три зоны ИП, различающиеся типом распределения электропроводящих минералов.

*а* — графики «стандартных» параметров ВП: кажущейся заряжаемости и кажущегося удельного электрического сопротивления; *б* — графики спектральных параметров ВП: средневзвешенного времени релаксации и кажущейся стационарной поляризуемости; *в* — кажущиеся (линия с кружками) и эталонные РВР (закрашенные серым цветом); *г* — геоэлектрическая модель.

$m_{\text{сфер}} = 0.15 \%$ ). Тело ИП содержит вкрапленность электропроводящих минералов ( $m_{\text{сфер}} = 2.7 \%$ ,  $\tau_{\text{сфер}} = 50 \text{ мс}$ ). Моделирование проведено при разных значениях  $\rho_{\text{сфер}}$ , изменяющихся от 1 до  $10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Расчет значений  $\eta_k(x, t)$  и  $\rho_k(x)$  ( $x$  — расстояние вдоль профиля) проведен для установки градиента: длина питающей линии ( $AB$ ) — 1000 м, приемной линии ( $MN$ ) — 10 м; шаг между точками измерения ( $\Delta_{MN}$ ) — 20 м.

**Вторая модель** (см. рис. 2, 3) отвечает телу ИП зонального строения. Оно состоит из центральной зоны, в которой присутствуют прожилки электропроводящих минералов (зона прожилков), и двух

зон, расположенных по краям, содержащих вкрапленность электропроводящих минералов (ореол вкрапленности). Модель включает три неоднородности разного размера, характеризующиеся пониженными значениями УЭС относительно вмещающей их среды ( $\rho_{\text{фон}} = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $m_{\text{фон}} = 0.88 \%$ ).

Зоны с вкрапленным типом распределения электропроводящих минералов отличаются от зон с прожилковым типом значениями УЭС ( $\rho_{\text{пр-1}} = \rho_{\text{пр-3}} = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $\rho_{\text{пр-2}} = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ), заряжаемости ( $m_{\text{пр-1}} = m_{\text{пр-3}} = 2.7 \%$ ,  $m_{\text{пр-2}} = 9.7 \%$ ) и времени релаксации ВП ( $\tau_{\text{пр-1}} = \tau_{\text{пр-3}} = 50 \text{ мс}$ ,  $\tau_{\text{пр-2}} = 1 \text{ с}$ ).

Значения  $\eta_k(x, t)$  и  $\rho_k(x)$  вычислены для установки градиента:  $AB = 2000 \text{ м}$ ,  $MN = 40 \text{ м}$ ,  $\Delta_{MN} = 20 \text{ м}$ . При расчетах размеры всех призм и их петрофизические свойства ( $\eta(t)$ ,  $m_{\text{пр-1}} = m_{\text{пр-3}}$ ,  $\rho_{\text{пр-1}} = \rho_{\text{пр-3}}$ ,  $\tau_{\text{пр-1}} = \tau_{\text{пр-3}}$ ) были приняты неизменными. При этом объем зон, содержащих вкрапленность электропроводящих минералов, в 5 раз превышал объем зоны прожилков. В качестве переменной величины выступала глубина залегания верхней кромки тела ИП ( $h_{\text{пр}} = 5, 10, 20, 50 \text{ м}$  (см. рис. 2, а, в)).

Кроме того, был проведен расчет данных электротомографии (для случая  $h_{\text{пр}} = 50 \text{ м}$ ) по методике точечных зондирований с трехэлектродной установкой:  $MN = 20 \text{ м}$ ; максимальное удаление  $MN$  от ближайшего токового электрода  $1010 \text{ м}$ ; шаг передвижения токового электрода  $100 \text{ м}$ . На основе модельных данных восстановлены разрезы распределения УЭС и поляризуемости для каждой временной задержки в программе ZondRes2.5D (относительная погрешность расхождения между модельными и подобранными кривыми  $\eta_k(x)$  и  $\rho_k(x)$  не превышала  $1 \%$ ). Таким образом, для каждой ячейки, на которые было разбито нижнее полупространство, получена кривая спада поляризуемости.

**Третья модель** (см. рис. 4) имитирует зоны ИП (минерализованные зоны дробления), различающиеся типом распределения электропроводящих минералов. Модель включает три неоднородности одинакового размера, расположенные на расстоянии  $250 \text{ м}$  друг от друга. Глубина залегания верхних кромок для всех тел равна  $20 \text{ м}$ . Первое тело содержит вкрапленность ( $\xi_{\text{пр-1}} \approx 1 \%$ ,  $m_{\text{пр-1}} = 0.15 \%$ ,  $\tau_{\text{пр-1}} = 0.5 \text{ с}$ ), второе — прожилки ( $\xi_{\text{пр-2}} \approx 1 \%$ ,  $m_{\text{пр-2}} = 0.76 \%$ ,  $\tau_{\text{пр-2}} = 20 \text{ с}$ ), а третье — тонкую вкрапленность электропроводящих минералов с самым большим  $\xi$  ( $\xi_{\text{пр-3}} \approx 5 \%$ ,  $m_{\text{пр-3}} = 0.15 \%$ ,  $\tau_{\text{пр-3}} = 10 \text{ мс}$ ). Оценка  $\xi$  была проведена по формуле (12).

Зоны ИП характеризуются пониженными значениями УЭС относительно вмещающей среды ( $\rho_{\text{пр-1}} = \rho_{\text{пр-2}} = \rho_{\text{пр-3}} = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $\rho_{\text{фон}} = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ), различными значениями заряжаемости ( $m_{\text{пр-1}} = m_{\text{пр-3}} = m_{\text{фон}} = 0.15 \%$ ;  $m_{\text{пр-2}} = 0.76 \%$ ) и времени релаксации ( $\tau_{\text{пр-1}} = 0.5 \text{ с}$ ,  $\tau_{\text{пр-2}} = 20 \text{ с}$ ,  $\tau_{\text{пр-3}} = 10 \text{ мс}$ ). Расчет  $\eta_k(x, t)$  и  $\rho_k(x)$  проведен для установки градиента:  $AB = 3000 \text{ м}$ ,  $MN = 20 \text{ м}$ ,  $\Delta_{MN} = 20 \text{ м}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам математического моделирования данных профилирования методом ВП установлено, что интенсивность РВР, восстановленных по кривым спада кажущейся поляризуемости ( $Z_k(\tau)$ ), зависит от глубины залегания поляризующегося тела (отношение  $Z(\tau)/Z_k(\tau) \rightarrow 1$  при  $h_{\text{пр}} \rightarrow 0$  и мощности тела ( $H \geq MN$ ), его размера и отношения  $\rho_{\text{тел}}/\rho_{\text{фон}}$  (контраста по УЭС). При этом для простых моделей 1 и 3 над аномалеобразующими телами установлено хорошее воспроизведение формы РВР ( $Z_k(\tau) \sim Z(\tau)$ , близкие значения преобладающих времен релаксации). Однако следует отметить, что сильные искажения временных характеристик ВП наблюдаются на краях аномальных зон. Последнее при анализе кажущихся кривых спада поляризуемости может приводить к ошибкам.

**Модель 1.** Данные моделирования подтверждают широко известный факт существенного влияния УЭС аномалеобразующего тела на интенсивность аномалий кажущейся поляризуемости или заряжаемости (см. рис. 1, в). Вычисления показывают, что интенсивность аномалий максимальна при небольшом контрасте по УЭС между вмещающей средой и сферой. Наибольший аномальный эффект достигается при отношении  $\rho_{\text{сфер}}/\rho_{\text{фон}} \approx 0.1$  (в общем случае его значение зависит еще и от геометрических параметров модели:  $r_{\text{сфер}}, h_{\text{сфер}}$ ). Это наблюдение близко к выводам В.А. Комарова и Б.Г. Геннадина, согласно которым наиболее интенсивные аномалии  $\eta_k$  наблюдаются над аномалеобразующими телами, электропроводность последних та же, что у вмещающей среды. Проведенный расчет показывает, что по мере роста контраста по УЭС между сферой и вмещающей средой ( $\rho_{\text{сфер}}/\rho_{\text{фон}}$ ) интенсивность аномалии существенно изменяется. Аналогичным образом ведут себя распределения  $Z_k(\tau)$ , восстановленные по кривым спада кажущейся поляризуемости, рассчитанным над центром сферы. Хорошо видно, что преобладающие времена релаксации и форма  $Z_k(\tau)$  колеблются несущественно, в отличие от интенсивности распределения, которая изменяется в несколько раз и сильно зависит от отношения  $\rho_{\text{сфер}}/\rho_{\text{фон}}$  [Liu, Vozoff, 1985].

Таким образом, высококонтрастные геоэлектрические разрезы являются неблагоприятными для проведения анализа временных характеристик ВП.

**Модель 2.** Согласно результатам математического моделирования для тела ИП зонального строения (аналог модели 2), выполненного Б.Г. Геннадина, показано, что для случая, когда мощность зоны с прожилковым типом распределения электропроводящих минералов меньше мощности зоны с

вкрапленным типом, интенсивность аномалий  $\rho_k$  и  $\eta_k$  почти полностью определяются вкрапленниками. В этом случае анализ временных характеристик не позволяет разделить зоны с вкрапленным и прожилковым типом распределения электропроводящих минералов.

Результаты моделирования показывают, что в случае, если тело ИП зонального строения выходит на поверхность, форма  $Z(\tau)$  и  $Z_k(\tau)$  совпадает ( $Z(\tau)/Z_k(\tau) \rightarrow 1$  (см. рис. 2, б, в)). При этом анализ временных характеристик ВП позволяет уверенно разделять зоны с вкрапленным и прожилковым типом распределения электропроводящих минералов. По мере увеличения  $h_{пр}$  форма  $Z_k(\tau)$  над зоной прожилковой минерализации существенно изменяется. Погружение тела на глубину 20 м приводит к тому, что вклад прожилковой минерализации в процесс релаксации вторичного электрического поля ВП становится практически незаметен (см. рис. 2, б, в). Последнее подтверждает данные моделирования Б.Г. Геннадина и В.А. Комарова [Геннадина и др., 1971; Комаров, 1980].

Таким образом, анализ временных характеристик ВП наиболее эффективен в том случае, если глубина залегания аномалеобразующих тел минимальна. При этом для простых геоэлектрических моделей (содержащих одно или несколько тел, располагающихся на расстоянии, когда их взаимным влиянием можно пренебречь) погружение аномалеобразующих тел приводит к уменьшению интенсивности пиков РВР (форма и время релаксации остаются неизменными (см. рис. 2, б)).

По результатам анализа кривых спада поляризуемости на основе ДД для каждой ячейки, на которые было разбито нижнее полупространство (в программе ZondRes2.5D), построены разрезы распределения: УЭС, заряжаемости, стационарной поляризуемости и средневзвешенного времени релаксации (см. рис. 3).

На приведенных разрезах зона с прожилковым типом распределения электропроводящих минералов выделяется субвертикальной аномалией пониженных значений УЭС, повышенных значений заряжаемости и средневзвешенного времени релаксации. Сопоставление разрезов распределения заряжаемости и стационарной поляризуемости показывает, что аномальная зона повышенных значений  $M$  больше, чем для  $m$ . В ее контур попадают зоны с вкрапленным типом распределения электропроводящих минералов. При этом тела, содержащие вкрапленность электропроводящих минералов на разрезах распределения параметров ВП, выделяются плохо. Очевидно, что без визуального анализа РВР проводить интерпретацию и делать геологически значимые выводы в данном случае сложно.

Поэтому были восстановлены РВР по осредненным кривым спада поляризуемости в пределах аномальных областей (см. рис. 3; блок I – вмещающие породы; блок II – область, характеризующаяся аномально высокими значениями стационарной поляризуемости; блок III – область с повышенными значениями средневзвешенного времени релаксации). Сопоставление восстановленных РВР с эталонными показало, что для блока I (вмещающие породы)  $Z_k(\tau)$  и  $Z(\tau)$  близки.

Распределение времен релаксации в пределах всего тела ИП (блок II) соответствует эталонному РВР, отвечающему зонам с вкрапленным типом распределения электропроводящих минералов (форма и интенсивность близки). Влияние зоны прожилков практически не отмечается.

Распределение времен релаксации в пределах блока III имеет бимодальный вид. Первая мода отвечает вкрапленности ( $\tau = 40$  мс), а вторая — прожилкам электропроводящих минералов ( $\tau = 1.5$  с). При этом интенсивность пика, отвечающего вкрапленникам, больше, чем пика, отвечающего прожилкам.

В общем РВР, восстановленные по данным ЭТ, ближе к эталонным, чем кажущиеся РВР, восстановленные по данным профилирования. Однако они также не позволяют отделить зоны с вкрапленным и прожилковым типом распределения электропроводящих минералов.

**Модель 3.** В ней для двух тел ИП (первого и третьего) были выбраны кривые спада поляризуемости с существенно различными преобладающими временами релаксации ( $\tau_{пр-1} = 0.5$  с,  $\tau_{пр-3} = 10$  мс), но одинаковой заряжаемостью, значения которой совпадали с фоновыми ( $m_{пр-1} = m_{пр-3} = m_{фон} = 0.15\%$ ). Поэтому на графике  $m_k$  (см. рис. 4, а) повышенными значениями выделяется только тело с прожилковым типом распределения электропроводящих минералов, а тела с вкрапленным типом, с существенно большим  $\xi$ , пропущены (см. рис. 4). Последнее обусловлено слабой чувствительностью заряжаемости к зернам малого размера (см. формулу (13)). Кроме того, полученные данные указывают на то, что интенсивность аномалий  $\eta_k$  или  $m_k$  не всегда является основой для выделения перспективных участков или минерализованных зон при проведении геологической интерпретации полевых данных.

В отличие от  $\eta_k$  или  $m_k$ , анализ данных ВП на основе ДД (спектральный подход) позволяет дать удовлетворительную оценку значений стационарной поляризуемости, времени релаксации, а также формы РВР (см. рис. 4, б, в). Следует отметить, что моделирование проведено в благоприятных геоэлектрических условиях ( $\rho_{пр}/\rho_{фон} = 0.5$ ).

На основе полученных данных показано, что анализ временных характеристик ВП на основе ДД с учетом экспериментально установленных связей спектральных параметров ВП с петрофизическими свойствами пород, содержащих электропроводящие минералы (выражения (12), (14)), в благоприят-

ных случаях позволяет уверенно разделить аномальные зоны по типу распределения электропроводящих минералов (см. рис. 4).

## ВЫВОДЫ

Результаты математического моделирования позволяют сделать следующие выводы:

– анализ временных характеристик ВП наиболее эффективен в том случае, когда аномалеобразующие тела выходят на поверхность или имеют приповерхностное положение в разрезе;

– высококонтрастные геоэлектрические разрезы ( $10^{-2} > \rho_{\text{тел}}/\rho_{\text{фон}} > 10^2$ ) являются неблагоприятными для проведения анализа временных характеристик ВП;

– анализ РВР, восстановленных по кривым спада кажущейся поляризуемости над аномалеобразующими телами, для простых геоэлектрических разрезов позволяет оценить петрофизические свойства слагающих их пород;

– кажущиеся РВР зависят от глубины залегания тел (отношение  $Z(s)/Z_k(s) \rightarrow 1$  при  $h_{\text{пр}} \rightarrow 0$  и  $H \geq MN$ ), их размеров, петрофизических свойств слагающих их пород и типа электроразведочной установки (в целом отношение  $Z(s)/Z_k(s)$  ведет себя аналогично  $\eta/\eta_k$ );

– геологические тела, сложенные породами с существенно различными петрофизическими параметрами, могут создавать аномалии с близкими значениями заряжаемости (в благоприятных случаях анализ временных характеристик ВП позволяет их различать).

Работа выполнена при поддержке гранта Санкт-Петербургского государственного университета 3.37.134.2014.

## ЛИТЕРАТУРА

**Булашевич Ю.П.** Расчет поля вызванных потенциалов для рудных тел сферической формы // Изв. АН СССР, Сер. геофизика, 1956, № 5, с. 504—512.

**Геннадиник Б.И., Лемец В.И., Набоко Ю.С.** Теоретические оценки влияния различных факторов на поляризуемость сред, содержащих рассеянные электропроводящие включения. Алма-Ата, КазВИРГ, 1971, 99 с.

**Гурин Г.В., Тарасов А.В., Ильин Ю.Т., Титов К.В.** Спектральная характеристика вызванной поляризации вкрапленных руд // Вестн. СПб. ун-та. Сер. 7. 2013, вып. 1, с. 14—30.

**Гурин Г.В., Тарасов А.В., Ильин Ю.Т., Титов К.В.** Оценка объемного содержания электропроводящих минералов по данным метода вызванной поляризации // Вестн. СПб. ун-та, Сер. 7, 2014, вып. 3, с. 4—19.

**Карасев А.П., Сейфулин Р.С., Бумагин А.В., Красников В.И.** Применение характеристик ранней стадии вызванной поляризации при поисках сульфидных месторождений. М., Недра, 1973, 128 с.

**Комаров В.А.** Временные характеристики вызванной поляризации // Методика и техника разведки, 1965, № 49, с. 29—61.

**Комаров В.А.** Временные и частотные параметры вызванной поляризации // Методика и техника разведки, 1972, № 81, с. 4—14.

**Комаров В.А.** Электроразведка методом вызванной поляризации. Л., Недра, 1980, 391 с.

**Кормильцев В.В.** Вызванная поляризация модели обломочной породы со сферическими вкраплениями // Сб. науч. трудов. Свердловск, УФ АН СССР, 1978, с. 14—29.

**Кормильцев В.В.** Переходные процессы при вызванной поляризации. М., Наука, 1980, 112 с.

**Кормильцев В.В., Мезенцев А.Н.** Электроразведка в поляризующихся средах. Свердловск, 1989, 125 с.

**Постельников А.Ф.** О природе и механизме образования вызванной поляризации на образцах электропроводящих горных пород // Тр. ЦНИГРИ, 1964, вып. 59, с. 153—154.

**Тарасов А.В., Каминский А.Е.** Программа IPOLYGON для 2D моделирования данных ВП методом граничных элементов // III Международная научно-практическая конференция и выставка «Санкт-Петербург-2008. Науки о Земле: от новых идей к новым открытиям». СПб., 2008.

**Шаповалов О.М.** Экспериментальное изучение переходных характеристик вызванной поляризации // Методика и техника разведки, 1972, № 1, с. 15—21.

**Шаповалов О.М., Черныш Ю.В., Кузьмичев В.В.** Метод производной вызванной поляризации и его практическое применение // Методы разведочной геофизики. Л., НПО «Рудгеофизика», 1976, с. 86—95.

**Шерешевский С.Н., Литманович Я.Л.** Интерпретация результатов работ методом ВП с использованием спектрального разложения временных характеристик // Методы разведочной геофизики. Л., НПО «Рудгеофизика», 1983, с. 3—12.

- Шейнман С.М.** Современные физические основы теории электроразведки. Л., Недра, 1969, 222 с.
- Fiandaca G., Auken E., Gazoty A., Christiansen A.V.** Time-domain-induced polarization: Full-decay forward modeling and 1D laterally constrained inversion of Cole-Cole parameters // *Geophysics*, 2012, v. 77, p. E213—E225.
- Fiandaca G., Ramm J., Binley A., Gazoty A., Christiansen A.V., Auken E.** Resolving spectral information from time domain induced polarization data through 2-D inversion // *Geophys. J. Int.* 2013, v. 192, p. 631—646.
- Florsch N., Llubes M., Téreygeol F., Ghorbani A., Roblet P.** Quantification of slag heap volumes and masses through the use of induced polarization: application to the Castel–Minier site // *J. Archaeological Sci.* 2011, v. 38, p. 438—451.
- Florsch N., Camerlynck C., Revil A.** Direct estimation of the distribution of relaxation times from induced-polarization spectra using a Fourier transform analysis // *Near Surface Geophys.*, 2012, v. 10, p. 517—531.
- Gazoty A., Fiandaca G., Pedersen J., Auken E., Christiansen A.V.** Mapping of landfills using time-domain spectral induced polarization data: the Eskelund case study // *Near Surface Geophys.*, 2012, v. 10, p. 563—574.
- Ghorbani A., Camerlynck C., Florsch N., Cosenza P., Revil A.** Bayesian inference of the Cole-Cole parameters from time- and frequency-domain induced polarization // *Geophys. Prospect.*, 2007, v. 55, p. 589—605.
- Guptasarma D.** Computation of the time-domain response of a polarizable ground // *Geophysics*, 1982, v. 47, p. 1574—1576.
- Guptasarma D.** Effect of surface polarization on resistivity modeling // *Geophysics*, 1983, v. 48, p. 98—106.
- Gurin G., Tarasov A., Ilyin Yu., Titov K.** Time domain spectral induced polarization of disseminated electronic conductors: laboratory data analysis through the Debye decomposition approach // *J. Appl. Geophys.* 2013, v. 98, p. 44—53.
- Gurin G., Titov K., Ilyin Yu., Tarasov A.** Induced polarization of disseminated electronically conductive minerals: a semi-empirical model // *Geophys. J. Int.* 2015, v. 200, p. 1555—1565.
- Kemna A., Binley A., Cassiani G., Niederleithinger E., Revil A., Slater L., Williams K., Orozco A., Haegel F., Hördt A., Kruschwitz S., Leroux V., Titov K., Zimmermann E.** An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications // *Near Surface Geophys.*, 2012, v.10, p. 453—468.
- Kirsch R.** *Groundwater geophysics: A tool for hydrogeology.* Berlin, 2006, 493 p.
- Liu S., Vozoff K.** The complex resistivity spectra of models consisting of two polarizable media of different intrinsic properties // *Geophys. Prospect.*, 1985, v. 33, p. 1029—1062.
- Loke M.H., Chambers J.E., Ogilvy R.D.** Inversion of 2D spectral induced polarization imaging data // *Geophys. Prospect.*, 2006, v. 54, p. 287—301.
- Luo B.Y., Zhang G.** *Theory and application of spectral induced polarization.* Society of Exploration Geophysicists, 1998, 165 p.
- Mahan K.M., Redman J.D., Strangway D.W.** Complex resistivity of synthetic sulphide bearing rocks // *Geophys. Prospect.*, 1986, v. 34, p. 743—768.
- Marshall D.J., Madden Th.R.** Induced polarization, a study of its causes // *Geophysics*, 1959, v. 26, p. 790—816.
- Nordsiek S., Weller A.** A new approach to fitting induced-polarization spectra // *Geophysics*, 2008, v. 75, p. F235—F245.
- Oldenburg D.W., Yaoguo Li.** Inversion of induced polarization data // *Geophysics*, 1994, v. 59, p. 1327—1341.
- Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R., Nelson P.H.** Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // *Geophysics*, 1978, v. 43, p. 588—609.
- Revil A., Florsch N.** Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media // *Geophys. J. Int.* 2010, v. 181, p. 1480—1498.
- Routh P.S., Oldenburg D.W., Yaoguo Li.** Regularized inversion of spectral IP parameters from complex resistivity data // SEG annual meeting, 1998, 13—18 September, New Orleans, Louisiana, 1998, p. 4.
- Sigel H.O., Vanhalaz H., Sheard N.** Some case histories of source discrimination using time-domain spectral IP // *Geophysics*, 1997, v. 62, p. 1394—1408.
- Soininen H.** The behavior of the apparent resistivity phase spectrum in the case of a polarizable prism in an unpolarizable half-space // *Geophysics*, 1984, v. 49, p. 1534—1540.

- Soininen H.** The behavior of the apparent resistivity phase spectrum in the case of two polarizable media // Geophysics, 1985, v. 50, p. 810—819.
- Tarasov A., Titov K.** Relaxation time distribution from time domain induced polarization measurements // Geophys. J. Int. 2007, v. 170, p. 31—43.
- Vanhala H., Peltoniemi M.** Spectral IP studies of Finnish ore prospects // Geophysics, 1992, v. 57, p. 1545—1555.
- Wait J.R.** Relaxation phenomena and induced polarization // Geoexploration, 1984, v. 22, p. 107—127.
- Wong J.** An electrochemical model of the induced-polarization phenomenon in disseminated sulfide ores // Geophysics, 1979, v. 44, p. 1245—1265.
- Xu S.** The boundary element method in geophysics. Society of Exploration Geophysicists, 2001, 214 p.
- Xu S., Zhao S., Ni Y.** A boundary element method for 2-D dc resistivity modeling with a point current source // Geophysics, 1998, v. 63, p. 399—404.
- Zisser N., Kemna A., Nover G.** Relationship between low-frequency electrical properties and hydraulic permeability of low-permeability sandstones // Geophysics, 2010, v. 75, p. E131—E141.
- Zonge R.L., Wynn J.C.** Recent advances and applications in complex resistivity measurements // Geophysics, 1975, v. 40, p. 851—864.

*Рекомендована к печати 16 марта 2016 г.  
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию  
26 октября 2015 г.*