

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕБАЕВСКОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА  
ДАННЫХ ПРОФИЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ  
(золото-серебряное месторождение Джульетта, Магаданская обл.)**

**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», 197110, Санкт-Петербург, Петровская коса, 1, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7/9, Россия

Приведен пример использования временных характеристик вызванной поляризации (ВП) для решения поисковых задач на флангах золото-серебряного месторождения Джульетта. Анализ временных характеристик ВП проводился на основе декомпозиции Дебая, которая позволяет восстанавливать распределение времен релаксации. Приведены экспериментально установленные зависимости параметров ВП от основных петрофизических параметров вкрапленных руд, которые использовались для интерпретации полевых данных. Выделены зоны гидротермально-метасоматически измененных пород, содержащих мелкую вкрапленность сульфидных минералов, которые были пропущены при использовании стандартной методики анализа данных метода ВП. Выполнена оценка содержания сульфидных минералов в измененных породах, которая не противоречит геологическим данным.

*Вызванная поляризация, гидротермально измененные породы, распределение времен релаксации, стационарная поляризуемость.*

**APPLICATION OF THE DEBYE DECOMPOSITION APPROACH TO ANALYSIS  
OF INDUCED-POLARIZATION PROFILING DATA (Julietta gold-silver deposit, Magadan Region)**

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

Time-domain induced polarization (IP) data are used for approach to ore prospecting problems on the flanks of the Julietta gold-silver deposit. IP time-domain data are analyzed on the basis of the Debye decomposition, which allows reconstruction of the relaxation time distribution. Experimental dependences of the IP parameters on the main petrophysical properties of disseminated ores were used to interpret field data. The Debye decomposition helped to identify zones of hydrothermally and metasomatically altered rocks containing finely disseminated sulfide minerals, which were missed when using the standard procedure for the analysis of IP data. The estimated content of sulfide minerals in the altered rocks agrees with geological data.

*Induced polarization, hydrothermally altered rocks, relaxation time distribution, total chargeability*

**ВВЕДЕНИЕ**

В большинстве случаев ореолы гидротермально-метасоматически измененных пород (ИП) являются основными поисковыми признаками рудных тел золотых, золото-серебряных и других типов месторождений [Хомич и др., 1989; Нарсеев и др., 1989; Метасоматизм..., 1998; Омеляненко, 1978; и др.]. По этой причине поиски и картирование ИП, сопровождающих и/или вмещающих слепые и перекрытые рудные тела, являются актуальной практической задачей для Северо-Востока России [Сидоров и др., 2009].

На многих типах месторождений гидротермально-метасоматического генезиса околорудные изменения вмещающих пород, в частности, проявляются в увеличении концентрации включений электропроводящих и глинистых минералов. Наличие этих минералов приводит к возрастанию поляризуемости

ИП по сравнению с их неизменными аналогами, что позволяет использовать метод ВП для их картирования.

По этой причине на протяжении многих лет поиски вкрапленных руд<sup>1</sup> являются одной из основных задач метода ВП. Однако имеющиеся данные позволяют утверждать, что ВП вкрапленных руд зависит не только от объемного содержания вкрапленников ( $\xi$ ), но и от их размера, минерального состава и электропроводности поровой влаги ( $\sigma_v$ ) [Gurin et al., 2015; и др.]. Наличие связей параметров ВП с различными петрофизическими свойствами пород доказывает, что по данным метода ВП можно судить не только о наличии электропроводящих минералов в породе и их объемном содержании, но и о других параметрах [Pelton et al., 1978; и др.], например, оценивать тип распределения электропроводящих минералов в объеме пород (прожилковый, вкрапленный, прожилково-вкрапленный), что в ряде случаев может быть использовано в качестве дополнительного поискового критерия. Для месторождений гидротермально-метасоматического генезиса (урана, золота, серебра, полиметаллов и др.) по типу распределения сульфидов в благоприятных случаях можно решать разнообразные геологические задачи: оценивать интенсивности изменения исходной породы или рудоотложения; выделять минерализацию определенной стадии гидротермально-метасоматического процесса; проводить оценку уровня эрозионного среза (например, для штокверковых полиметаллических или медно-порфировых месторождений); судить о наличии структурных ловушек и рудных столбов и др.

Начиная с 1960-х годов для решения этих задач рекомендовалось проводить анализ временных характеристик ВП, в частности, для детализации площадных аномалий повышенных значений кажущейся поляризуемости. Такие работы проводились на месторождениях различных полезных ископаемых, хотя и в ограниченном объеме. В настоящее время при выполнении работ производственными организациями анализ временных характеристик ВП не проводится, а для интерпретации данных ВП используются только поляризуемость или заряжаемость, что в ряде случаев снижает информативность метода.

В настоящей работе мы использовали новый подход к анализу полевых данных метода ВП. В его основе лежит анализ восстановленных распределений времен релаксации (РВР) по кривым спада поляризуемости [Tong et al., 2006; Tarasov, Titov, 2007]. В зарубежной литературе этот подход был назван «дебаевской декомпозицией» (ДД) [Nordsiek, Weller, 2008]. На основе экспериментальных и полевых работ мы показали ряд преимуществ анализа временных характеристик ВП на основе ДД по сравнению со стандартными методиками анализа данных, в частности, при картировании ИП с низкими объемными содержаниями ( $\xi \approx 1\text{—}3\%$ ) мелкой вкрапленности электропроводящих минералов (с радиусом зерна ( $r$ ) от 0.01 до 0.5 мм).

Мы впервые демонстрируем применимость РВР и характеризующих его параметров для интерпретации данных профилирования методом ВП. Фактическим материалом послужили результаты полевых работ, проведенных ОАО «Карамкенская геолого-геофизическая экспедиция» в 2010—2011 гг. на флангах золото-серебряного месторождения Джульетта. Работы выполнялись с целью оценки возможности применения геофизических методов для поисков слепого оруденения, представленного жилами и зонами прожилкования, сопровождающегося ореолами ИП.

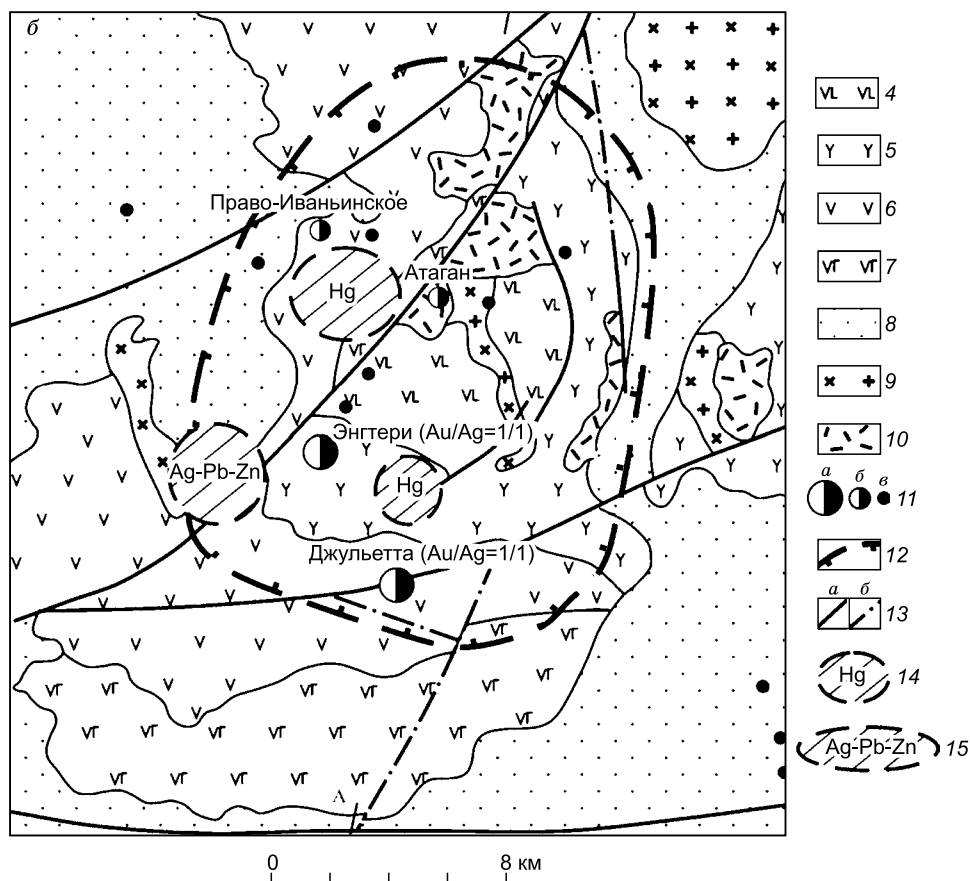
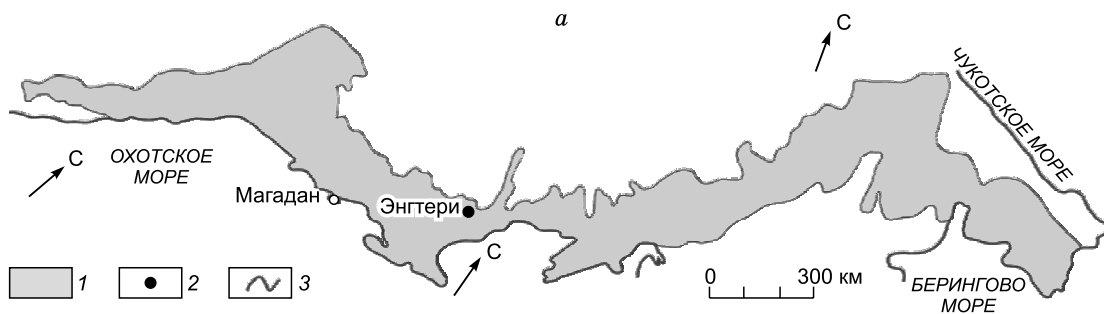
## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЖУЛЬЕТТА

Золото-серебряное месторождение Джульетта расположено во внешней зоне (Охотский сегмент) Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса, залегающего на терригенных отложениях Балагычанского краевого поднятия пологоскладчатых дислокаций [Константиновский, 2007]. В структурном плане оно расположено в южной части Иваньинской (Джугуджакской) вулканотектонической депрессии, приуроченной к узлу пересечения глубинного разлома северо-восточного простирания с системой региональных субширотных разломов (рис. 1).

Рудные тела на месторождении Джульетта вмещают ранне- и позднемиоценовые вулканогенно-осадочные отложения общей мощностью до 1000 м [Рыжов и др., 1995]. В пределах участка работ преимущественное распространение имеет существенно андезитовая иваньинская нижнемеловая толща (мощность 150—200 м) и перекрывающая ее энгеринская свита кислого—среднего состава (туфы дацитов, игнимбриты и туфогенно-осадочные породы, мощность 250—300 м). Вулканогенно-осадочные отложения прорваны многочисленными дайками, штоками и другими малыми интрузиями пестрого петрографического состава (от риолитов до андезитобазальтов).

Около половины площади месторождения перекрыто рыхлыми четвертичными отложениями мощностью от 2 до 60 м. В пределах участка работ задернованность составляет 95 %. Для проведения

<sup>1</sup> В теории метода ВП термин «вкрапленные руды» используется для пород, содержащих вкрапленность электропроводящих минералов и минералов-полупроводников. В данном случае количество полезных компонентов и экономическая целесообразность их извлечения не учитываются.



**Рис. 1. Региональное положение месторождения Дзультта (а) и Дзультетинский рудный узел (б) [Обушков и др., 2010].**

1 — контуры Охотско-Чукотской металлогенической провинции; 2 — месторождение Дзультта; 3 — береговая линия; 4–7 — нижнемеловые покровные вулканисты: 4 — андезиты и андезитобазальты (андезитобазальтовая формация), 5 — туфы дацитов (риодацитовая формация), 6 — андезиты и их туфы (андезитовая формация), 7 — андезитобазальты (андезитобазальтовая формация); 8 — юрские терригенно-морские отложения (алевритоаргиллитовая формация); 9 — меловые гранитоиды (лейкогранитная и гранодиорит-гранитная формации); 10 — меловые субвулканические дациты (риодацитовая формация); 11 — золото-серебряные месторождения (а), рудопроявления (б), точки минерализации (в); 12 — границы рудного узла; 13 — разломы: известные (а), предполагаемые (б); 14 — ореолы рассеянной ртутной минерализации; 15 — ореолы рассеянной серебро-полиметаллической минерализации.

геолого-разведочных работ в данных условиях требуются значительные объемы дорогостоящих горных работ и поискового бурения. Поэтому для локализации потенциально рудоносных структур и участков были проведены комплексные геофизические работы.

Рудные тела на месторождении Джульетта представлены малосульфидными карбонат-кварцевыми, сульфидно-карбонат-кварцевыми жилами, прожилковыми зонами и прожилками, сгруппированными на месторождении в девять жильных зон северо-западной и субширотной ориентировки. Они имеют протяженность от 200 до 1800 м и ширину в плане от первых метров до 50—100 м. Зоны прослежены на глубину до 350 м и более. Они представляют собой серии субпараллельных ветвящихся жил с многочисленными апофизами, сопровождающихся разноориентированными системами прожилков и ореолами низкотемпературной березитизации (аргиллитизации).

Формированию оруденения предшествовали интенсивные метасоматические изменения пород, выраженные в площадной пропилитизации. Пропилиты распространены по всей площади месторождения и образуют однородный фон метасоматически измененных пород.

Синрудные метасоматиты представлены зонами линейной березитизации и аргиллитизации околожильного пространства. Березиты образуют широкие зональные окolorудные ореолы мощностью от десятков до сотен метров [Рыжов и др., 1995], но наиболее интенсивным изменениям подвергаются околожильные зоны мощностью 1—3 м (внутренняя зона метасоматической колонки).

Наиболее распространенными рудными минералами являются пирит, сфалерит, галенит, халькопирит (магнетит и гематит, также присутствуют в рудах постоянно, но в незначительных количествах). Рудные минералы образуют рассеянную в объеме пород вкрапленность (размер зерен от 0.01 до 1—5 мм), прожилки, шлировые обособления, полосы в краевых частях жил и околожильном пространстве шириной от первых миллиметров до нескольких сантиметров.

В направлении от слабоизмененных пород к осевым зонам интенсивно измененных пород, в пределах которых располагаются рудные тела, можно выделить следующие особенности:

- увеличивается общее количество рудной минерализации с максимальным накоплением во внутренней зоне околожильных метасоматитов (березитов, аргиллитов);
- мелкозернистая вкрапленность сульфидов, развитая по основной массе пород, часто сменяется на мелкосреднезернистую или среднекрупнозернистую;
- часто наблюдается смена вкрапленного типа распределения рудных минералов на прожилково-вкрапленный;
- во внешних зонах ореола метасоматически измененных пород акцессорный магнетит замещается пиритом.

Таким образом, гидротермально-метасоматическая зональность окolorудного пространства сопровождается изменением типа распределения рудных минералов и их объемного содержания в породах. Это позволяет использовать параметры ВП для выявления данных особенностей.

## МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ, ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

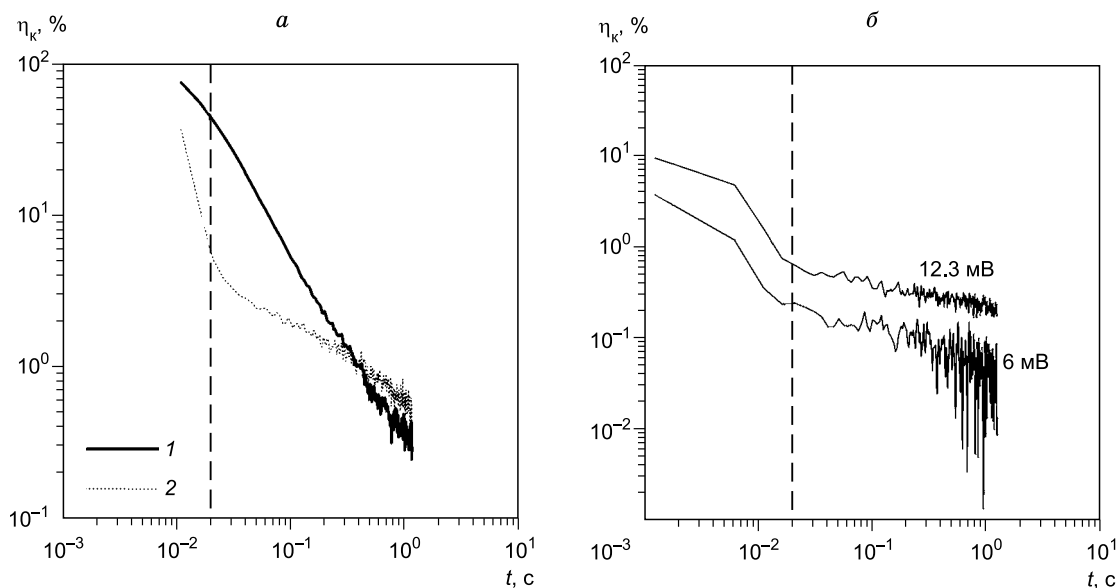
Электроразведочные работы методом ВП проведены с аппаратурой «Цикл-ВП-2» (ООО НТФ «ЭЛЬГА-ГЕО-2», Новосибирск, [www.tsiklgeo.ru](http://www.tsiklgeo.ru)) во временной области. Использовался режим разнополярных импульсов тока длительностью ( $T$ ) две секунды с паузами (длительности импульсов и пауз равна). В качестве приемных электродов использовались стандартные керамические медно-купоросные неполяризующиеся электроды.

Электропрофилирование методом ВП проводилось трехэлектродной установкой ( $AO = 120$  м,  $MN = 40$  м), которая обеспечивала глубину исследования до 50 м. Использование данной установки обусловлено тем, что участок работ разделен на две части действующей автодорогой, осложняющей раскладку питающей линии для более производительной установки срединного градиента, обладающей большей глубиной исследования.

Анализ измеренных кривых спада кажущейся поляризуемости ( $\eta_k(t)$ ) был проведен с использованием ДД. Это определяло повышенные требования к качеству измеренных кривых  $\eta_k(t)$ , так как восстанавливаемое РВР сильно зависит от их формы.

При проведении полевых работ наиболее значимые искажения кривых  $\eta_k(t)$  наблюдались при высоком переходном сопротивлении заземлений. Предварительная подготовка мест заземления приемных электродов позволила уменьшить его влияние (пролив раствором NaCl мест заземлений) и существенно снизить искажения кривых  $\eta_k(t)$  (рис. 2, а).

Опытно-методические работы 2010 г. показали, что проведение качественных измерений кривых  $\eta_k(t)$  с необходимой для анализа временных характеристик ВП точностью (в данных геоэлектрических условиях и для данной аппаратуры) при значениях напряжения в импульсе (напряжение пропускания  $U_{np}$ ), меньших 10 мВ, крайне сложно (см. рис. 2, б). Учитывая это, была выбрана оптимальная геофизи-



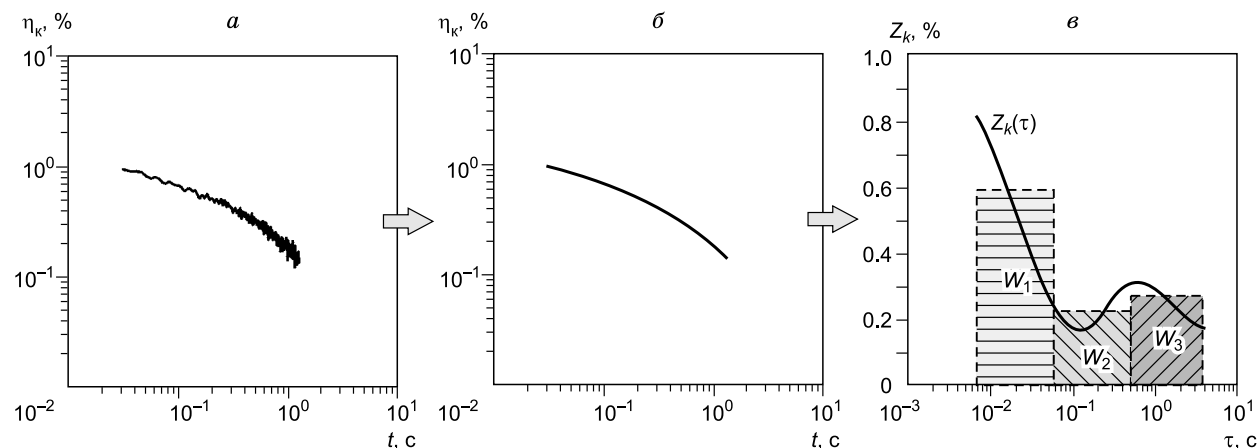
**Рис. 2. Условия измерений на участке работ.**

*а* — влияние условий заземления электродов приемной линии на форму кривых спада кажущейся поляризуемости; 1 — до пролива, 2 — после пролива; *б* — влияние величины измеряемого напряжения в импульсе (подписи у кривых отвечают значениям напряжения) на качество измерения кривых спада кажущейся поляризуемости.

ческая установка (при использовании маломощного генератора), обеспечившая необходимый уровень измеряемого напряжения  $U_{пр} \geq 40$  мВ (см. рис. 2, б). При этом на некоторых участках изучаемой площади близость жилого комплекса, линий электропередач и других коммуникаций рудника Джульетта привела к тому, что уровень промышленных помех не позволил получить неискаженные кривые  $\eta_k(t)$  (такие участки исключались).

По результатам тестовых измерений на активном сопротивлении установлено, что скорость выключения импульса тока генератором «Цикл-ВП-2» составила 10—20 мс. Данная особенность аппаратуры позволяет проводить измерения спада поляризуемости начиная лишь с 30 мс (см. рис. 2, штриховая линия), что вполне достаточно для проведения работ методом ВП по стандартным методикам [Инструкция..., 1980; Комаров, 1980], но приводит к снижению информативности данных ВП.

Обработка результатов измерений ВП проводилась с использованием пакета программ «PCYCLE», «IPANALYSIS» и «IPSPECTR» (ООО НПК «ЭЛГЕО», Санкт-Петербург, [www.elgeo.ru](http://www.elgeo.ru)) в следующем порядке. Первичная обработка измерений проводилась в программе «PCYCLE», которая позволяет вы-



**Рис. 3. Обработка полевых измерений.**

*а* — измеренная кривая спада кажущейся поляризуемости, *б* — сглаженная по времени кривая спада кажущейся поляризуемости, *в* — кажущееся распределение времен релаксации.

числять значения кажущейся поляризуемости и создавать единый файл данных для всего профиля (рис. 3, а). Далее полученные кривые спада  $\eta_k(t)$  сглаживались по времени в программе «IPANALYSIS» (см. рис. 3, б), а затем по ним восстанавливалось РВР в программе «IPSPECTR» (см. рис. 3, в).

Алгоритм восстановления РВР по кривым спада поляризуемости детально описан в работах А.В. Тарасова и К.В. Титова [Тарасов, Титов, 2006; Tarasov, Titov, 2007], поэтому ниже приводится лишь его основная идея.

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 можно записать в виде [Тарасов, Титов, 2006]:

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

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 (кроме омической составляющей).

Согласно введенным обозначениям, кривую спада поляризуемости можно представить следующим образом:

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

В качестве параметра, характеризующего скорость протекания процессов ВП, используется время релаксации ( $\tau$ ). С физико-химической точки зрения  $\tau$  отвечает времени, за которое большая часть избыточных зарядов (источников вторичных электрических полей ВП) нейтрализуется, а их общее распределение в объеме пород приближается к равновесному (соответствующему термодинамическому равновесию).

Таким образом, можно выделить два фундаментальных параметра ВП: 1) стационарную поляризуемость (характеризующую интенсивность процессов ВП) и 2) время релаксации (характеризующее скорость релаксации избыточных зарядов — источников вторичных электрических полей ВП).

В общем случае для аппроксимации наблюдаемых кривых спада поляризуемости использование переходной характеристики с одним преобладающим временем релаксации (описываемой моделью Коул-Коул, Вонга, Дебая и др.) оказывается недостаточно. Поэтому для количественного описания ВП необходимо анализировать динамику процесса релаксации вторичных электрических полей ВП — изучать РВР. Этот постулат лежит в основе всех релаксационных методов исследования вещества (диэлектрической спектроскопии, импедансных измерений в электрохимии, и др.), в том числе и метода математического анализа кривых спада поляризуемости — дебаевской декомпозиции, которая позволяет восстанавливать РВР.

Обычно для описания возникновения и релаксации вторичного электрического поля ВП в породах прибегают к понятию элементарных ячеек, под которыми понимается простейший элемент модели породы (зерно, погруженное в электролит; капилляр, заполненный поровой влагой, и т.д.), для которого известна функция, описывающая релаксацию зарядов  $F(t/\tau)$ . Далее, пользуясь законами смеси, породу представляют как среду, состоящую из элементарных ячеек, определенным образом распределенных в ее объеме.

В основе ДД лежит предположение о том, что релаксация избыточных зарядов в элементарной ячейке описывается экспоненциальной переходной характеристикой  $F(t, \tau)$ . В этом случае кривую спада поляризуемости для породы можно представить в виде суммы откликов от большого количества слагающих ее элементарных ячеек [Гурин и др., 2014]:

$$\eta(t) = \sum_{k=1}^N g(\tau_k) \cdot F(t, \tau_k) = \sum_{k=1}^N g(\tau_k) \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_k}\right), \quad (4)$$

где  $M = \sum_{k=1}^N g(\tau_k)$  — стационарная поляризуемость породы;  $F(t, \tau_k)$  и  $\tau_k$  — переходная характеристика ВП и время релаксации для  $k$ -й элементарной ячейки.

На основе данного подхода был разработан алгоритм, позволяющий оценить интенсивность элементарных поляризационных процессов  $g(\tau)$  по кривым  $\eta(t)$  для заданного набора времен релаксации.

Согласно введенным обозначениям, кривая спада поляризуемости после пропускания разнополярных импульсов тока (длительность импульса и паузы равна (РПИ-2)) может быть записана в виде [Тарасов, Титов, 2006; Tarasov, Titov, 2007]:

$$\eta(t) = \int_0^{\infty} g(\tau) \int_0^t I(t_0, T, NI) \cdot F(t - t_0, \tau) dt_0 d\tau = \int_0^{\infty} g(\tau) \cdot F^*(t, \tau, T, NI) d\tau, \quad (5)$$

где  $I(t_0, T, NI)$  — функция, описывающая зависимость тока от времени;  $F^*(t, \tau, T, NI)$  — свертка модельного спада, описывающая 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, целесообразно использовать логарифмический масштаб. Проводя замену переменных  $s = \ln(\tau)$  и  $p = \ln(t)$ , вводятся новые функции:

$$\int_0^{\infty} g(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} Z(s) ds = M, \quad (6)$$

$$\Phi(p, s, T, NI) = F^*(t, \tau, T, NI), \quad (7)$$

где  $g(\tau) = Z(s) / \tau$ .

С учетом введенных обозначений выражение (5) записывается в следующем виде:

$$\eta(p) = \int_{-\infty}^{\infty} Z(s) \cdot \Phi(p, s, T, NI) ds. \quad (8)$$

Функция  $\Phi(p, s, T, NI)$  известна, следовательно, выражение (8) является уравнением Фредгольма первого рода, которое может быть решено относительно распределения  $Z(s)$ .

В используемом авторами алгоритме ищется решение, отвечающее минимуму функционала обобщенной невязки методом регуляризации по Тихонову [Тарасов, Титов, 2006]:

$$\Psi_{\alpha}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} [\eta_{\text{изм}}(p) - \eta_{\text{мод}}(p)]^2 dp + \alpha \cdot \Omega(z), \quad (9)$$

$$\Omega(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ z^2 + \left( \frac{dz}{ds} \right)^2 \right] ds, \quad (10)$$

где  $\eta_{\text{изм}}(p)$  — измеренная кривая спада поляризуемости, определенная с некоторой погрешностью  $\varepsilon$ ;  $\eta_{\text{мод}}(p)$  — модельная кривая спада поляризуемости, отвечающая выбранной нормированной переходной характеристике;  $\alpha$  — параметр регуляризации;  $\Omega(z)$  — регуляризирующий функционал.

Согласно работе А.Н. Тихонова и В.Я. Арсенина [Тихонов, Арсенин, 1986], существует единственная функция  $Z_{\alpha}(s)$ , минимизирующая  $\Psi_{\alpha}(z)$  в том случае, если  $Z_{\alpha}(s)$  и  $Z_{\alpha}(s)/ds$  — непрерывно интегрируемые функции на промежутке  $(-\infty; \infty)$ . Переходная характеристика ВП, описываемая экспоненциальной функцией, удовлетворяет этим требованиям, следовательно, значения  $Z_{\alpha}(s)$  могут быть определены.

Минимизация функционала  $\Psi_{\alpha}(z)$  выполняется методом итераций с выбором оптимального параметра регуляризации ( $\alpha$ ) для каждой итерации. Для этого используется градиентный метод Гаусса—Ньютона. Процесс подбора параметров останавливается при достижении  $\Psi_{\alpha}(z)$  значения, меньшего заданной относительной погрешности  $\varepsilon$  или заданного количества итераций ( $N_{\text{итер}}$ ). При восстановлении РВР по кривым спада кажущейся поляризуемости использовались следующие значения этих параметров:  $\varepsilon = 3\%$ ,  $N_{\text{итер}} = 20$ . Следует отметить, что используемый алгоритм позволяет достигать заданной точности подбора достаточно быстро (обычно достаточно 4—6 итераций).

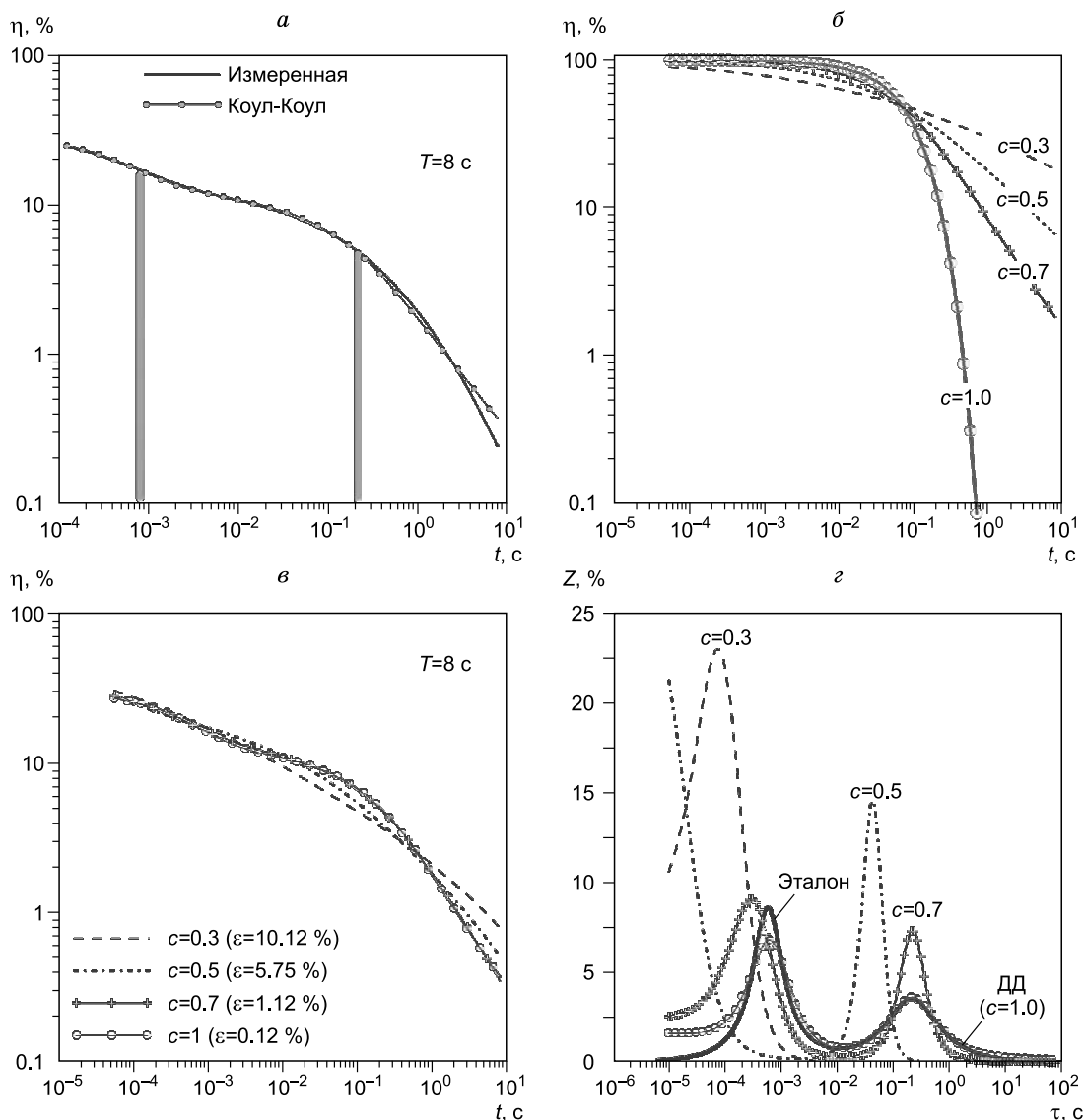
Однако в качестве переходной характеристики ВП, может быть использована не только экспоненциальная функция, отвечающая модели Дебая, но и любая другая функция (модель). Например, широко известная модель Коул-Коул (рис. 4, а), нормированная переходная характеристика которой во временной области может быть представлена следующим образом [Guptasarma, 1982]:

$$F(t, \tau) = M \left( \sum_{y=1}^{\infty} (-1)^y \frac{(t/\tau)^{yc}}{\Gamma(1+yc)} \right), \quad (11)$$

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

Возникает вопрос: какую функцию, описывающую нормированную переходную характеристику ВП лучше использовать? По нашему мнению, лучше использовать экспоненциальную функцию, отвечающую модели Дебая.

В качестве примера проведем восстановление РВР для кривой спада поляризуемости (см. рис. 4, а), измеренной на синтетической модели вкрапленной руды, содержащей 4% зерен криптомелана ( $r = 0.55$  мм) и 6% зерен галенита ( $r = 0.125$  мм). Для того чтобы получить истинное РВР (рассчитанное теоретически) аппроксимируем измеренную кривую спада поляризуемости моделью Коул-Коул ( $\eta_{\text{Коул}}(t)$ ). Отметим, что наблюдаемая кривая  $\eta(t)$  не может быть описана с удовлетворительной точностью моде-



**Рис. 4. Восстановление распределения времен релаксации по кривой спада поляризуемости при использовании нормированной переходной характеристики ВП различного вида (отвечающей модели Коул-Коул с показателями степени  $c = 1, 0.7, 0.5, 0.3$ ).**

а — кривая спада поляризуемости измеренная на синтетической модели вкрапленной руды, содержащей 4% зерен криптомелана ( $r = 0.55$  мм), 6% зерен галенита ( $r = 0.125$  мм) и аппроксимирующая ее кривая спада поляризуемости, отвечающая модели мульти-Коул-Коул ( $\eta_{\text{Коул}}(t)$ ) со следующими параметрами:  $M_1 = 17.6\%$ ,  $\tau_1 = 0.57$  мс,  $c_1 = 0.8$ ;  $M_2 = 11.4\%$ ,  $\tau_2 = 216$  мс,  $c_2 = 0.7$  ( $\varepsilon = 2.57\%$ ); б — использованные нормированные переходные характеристики ВП для восстановления РВР по кривой  $\eta_{\text{Коул}}(t)$ ; кривые спада поляризуемости (в) и отвечающие им РВР (г) полученные при восстановлении РВР по кривой  $\eta_{\text{Коул}}(t)$  при использовании нормированных переходных характеристик ВП, отвечающих модели Коул-Коул с зафиксированным показателем степени  $c = 1, 0.7, 0.5, 0.3$  (см. б).



лью Коул-Коул с одним временем релаксации. Это связано с тем, что суммарный релаксационный процесс ВП имеет два преобладающих  $\tau$ , отвечающих зернам разного размера. Поэтому для аппроксимации потребовалось использование двух моделей Коул-Коул (мульти-Коул-Коул) со следующими параметрами:  $M_1 = 17.6\%$ ,  $\tau_1 = 0.57$  мс,  $c_1 = 0.8$ ;  $M_2 = 11.4\%$ ,  $\tau_2 = 216$  мс,  $c_2 = 0.7$  (см. рис. 4, а). На основании этих данных было рассчитано РВР, которое использовалось в качестве эталона (см. рис. 4, з):

$$Z(s) = \sum_j \frac{M_j}{2\pi} \frac{\sin(\pi(1-c_j))}{\cos h(c_j \cdot (s - s_{0j})) - \cos(\pi(1-c_j))}, \quad (12)$$

где  $j = 1, 2$  — номер модели Коул-Коул;  $s_{0j} = \ln(\tau_{0j})$ ,  $\tau_{0j}$  — время релаксации, отвечающее модели Коул-Коул.

Далее, используя в качестве  $F(t, \tau)$  выражение (11), проводилось восстановление РВР по кривой  $\eta_{\text{Коул}}(t)$  при фиксированных значениях показателя степени  $c = 1, 0.7, 0.5, 0.3$ . Такой подход позволяет моделировать нормированные переходные характеристики ВП, существенно различающиеся скоростью спада  $F(t, \tau)$  (см. рис. 4, б).

По результатам расчетов показано, что восстановленные РВР по кривой  $\eta_{\text{Коул}}(t)$  при  $c = 0.5$  и  $0.3$  имеют один максимум вместо двух, время релаксации которого существенно отличается от эталонных (см. рис. 4, з). Кроме того, форма кривой спада поляризуемости описывается неудовлетворительно (см. рис. 4, в). Увеличение  $c$  до  $0.7$  приводит к тому, что в восстановленном РВР появляются два пика, время релаксации которых близко к эталонным значениям, при этом форма кривой  $\eta_{\text{Коул}}(t)$  описана удовлетворительно (см. рис. 4, в, з). Однако интенсивность пиков в восстановленном и эталонном РВР отличается примерно в два раза. Наконец, использование  $c = 1$  (ДД) позволило восстановить РВР и описать форму кривой  $\eta_{\text{Коул}}(t)$  с удовлетворительной точностью (см. рис. 4, з).

Таким образом, использование экспоненциальной нормированной переходной характеристики (ДД) гарантирует, что аппроксимируемая кривая спада поляризуемости во всех случаях будет описана с достаточно хорошей точностью, при этом восстановленное РВР будет близко к эталонному (при отсутствии значительных искажений исходных кривых  $\eta_k(t)$ ).

В качестве основных параметров, позволяющих количественно охарактеризовать РВР, используются стационарная поляризуемость ( $M$ ) и среднее взвешенное время релаксации ( $\tau^*$ ) [Nordsiek, Weller, 2008]:

$$\tau^* = \exp \left( \frac{\sum_k Z_k \cdot \ln(\tau_k)}{\sum_k Z_k} \right). \quad (13)$$

Оценка преобладающего времени релаксации с использованием  $\tau^*$  для РВР, содержащих один ярко выраженный пик, позволяет точно оценить значение  $\tau$ . В случае отсутствия пика или наличия двух и более пиков в РВР среднее взвешенное время релаксации может существенно отличаться от  $\tau$ . Таким образом, в общем случае  $\tau^*$  характеризует среднюю длительность процессов ВП.

Следует отметить, что при анализе кривых  $\eta_k(t)$  на основе ДД возникает проблема типизации РВР. Очевидно, что для петрофизической интерпретации РВР необходимо определять преобладающие времена релаксации, которых может быть более одного (например, в случае прожилково-вкрапленных руд), и интенсивность процессов ВП, отвечающих диапазону преобладающих времен релаксации. В подобных случаях стандартный подход к анализу РВР (на основе  $\tau^*$  и  $M$ ) малоэффективен, а качественная интерпретация возможна лишь при непосредственном визуальном анализе РВР на каждой точке измерений.

Для решения этой задачи мы предложили простую методику анализа РВР, суть которой заключается в разделении заданного диапазона времен релаксации на три временных окна, условно отражающих вклады ранней, средней и поздней стадий процессов ВП. Среднее значение функции  $Z(s)$  в трех временных окнах (ширина каждого окна выбиралась один раз и использовалась для анализа всех данных) вычислялось по следующей формуле:

$$W_{1,2,3} = \sum_{k=N_0^{1,2,3}}^{k=N_1^{1,2,3}} Z_k \cdot \ln(\tau_{k-1} / \tau_k), \quad (14)$$

где  $N_0^{1,2,3}$ ,  $N_1^{1,2,3}$  — число  $\tau_k$  и  $Z_k$ , попадающих в каждое временное окно  $[\tau_{N_0^{1,2,3}}, \tau_{N_1^{1,2,3}}]$ .

Стационарную поляризуемость с учетом выражения (14) можно представить в виде

$$M = W_1 + W_2 + W_3. \quad (15)$$

Кроме того, для анализа полевых данных ВП использовались классические параметры:

- кажущаяся заряжаемость

$$m_k = \frac{1}{U_{np} \cdot (t_1 - t_0)} \int_{t_0}^{t_1} U_{вп}(t) dt, \quad (16)$$

где  $U_{вп}(t)$  — напряжение, измеренное на отрезке  $[t_0, t_1]$  после выключения импульса тока;  $U_{np}$  — напряжение, измеренное в конце импульса тока;

- кажущееся удельное электрическое сопротивление

$$\rho_k = K \cdot \frac{U_{np}}{I}, \quad (17)$$

где  $K$  — геометрический коэффициент установки,  $I$  — сила тока в питающей линии.

### СВЯЗЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ВП С ПЕТРОФИЗИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ВКРАПЛЕННЫХ РУД

Для интерпретации полевых данных мы использовали ранее полученные зависимости параметров ВП от различных петрофизических параметров вкрапленных руд [Гурин и др., 2013; Gurin et al., 2013]. Ниже суммированы основные результаты этих экспериментов.

По экспериментальным данным установлено, что зависимости  $m$  от  $\xi$  описываются степенной функцией, показатель степени которой зависит от используемого токового режима, что отражается разным углом наклона  $m(\xi)$  (см. рис. 5, а) [Гурин и др., 2013; Gurin et al., 2013].

Подтверждена известная связь заряжаемости с радиусом электропроводящего зерна, выражающаяся в росте  $m$  с увеличением  $r$  [Кормильцев, 1980]. Кроме того, показано, что заряжаемость также зависит от минерального состава зерен электропроводящих минералов и электропроводности вмещающей их среды [Pelton et al., 1978; Комаров, 1980; Кормильцев, 1980; Mahan et al., 1986; Жандалинов, 2011; Гурин и др., 2014; Gurin et al., 2015].

В отличие от заряжаемости, стационарная поляризуемость не зависит от размера зерен электропроводящих минералов (см. рис. 5, з), токового режима измерений (см. рис. 5, а, в), минерального состава зерен, а также слабо зависит от электропроводности вмещающей среды. Установленная зависимость  $M(\xi)$  описывается степенной функцией, показатель степени которой близок к единице [Гурин и др., 2013; Gurin et al., 2015].

К недостаткам заряжаемости (или поляризуемости) также относится то, что ее значение для моделей, содержащих зерна электропроводящих минералов двух разных размеров, в большей степени определяется самым крупным размером зерен и слабо зависит от содержания мелких зерен ( $r < 0.1$  мм). Стационарная поляризуемость, в отличие от заряжаемости, сохраняет устойчивую связь с  $\xi$  вне зависимости от размера зерен [Гурин и др., 2013, 2014; Gurin et al., 2015].

По экспериментальным данным установлено, что увеличение объемного содержания зерен электропроводящих минералов сопровождается увеличением значений  $Z(\tau)$  в диапазоне преобладающих времен релаксации [Гурин и др., 2013]. Эту особенность можно использовать при качественном анализе РВР и их петрофизической интерпретации.

По результатам экспериментальных работ установлен рост времени релаксации ВП с увеличением размера зерен электропроводящих минералов (см. рис. 4, д, е). Установленная зависимость  $\tau(r)$  близка к квадратичной, что согласуется с ранее опубликованными экспериментальными данными [Pelton et al., 1978; Wong, 1979; Mahan et al., 1986; и др.].

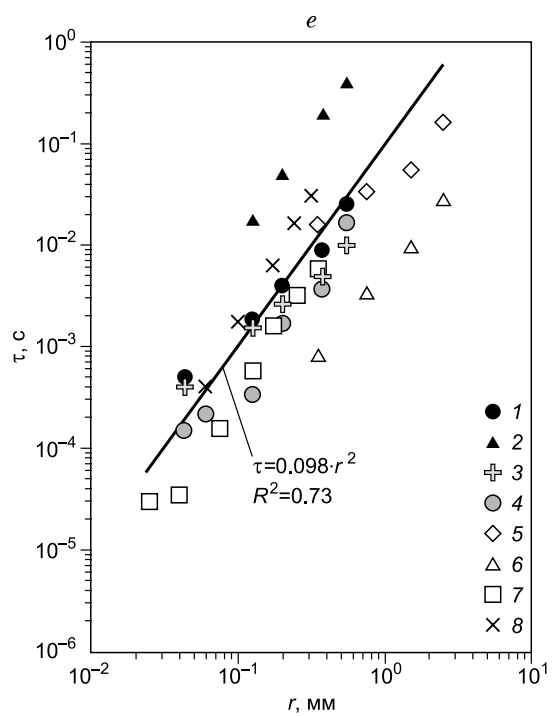
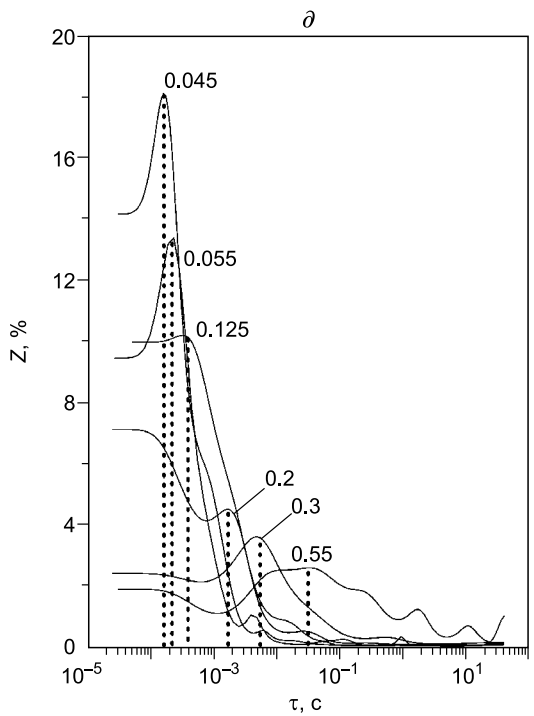
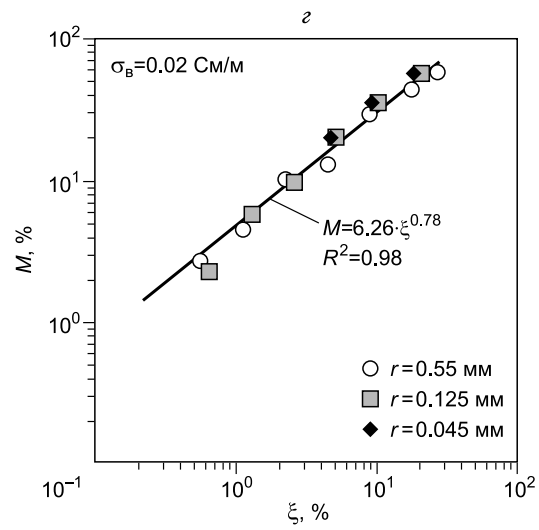
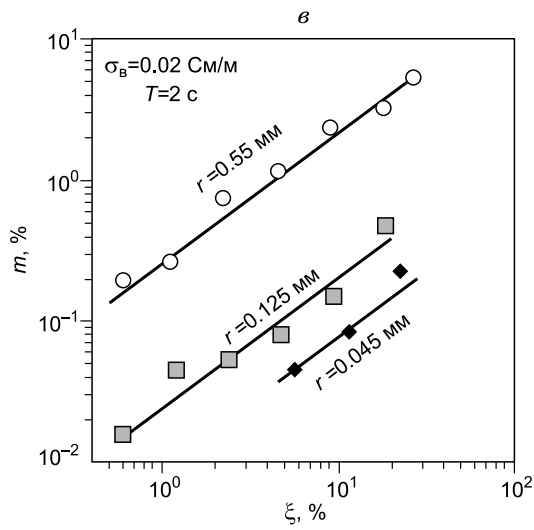
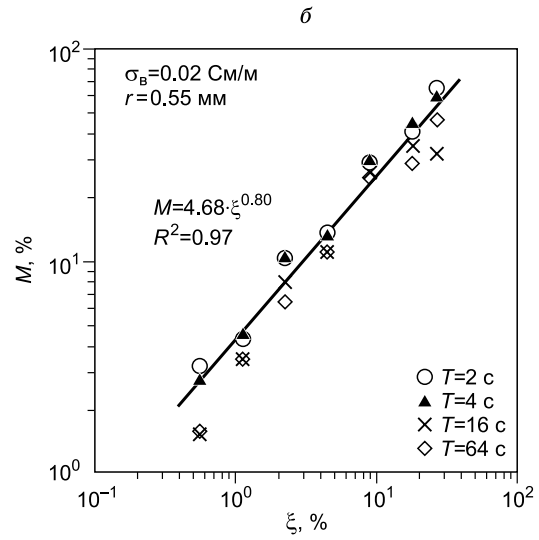
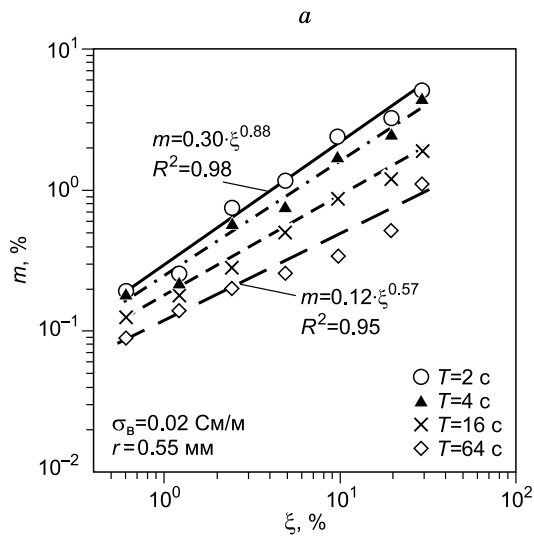
Кроме того, для случая вкрапленных руд было показано, что РВР удовлетворительно восстанавливается по данным, полученным при использовании коротких ( $T = 1—4$  с) импульсов тока [Гурин и др., 2013; Gurin et al., 2013]. Это явилось предпосылкой применимости ДД для анализа кажущихся кривых спада поляризуемости, наблюдаемых в полевых условиях.

Приведенные зависимости  $\tau$  и  $M$  от петрофизических параметров вкрапленной руды показывают их более высокую чувствительность к содержанию и размеру зерен электропроводящих минералов по сравнению с классическими параметрами — заряжаемостью или поляризуемостью.

Обобщая экспериментальные данные авторов и других исследователей, были установлены простые эмпирические уравнения, описывающие зависимость времени релаксации ВП и стационарной поляризуемости от основных параметров вкрапленных руд [Gurin et al., 2015]:

$$\tau = a \frac{r^2}{\sigma_b}, \quad (18)$$

$$\xi = M / 5.5, \quad (19)$$



### Рис. 5. Связь параметров ВП с петрофизическими параметрами моделей вкрапленной руды.

*a* — зависимость  $m$  от  $\xi$  при разных значениях  $T$ ; *b* — зависимость  $M$  от  $\xi$  при разных значениях  $T$ ; *в* — зависимости  $m$  от  $\xi$  при разном размере зерен; *г* — зависимость  $M$  от  $\xi$  при разном размере зерен; *д* — РВР для моделей, содержащих 5 % зерен электропроводящих минералов разного размера (0.045—0.5 мм); *e* — зависимость времени релаксации от радиуса зерен электропроводящих минералов (1 — данные авторов, пирит,  $\xi = 10\%$ ; 2 — данные авторов, крипомелан,  $\xi = 10\%$ ; 3 — данные авторов, галенит,  $\xi = 10\%$ ; 4 — Гурин и др., [2013], пирит + пирротин + магнетит,  $\xi = 5\%$ ; 5 — по [Ostrander, Zonge, 1978], пирит,  $\xi = 7.5\%$  (из работы [Zhdanov et al., 2008]); 6 — по [Ostrander, Zonge, 1978], халькопирит,  $\xi = 7.5\%$  (из работы [Zhdanov et al., 2008]); 7 — по [Grissemann, 1971], халькопирит,  $\xi = 6\%$ ; 8 — по [Overvoltage..., 1959], галенит,  $\xi = 3\%$  (из работы [Wong, 1979]).

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

Согласно уравнению (18), связь времени релаксации с размером вкрапленников неоднозначна. Однако в большинстве случаев в пределах участка работ минеральный состав зерен и электропроводность поровой влаги можно считать постоянными. Тогда основным параметром, влияющим на время релаксации, оказывается размер вкрапленников.

Уравнение (19) позволяет утверждать, что стационарная поляризуемость, в отличие от заряжаемости или поляризуемости, есть мера концентрации электропроводящих минералов, независимая от других параметров вкрапленных руд, а также от режима измерений.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По данным профилирования методом ВП на флангах золото-серебряного месторождения Джульетта удалось выделить и оконтурить зоны ИП различного минерального состава, перекрытые чехлом рыхлых отложений мощностью до 10 м.

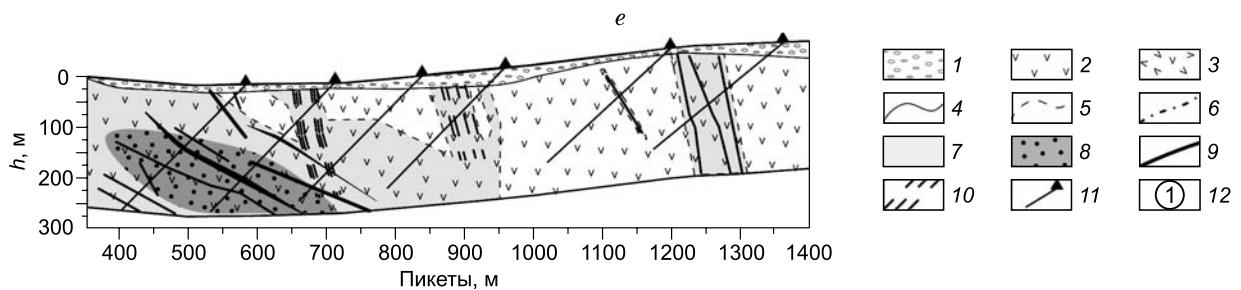
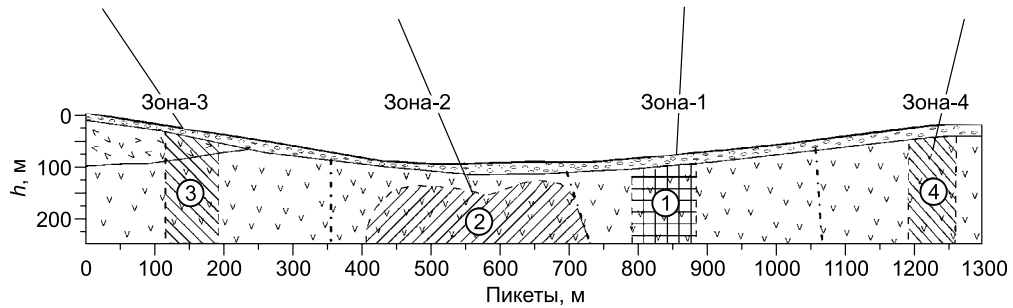
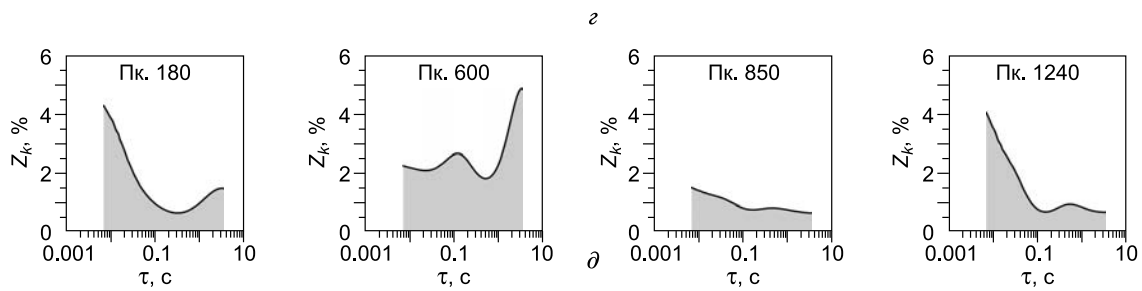
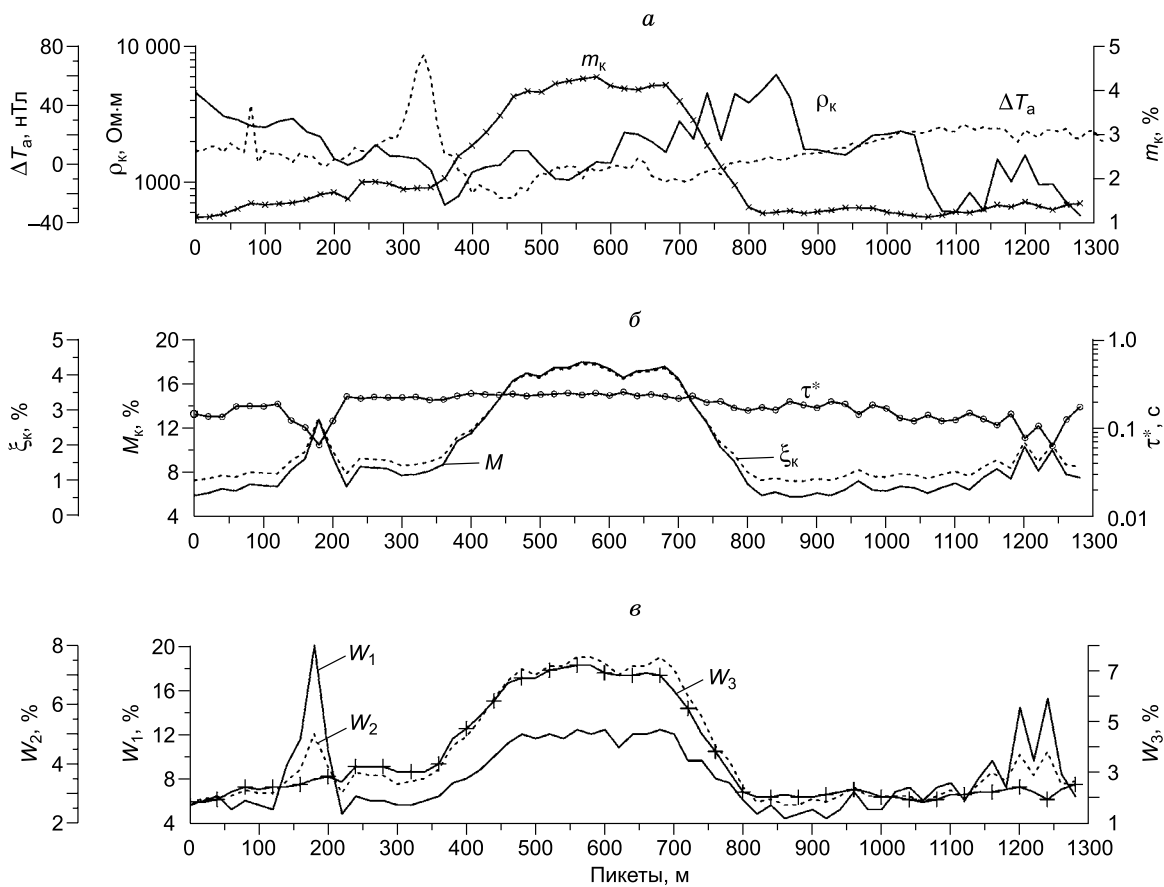
В качестве примера приведены результаты профилирования методом ВП и магниторазведки по двум профилям, пересекающим известные (рис. 6, *д*, пикеты: 100—200, 800—900, 1200—1300 м) и выявленные в ходе полевых работ зоны ИП (см. рис. 6, *д*, пикеты 400—700 м; рис. 7, *з*, пикеты 600—900 м). Возможность использования параметров РВР при прослеживании зон ИП в плане иллюстрирует рис. 8. Все выделенные зоны подтверждены поисковым бурением (см. рис. 6, *е*; 7, *д*).

Измененные породы, слагающие выделенные зоны, характеризуются близким составом новообразованных минералов (кварц, кальцит, серицит, хлорит, сульфиды), но их разным объемным содержанием (косвенным образом отражающим интенсивность изменений) и типом распределения сульфидной минерализации в пространстве.

По результатам работ выделены три типа зон ИП (см. рис. 6). К первому типу относятся зоны окварцевания, содержащие кварцево-жильные тела существенно кварцевого и карбонат-кварцевого состава с незначительным содержанием рудных минералов ( $\xi \leq 1$ —1.5 %) (см. рис. 6, *д*; зона 1). Зоны ИП этого типа характеризуются повышенными значениями  $\rho_k$  (1000—4000 Ом·м), фоновыми значениями  $m_k$  (1.5—1.8 %) и параметров РВР ( $M_k$ ,  $\tau^*$ ,  $W_{1-3}$ ) (см. рис. 6, *а*, *б*, *г*). Картирование этих зон затруднено, так как в районе работ широко развиты дайки, для которых характерны близкие значения перечисленных параметров.

Вторым типом ИП являются метасоматиты, по составу близкие к березитам (пирит-серицит-карбонат-кварц-гидрослюдистого состава). Они вмещают сульфидно-карбонат-кварцевые жилы и зоны прожилкования (в том числе с промышленными содержаниями золота и серебра). Для ИП второго типа характерно значительное содержание электропроводящих минералов от 2 до 7 % (пирит, халькопирит и галенит), что объясняет высокие значения  $m_k$  до 5—6 % (см. рис. 6, *д*; зона 2). Это позволяет картировать их в плане (см. рис. 6, *а*). Измененные породы второго типа характеризуются фоновыми значениями  $\rho_k$  1500—1800 Ом·м и незначительным понижением приращения модуля вектора индукции аномального магнитного поля ( $\Delta T_a$ ) на 10—20 нТл (см. рис. 6, *а*). Последнее указывает на высокую степень изменения исходных пород, что связано с разложением темноцветных минералов андезитов под действием гидротермальных растворов (в том числе разложение акцессорного магнетита). Для них характерно почти полное (70—100 %) замещение исходных андезитов во внутренних зонах метасоматической колонки.

Для второго типа ИП параметры РВР не дают значимого повышения информативности по сравнению с  $m_k$  или  $\eta_k$ , что обусловлено узким временным интервалом измерений кривых  $\eta_k(t)$ . Однако по РВР можно говорить о прожилково-вкрапленном типе оруденения. Об этом свидетельствует наибольшая интенсивность процессов ВП в третьем временном окне  $W_3$  (444—3540 мс),  $\tau > 4$  с (см. рис. 5, *в*, *е*; рис. 6, *б*, *г*). Сделанное предположение подтверждено поисковым бурением, по данным которого для второй зоны установлен прожилково-вкрапленный тип распределения сульфидов (см. рис. 6, *д*, *е*, *ж*).



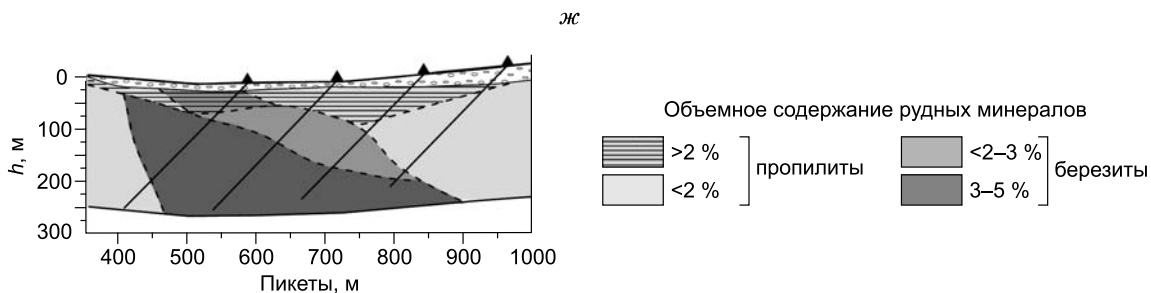


Рис. 6. Результаты комплексных геофизических работ по пр. 1.

*a* — графики кажущегося сопротивления ( $\rho_k$ ), приращения модуля вектора индукции аномального магнитного поля ( $\Delta T_a$ ) и кажущейся зарядаемости ( $m_k$ ); *б* — графики кажущегося объемного содержания сульфидов ( $\xi_k$ ), кажущейся стационарной поляризуемости ( $M_k$ ) и средневзвешенного времени релаксации ( $\tau^*$ ); *в* — графики параметров  $W_1$  (7—56 мс),  $W_2$  (56—444 мс) и  $W_3$  (444—3540 мс); *г* — типичные РВР для различных зон ИП; *д* — схематический геолого-геофизический разрез, *e* — схематический геологический разрез по данным заверочного поискового бурения; *ж* — распределение содержания сульфидов в разрезе (по данным описания керна скважин).

Стратифицированные отложения: 1 — четвертичные отложения, 2 — андезиты иваньинской толщи, верхней подтолщи, 3 — крупнопорфировые андезиты иваньинской толщи, средней подтолщи. Границы: 4 — стратиграфические, 5 — гидротермально-метасоматически измененных пород; 6 — разрывные нарушения. Степень изменения исходных пород: 7 — умеренно измененные (1—2% сульфидов), 8 — интенсивно измененные (3—5% сульфидов); 9 — кварцевые жилы и прожилки; 10 — зоны кварц-карбонатного прожилкования; 11 — скважины разведочного бурения; 12 — выделенные типы гидротермально-метасоматически измененных пород: 1 — зоны окварцевания и гематитизации; 2 — березиты, содержащие до 7% сульфидов (прожилково-вкрапленного типа); 3 — березитизированные породы, содержащие до 3% сульфидов (тонковкрапленный тип).

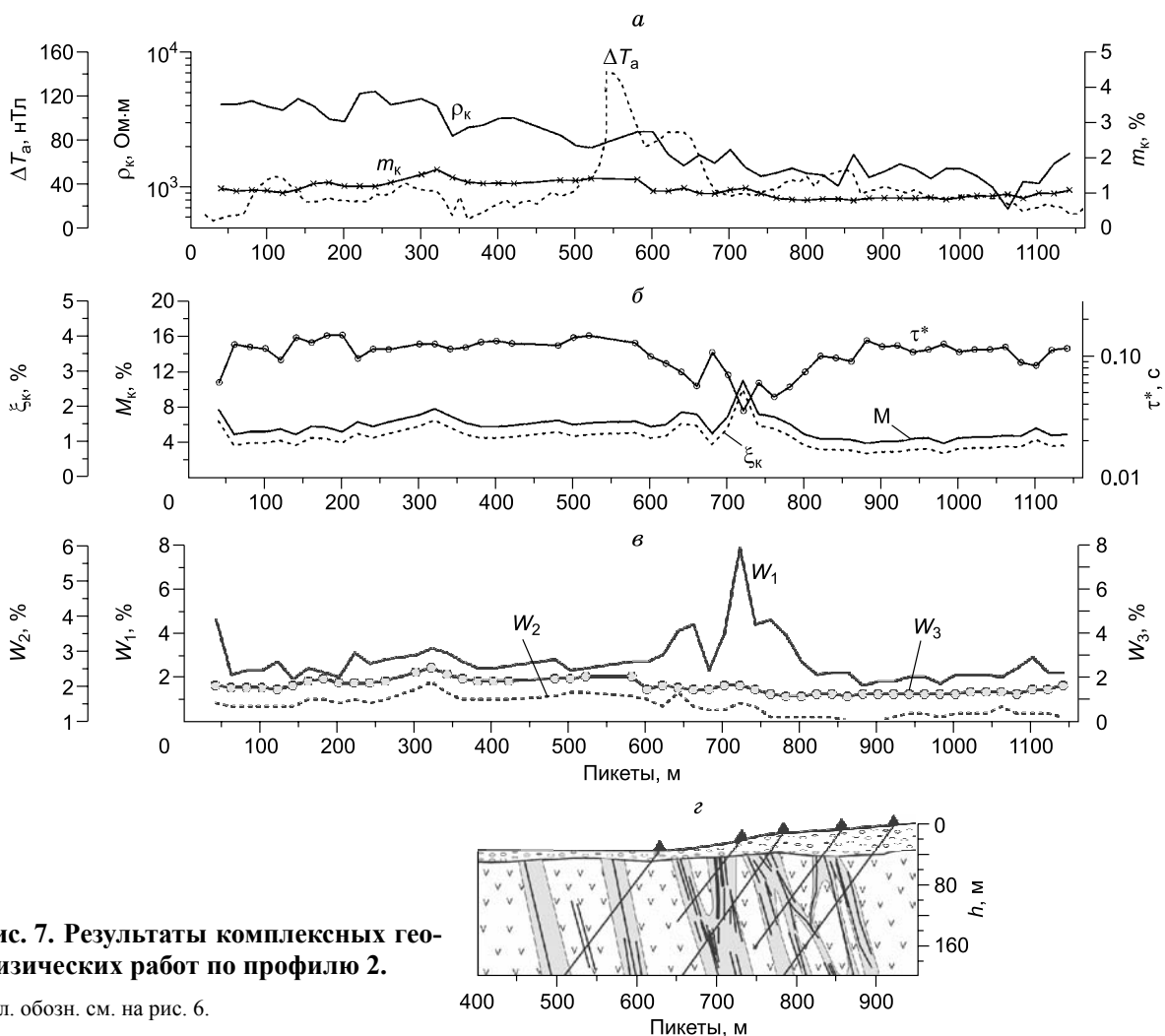
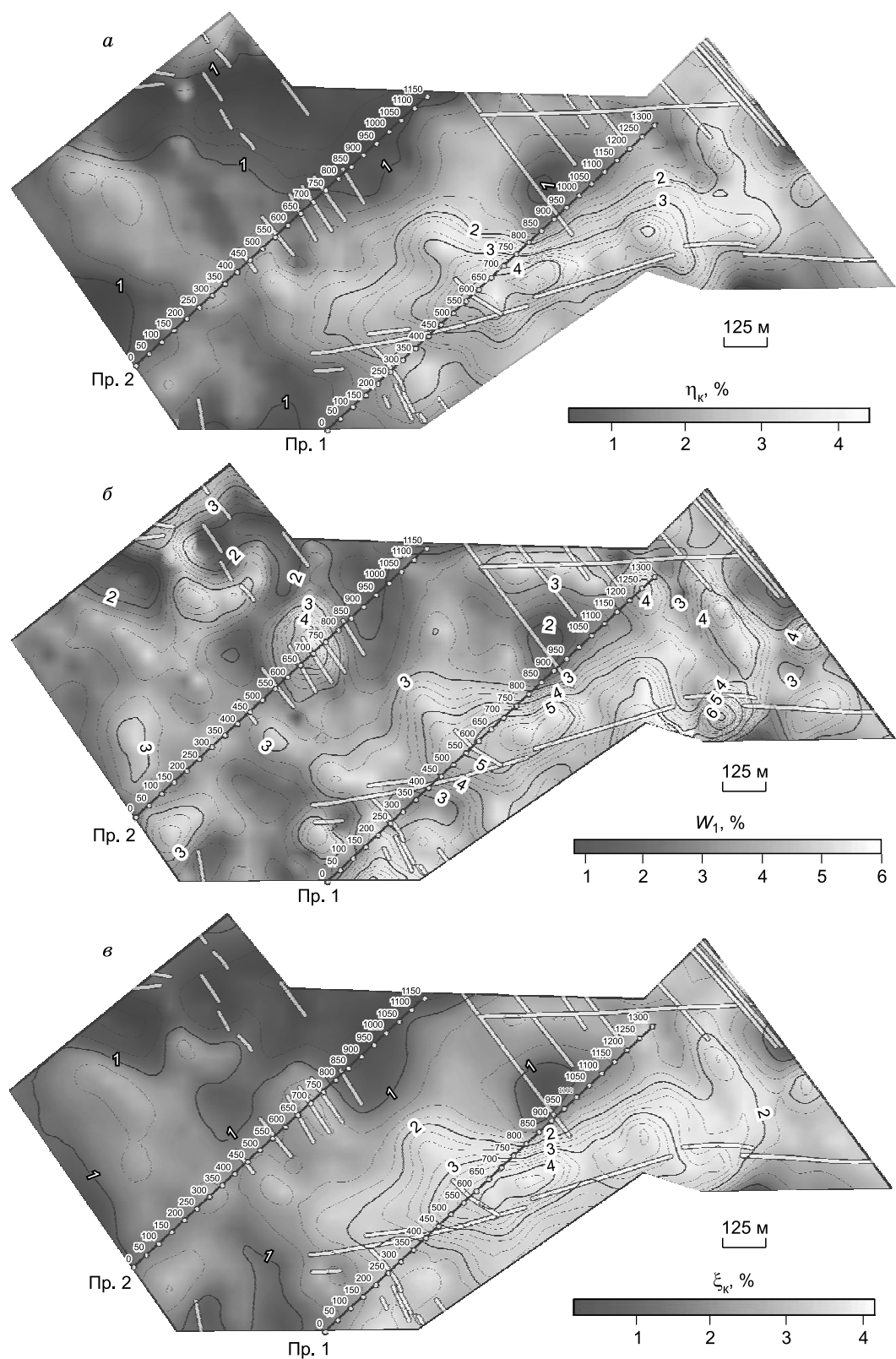


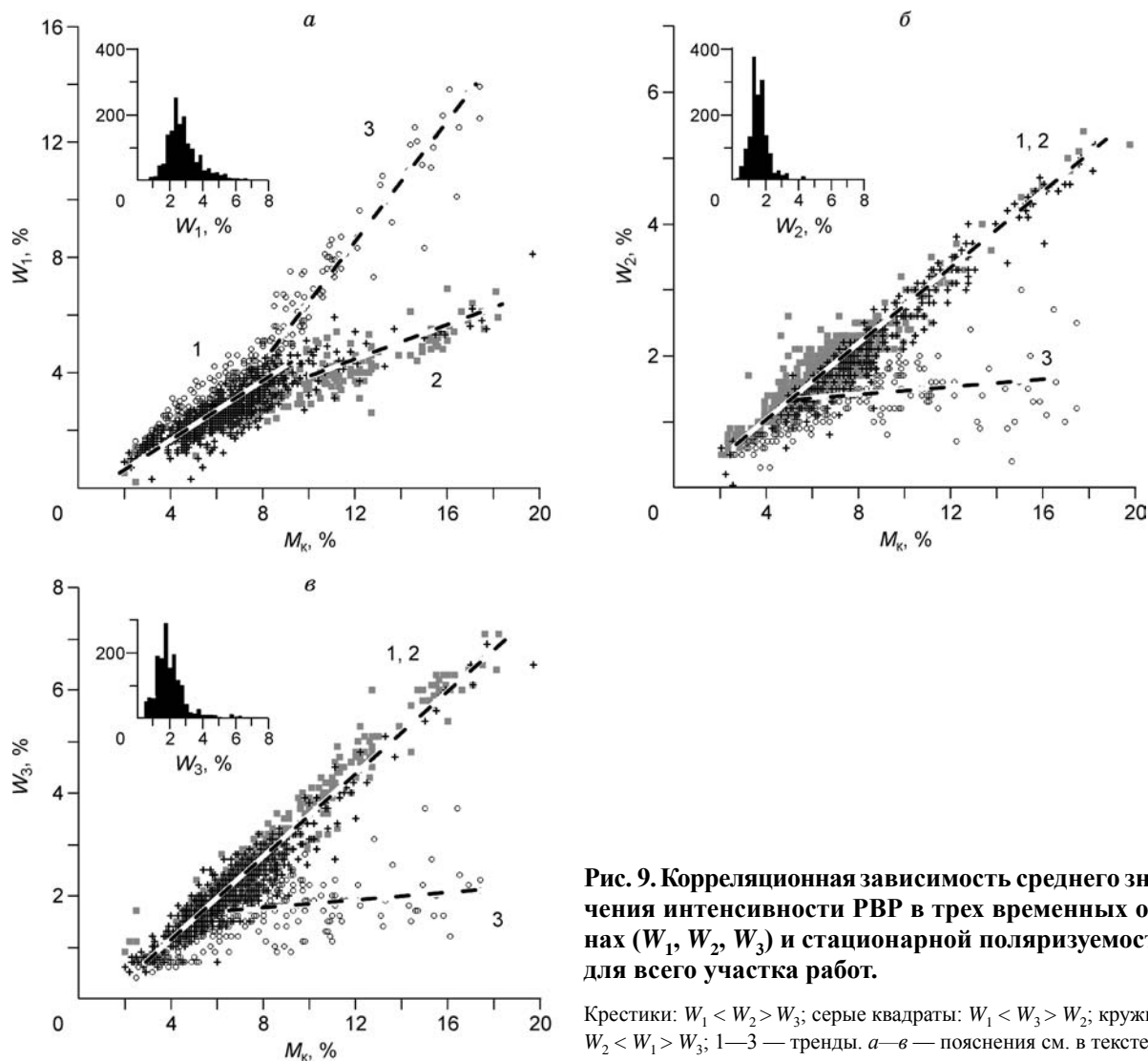
Рис. 7. Результаты комплексных геофизических работ по профилю 2.

Усл. обозн. см. на рис. 6.



**Рис. 8.** Распределение кажущейся зарядаемости (*a*), среднего значения интенсивности РВП в первом окне (*b*) и кажущегося объемного содержания электропроводящих минералов (*в*).

Линиями показаны кварцево-жильные тела и оси зон гидротермально-метасоматически измененных пород.



**Рис. 9. Корреляционная зависимость среднего значения интенсивности РВП в трех временных окнах ( $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$ ) и стационарной поляризуемости для всего участка работ.**

Крестики:  $W_1 < W_2 > W_3$ ; серые квадраты:  $W_1 < W_3 > W_2$ ; кружки:  $W_2 < W_1 > W_3$ ; 1—3 — тренды. а—в — пояснения см. в тексте.

Третий тип ИП близок ко второму, но отличается низким содержанием рудных минералов ( $\xi \approx 1—3$  %). Этот тип ИП удастся выделить лишь с использованием параметров РВП ( $M_k$ ,  $\tau^*$ ,  $W_1$ ; см. рис. 6—8). Измененные породы третьего типа слагают третью и четвертую зоны, которые пересекает первый профиль. Четвертая зона ИП, по данным поискового бурения, не содержит промышленных содержания золота и серебра, а третья — совпадает с краевой частью выклинивающегося промышленного рудного тела (см. рис. 6). Подобная зона ИП выделена на втором профиле (пикеты 600—900 м; см. рис. 7).

По значениям  $\rho_k$ ,  $m_k$  и  $\Delta T_a$  этот тип ИП не отличается от вмещающих их андезитов ивановской толщи (см. рис. 6, а, б; рис. 7, а, б; рис. 8). В данном случае в полной мере проявляются преимущества стационарной поляризуемости и времени релаксации (см. рис. 4—8), связанные с их высокой чувствительностью (по сравнению с  $m$  или  $\eta$ ) к содержанию электропроводящих зерен малого размера ( $r < 0.1$  мм; см. рис. 5—8). Зоны ИП третьего типа выделяются высокими значениями параметров  $W_1$ ,  $M$  и низкими значениями  $\tau^*$  (см. рис. 6—8). Это позволяет предполагать, что ИП данного типа содержат вкрапленность электропроводящих минералов мелкого размера ( $r \leq 0.1$  мм). По имеющимся геологическим данным, ИП третьего типа отвечают зонам окварцевания, содержащим карбонат-кварцевые прожилки с малым содержанием сульфидов ( $\xi \approx 1—2$  %).

Оценим вклад каждого из параметров  $W_1$ ,  $W_2$  и  $W_3$  в стационарную поляризуемость для всего участка работ (рис. 9). По результатам анализа корреляционной зависимости  $W_1$  от  $M$  выделено три разных тренда (см. рис. 9, а). Начальный отрезок (1) зависимости  $W_1(M)$  имеет линейный характер и отвечает фоновому изменению  $Z_k(\tau)$  в первом временном окне (см. гистограммы распределения параметров  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  на рис. 9). Подобная зависимость параметров РВП указывает на отсутствие преобладающего процесса ВП.



С увеличением значений  $W_1$  и  $M$  поле корреляции распадается на два облака точек (2, 3), что указывает на два разных фактора, влияющих на РВР. Первое облако (2) характеризуется слабым ростом значений  $W_1$  за счет  $M$ , что указывает на относительно небольшой вклад процессов ВП с малыми временами релаксации (см. рис. 9). Этому тренду отвечают породы, для которых характерен прожилково-вкрапленный тип распределения сульфидной минерализации ( $W_1 < W_2 > W_3$ ), (см. рис. 6, *д*, зона 2).

Третий тренд, отвечает росту значений  $W_1$  по мере увеличения  $M$ . Подобная зависимость параметров указывает на то, что преобладают процессы релаксации с малыми  $\tau$  ( $W_3 < W_1 > W_2$ ; см. рис. 9, *а*). Этому тренду отвечают РВР, характерные для третьего типа ИП, содержащих рассеянную вкрапленность электропроводящих минералов мелкого размера (см. рис. 6—8).

Установленная по экспериментальным данным устойчивая зависимость  $M$  от  $\xi$  (см. (19)), позволяет проводить оценку объемного содержания электропроводящих минералов без привлечения дополнительной информации. Следует отметить, что для случая полевых работ, где измеряются кажущиеся кривые спада поляризуемости, оценка  $\xi$  также является эффективным (или кажущимся) параметром ( $\xi_k$ ). Основным условием использования  $\xi_k$  является соответствие временного диапазона измерения кривой спада кажущейся поляризуемости интервалу преобладающих времен релаксации. Расчет кажущегося объемного содержания электропроводящих минералов (используя (19)), приведенный на рис. 6, *а*, показывает, что для ИП второго и третьего типа характерны повышенные значения  $\xi_k$  (см. рис. 8, *в*). Кроме того, наблюдается пространственное совпадение областей, характеризующихся повышенным содержанием электропроводящих минералов ( $\xi_k > 1\%$ ), с известными и выявленными в ходе заверочного поискового бурения кварцево-жильными телами и зонами гидротермально-метасоматически измененных пород (см. рис. 8).

Сопоставимые значения  $\xi_k$  с оценкой объемного содержания сульфидов по результатам описания керны скважин (см. рис. 6, *ж*) подтверждают применимость уравнения (19) для практического использования. Учитывая это, можно предполагать, что в благоприятных условиях при наличии корреляционной связи золота, серебра или другого полезного ископаемого с содержанием электропроводящих минералов в околорудных породах, зависимость  $M(\xi)$  даст возможность проводить предварительную оценку ресурсов месторождений или отдельных тел (см. рис. 5, *в*, *г*; рис. 6—8).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе доказана возможность оконтуривания различных типов ИП на основе анализа РВР, восстановленных по кривым спада кажущейся поляризуемости. По результатам поискового бурения рудная минерализация установлена во всех выделенных типах ИП. Высокие содержания золота встречены в ИП второго и третьего типов.

Выявленные на основе лабораторных данных связи параметров ВП с петрофизическими параметрами вкрапленных руд (рис. 5; уравнения (18), (19)) получили подтверждение на полевом материале.

Показано, что использование ДД для анализа временных характеристик ВП имеет ряд преимуществ по сравнению со стандартными методиками анализа данных и позволяет проводить поиски ИП с низкими объемными содержаниями ( $\xi \approx 1—3\%$ ) электропроводящих минералов малого размера (с радиусом зерен от 0.01 до 0.5 мм).

Доказано, что форма РВР и характеризующие его параметры позволяют разделять породы по типу распределения в них сульфидной минерализации (вкрапленный, прожилково-вкрапленный или прожилковый). К настоящему времени большая часть выделенных нами зон подтверждена заверочным поисковым бурением.

Авторы благодарят геологов СП ЗАО «Омсукчанская горно-геологическая компания» О.В. Жукова, М.Е. Вакина за тесное сотрудничество, всестороннюю помощь и предоставленную возможность публикации результатов работ.

## ЛИТЕРАТУРА

**Гурин Г.В., Тарасов А.В., Ильин Ю.Т., Титов К.В.** Спектральная характеристика вызванной поляризации вкрапленных руд // Вестн. СПб. ун-та, Сер. геолог., 2013, В. 1, с. 14—31.

**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. 1, с. 4—19.

**Жандалинов В.М.** Электрические и электромагнитные зондирования при поисках коренных месторождений алмазов. Новосибирск, Акад. изд-во «Гео», 2011, 275 с.

**Инструкция** по электроразведке. М-во геологии СССР. М., Недра, 1984, 352 с.

**Константиновский А.А.** Структура и геодинамика Верхоянского складчато-надвигового пояса // Геодинамика, 2007, № 5, с. 3—22.

- Комаров В.А.** Электроразведка методом вызванной поляризации. Л., Недра, 1980, 391 с.
- Кормильцев В.В.** Переходные процессы при вызванной поляризации. М., Наука, 1980, 112 с.
- Метасоматизм и метасоматические породы** / Под ред. В.А. Жарикова, В.Л. Русина. М., 1998, 492 с.
- Нарсеев В.А., Самарцев И.Т., Гусева Л.Д., Веселов А.В., Гузман Б.В.** Прогнозная оценка глубоких горизонтов и флангов золоторудных месторождений. М., ЦНИГРИ, 1989, 176 с.
- Обушков А.В., Стружков С.Ф., Наталенко М.В., Рыжов О.Б., Кряжев С.Г., Радченко Ю.И.** Геологическое строение и минералогия руд скрытого золото-серебряного месторождения Энгтери (Магаданская область) // Геология рудных месторождений, 2010, т. 52, № 6, с. 512—533.
- Омельяненко Б.И.** Околорудные гидротермальные изменения пород. М., Наука, 1978, 215 с.
- Пахомов М.Н., Пахомов В.Н.** Петрофизический метод выделения и оценки метасоматитов. М., Недра, 1988, 152 с.
- Рыжов О.Б., Стружков С.Ф., Аристов В.В., Григорьев Н.В., Колесников А.Г.** Геологическое строение и состав руд золото-серебряного месторождения Джульетта (Северо-Восток России) // Руды и металлы, 1995, № 2, с. 66—79.
- Сидоров А.А., Белый В.Ф., Волков А.В., Савва Н.Е., Колов Е.Е.** Золото-серебряные месторождения и рудные комплексы Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // ДАН, 2009, т. 427, № 6, с. 814—820.
- Тарасов А.В., Титов К.В.** Оценка распределения времен релаксации по данным метода вызванной поляризации во временной области // Геофизика, 2006, № 6, с. 42—56.
- Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. М., Наука, 1986, 287 с.
- Хомич В.Г., Иванов В.В., Фатьянов И.И.** Типизация золото-серебряного оруденения. Владивосток, ДВО АН СССР, 1989, 292 с.
- Guptasarma D.** Computation of the time-domain response of polarizable ground // Geophysics, 1982, v. 47, p. 1574—1576.
- Gurin G., Tarasov A., Piyin Yu., Titov K.** Time domain spectral induced polarization of disseminated electronic conductors: laboratory data analysis through the Debye decomposition approach // J. Appl. Geoph., 2013, v. 98, p. 44—53.
- Gurin G., Titov K., Piyin Yu., Tarasov A.** Induced polarization of disseminated electronically conductive minerals: a semi-empirical model // Geoph. J. Int., 2015, v. 200, p. 1555—1565.
- Grissemann C.** Examination of the frequency-dependent conductivity of ore-containing rock on artificial models. Electr. Lab. University of Innsbruck, Austria, 1971, Sc. Rep., № 2.
- Mahan K.M., Redman J.D., Strangway D.W.** Complex resistivity of synthetic sulphide-bearing rocks // Geoph. Prosp., 1986, v. 34, № 5, p. 743—768.
- Nordsiek S., Weller A.** A new approach to fitting induced-polarization spectra // Geoph., 2008, v. 75, № 6, p. F235—F245.
- Ostrander A.G., Zonge K.L.** Complex resistivity measurements of sulfide-bearing synthetic rocks // 48th Annual International Meeting. SEG. 1978, Abstract. M-6, p. 113.
- Overvoltage** research and geophysical applications / Ed. J.R. Wait. London, Pergamon Press, 1959, 158 p.
- 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, № 3, p. 588—609.
- Tarasov A., Titov K.** Relaxation time distribution from time domain induced polarization measurements // Geoph. J. Intern., 2007, v. 170, № 1, p. 31—43.
- Tong M., Li L., Wang W., Jiang Y.A.** Time-domain induced-polarization method for estimating permeability in a shaly sand reservoir // Geoph. Prosp., 2006, v. 54, p. 623—631.
- Wong J.** An electrochemical model of the induced-polarization phenomenon in disseminated sulfide ores // Geophysics, 1979, v. 44, № 7, p. 1245—1265.
- Zhdanov M.** Generalized effective-medium theory of induced polarization // Geophysics, 2008, v. 73, p. F197—F211.