

УДК 550.34.013.4

ИЗУЧЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРИ ПОИСКАХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (на примере месторождений золота)

Г.В. Гурин^{1,2}, А.В. Тарасов^{1,2}, К.В. Титов²

¹ ООО «Рудгеофизика» 197110, Санкт-Петербург, ул. Аэродромная, 8А, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. 7/9, Россия

Рассматривается современное состояние спектрального подхода к анализу данных вызванной поляризации (ВП), обсуждаются его возможности и ограничения, а также направления дальнейшего развития. Приводится краткое описание основных методов и подходов, применяемых для оценки спектральных параметров ВП, дается оценка их особенностей.

На практических примерах мы показываем, что изучение временных характеристик ВП в ряде случаев дает преимущество над стандартными подходами к анализу и обработке данных ВП. Мы сравниваем результаты использования стандартного и спектрального подхода к анализу данных ВП при решении поисковых задач на месторождении золота Малетойваям (п-ов Камчатка) и рудопроявлении золота Ясное (п-ов Таймыр). Мы показываем, что одним из основных факторов, сдерживающих широкое использование спектрального ВП при поисках рудных месторождений, является не низкая производительность работ, а отсутствие методик автоматизированного анализа временных характеристик ВП. Мы предлагаем новый подход к спектральному анализу данных ВП, базирующийся на основе алгоритмов распознавания образов эталонного объекта, и приводим первый опыт его практического применения.

Спектральная вызванная поляризация, время релаксации, заряжаемость, месторождения золота

ANALYSIS OF TRANSIENT CHARACTERISTICS OF INDUCED POLARIZATION IN INNOVATIVE MINERAL EXPLORATION SOLUTIONS (from case studies of gold deposits)

G.V. Gurin, A.V. Tarasov, K.V. Titov

The paper discusses current state of the spectral approach to analysis of induced polarization (IP), its possibilities and limitations, along with directions for the method development. Reviewed are the main methods and approaches for estimation of spectral IP parameters and their specific features. Our practical experiments have shown the advantages of analysis of transient IP characteristics over standard approaches to the IP data analysis and processing. Results of the standard and spectral approaches application to analysis of IP data when solving mineral exploration problems at the Maletoyvayam gold deposit (Kamchatka Peninsula) and the Yasnoe gold occurrence (Taimyr Peninsula) are compared. Here, we demonstrate that low efficiency of works is erroneously regarded as one of the main factors hindering a broad adoption of the spectral IP method in mineral exploration activities. Rather, it is a lack of automated techniques for analysis of transient IP characteristics.

We propose a new approach to spectral analysis of IP data, based on the algorithms for image recognition of a reference object, and describe pioneering efforts of its practical application.

Spectral induced polarization, relaxation time, chargeability, gold deposits

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время метод вызванной поляризации (ВП) является одним из основных методов рудной геофизики. Его важнейшим преимуществом является тесная связь параметров ВП с петрофизическими свойствами пород: объемным содержанием зерен электропроводящих минералов, их преобладающим размером, характерным размером пор и др. [Pelton et al., 1978; Kemna et al., 2012; Gurin et al., 2015b]. В простых случаях для качественной оценки этих свойств можно использовать стандартные методики работ и обработки данных ВП (вычисление заряжаемости или поляризуемости), так как для решения поисковых задач часто достаточно выделить и определить пространственное положение аномалий поляризуемости в плане и разрезе. При этом для выявления геологической природы аномалий, оценки их перспективности или практической значимости используется один критерий — интенсивность аномалий (значение поляризуемости). Однако тела, сложенные породами различного вещественного состава (сульфидизированные и графитизированные породы), могут создавать аномалии поляризуе-

мости одинаковой интенсивности. Кроме того, в пределах площади работ аномалий поляризуемости сопоставимой интенсивности может быть выявлено много или аномалии могут иметь большой размер (ширину от 100 до 1000 м и более). В этих ситуациях «стандартный» подход к анализу данных ВП оказывается малоэффективен — требуется детализация и/или разбраковка выделенных аномалий поляризуемости. В благоприятных случаях эти задачи решаются на основе изучения временных или частотных характеристик ВП, что позволяет реализовать «спектральный» подход к анализу данных ВП. В зарубежной литературе изучение частотных характеристик ВП — измерения в широком частотном диапазоне от 0.1 до 100 Гц (для случая полевых работ) и от 0.001 до 100 Гц (для лабораторных исследований) — и их анализ называется методом спектральной ВП (СВП). Учитывая взаимосвязь результатов измерений ВП во временной и частотной областях, можно считать, что изучение и анализ временных характеристик ВП (ВХ-ВП) также является разновидностью метода СВП.

Начиная с 1960-х годов в литературе приводятся примеры использования спектрального подхода к анализу данных ВП для решения различных геологических задач при поисках рудных месторождений [Комаров, 1980; Кормильцев, 1980; Luo, Zhang, 1998]. Можно выделить три основных типа решаемых задач, состоящих в разделении пород по: 1) текстурно-структурным особенностям (выделение вкрапленных и прожилковых руд [Комаров, 1980; Luo, Zhang, 1998]); 2) составу рудных минералов (разделение графитизированных и сульфидизированных пород [Luo, Zhang, 1998; Tarasov, Gurin, 2016]); 3) вещественному составу (разделение пород, различающихся интенсивностью гидротермально-метасоматического изменения [Гурин и др., 2015], литологическим или петрографическим составом). Несмотря на то, что спектральный подход к анализу данных ВП позволяет получить дополнительную информацию о структурно-текстурных особенностях строения пород и их вещественном составе, он пока редко используется при поисках рудных месторождений.

В настоящей работе мы представляем опыт применения ВХ-ВП при поисках рудных месторождений за последние несколько лет. Мы обсуждаем ограничения и недостатки спектрального подхода к анализу данных ВП, методику и технику выполнения работ методом СВП, методы оценки спектральных параметров ВП и их геологической интерпретации, а также перспективы развития спектрального подхода к анализу данных ВП. Мы приводим примеры использования стандартного и спектрального подходов к анализу данных ВП при решении поисковых задач на месторождении золота Малетойвая (п-ов Камчатка) и рудопроявлении золота Ясное (п-ов Таймыр). Мы показываем, что одним из основных факторов, сдерживающих широкое использование спектрального ВП при поисках рудных месторождений, является не низкая производительность работ, а отсутствие методик анализа ВХ-ВП.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВП

В настоящее время можно выделить три основных метода оценки спектральных параметров ВП: аппроксимация кривых $\eta(t)$ моделью Коул-Коул [Pelton et al., 1978]; разложение $\eta(t)$ на сумму моделей Дебая (дебаевская декомпозиция (ДД) [Nordsiek, Weller, 2008]) или на сумму моделей Коул-Коул (мультиКоул-Коул) [Pelton et al., 1978; Florsch et al., 2010]), а также вычисление кривых дифференциальной поляризуемости [Комаров, 1980]. Все отмеченные методы позволяют оценивать спектральные параметры ВП, но чаще всего используются лишь два первых подхода.

Модель Коул-Коул, описывающая зависимость комплексной электропроводности среды $\sigma^*(\omega)$ от частоты электрического поля (ω), во временной области может быть представлена в следующем виде [Guptasarma, 1982]:

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

где $\Gamma(1+ic)$ — гамма-функция с аргументом $(1+ic)$, $0 < c \leq 1$ — показатель степени модели Коул-Коул, M — стационарная поляризуемость, t — время после выключения тока, τ — время релаксации ВП породы.

Параметры Коул-Коул (M , τ , c), оцениваемые по результатам аппроксимации кривых $\eta(t)$, часто называют интегральными параметрами ВП, так как в простых случаях они позволяют удовлетворительно описать наблюдаемые кривые $\eta(t)$ или спектры $\sigma^*(\omega)$.

Разложение кривых $\eta(t)$ на суперпозицию моделей Дебая (ДД) позволяет анализировать динамику поляризации пород и восстанавливать распределение времен релаксации (РВР). В простейшем случае ДД кривой $\eta(t)$ может быть описана следующим выражением:

$$\eta(t) = \sum_{k=1}^N Z(\tau_k) F(t, \tau_k) = \sum_{k=1}^N Z(\tau_k) \exp\left(-\frac{t}{\tau_k}\right), \quad (2)$$

где $M = \sum_{k=1}^N Z(\tau_k)$ — стационарная поляризуемость породы; $Z(\tau_k)$, τ_k — стационарная поляризуемость и время релаксации k -го элементарного релаксационного процесса ($Z(\tau_k)$ — функция, описывающая РВР), N — общее количество моделей Дебая. Подробное описание алгоритма ДД кривых $\eta(t)$, измеренных при разных токовых режимах, приведено в работе [Tarasov, Titov, 2007].

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВП

Аппроксимация кривых $\eta(t)$ моделью Коул-Коул чаще всего используется для оценки интегральных параметров ВП. Популярность этого метода объясняется простотой, а также возможностью аппроксимации кривых $\eta(t)$ различного вида в автоматическом режиме. Однако использование одной модели Коул-Коул часто оказывается недостаточно, так как породы могут иметь сложное РВР (например, представлять несколько процессов, различающихся временами релаксации). В этом случае необходимо применять несколько моделей Коул-Коул, что приводит к росту параметров, подлежащих определению (для двух моделей их шесть, а для трех — уже девять), и делает анализ полевых данных ВП неустойчивым.

Более универсальными методами анализа ВХ-ВП являются ДД или вычисление кривых дифференциальной поляризуемости [Комаров, 1980], которые лишены отмеченного недостатка (многопараметричности), но их использование приводит к другим сложностям — методы анализа РВР разработаны плохо. Чаще всего анализ РВР проводится визуально (выделяются некоторые особенности РВР, например, пики и их положение на оси времени и др.). Очевидно, что визуальный анализ РВР для тысяч и десятков тысяч точек наблюдений — крайне трудоемкая работа. Это в значительной мере ограничивает использование ДД для анализа полевых данных ВП.

ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ПОДХОДА К АНАЛИЗУ ДАННЫХ ВП

Физические. Для надежной оценки петрофизических свойств пород, слагающих геологический разрез (отдельные тела, слои и др.), необходимо перейти от кажущихся параметров ($\eta_k(t)$ и кажущегося удельного электрического сопротивления (ρ_k)) к их истинным значениям ($\eta(t)$, ρ), так как форма кривых $\eta_k(t)$ зависит не только от петрофизических свойств пород, слагающих геологический разрез, но и от объема тел, их пространственного расположения, контраста пород по значениям ρ , η и т.д. Однако для простых геоэлектрических разрезов (малая глубина залегания и простое строение аномалеобразующих тел, низкий контраст по электропроводности и др. [Гурин и др., 2017]) РВР, восстановленные по кривым $\eta_k(t)$, близки к истинным, поэтому их можно использовать для оценки петрофизических параметров пород.

Методические. Существенным ограничением спектрального ВП, сдерживающим его широкое практическое внедрение, является необходимость выполнять измерения кривых $\eta(t)$ в широком временном диапазоне от 10^{-3} до 10^2 с. При этом измерения кривых $\eta(t)$ проводят при нескольких длительностях импульсов тока (1, 8, 16, 64 с) с повышенными требованиями к качеству измерений. Например, одно наблюдение с помощью комплекта аппаратуры АИЭ-2, используя три токовых режима $T = 1, 8$ и 32 с, потребует около 17—20 мин, а один токовый режим $T = 1$ с — около 1 мин. Таким образом, при изучении ВХ-ВП время выполнения одного наблюдения оказывается в 20 раз больше.

Эти методические особенности проведения работ существенно снижают их производительность. Кроме того, для интерпретации данных необходим углубленный анализ материалов, что также требует существенных затрат времени и средств.

Аппаратурные. Большинство серийно выпускаемых измерителей ВП позволяют проводить регистрацию кривых $\eta(t)$ в широком временном диапазоне. Однако они плохо подходят для изучения ВХ-ВП, так как не имеют возможности гибкого изменения параметров регистрации сигнала: есть лишь небольшое число временных задержек (10—40) и нельзя проводить измерения кривых $\eta(t)$ на ранних временах (менее 40—100 мс).

ОПТИМАЛЬНАЯ МЕТОДИКА И ТЕХНИКА РАБОТ, РЕЖИМЫ ИЗМЕРЕНИЙ

«Конфликт с производством», возникающий при изучении ВХ-ВП, можно разрешить оптимальным выбором методики и техники проведения полевых работ. Для оценки распределений поляризуемости и электропроводности в разрезе по данным метода ВП очевидным преимуществом обладает методика электротомографии (ЭТ). Однако проводить спектральные измерения ВП при выполнении ЭТ оказывается непроизводительно, так как на измерения с несколькими режимами тока требуется много времени.

Наш опыт работ методом СВП показывает, что более рационально выполнять полевые работы в два этапа: сначала электропрофилирование и ЭТ по стандартной методике (для определения пространственного положения поляризующихся объектов и их геометрических параметров), а затем изучение ВХ-ВП на наиболее перспективных участках для характеристики вещественного состава пород и разбраковки выявленных аномалий поляризуемости. Подобный подход позволяет проводить изучение ВХ-ВП при оптимальных затратах времени на производство работ.

Выбор оптимального режима измерений проводят по данным параметрических измерений на известных геологических разрезах. Наш опыт полевых работ методом СВП показывает, что выполнять измерения кривых $\eta(t)$ с длительностью импульсов более 16 с недопустимо в связи с низкой производительностью. Как правило, достаточная доля полезной информации может быть получена при использовании всего двух токовых режимов с длительностью импульсов тока 1 и 8 с. При этом измерение кривых $\eta(t)$ необходимо начинать с ранних времен (от 1 мс), несмотря на искажения, обусловленные «индукционными» эффектами и переходными характеристиками генератора. В ряде случаев этот подход добавляет 1.0—1.5 декады временного диапазона характеристики РВР.

НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ПОДХОДА К АНАЛИЗУ ДАННЫХ ВП

Форма РВР или кривой дифференциальной поляризуемости несет информацию о различных петрофизических параметрах пород (структуре порового пространства и/или текстурно-структурных особенностях строения пород). Поэтому ее можно рассматривать в качестве дополнительного «петрофизического параметра», позволяющего классифицировать породы. Однако методы автоматизированного анализа РВР разработаны плохо. Таким образом, разработка алгоритмов и программ сравнения и типизации РВР — важное направление развития метода СВП.

К настоящему времени разработаны две методики анализа РВР: вычисление интегральных характеристик РВР (стационарной поляризуемости и средневзвешенного времени релаксации [Nordsiek, Weller, 2008]) и классификация РВР на основе его деления на три временных окна, условно отражающих вклады ранней, средней и поздней стадий процессов ВП [Гурин и др., 2015]. Первый подход применим для РВР простой формы (содержащих один пик) и оказывается малоприменимым для анализа РВР сложной формы (содержащих несколько пиков). Второй подход более универсален. Он был с успехом опробован на золото-серебряном месторождении Джульетта (Магаданская область [Гурин и др., 2015]) и месторождении золота Сухой Лог (Бодайбинский рудный район [Tarasov, Gurin, 2016]). Однако для «петрофизической» интерпретации РВР необходимо определять преобладающие времена релаксации, которых может быть более одного (например, в случае прожилково-вкрапленных руд), выделять РВР, имеющие особую форму (например, пик или два пика) и т.д. Для оценки перечисленных особенностей РВР метод, предложенный в работе [Гурин и др., 2015], оказывается слишком грубым.

Более перспективным подходом, по мнению авторов, является классификация РВР, построенная на основе алгоритмов распознавания образов эталонного объекта. Рассмотренный ниже пример является первым опытом реализации алгоритма автоматической классификации РВР.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ РВР НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ЗОЛОТА МАЛЕТОЙВАЯМ (п-ов Камчатка)

Малетойваямское месторождение золота расположено в пределах кальдеры одноименного стратовулкана, сложенного вулканогенно-осадочными образованиями андезитового состава в различной степени измененными гидротермально-метасоматическими процессами [Гурин, 2021]. Золоторудные зоны и тела Малетойваямского месторождения расположены в осевых частях массивов «вторичных кварцитов», местонахождение, форма и размеры которых определяются литологическим (физико-механическими свойствами пород) и тектоническим факторами. Золотое оруденение отнесено к «*high sulfidation*» (кислотно-сульфатарному) типу с наложенной медной люционит-энаргитовой минерализацией, характерной для верхних частей медно-порфирировых систем. Большая часть выделенных золотоносных тел — это мощные сульфидизированные залежи пластовой формы в монокварцитах, реже в алунитовых и пирит-алунитовых вторичных кварцитах. Вещественный состав золоторудных тел достаточно простой: кварц, алунит и каолинит. Рудные минералы представлены пиритом, лимонитом и энаргитом, содержание которых в среднем не превышает 1—2 % от объема породы (иногда достигает 5—10 %).

В пределах перспективного участка Малетойваямского месторождения золота выполнено электропрофилирование методом ВП с установкой срединного градиента (ВП-СГ) на площади около 1 км² (рис. 1). На картах изолиний ρ_k и η_k видно, что золотоносная структура в центральной части участка работ выделяется линейно-вытянутой аномалией повышенной η_k (> 1.6 %) и пониженного ρ_k (около

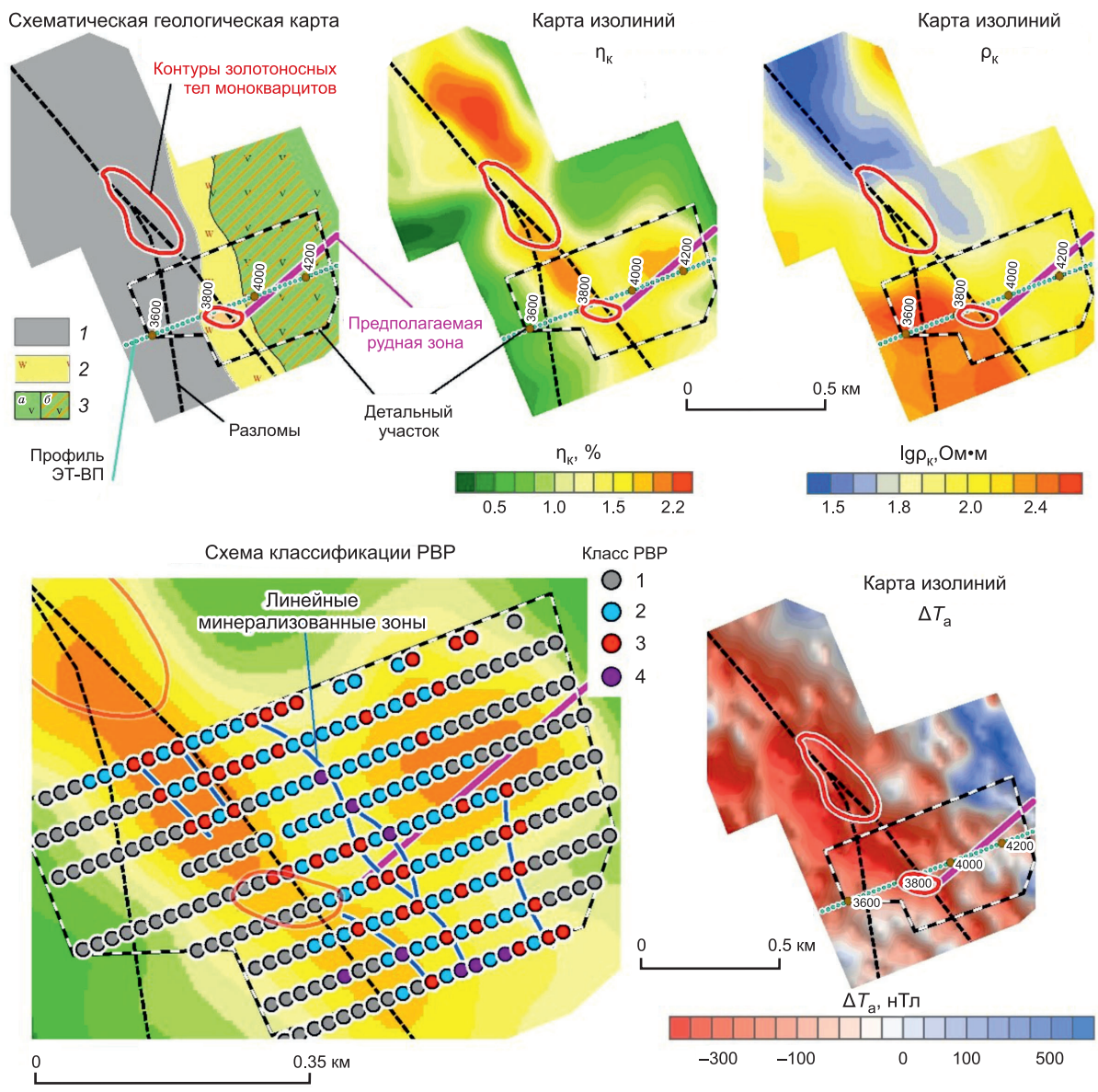


Рис. 1. Результаты геофизических работ в пределах перспективного участка Малотиваямского месторождения золота.

1 — четвертичные отложения, 2 — «вторичные кварциты», 3 — неизменные (а) и пропилитизированные (б) вулканогенно-осадочные образования.

100—50 Ом·м) СЗ простирания. В 200 м восточнее выделяется аналогичная комплексная аномалия изометричной формы, в пределах которой по геологическим данным прогнозируется рудная зона. Таким образом, выделенная аномалия является потенциально перспективной на выявление золотого оруденения. Для уточнения глубинного строения рассматриваемого участка и установления геологической природы выявленной комплексной аномалии выполнены ЭТ-ВП по профилю, пересекающему участок в широтном направлении, и изучение ВХ-ВП на площади 0.3 км² по данным электропрофилирования ВП-СГ. Измерения выполнены с помощью десятиканального измерителя ElrecPro (IRIS Instruments Ltd.) и генератора ВП-1000 (ООО «НПК Элгео») при двух токовых режимах, различающихся длительностью импульсов тока 1 и 8 с.

Восстановленные по данным ЭТ-ВП разрезы распределения поляризуемости и удельного электрического сопротивления (использована программа ZondRes2D) приведены на рис. 2. Отчетливо видно, что перспективная аномалия поляризуемости в восточной части детального участка работ (пикеты 4000—4250), выделенная по данным ВП-СГ, имеет сложное строение — обусловлена двумя телами.

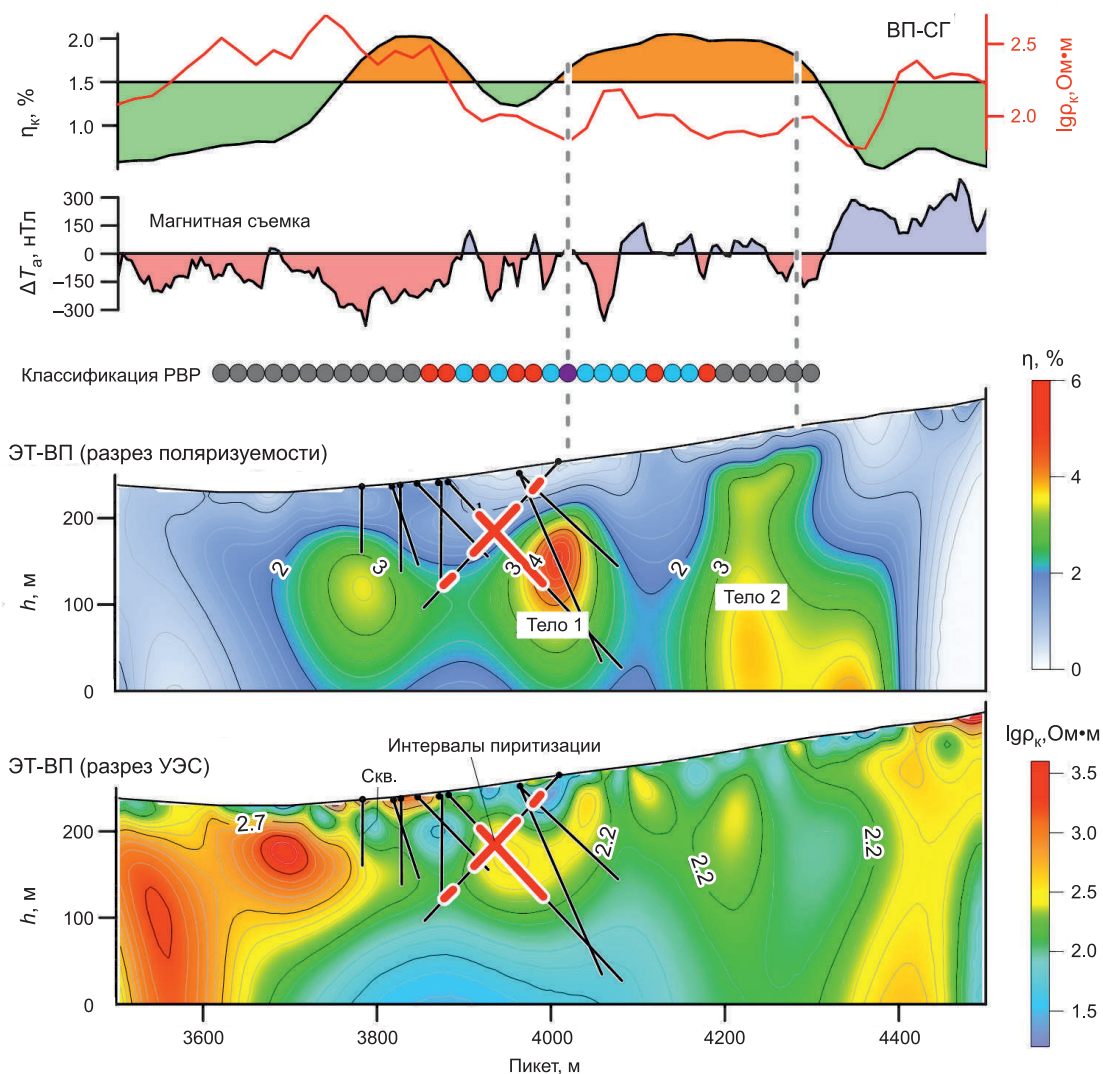


Рис. 2. Результаты ЭТ-ВП по профилю, пересекающему золотоносную структуру на Малетойваямском месторождении золота.

Положение профиля показано на рис. 1. Классы РВР см. на рис. 3.

Учитывая, что повышенной поляризуемостью обладают и неизменные вулканиты и сульфидизированные породы, установить природу аномалий сложно. Однако совместный анализ результатов ВХ-ВП и ЭТ-ВП позволяет это сделать.

Анализ данных ВП-СГ проведен на основе ДД, по результатам которой восстановлены РВР. По типу РВР разделены на четыре класса (рис. 3): 1) неизменные образования вулканогенно-осадочной толщи и 2) интенсивно измененные породы (метасоматиты), не содержащие повышенных концентраций сульфидов; породы, содержащие повышенные концентрации сульфидов («вкрапленные») (3) и «прожилковые» (4)).

Неизменные и слабоизмененные образования вулканогенно-осадочной толщи характеризуются «плоским» типом РВР, не содержащим пиков (см. рис. 3, а). Метасоматически измененные породы характеризуются «J-образным» типом РВР, в котором преобладают процессы поляризации с большими $\tau > 10$ с (см. рис. 3, б). В класс «вкрапленные» объединены РВР, содержащие четко проявленный пик, время релаксации которого изменяется от 0.5 до 3 с (см. рис. 3, в). Подобные РВР установлены для пород, содержащих изометричные электропроводящие включения. В класс «прожилковые» объединены РВР с «J-образным» типом (отличаются от класса «измененные породы» более высокой интенсивностью процессов поляризации с большими $\tau > 10$ с (см. рис. 3, в)). Часть РВР имела промежуточный тип, что осложняло их формализованную классификацию.

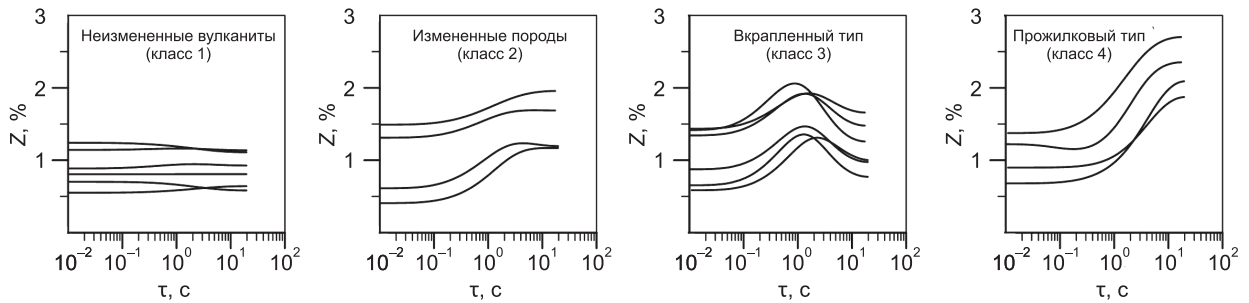


Рис. 3. Классификация пород по форме РВР.

Описание классов РВР приведено в тексте.

Подходы, предложенные в работах [Nordsiek, Weller, 2008; Гурин и др., 2015], не позволили дифференцировать РВР по площади. Последнее обусловлено низкой интенсивностью ВП пород и многообразием типов РВР.

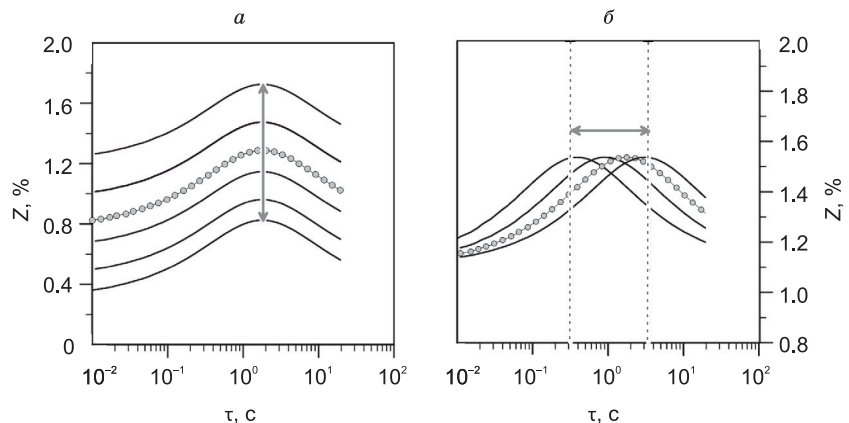
По этой причине мы использовали новый подход — автоматическая классификация РВР на основе алгоритма распознавания фотографий лиц людей «Eigenface» (<http://www.face-rec.org>). Алгоритм «Eigenface» использует метод главных компонент (понижение размерности или выбор информативных признаков образов) для выбора базисных векторов нового пространства с «оптимальной» ориентировкой осей, а в качестве метрики, оценивающей меру близости РВР к эталонной выборке, — расстояние Махаланобиса. В упрощенном виде работа алгоритма заключается в сравнении рядового РВР с РВР из эталонной выборки (в пределах которой выделены классы — типы пород) и присваивании ему номера класса.

В каждом выделенном классе РВР имеют близкую форму, но различаются интенсивностью процессов релаксации (смещение вверх) или временем релаксации, отвечающим пику (смещение пика вдоль горизонтальной оси). Для каждого класса были выделены наиболее типичные РВР, которые аппроксимировались одной или несколькими моделями Коул-Коул, что позволило создать «эталонные» РВР. Далее полученные «эталонные» РВР трансформировались (изменялась суммарная интенсивность процессов релаксации (смещение вверх) и/или время релаксации, отвечающее пику (смещение вдоль горизонтальной оси)). В результате каждый класс эталонной выборки содержал от 10 до 60 образцов РВР. На рисунке 4 приведен пример, поясняющий создание эталонной выборки для класса 3 (породы с вкрапленными сульфидами).

Составленная по результатам классификации РВР схема использована для визуализации ВХ-ВП (см. рис. 1). На схеме в центральной части детального участка отчетливо выделяется полоса интенсивно измененных пород СЗ простирания, отвечающая РВР второго класса. В то время как на картах изолиний ρ_k или η_k измененные породы не выделяются, потому что повышенной электропроводностью обладают не только вторичные кварциты, но и туфы неизмененных «вмещающих» вулканитов. Кроме того, в пределах зоны измененных пород на схеме классификации РВР также выделяются линейные зоны сульфидизации, различающиеся текстурой пород (преобладание вкрапленности или прожилков сульфидов). Совместный анализ данных магнитной съемки и электроразведки методом ВП (ВП-СГ и ЭТ-ВП) позволяет полагать, что выделенные зоны сульфидизации отвечают минерализованным разрывным нарушениям, не имеющим прямой связи с золотым оруденением.

Рис. 4. Создание РВР эталонной выборки класса 3 (породы с вкрапленностью пирита).

a — изменение интенсивности РВР (которое может быть связано с изменением содержания пирита); *b* — изменение времени релаксации (которое может быть связано с изменением размера зерен пирита). Линией с кружками показано «эталонное» РВР, используемое для создания класса.



Кроме того, на карте классов РВР отчетливо видно, что перспективная аномалия поляризуемости разделяется на две части (см. рис. 1, 2): с одной стороны, выделяются РВР первого класса (неизменные вулканиты), а с другой, — РВР второго класса («вторичные кварциты»). При этом граница между отмеченными классами расположена примерно в центральной части аномалии поляризуемости (что согласуется с данными ЭТ-ВП). Совместный анализ результатов изучения ВХ-ВП, ЭТ-ВП и магнитной съемки позволяют утверждать, что в пределах выделенной перспективной аномалии поляризуемости первое тело представлено сульфидизированными породами (по данным бурения — интенсивно пиритизированными «вторичными кварцитами»), а второе тело — неизменными вулканитами. На основании этих данных «восточная» аномалия поляризуемости переведена в ранг неперспективных. Были даны рекомендации не выполнять в ее пределах поисковое бурение.

ИЗУЧЕНИЕ ВХ-ВП ЗОЛОТОНОСНОЙ ЗОНЫ И ВМЕЩАЮЩИХ ЕЕ ПОРОД НА РУДОПРОЯВЛЕНИИ ЗОЛОТА ЯСНОЕ (п-ов Таймыр)

Рудопроявление Ясное золото-сульфидно-кварцевого типа локализовано в углеродистых вулканогенно-карбонатно-терригенных формациях позднего докембрия (типа Енисейского кряжа), которые прорваны нижнерифейскими силлами габбро-долеритов. Золотоносные минерализованные зоны представлены линейными ореолами березитизированных пород (кварц-серицит-карбонат-сульфидного состава) в телах габбро-долеритов и вмещающих их углеродистых карбонатно-терригенных породах. Структурно золотоносные минерализованные зоны приурочены к разрывным нарушениям и зонам катаклаза. Рудная минерализация, представленная вкрапленным и прожилково-вкрапленным пиритом от 2 до 15 %, сопровождается кварцевым, карбонат-кварцевым прожилкованием, серицитизацией, карбонатизацией, хлоритизацией и графитизацией.

В пределах рудопроявления выполнялись комплексные наземные геофизические работы (магнито-, грави- и электроразведка методами ВП и естественного поля (ЕП)) масштаба 1:5000—1:10 000, а также параметрические измерения вдоль канавы (включая изучение ВХ-ВП в отдельных точках), пересекающей основную золотоносную зону, и отбором образцов из полотна канавы для изучения петрофизических свойств пород. Ниже приводится лишь описание результатов параметрических измерений и изучения ВХ-ВП на опорном профиле. Измерения $\eta_k(t)$ проведены комплектом аппаратуры АИЭ-2 (ООО «НПК Элгео») в широком временном диапазоне от 20 мс до 32 с при трех токовых режимах, различающихся длительностью импульсов тока 1, 8, 32 с четырехэлектродной установкой (А20N5M20B). Анализ временных характеристик выполнен на основе ДД.

По данным ЭП-ВП, габбро-долериты и слабографитизированные известняки выделяются повышенными значениями ρ_k (около 1500—2000 Ом·м), при этом первые характеризуются повышенным магнитным полем, а вторые — интенсивным отрицательным полем U_{EP} и его локальной составляющей ($U_{EP,лок}$), рассчитанной методом осреднения (рис. 5). Графитизированные породы выделяются локальными аномалиями пониженных значений ρ_k , U_{EP} и интенсивными аномалиями η_k (3.5—5.0 %). Линейная зона березитизации — основная золотоносная структура рудопроявления Ясное, приуроченная к минерализованной зоне катаклаза и дробления, выделяется двумя локальными аномалиями повышенных значений η_k интенсивностью до 5—7 % (только по данным ЭП-ВП). Кроме того, на рис. 5, а видно, что подобной аномалией η_k на пикетах 245—290 выделяется еще одна минерализованная зона. Она может рассматриваться в качестве потенциально перспективной на выявление золотого оруденения, если ей отвечает линейная зона березитизации, а не графитизированная зона дробления. Для определения природы выявленной аномалии проведено изучение ВХ-ВП. На рисунке 5, б приведены типичные РВР, восстановленные по результатам измерений в пределах известной и предполагаемой рудных зон, а также вмещающих их пород. Хорошо видно, что породы, различающиеся вещественным составом, имеют разную форму РВР. Неизменные метагаббро-долериты имеют «пологий» тип РВР и низкую интенсивность поляризации, а слабографитизированные известняки — РВР «J-образной» формы, содержащие пик, время релаксации которого составляет около 1 с. Подобное РВР можно объяснить сульфидизацией пород или наличием двух характерных размеров агрегатов графита (пленок и вкрапленников). Графитизированные сланцы также имеют РВР «J-образной» формы, но интенсивность поляризации оказывается в 2—3 раза больше. Кроме того, над интенсивно графитизированными породами установлена нелинейность ВХ-ВП, проявляющаяся в зависимости преобладающего времени релаксации от длительности импульса тока (смещении или растяжении пика в РВР). Отмеченная особенность также может являться дополнительным критерием выделения графитизированных пород. Березиты и березитизированные породы, содержащие пирит, характеризуются РВР, имеющим ярко выраженный пик, время релаксации которого составляет около 0.8—3.0 с. При этом для полнопроявленных березитов кварц-серицит-хлорит-пиритового состава пик в РВР проявлен лучше, а его интенсивность в 2—3 раза больше. РВР, восстановленные в пределах установленной и предполагаемой рудных зон, оказались схожими. Основным отличием между ними является интенсивность пика и процессов релаксации с большими

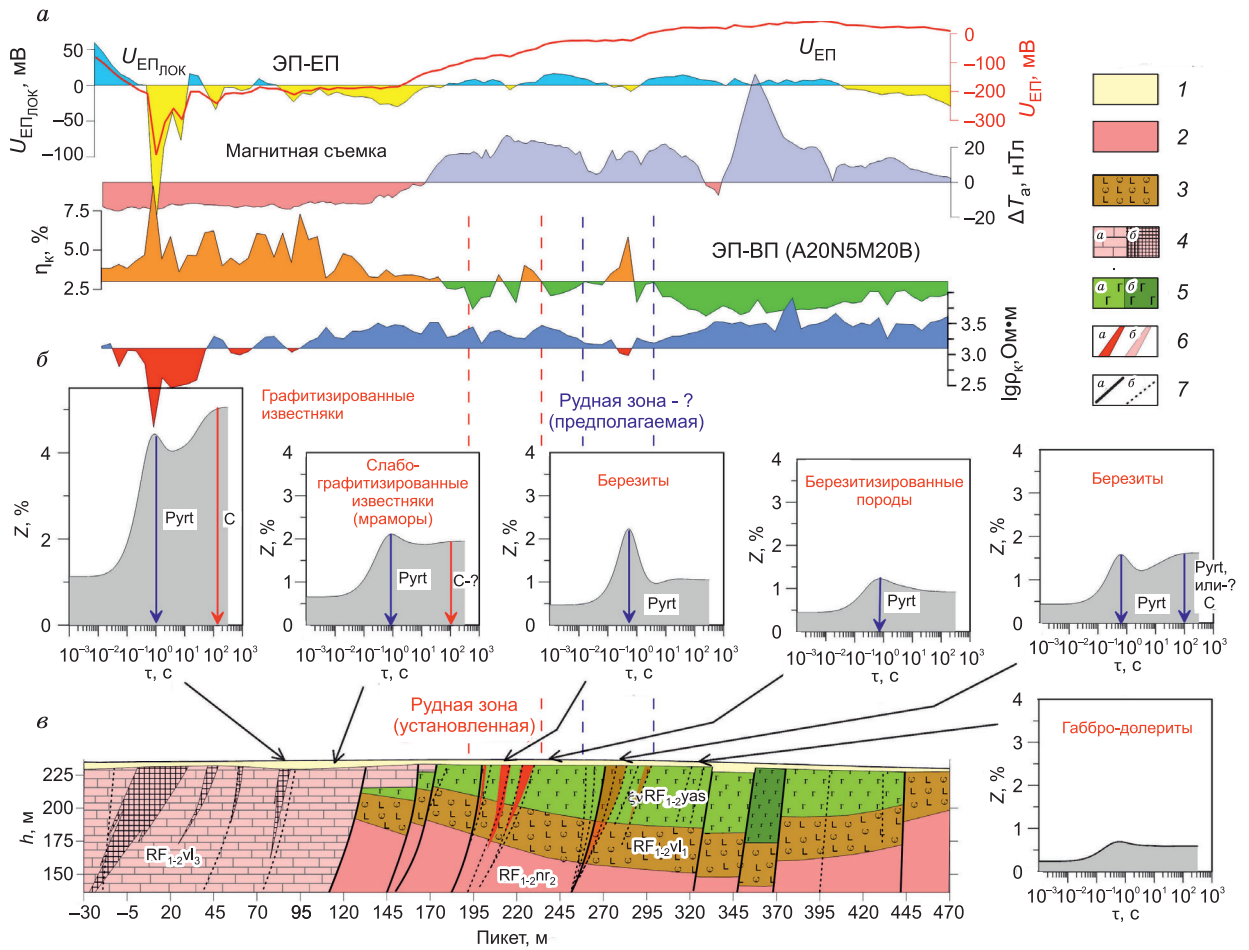


Рис. 5. Результаты параметрических измерений и изучения ВХ-ВП в пределах основной золотоносной зоны рудопроявления Ясное (п-ов Таймыр).

a — графики $U_{EП}$, $U_{EП_{лок}}$ (локальная составляющая $U_{EП}$, рассчитанная способом осреднения (длина интервала осреднения 60 м, шаг перемещения 5 м)), $\rho_{кр}$, $\eta_{кр}$, построенные по данным электропрофилирования ВП, ЕП и магнитной съемки; *b* — RVP, восстановленные в различных точках профиля; *в* — схематический геолого-геофизический разрез: 1 — четвертичные отложения, 2 — алевриты, 3 — вулканогенно-осадочные образования основного состава, 4 — слабо- (*a*) и интенсивно (*б*) графитизированные известняки, 5 — рассланцованные (*a*) и нерассланцованные (*б*) метагаббро-долериты, 6 — интервалы сульфидизации, установленные (*a*) и предполагаемые (*б*), 7 — разрывные нарушения, установленные (*a*) и предполагаемые (*б*).

временами ($\tau > 10$ с), которые мы объясняем наличием как вкрапленности, так и прожилков пирита в березитизированных породах. Последнее подтверждается описанием керна скважин. Таким образом, на основании изучения ВХ-ВП установлено, что выделенная предполагаемая рудная зона, вероятнее всего, представлена линейной зоной березитизации, приуроченной к разрывному нарушению. Это подтверждает высокие перспективы на выявление в ее пределах золотого оруденения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе показано, что стандартный подход к анализу данных ВП в сложных ситуациях имеет ограничения и может приводить к неоднозначности геологической интерпретации, так как для выявления геологической природы аномалий используется только один критерий — интенсивность аномалий поляризуемости. В благоприятных случаях разбраковка и детализация аномалий поляризуемости может быть выполнена на основе изучения ВХ-ВП.

По результатам изучения ВХ-ВП на месторождении золота Малетойвам и рудопроявлении золота Ясное показана возможность оценки структурно-текстурных особенностей и вещественного состава пород, которые могут быть использованы для ранжирования аномалий поляризуемости по степени перспективности или выявления их геологической природы. При этом «конфликт с производством», возникающий при изучении ВХ-ВП (снижение производительности работ), можно разрешить оптималь-

ным выбором методики и техники проведения полевых работ. Мы показываем, что основным фактором, сдерживающим широкое использование спектрального ВП при поисках рудных месторождений, является не низкая производительность работ, а отсутствие методик анализа ВХ-ВП. Предложенный нами подход автоматической классификации РВР на основе алгоритмов распознавания образов эталонного объекта позволяет существенно упростить анализ и интерпретацию ВХ-ВП. Мы надеемся, что его развитие приведет к более частому использованию изучения ВХ-ВП при поисках рудных месторождений.

Авторы благодарят д.г.-м.н. Н.О. Кожевникова и анонимного рецензента за конструктивные комментарии, которые позволили существенно улучшить работу.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ-DFG № 20-47-04402 «Развитие теории вызванной поляризации применительно к поискам месторождений стратегического сырья».

ЛИТЕРАТУРА

Гурин Г.В. Опыт применения геофизических методов при поисках эпитермальных месторождений золота (на примере Малетойвьямского золоторудного поля, Камчатка) // Литосфера, 2021, т. 21, № 1, с. 116—132, doi: 10.24930/1681-9004-2021-21-1-116-132.

Гурин Г.В., Тарасов А.В., Ильин Ю.Т., Титов К.В. Использование дебаевской декомпозиции для анализа данных профилирования методом вызванной поляризации (золото-серебряное месторождение Джульетта, Магаданская обл.) // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (12), с. 2222—2239, doi: 10.15372/GiG20151208.

Гурин Г.В., Тарасов А.В., Ильин Ю.Т., Титов К.В. Особенности временных характеристик вызванной поляризации в неоднородных средах (по результатам двумерного численного моделирования) // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (5), с. 768—782, doi: 10.15372/GiG20170507.

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.

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, <https://doi.org/10.1093/gji/ggu490>.

Kemna A., Binley A., Cassiani G., Niederleithinger E., Revil A., Slater L., Williams, K.H., Orozco A.F., Haegel F.-H., Hördt A., Kruschwitz S., Leroux V., Titov K., Zimmermann E. An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications // Near Surf. Geophys., 2012, v. 10, p. 453—468, doi: 10.3997/1873-0604.2012027.

Luo Y.Z., Zhang G. Theory and application of spectral induced polarization. SEG, 1998, 165 p., <https://doi.org/10.1190/1.9781560801856>.

Nordsiek S., Weller A. A new approach to fitting induced-polarization spectra // Geophysics, 2008, v. 73, p. F235—F245, <https://doi.org/10.1190/1.2987412>.

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, <https://doi.org/10.1190/1.1440839>.

Tarasov A., Titov K. Relaxation time distribution from time domain induced polarization measurements // Geophys. J. Int., 2007, v. 170, p. 31—43, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03376.x.

Tarasov A., Gurin G. Spectral induced polarization of the ore zone of the gold deposit Sukhoi Log // 4th Int. Workshop on Induced Polarization. Aarhus, Denmark, 2016.