



Оригинальная статья / Original article
УДК 550.379

Использование одномерной и трехмерной инверсии для определения поляризационных параметров рудных тел на Горном Алтае

© С.В. Бухалов^a, А.Ю. Белова^b, Ю.А. Давыденко^c

^{a,b,c}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

^{a,b,c}ООО «Гелиос», г. Иркутск, Россия

^cИнститут земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель данной статьи заключается в исследовании полиметаллического рудопроявления на Горном Алтае, выполненном в условиях естественного залегания с помощью микроустановок (измерительных установок с малым шагом) для качественного определения геоэлектрических характеристик рудных тел. Для определения геоэлектрических характеристик рудопроявления изучаемая среда возбуждалась последовательностью разнополярных импульсов тока в генераторном диполе, а электромагнитное поле регистрировалось приемной линией по технологии электромагнитного зондирования и вызванной поляризации. Для построения моделей среды применялась инверсия нестационарных электромагнитных полей в рамках одномерных и трехмерных моделей с учетом эффекта вызванной поляризации. Зоны с аномальными поляризационными характеристиками, полученные в результате одномерной инверсии, коррелируют с зонами повышенного содержания серебра и меди, установленными при детальном геохимическом опробовании канавы. В процессе трехмерного моделирования использовались граничные условия, когда геометрия рудных тел задавалась по геологическому разрезу, а их свойства – по данным одномерной инверсии. В результате нескольких итераций аномалии поляризационных параметров пространственно совпадали с положением рудных тел на геологическом разрезе. Расположенная за пределами электроразведочного профиля аномалия времени релаксации соответствует известной рудной жиле, которая не задавалась в начальном приближении, что говорит о высокой чувствительности технологии электромагнитного зондирования и вызванной поляризации к поляризационным характеристикам среды. Исследование микроустановками рудопроявлений с сульфидной минерализацией позволяет получать информацию о поляризационных характеристиках, пространственном положении, угле падения и размере рудных объектов. Данный подход может использоваться в процессе комплексной интерпретации геолого-геофизических данных площадных электромагнитных зондирований, поставленных с целью выявления перспективных рудопроявлений и оптимизации поискового бурения и горных работ.

Ключевые слова: электромагнитные зондирования, вызванная поляризация, сульфидная минерализация, одномерная инверсия, трехмерная инверсия

Благодарности: Авторы признательны коллегам из ОСП «Горно-Алтайская экспедиция» за предоставление материалов и содействие в работе: Д.А. Шмойлову (директор), Ю.А. Сморокову (начальник геофизического отряда), С.И. Федаку (главный геолог), Ю.А. Фалалееву (ведущий геолог Ишинской партии). Работа выполнена при поддержке базовой части государственного задания Министерства образования и науки РФ № 13.7232.2017/8.9.

Информация о статье: Дата поступления 1 августа 2019 г.; дата принятия к печати 27 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2019 г.

Для цитирования: Бухалов С.В., Белова А.Ю., Давыденко Ю.А. Использование одномерной и трехмерной инверсии для определения поляризационных параметров рудных тел на Горном Алтае. *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 3. С. 312–323.



One-dimensional and three-dimensional inversions in evaluating the ore bodies' polarization parameters in the Altai Mountains

© Sergei V. Bukhalov^a, Anastasia Y. Belova^b, Yuri A. Davydenko^c

^{a,b,c}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^{a,b,c}Gelios, Ltd., Irkutsk, Russia

^cInstitute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the work is to study natural-mode polymetallic ore occurrences in the Altai Mountains using microinstallations (small-step measuring devices) for a qualitative evaluation of the ore bodies' geoelectric characteristics. To evaluate the ore bodies' geoelectric characteristics, the investigated medium was excited by a sequence of multidirectional current pulses in a generator dipole, and the electromagnetic field was registered by the receiving line by the technique of electromagnetic sounding and induced polarization. For the purposes of the medium modeling, an inversion of the non-stationary electromagnetic fields was applied within one-dimensional and three-dimensional models with the account of the induced polarization effect. The zones with anomalous characteristics that were obtained with the one-dimensional inversion, correlate with the high silver- and copper-content zones defined by the means of the detailed geochemical sampling of the ditch. The three-dimensional modeling process used the following border conditions: the geometry of the ore bodies was set by the geological section, and their properties, by the one-dimensional inversion data. The polarization parameter anomalies obtained after several iterations have shown a spatial coincidence with the ore bodies position on the geological section. The relaxation time anomaly that is beyond the electrical survey profile corresponds to the known ore seam that had not been set in the initial approximation, which suggests a high sensitivity of the electromagnetic sounding and induced polarization technique to the polarization characteristics of the ore bodies. The study of the sulfide-mineralization ore bodies with the microinstallations provides information on the ore bodies' polarization characteristics, spatial position, angle of incidence, and size. The suggested approach can be used in the geological-geophysical interpretation of the areal electromagnetic sounding data to define promising ore occurrences and optimize the prospect drilling and mining.

Keywords: electromagnetic sounding, induced polarization, sulfide mineralization, one-dimensional inversion, three-dimensional inversion

Acknowledgements: We would like to thank our colleagues from Gorno-Altai Expedition JSC for their assistance: D. Shmoilov (Director), Smorokov Yu.A. (Head of the Geophysical Group), Fedak S.I. (Chief Geologist), Falaleev Yu.A. (Lead Geologist of the Ishinsky Geological Party). The work has been realized with the support of the base part of the Government Assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation №13.7232.2017/8.9.

Information about the article: Received August 1, 2019; accepted for publication August 27, 2019; available online September 30, 2019.

For citation: Bukhalov S.V., Belova A.Y., Davydenko Y.A. One-dimensional and three-dimensional inversions in evaluating the ore bodies' polarization parameters in the Altai Mountains. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2019;42(3):312–323. (In Russ.)

Введение

Благодаря исследованиям поверхностных рудопроявлений в условиях естественного залегания при моделировании переходных процессов возможно определять геоэлектрические характеристики рудных тел и вмещающих пород. Использование данных характеристик позволяет существенно уменьшить неоднозначность в решениях обратных задач при моделировании площадных электромагнитных зондирований и выполнить

качественную геолого-геофизическую интерпретацию.

Целью исследования является определение качественных характеристик рудных тел в условиях естественного залегания по данным технологии электромагнитного зондирования и вызванной поляризации (ЭМЗ-ВП) [1] микроустановками с помощью инверсии данных в рамках одномерных и трехмерных моделей.



Методы исследования

В работе использованы эмпирические и теоретические методы исследования. Эмпирическими методами являются измерение с помощью электромагнитных зондирований и сравнение результатов с геологическим очерком по результатам геохимического опробования и бурения. Теоретическими методами является моделирование горизонтально-слоистой среды через расчет прямой задачи геофизики и анализ полученных данных.

Использование методов вызванной поляризации (ВП), основанных на изучении процесса накопления заряда и его последующего распределения в породе под действием тока [2–4], позволяет вносить дополнительную характеристику для интерпретации электроразведочных данных. Природа вызванной поляризации – электрохимическая [5–8].

В методах ВП выделяют два вида измерений [9, 10]:

- измерения во временной области;
- измерения в частотной области.

Во временной области измеряется спад электрического поля после выключения тока, представляющего собой разнополярный импульс [11]. В частотной области для возбуждения в породах вторичных электрических полей ВП используют меандр, то есть разнополярные импульсы тока без пауз [12].

Для моделирования методов ВП используются феноменологические модели. Наиболее используемой является модель частотной дисперсии Cole-Cole [13–18], которая хорошо работает в рамках одномерной горизонтально-слоистой среды. При моделировании данных во временной области используется аналог формулы Cole-Cole, описанный В.В. Кормильцевым в 1989 г. [19]. Измерения, рассмотренные в данной работе, производились во временной области.

В рамках полевых работ с АО «Горно-Алтайская экспедиция» с октября 2015 г. по технологии ЭМЗ-ВП были проведены площадные геофизические изыскания на участке Туравитый [20], который

находится на территории Чойского административного района в северо-восточной части Республики Алтай. С целью качественного определения геоэлектрических характеристик рудопоявлений на участке работ микроустановками были произведены исследования объекта, представляющего собой канаву ручной и бульдозерной проходки длиной 103 м с выходом рудной жилы, содержащей сульфидную минерализацию. Для этого по всей длине канавы была заземлена приемная линия в рудное тело длиной 96 м. Шаг между электродами составил 12 м, длина питающей линии – 107,5 м (рис. 1).

В геологическом смысле (см. рис. 1) канава № 19 представляет собой вскрытые метасоматически измененные, неравномерно пиритизированные, пятнами и линзами эпидотизированные, окварцованные и скарнированные алевролиты и песчаники, прорванные телами гранит-порфиров, пиритизированных кварцевых диоритов и диоритов (см. рис. 1). В южной части канавы в интервале 0–30 м на контакте с диоритами вскрыты метасоматически измененные песчаники, по результатам изучения шлифов представленные метасоматитами КПШ-актинолит-эпидотового состава, местами с примесью биотита и амфибола, в которых по результатам анализов установлены сплошь повышенные содержания золота до 0,1 г/т, серебра – до 0,7 г/т и меди – до 200 г/т, слегка повышенные значения свинца, цинка и кобальта. В двух пробах по пробирному анализу содержания золота составили 0,13 и 0,18 г/т, в интервале 26,3–29,1 м – 3,66 и 0,46 г/т. Средневзвешенное содержание золота на мощность 2,8 м составило 1,72 г/т (рудное пересечение первого рудного тела № 1). По результатам приближенно-количественного спектрального анализа (ПКСА) содержания в рудной пробе серебра – 1,7 г/т, меди – 640 г/т, в интервале 67–73,8 м в выветрелых диоритах и песчаниках на контакте с ними также установлены повышенные содержания золота

Геологический разрез по линии А-В (канавы 19 – скважины 63–64)

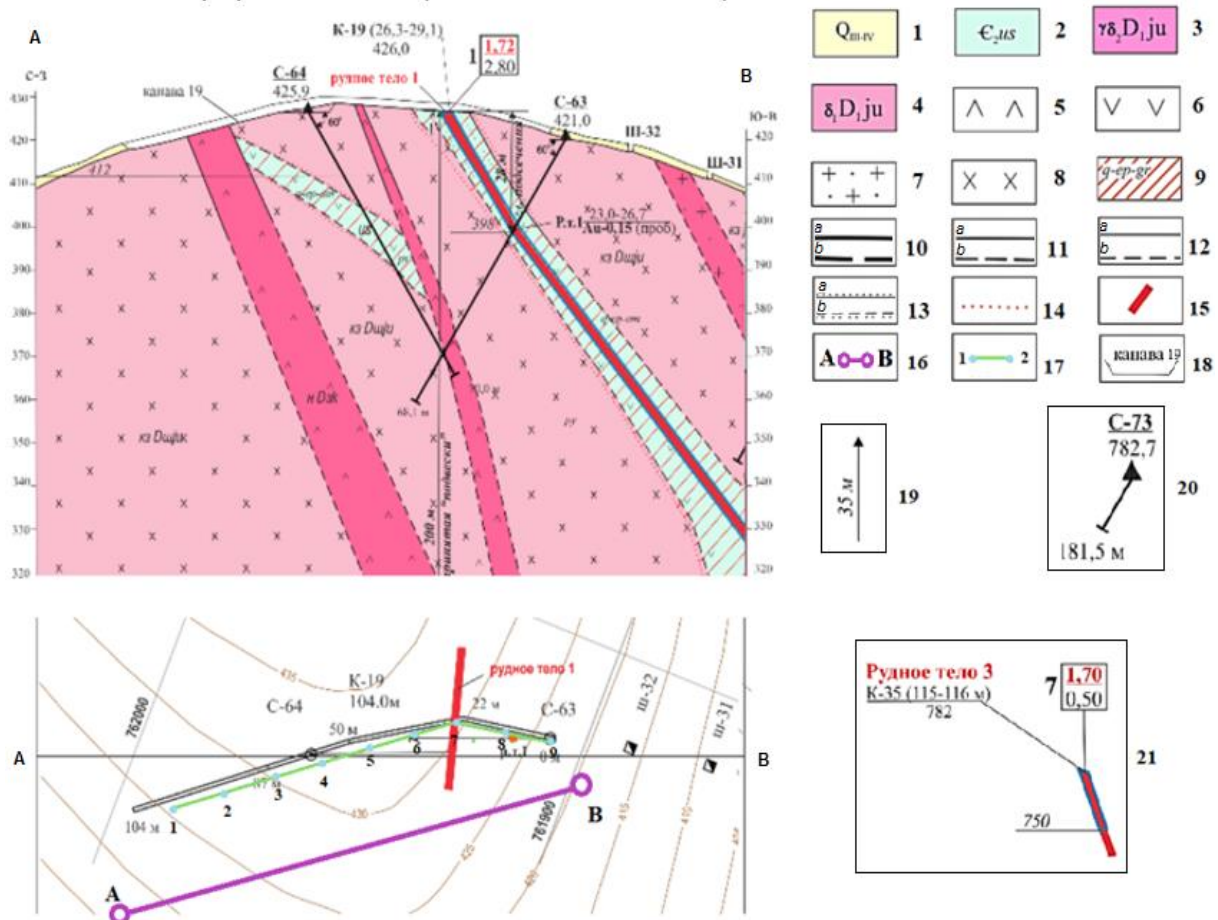


Рис. 1. Геологический разрез канавы со схемой расположения приемной и питающей линий электромагнитного зондирования и вызванной поляризации и геохимического пробоотбора:
1 – аллювиальные, аллювиально-делювиальные, озерно-аллювиальные озерно-болотные отложения: галечники, пески, глины, илы, суглинки; 2 – ускуцуская свита; лавы и туфы андезитовых, базальтовых, порфиров, реже туффиты, туфобрекчии, прослои и пачки алевролитов, песчаников, гравелитов, конгломератов; 3 – вторая фаза – крупно-среднезернистые плагиограниты, гранодиориты, кварцевые диориты; зоны метасоматических изменений, скарны гранатовые, пироксен-гранатовые; 4 – первая фаза – мелкозернистые диориты, кварцевые диориты; зоны метасоматических изменений, скарны гранатовые, пироксен-гранатовые; 5 – дациты (ζ) (вулканические породы); 6 – андезиты (α) (вулканические породы); 7 – гранит-порфиры (уп) (интрузивные породы); 8 – диориты (δ) (интрузивные породы); 9 – метасоматиты, исходный состав пород, по которым они образовались, не определен (буквенные символы, определяющие состав метасоматитов, проставляются на фоне штриховки); 10 – разломы главные, выходящие на поверхность: достоверные (а) и предполагаемые (б); 11 – прочие разломы, выходящие на поверхность: достоверные (а) и предполагаемые (б); 12 – границы между разновозрастными подразделениями и телами разного состава внутри этих подразделений: достоверные (а) и предполагаемые (б); 13 – границы несогласованного залегания стратиграфических подразделений: достоверные (а) и предполагаемые (б); 14 – границы метасоматитов; 15 – выход рудного тела на поверхность под рыхлые отложения; 16 – питающая линия АВ электромагнитного зондирования и вызванной поляризации; 17 – приемная линия MN электромагнитного зондирования и вызванной поляризации; 18 – канавы, пройденные Ишинской партией, и их номера; 19 – глубина подсечения, величина интерполяции, экстраполяции рудного тела на глубину или «подвески» при расчете ресурсов; 20 – скважины, пробуренные Ишинской партией, в числителе – абсолютная отметка устья, м, в знаменателе – глубина скважины, м; 21 – рудное тело, его номер и номер пересечения: слева в числителе – номер выработки, в скобках – рудный интервал, выявленный по результатам анализов, в знаменателе – абсолютная отметка пересечения; в квадрате в числителе – среднее содержание золота по рудному пересечению по результатам пробирного анализа, в знаменателе – его горизонтальная мощность, м, слева – номер пересечения; синим цветом выделен контур подсчета ресурсов по рудному телу, цифра у нижней границы – абсолютная отметка нижней границы подсчета ресурсов



Fig. 1. Geological section of the ditch with the scheme of the receiving and feeding lines of electromagnetic sounding and induced polarization, and geochemical sampling:

1 – alluvial, alluvial-diluvium, lake-diluvium, lake-alluvial lake-bog sediments: pebble, sands, clay, slime, clay loams; 2 – uskuchusk suite; lava and tuff of the andesite and basalt porphyries; less often, tuffites, tuff breccia, interlayers and packs of siltstone, sandstone, gravelite and conglomerate units; 3 – second phase – coarse-to-medium-grain plagiogranites, granodiorites, quartz diorites; metasomatic transformation zones, garnet and pyroxene-garnet scars; 4 – first phase – fine-grain diorites, quartz diorites, metasomatic transformation zones, garnet and pyroxene-garnet scars; 5 – dacites (ζ) (volcanic rocks); 6 – andesites (α) (volcanic rocks); 7 – granite-porphyries ($\gamma\pi$) (intrusive rocks); 8 – diorites (δ) (intrusive rocks); 9 – metasomatites, with the initial rock-forming structure undefined (letter symbols defining the metasomatites' structure are indicated against the crosshatch background); 10 – outcropping main faults: proved (a) and estimated (b); 11 – other outcropping faults: proved (a) and estimated (b); 12 – borders between the different-age units and different-structure bodies within the units: proved (a) and estimated (b); 13 – borders of the inconsistent occurrence of the stratigraphic units: proved (a) and estimated (b); 14 – borders of the metasomatites; 15 – ore body outcrop under the unconsolidated deposits; 16 – AB receiving line of electromagnetic sounding and induced polarization; 17 – MN receiving line of electromagnetic sounding and induced polarization; 18 – ditches driven by the Ishinsk party, and their numbers; 19 – undercutting depth, and the depth interpolation and extrapolation values of the ore body or 'hanging' when calculating the resources; 20 – wells drilled by the Ishinsk party: in the numerator, an absolute heel mark, m; in the denominator, the well depth; 21 – the ore body, its number and the intersection number: in the numerator on the left, the workings' number; in brackets, the ore interval defined by the analysis results; in the denominator, the absolute intersection mark; in the numerator (box), average gold content on the ore intersection by the assay analysis results, in the denominator, the body horizontal thickness, m; on the left, the intersection number; in the blue color, the contour of the resources calculation for the ore body, the figure at the lower border, the absolute mark of the lower border of the resources calculation

по сокращенному химическому анализу (СХА) от 0,03 до 0,15 г/т, по пробирному – до 0,24 г/т (П13). Полный список химических элементов, выделенных с помощью геохимического пробоотбора по всей длине канавы выглядит следующим образом: Ag, As, B, Ba, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Ge, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, Sr, V, W, Zn.

Результаты исследования

Одномерная инверсия выполнена в рамках поляризационной модели Cole-Cole [13], описывающей процессы ВП с точки зрения частотной дисперсии электрического сопротивления среды:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - \eta \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\},$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление (УЭС); ρ_0 – сопротивление на постоянном токе; i – мнимая единица; ω – круговая частота; η – коэффициент поляризуемости среды ($0 \leq \eta \leq 1$); τ – постоянная времени поляризационного процесса (время релаксации); c – показатель степени, определяющий ширину экспоненциального спектра переходной характеристики ВП ($0 \leq c \leq 1$).

При инверсии использовалась горизонтально-слоистая поляризующая модель, состоящей из двух слоев (таблица).

В процессе инверсии менялись параметры только первого слоя, при этом мощность данного слоя была закреплена, в то время как параметры второго опорного высокоомного слоя оставались неизменными. Результат моделирования кривых переходных процессов с высокими и низкими значениями поляризуемости представлен на графике (рис. 2). Данные по УЭС и поляризуемости для разных значений силы тока при измерениях были осреднены вынесены на график (рис. 3) вместе с данными по геохимическому опробованию и анализу металлов серебра и меди.

Изменения параметров сопротивления и поляризационных характеристик, наблюдаемых в направлении падения рудной жилы к концу профиля (после 70 м), объясняются повышением сульфидной минерализации. Угол падения тела невозможно однозначно определить, анализируя результаты инверсии, выполненной в рамках одномерной модели. Дело в том, что в реальной геологической обстановке может меняться не только угол падения рудных тел, но и свойства вмещающей среды, что существенно расширяет рамки неопределенности.



Параметры модели, полученные при подборе кривой с высокой поляризацией и используемые для подбора всех остальных кривых на профиле
Model parameters obtained when choosing a high-polarization curve and used in choosing all other curves on the profile

Номер слоя	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м	Коэффициент поляризуемости среды η , %	Время релаксации τ , с	Показатель степени C	Мощность слоя H , м
1	490,295	68,18	5E-05	0,47	1
2	<i>10000</i>	<i>0</i>	<i>0,01</i>	<i>0,5</i>	∞

Примечание. Курсивом выделены закреплённые параметры модели.
Note. The model fixed parameters are italicized.

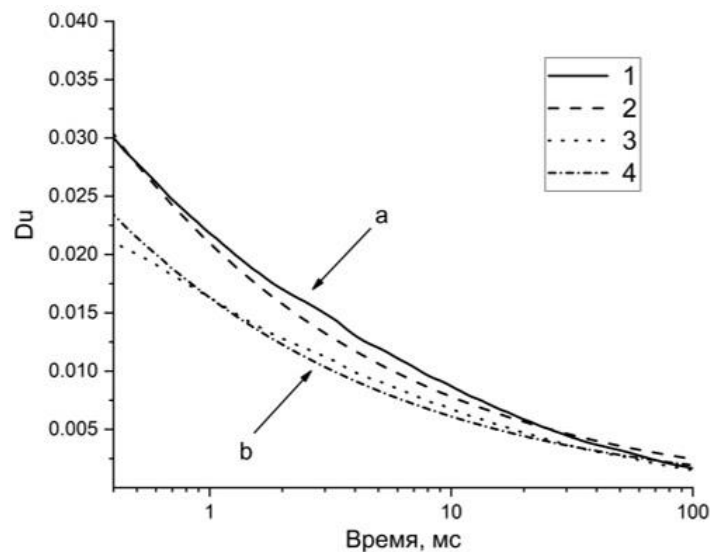


Рис. 2. Наблюдаемые и модельные кривые с высокими и низкими параметрами поляризуемости:
1 – наблюдаемая кривая с высокой поляризуемостью; 2 – модельная кривая с высокой поляризуемостью;
3 – наблюдаемая кривая с низкой поляризуемостью; 4 – модельная кривая с низкой поляризуемостью;
a – значение параметра поляризации Cole-Cole – 68,7 %, среднеквадратическое отклонение – 10,2 %;
b – значение параметра поляризации Cole-Cole – 40,3 %, среднеквадратическое отклонение – 9,4 %

Fig. 2. Observed and model curves with high and low polarization parameters

1 – observed curve with high polarization; 2 – model curve with high polarization;
3 – observed curve with low polarization; 4 – model curve with low polarization;
a – polarization parameter value Cole-Cole – 68.7 %, standard deviation – 10.2 %;
b – polarization parameter value Cole-Cole – 40.3 %, standard deviation – 9.4 %

Улучшения качества интерпретации можно достичь при использовании трехмерного моделирования электроразведочных данных. Трехмерное моделирование представляет собой инверсию с использованием конечно-элементного подхода для решения прямых и обратных задач в горизонтально-слоистой среде. Трехмерная инверсия осуществлялась в программном комплексе ITEM-IP. Математический аппарат, лежащий в основе этого программного комплекса, и

алгоритм инверсии представлены в работах [21–23].

При выполнении трехмерной инверсии были заданы граничные условия, когда свойства вмещающей среды и рудных объектов определялись по результатам решения одномерной обратной задачи, а априорная геологическая информация использовалась для геометризации объектов. В пределах профиля съемки в несколько итераций было подобрано распределение УЭС, при этом

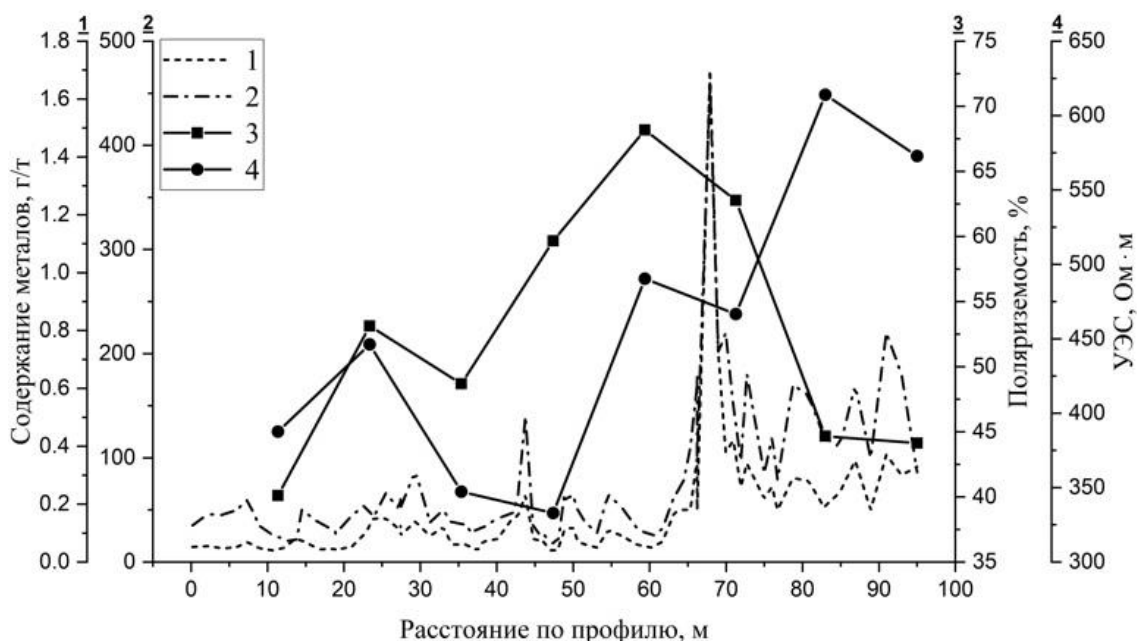


Рис. 3. Концентрация, г/т, серебра и меди в канаве геохимического профиля с параметрами удельного электрического сопротивления и поляризуемости по всей длине канавы:

1 – серебро; 2 – медь; 3 – поляризуемость, полученная при расчете через Cole-Cole модель;
4 – удельное электрическое сопротивление, полученное при расчете через Cole-Cole модель

Fig. 3. Concentration of silver and copper in the geochemical profile ditch with the electrical resistivity and polarization parameters along the full length of the ditch, g/m:

1 – silver; 2 – copper; 3 – polarization obtained by the calculation using the Cole-Cole model;
4 – electrical resistivity obtained by the calculation using the Cole-Cole model

жилам задавались высокие значения (1–5 кОм), а поляризационные параметры (поляризуемость, время релаксации и параметр B , отвечающий за форму спада кривой) определялись автоматически. По результатам трехмерного моделирования было получено устойчивое решение, отражающее распределение поляризационных характеристик на глубину. Аномалии по поляризуемости совпали с контурами рудных тел и соответствуют геологическим представлениям о строении участка (рис. 4). В процессе выполнения трехмерного моделирования граничные условия были заданы только в пределах линии профиля, записанного микроустановками. Тем не менее за пределами профиля съемки по разрезу времени релаксации был выявлен аномалиеобразующий объект (рис. 5) в месте, где по результатам геологической съемки и буровых работ закартирован выход гранитпорфиров. Параметры времени релаксации также являются критериями разделе-

ния рудных объектов при изучении процессов ВП [24, 25]. Аномальные значения поляризуемости рудопроявлений подтверждены бурением и горными выработками (скважина № 64), что позволяет на качественном уровне разделять рудопроявления на перспективные и мало-перспективные и использовать данный подход при последующей интерпретации площадных съемок электромагнитных зондирований.

Заключение

Результаты детальных исследований микроустановками в естественном залегании, проведенные на эталонном участке Ишинской площади, позволяют говорить о высокой чувствительности технологии ЭМЗ-ВП к определению УЭС и поляризационных характеристик рудных тел. Наблюдается высокая корреляция сульфидной минерализации с поисковыми электроразведочными параметрами (УЭС, поляризуемость и время релаксации). Применение трехмерного

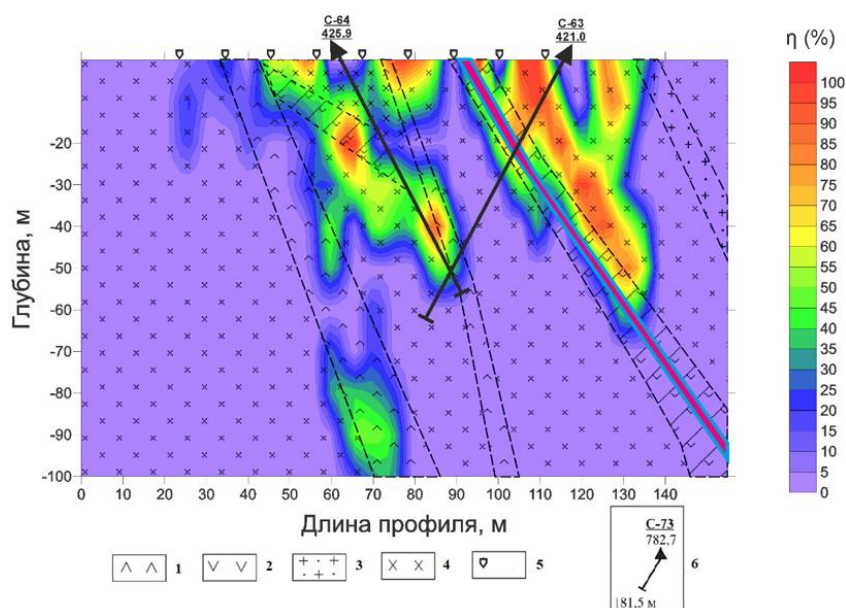


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по поляризуемости, полученный в результате 3D-инверсии данных электромагнитного зондирования и вызванной поляризации:

- 1 – дациты (ζ) (вулканические породы); 2 – андезиты (α) (вулканические породы);
3 – гранит-порфиры ($\gamma\pi$) (интрузивные породы); 4 – диориты (δ) (интрузивные породы);
5 – пикеты приемной линии MN электромагнитного зондирования и вызванной поляризации;
6 – скважины, пробуренные Ишинской партией, в числителе – абсолютная отметка устья, м, в знаменателе – глубина скважины, м

Fig. 4. Geoelectric section by polarization obtained by the 3D inversion of the electromagnetic sounding and induced polarization data:

- 1 – dacites (ζ) (volcanic rocks); 2 – andesites (α) (volcanic rocks);
3 – granite-porphyrries ($\gamma\pi$) (intrusive rocks); 4 – diorites (δ) (intrusive rocks);
5 – stakes of the MN receiving line of electromagnetic sounding and induced polarization;
6 – wells drilled by the Ishinsk party: in the numerator, the absolute heel mark, m; in the denominator, the well depth, m

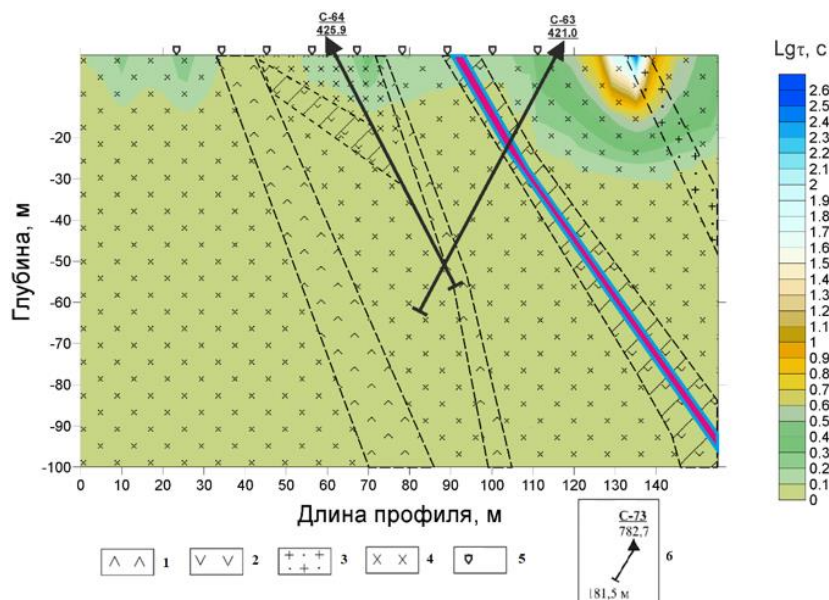


Рис. 5. Геоэлектрический разрез по времени релаксации, полученный в результате 3D-инверсии данных электромагнитного зондирования и вызванной поляризации:

- 1 – дациты (ζ) (вулканические породы); 2 – андезиты (α) (вулканические породы);
3 – гранит-порфиры ($\gamma\pi$) (интрузивные породы); 4 – диориты (δ) (интрузивные породы);
5 – пикеты приемной линии MN электромагнитного зондирования и вызванной поляризации;
6 – скважины, пробуренные Ишинской партией, в числителе – абсолютная отметка устья, м, в знаменателе – глубина скважины, м



Fig. 5. Goelectric section by relaxation time obtained by the 3D inversion of the electromagnetic sounding and induced polarization data:

- 1 – dacites (ζ) (volcanic rocks); 2 – andesites (α) (volcanic rocks);
3 – granite-porphyrines ($\gamma\pi$) (intrusive rocks); 4 – diorites (δ) (intrusive rocks);
5 – stakes of the MN receiving line of electromagnetic sounding and induced polarization;
6 – wells drilled by the Ishinsk party: in the numerator, the absolute heel mark, m ;
in the denominator, the well depth, m

моделирования для данных ЭМЗ-ВП позволяет получать информацию об относительном положении, угле падения и размере рудных объектов. Данная методика по определению поляризационных и геометрических параметров рудных тел может использоваться для определения качественной характеристики рудопро-

явлений и выявления бедной или богатой минерализации. В результате существенно повысится качество геолого-геофизической интерпретации площадных данных электромагнитных зондирований, что позволит оптимизировать программу поискового бурения и горных работ.

Библиографический список

1. Пат. № 2574861, Российская Федерация. Способ измерения и обработки переходных процессов с заземленной линией при импульсном возбуждении поля электрическим диполем с целью построения геоэлектрических разрезов и устройство для осуществления этого способа с помощью аппаратно-программного электроразведочного комплекса (АПЭК «МАРС») / Ю.А. Давыденко, А.Ю. Давыденко, И.Ю. Пестерев, С.В. Яковлев, М.А. Давыденко, А.В. Комягин, Д.М. Шимянский. Заявл. 01.08.2012; опублик. 10.02.2016.
2. Marshall D.J., Madden Th.R. Induced polarization, a study of its causes // *Geophysics*. 1959. Vol. 26. P. 790–816.
3. Гурин Г.В., Тарасов А.В., Ильин Ю.Т., Титов К.В. Оценка объемного содержания электропроводящих минералов по данным метода вызванной поляризации // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Геология и география*. 2014. № 3. С. 4–19.
4. Bleil D.F. Induced polarization, a method of geophysical prospecting // *Geophysics*. 1953. Vol. 18. P. 636–661.
5. Постельников А.Ф. К вопросу о природе вызванной поляризации в осадочных горных породах // *Геология и разведка*. 1959. Vol. 2. P. 126–136.
6. Постельников А.Ф. О природе и механизме образования вызванной поляризации на образцах электропроводящих горных пород // *Труды Центрального научно-исследовательского горноразведочного института*. 1964. № 59. С. 153–164.
7. Bhattacharyya B., Morrison H. Some theoretical aspects of electrode polarization in rocks // *Geophysical Prospecting*. 1963. Vol. 11 (2). P. 62–72.
8. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Л.: Недра, 1980. 446 с.
9. Sumner J.S. Principles of induced polarization for geophysical exploration. Amsterdam: Elsevier, 1976. 277 p.
10. Titov K., Gurin G., Tarasov A., Akulina K. Spectral induced polarization: frequency domain versus time domain // 3rd International Workshop on Induced Polarization (6–9 April). Oléron Island, France, 2014. P. 78–79.
11. Flis M.F., Newman G.A., Hohmann G.W. Induced-polarization effects in time-domain electromagnetic measurements // *Geophysics*. 1989. Vol. 54 (4). P. 514–523.
12. Куликов А.В., Шемякин Е.А. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. М.: Недра, 1978. 157 с.
13. Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and absorption in dielectrics. Alternating current characteristics // *Journal of Chemical Physics*. 1941. Vol. 9 (4). P. 341–351.
14. 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. Vol. 43. P. 588–609.
15. Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Вагин Д.В., Домников П.А. Сравнение различных подходов к численному моделированию трехмерных полей вызванной поляризации // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. 2011. № 2. С. 123–139.
16. Tarasov A., Titov K. Relaxation time distribution from time domain induced polarization measurements // *Geophysical Journal International*. 2007. Vol. 170. P. 31–43.
17. 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. Vol. 77. P. 213–225. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0217.1>.



18. Fiandaca G. Line Meldgaard Madsen and Pradip Kumar Maurya. Re-parameterisations of the Cole-Cole model for improved spectral inversion of induced polarization data // *Near Surface Geophysics*. 2018. Vol. 16. P. 385–399. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2017065>.

19. Кормильцев В.В., Мезенцев А.Н. Электроразведка в поляризующихся средах. Свердловск: Изд-во УрО АН СССР, 1989. 128 с.

20. Давыденко Ю.А., Айкашева Н.А., Башкеев А.С., Фаустова А.Ю., Богданович Д.В. Результаты применения импульсной электроразведки при поиске месторождений рудных полезных ископаемых на горном Алтае // *Инженерная и рудная геофизика 2018*: сб. стат. XIV науч.-практ. конф. и выставки (г. Алматы, 23–27 апреля 2018 г.). 8 с. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91717_\(03.09.2019\)](http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91717_(03.09.2019)).

21. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Trigubovich G.M. Computer modeling of geoelectromagnetic fields in three-dimensional media by the finite element method // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2011. Vol. 47. № 2. P. 79–89.

22. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Tokareva M.G., Trigubovich G.M. Methods and algo-

rithms for reconstructing three-dimensional distributions of electric conductivity and polarization in the medium by finite-element 3D modeling using the data of electromagnetic sounding // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2013. Vol. 49. № 3. P. 329–343.

23. Белова А.Ю., Гуревич Д.В., Богданович Д.В., Айкашева Н.А., Башкеев А.С., Бухалов С.В. [и др.]. Поиск скрытых медно-молибденовых оруденений в Северном Казахстане с помощью технологии электромагнитного зондирования и вызванной поляризации (ЭМЗ-ВП) // *Инженерная и рудная геофизика 2019*: сб. стат. XV науч.-практ. конф. и выставки (г. Геленджик, 22–26 апреля 2019 г.). 11 с. [Электронный ресурс]. URL: [http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=96758_\(03.09.2019\)](http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=96758_(03.09.2019)).

24. Куликов В.А., Яковлев А.Г. Практическое применение временных (частотных) характеристик процесса вызванной поляризации для разделения аномалий от углефицированных пород и сульфидов // *Геофизика*. 2008. № 6. С. 55–59.

25. Куликов В.А., Зорин Н.И., Манжева И.Т., Яковлев А.Г. Разделение аномалий вызванной поляризации по частотным характеристикам дифференциального фазового параметра // *Геофизика*. 2013. № 6. С. 23–31.

References

1. Davydenko YuA, Davydenko AYU, Pesterev IYu, Yakovlev SV, Davydenko MA, Komyagin AV, Shimyanskii DM. *Measurement and processing method for grounded-line transient processes under the pulse excitation of the field by an electric dipole for constructing geoelectric sections, and a device for the method implementation using the hardware-and-software electric prospecting complex (HSEPC "MARS")*. Patent RF, no. 2574861; 2016. (In Russ.)

2. Marshall DJ, Madden ThR. Induced polarization, a study of its causes. *Geophysics*. 1959;26:790–816.

3. Gurin GV, Tarasov AV, Il'in YuT, Titov KV. Ore volumetric content from induced polarization data. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Geologiya i geografiya = Saint-Petersburg University Bulletin. Geology and Geography*. 2014;3:4–19. (In Russ.)

4. Bleil DF. Induced polarization, a method of geophysical prospecting. *Geophysics*. 1953;18:636–661.

5. Postel'nikov AF. On the nature of induced polarization in sedimentary rocks. *Geologiya i razvedka = Geology and Exploration*. 1959;2:126–136. (In Russ.)

6. Postel'nikov AF. On the nature and mechanism of induced polarization formation on the electron-conductive rock samples. *Trudy Tsentral'nogo nauchno-issledovatel'skogo gornorazvedovatel'nogo instituta = Proceedings of the Central Research Mining Prospecting Institute*. 1964;59:153–164. (In Russ.)

7. Bhattacharyya B, Morrison H. Some theoretical aspects of electrode polarization in rocks. *Geophysical Prospecting*. 1963;11(2):62–72.

8. Semenov AS. *Electrical survey by the self-potential method*. Leningrad: Nedra; 1980. 446 p. (In Russ.)

9. Sumner JS. *Principles of induced polarization for geophysical exploration*. Amsterdam: Elsevier; 1976. 277 p.

10. Titov K, Gurin G, Tarasov A, Akulina K. Spectral induced polarization: frequency domain versus time domain. *3rd International Workshop on Induced Polarization*, 6–9 April. Oléron Island, France; 2014. p.78–79.

11. Flis MF, Newman GA, Hohmann GW. Induced-polarization effects in time-domain electromagnetic measurements. *Geophysics*. 1989;54(4):514–523.

12. Kulikov AV, Shemyakin EA. *Electrical survey by the phase method of induced polarization*. Moscow: Nedra; 1978. 157 p. (In Russ.)

13. Cole KS, Cole RH. Dispersion and absorption in dielectrics. Alternating current characteristics. *Journal of Chemical Physics*. 1941;9(4):341–351.

14. Pelton WH, Ward SH, Hallof PG, Sill WR, Nelson PH. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*. 1978;43:588–609.

15. Persova MG, Soloveichik YuG, Vagin DV, Domnikov PA. Comparison of different numerical modeling approaches for three dimensional induced



polarization. *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*. 2011;2:123–139. (In Russ.)

16. Tarasov A, Titov K. Relaxation time distribution from time domain induced polarization measurements. *Geophysical Journal International*. 2007;170:31–43.

17. Fiandaca G, Auken E, Gazoty A, Christensen AV. Time-domain induced polarization: full-decay forward modeling and 1D laterally constrained inversion of Cole-Cole parameters. *Geophysics*. 2012;77:213–225. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0217.1>.

18. Fiandaca G. Line Meldgaard Madsen and Pradip Kumar Maurya. Re-parameterisations of the Cole-Cole model for improved spectral inversion of induced polarization data. *Near Surface Geophysics*. 2018;16:385–399. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2017065>.

19. Kormiltsev VV, Mezentshev AN. *Electrical survey in polarizing media*. Sverdlovsk: Ural Branch of the Academy of Sciences of the USSR; 1989. 128 p. (In Russ.).

20. Davydenko YuA, Aikashva NA, Bashkeev AS, Faustova AYU, Bogdanovich DV. The results of the pulse electrical survey application in prospecting for ore mineral deposits in the mountainous Altai. *Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2018: sbornik statei 14 nauchno-prakticheskoi konferentsii i vystavki = Engineering and mining geophysics in 2018: collected works of the 14th Science-to-practice Conference and Exhibition*, 23–27 April 2018, Almaty. 8 p. Available from: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91717> [Accessed 3rd September 2019].

21. Persova MG, Soloveichik YG, Trigubovich GM. Computer modeling of geoelectromagnetic fields in three-dimensional media by the finite element method. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2011;47(2):79–89.

22. Persova MG, Soloveichik YG, Tokareva MG, Trigubovich GM. Methods and algorithms for reconstructing three-dimensional distributions of electric conductivity and polarization in the medium by finite-element 3D modeling using the data of electromagnetic sounding. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2013;49(3):329–343.

23. Belova AYU, Gurevich DV, Bogdanovich DV, Aikashva NA, Bashkeev AS, Bukhalov SV, et al. Exploration for concealed copper-molybdenum ore deposits in Northern Kazakhstan using the techniques of electromagnetic sounding and induced polarization. *Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2019: sbornik statei 15 nauchno-prakticheskoi konferentsii i vystavki = Engineering and Mining Geophysics 2019: collected works of the 15th Research-to-practice Conference and Exhibition*, 22–26 April 2019, Gelendzhik. 11 p. Available from: <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=96758> [Accessed 3rd September 2019].

24. Kulikov VA, Yakovlev AG. The use of induced polarization time/frequency characteristics for carbonized and sulfide rock anomalies determination. *Russian Geophysics*. 2008;6:55–59. (In Russ.)

25. Kulikov VA, Zorin NI, Manzheeva IT, Yakovlev AG. Using of differential phase parameter (DPP) for IP anomalies separation. *Russian Geophysics*. 2013;6:23–31.

Критерии авторства / Authorship criteria

Бухалов С.В., Белова А.Ю., Давыденко Ю.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Sergei V. Bukhalov, Anastasia Y. Belova, Yuri A. Davydenko are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Сведения об авторах / Information about the authors



Бухалов Сергей Владимирович,
ассистент кафедры прикладной геологии,
геофизики и геоинформационных систем,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
инженер-геофизик,
ООО «Гелиос»,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия,
✉ e-mail: xerorodger@yandex.ru



Sergei V. Bukhalov,

Assistant, Department of Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
Geophysicist,
Gelios, Ltd,
83a, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
✉ e-mail: xerorodger@yandex.ru



Белова Анастасия Юрьевна,

аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
инженер-геофизик,
ООО «Гелиос»,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия,
e-mail: bay@gelios-geo.com

Anastasia Y. Belova,

Postgraduate,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
Geophysicist,
Gelios, Ltd,
83a, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: bay@gelios-geo.com



Давыденко Юрий Александрович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры прикладной геологии,
геофизики и геоинформационных систем,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
ведущий инженер,
Институт земной коры,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
генеральный директор,
ООО «Гелиос»,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия,
e-mail: davidenkoya@gmail.com

Yury A. Davydenko,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor, Department of Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
Lead Engineer,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128, Lermontov St., Irkutsk, 664054, Russia,
CEO,
Gelios, Ltd,
83a, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: davidenkoya@gmail.com