

Оригинальная статья / Original article УДК 550.8.013; 550.837.8

Сравнение эффектов вызванной поляризации для гальванической и индукционной установок в методах переходных процессов

© А.С. Башкеев^а

^аИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью данной работы является сравнение аномальных откликов от эффектов вызванной поляризации в методах переходных процессов для гальванической и индукционной установок. Под гальванической понимается установка с использованием горизонтальной электрической линии в конфигурации «линия-линия», а под индукционной – незаземленные контуры в конфигурации «петля-петля». Учет быстро протекающей индукционно-вызванной поляризации, проявляющейся при наличии в среде поляризующихся объектов, позволяет избежать ложных аномалий по удельному электрическому сопротивлению и выделить аномалии по поляризуемости. Сравнение производится с помощью численного моделирования в рамках одномерной модели с учетом частотной дисперсии удельного электрического сопротивления, описываемой формулой Cole-Cole. В рамках примененной модели аномальный вклад вызванной поляризации для гальванической установки оказался больше, чем аномальный вклад индукционно-вызванной поляризации для индукционной установки. Вклад эффектов вызванной поляризации практически не спадает со временем в отличие от эффектов индукционно-вызванной поляризации.

Ключевые слова: численное моделирование, модель Cole-Cole, индукционная установка, гальваническая установка, метод переходных процессов

Благодарности: 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: Башкеев А.С. Сравнение эффектов вызванной поляризации для гальванической и индукционной установок в методах переходных процессов. *Науки о Земле и недропользование.* 2019. Т. 42. № 3. С. 303–311.

Induced polarization effects comparison for galvanic and induction installations in transient electromagnetic methods

© Aiur S. Bashkeev^a

^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the work is to compare the anomalous responses from the IP-effects in transient electromagnetic methods for galvanic and induction installations. By a galvanic installation is meant one using a horizontal electric line in a "line-line" configuration, and by an induction installation, one using ungrounded contours in a "looploop" configuration. Registering the fast decaying induction-induced polarization (IIP) that occurs in the geo-environment in the presence of polarized objects, makes it possible to avoid false electrical resistivity anomalies and to find polarizability anomalies. The comparison is realized using numerical modeling within the one-dimensional model with a frequency dispersion of electrical resistivity (described by the Cole-Cole formula). The modeling has shown that the anomalous IP-effect for the galvanic installation is higher than the IIP effect for the induction installation. The IP effect contribution virtually does not decay with time, as opposed to the IIP effect.

Keywords: numerical modeling, Cole-Cole model, induction configuration, galvanic configuration, transient electromagnetic method

Acknowledgements: The study was supported by the base part of the Government Assignment for Scientific Research from 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: Bashkeev A.S. Induced polarization effects comparison for galvanic and induction installations in transient electromagnetic methods. *Earth Sciences and Subsoil Use.* 2019;42(3):303–311. (In Russ.)

Введение

Метод переходных процессов (МПП) или зондирования становлением поля (3С) в настоящее время широко применяется при решении разнообразных задач прикладной геофизики. Для ЗС теоретически обосновано применение различных типов установок, как диполей, так и контуров¹⁻³ [1], но на практике наиболее широкое распространение получило применение индукционной установки в виде незаземленных контуров, где в качестве генератора и приемника используются петли [2-4], что неслучайно, так как модельное представление кривых МПП (3С) изначально не предполагало наличие эффектов вызванной поляризации (ВП) и рассматривались в качестве помех, мешающих инверсии [5], в то время как гальванические установки с использованием заземленных диполей применялись в основном для исследований эффектов ВП [6, 7], где индукционная составляющая считалась помехой.

На сегодняшний день эффекты ВП успешно учитываются в моделировании данных МПП, в том числе в зондированиях становлением поля в ближней зоне [8, 9]. Надо отметить, что ВП при установке с источником в виде незаземленного контура из-за специфики индукционного возбуждения разреза называется быстропротекающей ИНДУКЦИОННО-ВЫзванной поляризацией (ВПИ) [9]. Процессы, возникающие от эффектов ВП, в методах с гальванической установкой в качестве источника электромагнитного поля в виде горизонтального электрического диполя описаны достаточно давно [10], но одним из первых, использующих (помимо ВП) индукционную составляющую, стал дифференциально-нормированный метод электроразведки (ДНМЭ), активно применяющийся для решения задач по поиску и разведке углеводородов [11, 12]. Развитием идей ДНМЭ для решения рудных задач геофизики занимается метод электромагнитного зондирования и вызванной поляризации (ЭМЗ-ВП) [13].

Методы исследования

В МПП как для гальванической, так и для индукционной установок при измерениях во временной области в большинстве случаев в качестве источника тока используются генераторы (коммутаторы) прямоугольных импульсов. В таком случае при подаче импульсов тока в питающий контур или диполь возникают эффекты электромагнитной индукции и ВП.

Под гальванической установкой в данной работе имеется в виду установка с источником в виде горизонтальной электрической линии (ГЭЛ) или горизонтальный электрический диполь, как в аппаратно-программном электроразведочном комплексе «Марс» [14]. Проходящий через ГЭЛ электрический ток создает поле смешанного типа: поперечное электрическое (TE – transverse electric) и поперечное магнитное (TM – transverse magnetic) поля. Сама линия (провод) является источником индуктивного поля и возбуждает ТЕ-поле в то время, как питающие электроды А и В – ТМ-поле⁴. Под индукционной установкой понимается установка с источником в виде незаземленной рамки, лежащей на дневной поверхности. Проходящий по этой рамке электрический ток возбуждает в отличие от ГЭЛ только TE-поле⁵. Соответственно, индукционная установка заряжает среду только в момент выключения тока, когда изменение магнитного поля резкое

⁵Там же.

¹ Жданов М.С. Электроразведка: учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 316 с.

² Крылов С.С. Геоэлектрика: поля искусственных источников: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 138 с.

³ Могилатов В.С. Импульсная геоэлектрика: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во РИЦ НГУ, 2014. 181 с.

⁴ Там же.

Башкеев А.С. Сравнение эффектов вызванной поляризации... Bashkeev A.S. Induced polarization effects comparison for galvanic...

индуцирует в среде вторичные электрические поля, тогда как гальваническая заряжает среду двумя способами: индукционным, как в индукционной установке, и посредством тока пропускания в токовом импульсе. Из этого следует, что поляризующиеся объекты заряжаются дольше, имеют большую амплитуду по напряжению и, соответственно, дольше разряжаются (рис. 1).

Решение прямой задачи в рамках одномерных горизонтально-слоистых сред будет производиться в частотной области с последующим переходом во временную. Расчет компонентов электромагнитного поля для электрической (*Ex, Ey*) и магнитной (*Hx, Hy, Hz*) составляющих производится через формулы компонент гармонического поля для горизонтально-слоистой среды в квазистационарном приближении, полученные через метод, основанный на спектральных преобразованиях поля⁶. Ознакомиться с исходными формулами можно в работе П.Ю. Пушкарева⁷. Сам расчет компонентов поля выполняется с помощью фильтра Рыжова, где ядерную функцию заменяют аппроксимирующим полиномом, что позволяет существенно ускорить вычисления [15].

Данные алгоритмы используются в программе одномерной инверсии «Mars1D» [16], где производилось решение прямой задачи в рамках одномерной горизонтально-слоистой феноменологической модели Cole-Cole [17], адаптированной для комплексной проводимости Пельтоном [18]. Формула представлена для удельного электрического сопротивления (УЭС):

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

где ρ – частотно-зависимое УЭС; ρ_0 – сопротивление на постоянном токе; *i* – мнимая единица; ω – круговая частота; η – коэффициент стационарной поляризуемости среды (0 ≤ η ≤ 1); *r* – постоянная времени поляризационного процесса (время релаксации); *с* – показатель степени, определяющий ширину экспоненциального спектра переходной характеристики ВП (0 ≤ *c* ≤ 1).

Параметр стационарной поляризуемости *η* определяется следующим образом:

$$\eta = \frac{\rho_0 - \rho_\infty}{\rho_0},\tag{2}$$

где *ρ*₀ и *ρ*_∞ – асимптотические, то есть предельные значения УЭС на нулевой (поле пропускания) и бесконечно боль-шой частоте.

В программе «Mars1D» заданы четыре фоновых модели и четыре модели с наличием поляризующегося слоя (таблица).

Данные модели являются сильно упрощенными и обобщенными моделями разрезов с объектами медно-колчеданного (модели 1, 3) и медно-порфирового (модели 2, 4) типов. Объекты медно-колчеданного типа характеризуются в основном более низкими значениями УЭС в сравнении со вмещающими породами, тогда как объекты медно-порфирового типа обычно не выделяются по УЭС. Параметры Cole-Cole для поляризующегося слоя: параметр стационарной поляризуемости $\eta - 90$ % (коэффициент – 0,9), время релаксации r - 10 с, показатель степени c - 0,5.

Также заданы две установки: с источником и приемником в виде незаземленных контуров («петля-петля») и заземленных диполей («линия-линия») (рис. 2).

Размеры сторон установки «петляпетля» составляют 100 м для генераторной петли Q и 25 м для приемной петли q. Размеры установки «линия-линия» – 400 м для генераторной линии AB и 25 м для приемной линии MN. В первом случае установка соосная, во втором – срединного градиента.

Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Geophysical Methods of Deposit Exploration and Prospecting

⁶ Жданов М.С. Электроразведка: учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 316 с.

⁷ Пушкарев П.Ю., Яковлев А.Г., Яковлев А.Д. Программа решения прямой и обратной одномерной задачи метода частотных зондирований. М., 1999. 13 с.



Рис. 1. Форма регистрируемых сигналов над поляризующейся средой установками «линия-линия» и «петля-петля» Fig. 1. Signals shape registered above the polarized medium by the "line-line" and "loop-loop" configurations

Заданные свойства в рамках модели Cole-Cole Preset properties within the Cole-Cole model

Номер слоя	Мощность слоя <i>h</i> , м	Удельное электрическое сопротивление <i>ρ</i> , Ом⋅м	Стационарная поляризуемость <i>η</i>	Время релаксации <i>т</i> , с	Показатель степени с
1	10	100			
2	40 (модель 1,2) / 340 (модель 3,4)	500	0		
3	20	50 (модель 1, 3) / 500 (модель 2, 4)	0,9	10	0,5
4	œ	3000	0		

Примечание. Курсивом обозначены параметры, изменяющиеся в рамках различных моделей. Note. The parameters that change depending on the model are italicized.



Рис. 2. Геометрия заданных установок: a – установка «петля-петля»; b – установка «линия-линия» Fig. 2. Geometry parameters of the preset installations: a – "loop-loop" configuration; b – "line-line" configuration

Расчеты проводились для тока, равного 1 А, времени импульса и паузы – 1 с, кривые выгружены в значениях мВ/А.

Результаты исследования

Ниже приведены расчеты прямых задач для моделей 1 и 2 (рис. 3). По

модельным представлениям кривых видно, что уровень кривой с наличием в среде ВП для гальванической установки сильно выше и имеет другой знак (см. рис. 3, *а*), в то время как для индукционной установки смена знака происходит на Башкеев А.С. Сравнение эффектов вызванной поляризации... Bashkeev A.S. Induced polarization effects comparison for galvanic...

2,4–2,5 мс для модели 1 и 0,7–0,8 мс для модели 2 (см. рис. 3, *b*).

При увеличении глубины залегания поляризующегося слоя картина изменяется не сильно (рис. 4). С увеличением глубины в кривых, рассчитанных от гальванической установки, появляется переход через ноль на ~0,3 мс (см. рис. 4, а) как для модели 3, так и для модели 4; для индукционной установки – 11 мс для модели 3 и 9,3–9,4 мс для модели 4 (см. рис. 4, *b*).

Далее для анализа аномального отклика был произведен расчет аномального вклада абсолютного (3) и относительного (4), после чего были рассчитаны медианные оценки для диапазонов времен 0,01–0,1; 0,1–1; 1–10; 10–100; 100– 500 мс (рис. 5).

$$AAC = |x(t) - y(t)|;$$
(3)

$$RAC = \left| \frac{x(t) - y(t)}{x(t)} \right| \cdot 100\%,$$
 (4)

где *ААС* – абсолютный аномальный вклад, выраженный в заданных едини-

цах; *RAC* – относительный аномальный вклад, выраженный в процентах; *x*(*t*) – значения модельной кривой, рассчитанной от исходной модели; *y*(*t*) – значения модельной кривой, рассчитанной от модели с поляризацией; *t* – время.

Относительные аномальные вклады ВП и ВПИ (см. рис. 5, а) возрастают со временем для всех моделей, что логично, так как со временем вклад индукции падает. Относительный вклад ВПИ от модели 1 выше вклада ВП на диапазонах 0,01-0,1 и 0,1-1 мс. Для индукционной установки можно отметить, что относительный вклад ВПИ выше от моделей 2 и 4 (медно-порфировый тип), чем от моделей 1 и 3 (медно-колчеданный тип), что может свидетельствовать о том, что вклад ВПИ выше, когда поляризующийся объект обладает более низкими УЭС, чем вмещающие породы. Для гальванической установки относительный вклад выше от модели 2, чем 1, что может говорить о противоположной ситуации,







если бы не результаты моделирования от моделей 3 и 4.

Абсолютные вклады показывают, что вклады ВП спадают намного медленнее, чем вклады ВПИ (см. рис. 5, *b*). Аномальные вклады ВПИ для моделей 1 и 3 (медно-колчеданный тип) больше аналогичных для моделей 2 и 4 (медно-порфировый тип). Вклады ВП в абсолютных значениях показывают примерно те же результаты, что и в относительных единицах, то есть вклад от модели 1 меньше вклада от модели 2, а вклад от модели 3 больше вклада от модели 4.

Общий вклад ВПИ в кривую зондирования для всех моделей на временном диапазоне 0,01–0,1 мс составляет первые проценты, тогда как на поздних временах (100–500 мс) данные значения вырастают вплоть до 10⁶ %, хотя в абсолютных значениях оно составляет примерно 10⁻⁷ мВ/А. Ситуация по общему вкладу ВП несколько другая. Рассмотрим общий вклад на примере расчетов от модели 3 (медно-колчеданный тип на глубине 340 м): на диапазоне времен 0,01–0,1 мс относительный вклад составляет примерно 4 %, в абсолютных – примерно 0,8 мВ/А, на диапазоне 100–500 мс в относительных – 2·10⁶ %, а в абсолютных – 0,7 мВ/А, что сильно не отличается от аналогичного значения на начальных временах, то есть можно сделать вывод, что влияние ВП (по модулю) на кривую зондирования со временем изменяется не сильно.

Заключение

Результаты численного моделирования в рамках одномерных горизонтально-слоистых моделей с частотной дисперсией УЭС, описываемой формулой Cole-Cole, показали, что при использовании гальванической установки вклад ВП больше, чем при использовании



Puc. 5. Медианные оценки аномальных вкладов для всех моделей по диапазонам времен: a – относительные аномальные вклады; b – абсолютные аномальные вклады Вклады: 1-1 – вызванной поляризации в модель 1; 1-2 – индукционно-вызванной поляризации в модель 1; 2-1 – вызванной поляризации в модель 2; 2-2 – индукционно-вызванной поляризации в модель 2; 3-1 – вызванной поляризации в модель 3; 3-2 – индукционно-вызванной поляризации в модель 3; 4-1 – вызванной поляризации в модель 4; 4-2 – индукционно-вызванной поляризации в модель 4; Fig. 5. Anomalous responses median estimates for all models over time ranges a – relative anomalous responses; b – absolute anomalous responses Responses: 1-1 – induced polarization, model 1; 1-2 – inductive-induced polarization, model 1; 2-1 – induced polarization, model 2; 2-2 – inductive-induced polarization, model 2; 3-1 – induced polarization, model 3; 3-2 – inductive-induced polarization, model 3; 4-1 – induced polarization, model 2; 2-2 – inductive-induced polarization, model 3;

4-1 – induced polarization, model 4; 4-2 – inductive-induced polarization, model 4

индукционной установки. Также в абсолютных значениях вклад ВП со временем спадает значительно медленнее, не более чем на один порядок, тогда как при индукционной установке вклад ВПИ стремительно уменьшается – примерно на 8 порядков (в 10⁸ раз).

Небольшие значения абсолютных аномальных вкладов ВПИ в относительных величинах достигают 10⁶ % на поздних временах спада. Следовательно, эффекты ВПИ необходимо учитывать при решении обратных задач для установки с индукционным возбуждением, иначе значения УЭС, особенно нижних слоев, будут неминуемо искажены.

Для более точных результатов необходимо провести численное моделирование в рамках трехмерных моделей, так как в рамках одномерных моделей аномальный поляризующийся слой имеет бесконечно большие размеры по простиранию в то время, как реальные объекты достаточно локальны и их вклад в процессы становления и ВП во многом определяется влиянием геометрического фактора.

Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Geophysical Methods of Deposit Exploration and Prospecting

Библиографический список

1. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 219 с.

2. Поспеев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Кожевников Н.О. Выделение пластовколлекторов в разделе осадочного чехла юга сибирской платформы по данным зондирований становлением электромагнитного поля в ближней зоне // Геофизика. 2010. № 6. С. 47–52.

3. Стогний В.В., Коротков Ю.В. Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. Новосибирск: Малотиражная типография 2D, 2010. 121 с.

4. Шарлов М.В., Буддо И.В., Мисюркеева Н.В., Шелохов И.А., Агафонов Ю.А. Опыт эффективного изучения верхней части разреза методом зондирования становлением поля в ближней зоне с системой FastSnap // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. № 2 (60). С. 8–23.

5. Стогний В.В. Импульсная индуктивная электроразведка при изучении поляризующейся среды криолитозоны Якутской кимберлитовой провинции // Криосфера Земли. 2008. Т. 12. № 4. С. 46–56.

6. Vanhala H., Peltoniemi M. Spectral IP studies of Finnish ore prospects // Geophysics. 1992. Vol. 57 (12). P. 1545–1555.

7. Агеев В.В. Изучение процессов вызванной поляризации для решения геокриологических задач // Разведка и охрана недр. 2012. № 11. С. 46–49.

8. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Импульсная индуктивная электроразведка поляризующихся сред // Геофизический журнал. 2009. Т. 31. № 4. С. 104–118.

9. Кожевников Н.О. Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мерзлых породах // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 4. С. 527–540.

10. Комаров В.А. О природе электрических полей вызванной поляризации и возможности их

1. Van'yan LL. Electromagnetic sounding. Moscow: Nauchnyi mir; 1997. 219 p. (In Russ.)

2. Pospeev AV, Buddo IV, Agafonov YuA, Kozhevnikov NO. Reservoir identification in the sedimentary cover of South of Siberian platform with the use of non-stationary electromagnetic soundings data. *Russian Geophysics*. 2010;6:47–52. (In Russ.)

3. Stognii VV, Korotkov YuV. Prospecting for kimberlite bodies by the transient electromagnetic method. Novosibirsk: Malotirazhnaya tipografiya 2D; 2010. 121 p. (In Russ.)

4. Sharlov MV, Buddo IV, Misyurkeeva NV, Shelokhov IA, Agafonov YuA. Experience of effective study of the upper part of the section by near-field transient electromagnetic sounding method with использования при поисках рудных месторождений // Вестник Ленинградского университета. Геология и география. 1957. № 6. С. 29–40.

11. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Применение дифференциально-нормированной электроразведки на Непском своде // Геология и геофизика. 1990. № 4. С. 86–91.

12. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей // Геофизика. 1995. № 4. С. 42–45.

13. 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/publicationdetail s/?publication=91717 (03.09.2019).

14. Башкеев А.С., Давыденко Ю.А. Архитектура аппаратно-программного электроразведочного комплекса «Марс» // Вопросы естествознания. 2016. № 3 (11). С. 35–43.

15. Рыжов А.А. Оптимальный алгоритм решения прямой задачи ВЭЗ // Физика Земли. 1983. № 3. С. 68–76.

16. А. с. № 2012660743, Российская Федерация. Программа одномерной инверсии «Mars1D» / И.Ю. Пестерев. Заявл. № 2012618705 от 16.10.2012; зарег. 28.11.2012.

17. Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and absorption in dielectrics. Alternating current characteristics // Journal of Chemical Physics. 1941. Vol. 9. P. 341–351.

18. 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.

References

FastSnap system. *Devices and systems of Exploration Geophysics.* 2017;2(60):8–23. (In Russ.)

5. Stognii VV. Transient electromagnetic prospecting on investigations of induced polarization effects in frozen ground of Yakutian kimbcrlitc province. *Kriosfera Zemli = Earth cryosphere*. 2008;12(4):46– 56. (In Russ.)

6. Vanhala H, Peltoniemi M. Spectral IP studies of Finnish ore prospects. *Geophysics*. 1992;57(12):1545–1555.

7. Ageev VV. Induced polarization processes study for geocryological tasks solution. *Prospect and protection of mineral resources*. 2012;11:46–49. (In Russ.)



8. Kozhevnikov NO, Antonov EYu. Pulse-inductive electrical exploration of polarized media. *Geofizicheskiy zhurnal* = *Geophysical Journal*. 2009;31(4):104–118. (In Russ.)

9. Kozhevnikov NO. Fast-decaying inductive IP in frozen ground. *Russian Geology and Geophysics*. 2012;53(4):527–540. (In Russ.)

10. Komarov VA. On the nature of inducedpolarization electric fields and the possibility of their use in prospecting ore deposits. *Vestnik Leningradskogo universiteta. Geologiya i geografiya = Bulletin of the Leningrad University. Geology and geography.* 1957;6:29–40. (In Russ.)

11. Legeido PYu, Mandel'baum MM, Rykhlinskii NI. The use of differential-normalized electrical exploration in the Nepa arch. *Russian Geology and Geophysics*. 1990;4:86–91. (In Russ.)

12. Legeido PYu, Mandel'baum MM, Rykhlinskii NI. Differentially normalized electrical survey method in direct exploration for deposits. *Russian Geophysics*. 1995;4:42–45. (In Russ.)

13. Davydenko YuA, Aikasheva NA, Bashkeev AS, Faustova AYu, Bogdanovich DV. Results of the pulse electrical survey application in prospecting ore mineral deposits in the mountainous Altai. Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2018: sbornik statei XIV nauchno-prakticheskoi konferentsii i vystavki = Engineering and mining geophysics in 2018: 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 3d September 2019].

14. Bashkeev AS, Davydenko YuA. The "Mars" electromagnetic hardware-software complex architecture. Voprosy estestvoznaniya = *Natural Science Questions*. 2016;3(11):35–43. (In Russ.)

15. Ryzhov AA. The optimal algorithm for solving the direct problem of VES. *Fizika Zemli* = *Earth Physics*. 1983;3:68–76. (In Russ.)

16. Pesterev IYu. *One-dimensional inversion* program "Mars1D". Certificate of authorship RF, no. 2012660743; 2012. (In Russ.)

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

18. 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.

Критерии авторства / Authorship criteria

Башкеев А.С. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат. Aiur S. Bashkeev is the author of the article, holds the copyright and bears responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов. The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Сведения об авторе / Information about the author



Башкеев Аюр Саянович,

ассистент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем, младший научный сотрудник научно-исследовательской части, Иркутский национальный исследовательсий технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия, e-mail: bashkeev.as@gmail.com Aiur S. Bashkeev, Assistant, Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems, Junior Researcher, Research Division, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia, e-mail: bashkeev.as@gmail.com