

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ МЕТОДОМ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ПИЛЬНЕНСКО-ДМИТРИЕВСКОМ РУДНОМ ПОЛЕ ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЯ: ПОИСК ЗОЛОТОНОСНЫХ РУДНЫХ ЗОН

PRACTICAL EXPERIENCE OF ELECTRICAL RESISTIVITY APPLICATION BY THE TOMOGRAPHY OF INDUCED POLARIZATION METHOD AT THE PILNENSKO-DMITRIEVSKY ORE FIELD OF EASTERN TRANSBAIKALIA: SEARCHING FOR GOLDEN ORE ZONES

Е. Ю. Юдицких, Забайкальский государственный университет, г. Чита

E. Yuditских, Transbaikal State University, Chita



Представлен опыт применения геофизического метода электротомографии вызванной поляризации (ВП) для выявления тектонических нарушений и зон вероятной золоторудной минерализации, связанных с разломными зонами и дайковым комплексом в платформенном чехле Пильненско-Дмитриевского рудного поля в Восточном Забайкалье. Пройдено девятнадцать профилей в северо-восточном направлении вкрест простирания основных геологических структур на расстоянии 10 м друг от друга. Профиль № 4 располагался над дайкой, вскрытой канавой. Это дало возможность сравнить данные электротомографии по данному профилю с геологическими данными о проходке канавы. В результате работ получены графики, разрезы и 3D-модели удельного электрического сопротивления и поляризуемости. Разломной зоне на геоэлектрическом разрезе соответствует субвертикальный участок повышенной проводимости (1000...2000 Ом·м). Здесь профиль по касательной пересекает Пильненский широтный разлом, и присутствие бедной сульфидной минерализации в зоне разлома отмечается повышением заряжаемости (до 40 мс). Золоторудная зона выделена на разрезе наклонной зоной пониженных сопротивлений (2000...3000 Ом·м) с высоко проводящим центром (<1000 Ом·м), расположение которого сходится с расположением дайки гибридных порфиров. На разрезе заряжаемости в этой области отмечается повышение параметра С до 24 мс на фоне 20 мс. Объемная модель дала возможность локализовать перспективные на золото участки в пределах площади исследований. Анализ полученных результатов, несмотря на сложные условия реализации (высокое содержание почвенной влаги, наличие многолетней мерзлоты и др.), позволил выделить разломные и приальбандовые (золоторудные) зоны

Ключевые слова: электротомография; метод сопротивлений; метод вызванной поляризации; геоэлектрический разрез; 3D-модель; золотое оруденение; заряжаемость; дайковый комплекс; многолетнемерзлая порода; разломная зона

Practical experience of electrical resistivity application by the tomography of induced polarization method (IP) for revealing tectonic disturbances and zones of probable gold mineralization, associated with fault zones and a dyke complex in the platform cover of the Pilnenskoye-Dmitrievsky ore field in the Eastern Transbaikalia is presented. Nineteen profiles have been traversed in the northeastern direction across the strike of the main geological structures at a distance of 10 m from each other. Profile number 4 was located above the dyke, exposed by the geological ditch. This made it possible to compare the data of the electro tomography on this profile with the geological data. As a result of the work, graphs, sections and 3D-models of resistivity and polarizability were obtained. The fracture zone on the geoelectric section corresponds to a subvertical region of increased conductivity (1000...2000 Ohm). Here the profile along the tangent crosses the Pilninsky latitudinal fault, and the presence of poor sulphide mineralization in the fault zone is marked by an increase in the chargeability (up to

40 ms). The gold zone was distinguished on a section by an inclined zone of lowered resistances (2000...3000 Ohm · m) with a highly conducting center (<1000 Ohm · m), the location of which converges with the location of the dyke of hybrid porphyries. At the section of chargeability in this region, the parameter C is raised to 24 msec on the background of 20 msec. The volumetric model made it possible to localize promising gold sites within the research area. Analysis of the results obtained, despite the difficult conditions of implementation (high content of soil moisture, the presence of permafrost, etc.), made it possible to identify faults and prisalband (gold ore) zones

Key words: electrical resistivity tomography; resistivity method; induced polarization method; geoelectric section; 3D-model; gold mineralization; chargeability; dyke complex; permafrost rock; fault zone

Введение. В настоящее время открытие новых месторождений золота значительно сократилось. Это связано с тем, что большинство месторождений, открытых в прошлом, относились к россыпному типу, т. е. залежали на небольшой глубине и достаточно легко обнаруживались комплексом геологических поисковых методов. Но уже не менее полувека говорят о том, что россыпные месторождения практически полностью истощены, разведанных целиковых почти нет и серьезных открытий ожидать не следует [3]. Значительная часть золота добывается из остаточного-целикового и отвалного комплексов техногенных россыпей, в основном сформированных за счет неправильно разведанных или не полностью прослеженных месторождений. В связи с этим стал актуален вопрос о поиске месторождений рудного золота. Однако месторождения такого типа имеют большую глубину залегания и не обнаруживаются большинством геологических методов, кроме дорогостоящего бурения по густой сети, которое также не гарантирует результата.

Одним из сравнительно новых геофизических методов, с помощью которого можно решить поставленную задачу, является электротомография. Как модификация метода сопротивлений на постоянном токе, электротомография унаследовала все принципиальные возможности метода сопротивлений, позволив в то же время существенно расширить области его применения. Благодаря этому электротомография становится одним из ведущих геофизических методов при решении поисково-разведочных [17; 18], экологических [6, 9; 10; 14; 19], инженерно-гидрогеологических

[11; 12; 15; 16], геокриологических [1; 4; 8], археологических [13] и других задач.

Методы и методология исследования. Метод вызванной поляризации (ВП) показал высокую эффективность при поисково-разведочных работах на твердые полезные ископаемые. Он позволяет выделять породы, содержащие электропроводящие минералы, присутствие которых является поисковым признаком гидротермально или метасоматически измененных пород, часто вмещающих рудные тела.

Метод ВП основан на изучении вторичных электрических полей, источником которых являются физико-химические процессы, возбуждаемые в геологической среде электрическим током. Интенсивные поля ВП создаются над средами, содержащими рудные (электропроводящие) минералы. Во время пропускания тока на поверхности рудных минералов происходят физические превращения и химические реакции, приводящие к поляризации среды. После отключения тока в среде начинает устанавливаться равновесие, проявляющееся в спаде вторичного электрического поля и наличии на приемных электродах спадающей разницы потенциалов $\Delta U_{ВП}$. Различают быстрые и медленные процессы ВП. Первые протекают в микро-миллисекундном временном диапазоне, вторые — в течение секунд, часов. Скорость спада переходной характеристики ВП во времени определяется электрохимическими свойствами геологической среды. Она несет информацию о минеральном составе рудного тела и зональных изменениях в контурах месторождений. Классическим параметром, характеризующим интенсивность ВП пород, является поляризуемость (η). Согласно определению В. А. Комарова, это отношение

напряжения ВП, измеренного в фиксированный момент времени $U(t)$ ВП к напряжению в конце импульса тока ($ИПУ, t = T$).

В качестве параметра, характеризующего поляризуемость пород, используют

заряжаемость (C). Она отвечает площади под кривой $U(t)$ ВП, нормированной на интервал времени его измерения $[t_1, t_0]$ и $ИПУ$ (рис. 1).

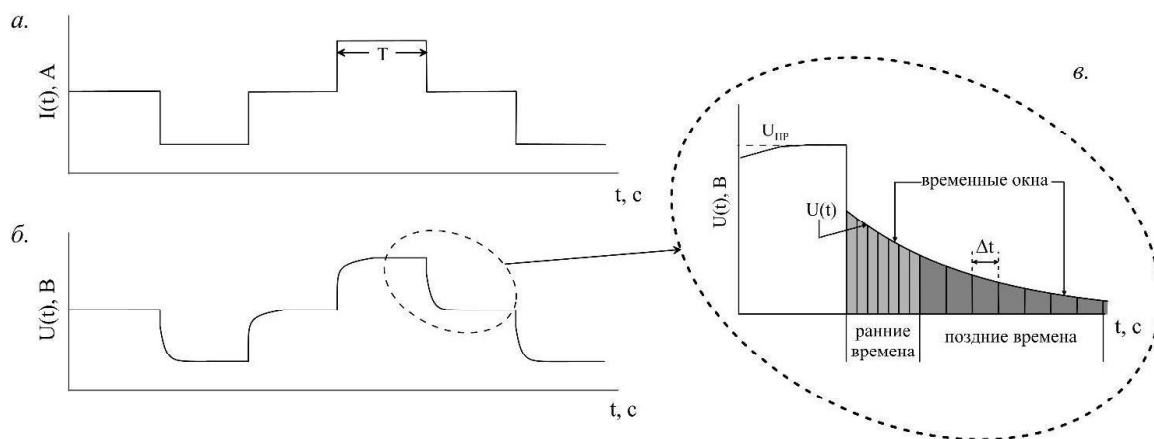


Рис. 1. Графики переходных процессов: (а) силы тока, (б) напряжения с выделенными этапами (в) / Fig. 1. Graphs of transient processes: (a) current strength, (b) stresses with isolated stages (c)

Заряжаемость является более устойчивым параметром ВП, чем поляризуемость, поэтому она широко используется для анализа полевых и экспериментальных данных [4].

Электротомография методами сопротивления и вызванной поляризации является одним из самых эффективных инструментов для поиска твердых полезных ископаемых [2; 5]. Электротомография методом ВП использовалась нами на одном из рудных месторождений Восточного Забайкалья.

Геологическая характеристика объекта исследования. Пильненское рудное поле локализуется в Карийском рудном узле. Золоторудная минерализация одного из участков Пильненского рудного поля приурочена к дайковым телам гибридных кварцевых порфиров (кварцевых диоритовых порфиритов). Как по простиранию, так и по падению дайки гибридных кварцевых порфиров характеризуются протяженностью свыше 1 км, выдержанной мощностью (3...20 м), на отдельных участках они содержат наложенную золоторудную минерализацию, а на других контролируют ее развитие. Коренные породы перекрыты чехлом

рыхлых отложений мощностью от первых до 10...15 м и более (в долинах рек) [7].

Исследования методом ЭТ-ВП проведены на участке, расположенном в южной части рудного поля. Девятнадцать профилей в северной части участка проходили в северо-восточном направлении вкрест простирания основных геологических структур и располагались на расстоянии 10 м друг от друга, длина профилей составляла 645 м. Южная часть участка исследована девятью профилями длиной 950 м, расстояние между профилями составило 40 м. Измерения выполнены аппаратурой Скала-64, разработанной в ИНГГ СО РАН и изготавливаемой в ООО «КБ Электротометрии». При измерениях применялась прямая и встречная трехэлектродная установка. Параметры ВП оценивались во временном диапазоне 20...160 мс. Рассчитывалась заряжаемость (C) среды. Для обработки, интерпретации и визуализации данных электротомографии использованы программы *Ripprr*, *Res2Dinv*, *Res3Dinv* и *Voxler*.

Результаты исследования и их обсуждение. На рис. 2а показаны графики кажущегося УЭС (ρ_k) и кажущейся заря-

жаемости (C_k) по профилю № 4, пересекающему разведочную канаву на интервале профиля 375...525 м. Графики параметров приведены для прямой (AMN) и встречной (MNB) трехэлектродных установок для разноса $AO=30$ м. При таких разносах глубина исследований составляет около 10 м. На графиках кажущегося УЭС «прямыми» пересечениями выделяются зоны низкого УЭС № 1, 2. В выделенных зонах отмечаются аномалии заряжаемости до 17 мс на фоне 8 мс. Выделенные аномальные участки связаны с тектоническими нарушениями и золотосульфидной минерализацией, т. е. представляют собой рудные зоны. Рудная зона № 2 на рис. 2а вскрыта канавой. Здесь установлена дайка гибридных диорит-порфиров, внедрившаяся по разлому. В зальбандах дайки присутствует сульфид-

ная минерализация. Кроме выделенных локальных аномалий, необходимо отметить область пониженного УЭС в начале профиля (50...100 м), сопровождающуюся протяженной аномалией поляризуемости (50...150 м). «Обратное» пересечение графиков прямой и встречной установок на шк 100 м связано с линзой льдистых многолетнемерзлых пород, однако наличие аномалии ВП говорит о присутствии в этой зоне сульфидной минерализации. Повышенная поляризуемость связана именно с электропроводящими минералами (сульфидами), а не с мерзлотой, так как мерзлые породы поляризуются на ранних — порядка 0,1 мс — временах [7], а заряжаемость среды в данном случае оценивается во временном интервале 20...160 мс.

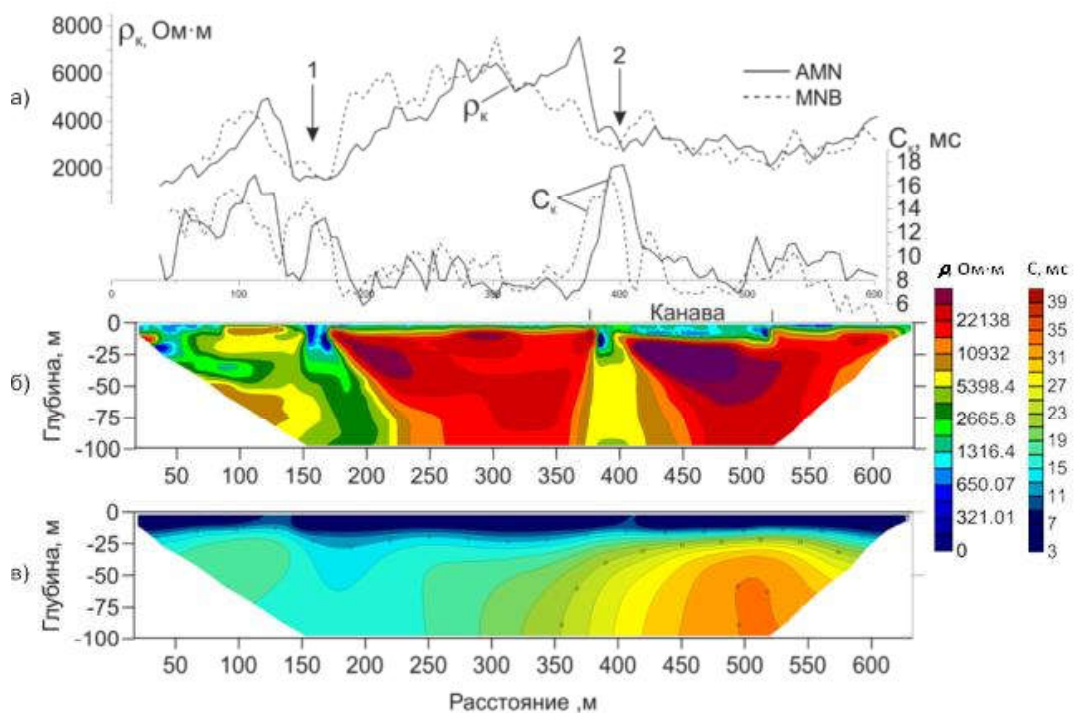


Рис. 2. Графики кажущихся УЭС (r_k) и заряжаемости (C_k): для прямой и встречной установок (а), геоэлектрический разрез (б) и разрез поляризуемости (в) по результатам 2D-инверсии данных электротомографии (прямая установка AMN) / Fig. 2. Graphs of apparent UES (r_k) and chargeability (C_k): for the forward and backward devices (a), geoelectrical section (b) and polarizability cut (c) from the results of the 2D inversion of the data of electric tomography (direct AMN installation)

Ниже графиков показаны разрезы УЭС и заряжаемости (2б; 2в), построенные по результатам двумерной автоматической

инверсии данных прямой (AMN) установки. На разрезе УЭС крутопадающими зонами низкого сопротивления выделяются

тектонические нарушения, перспективные на оруденение. Отчетливо проявляются зоны на пк 150...200 и 400 м. Высокое УЭС вмещающей толщи обусловлено не только составом (граниты), но и мёрзлым состоянием пород. В интервале 375...525 м хорошо видно, что присутствие разведочной канавы привело к протаиванию ММП. Это выразилось в уменьшении УЭС с десятков тысяч до 1000...2000 Ом·м. В начале профиля в интервале 0...200 м разрез характеризуется пониженным УЭС, что является признаком зоны дробления. На разрезе заряжаемости в этой области отмечается повышение параметра С до 24 мс на фоне 20 мс. Максимальная заряжаемость (до 40 мс) характерна для пород на интервале

400...600 м. Здесь профиль по касательной пересекает Пильненский широтный разлом и присутствие бедной сульфидной минерализации в зоне разлома отмечается повышением заряжаемости.

На рис. 3 показана 3D-модель участка исследований. Вмещающие граниты характеризуются очень высоким (5...100 кОм·м и более) УЭС. Среди этой высокоомной толщи зонами низких УЭС (от 2 кОм·м и ниже) выделяются зоны дробления, по которым происходило внедрение рудоносных гидротермальных растворов. Объемная модель даёт возможность локализовать перспективные на золото участки в пределах площади исследований.

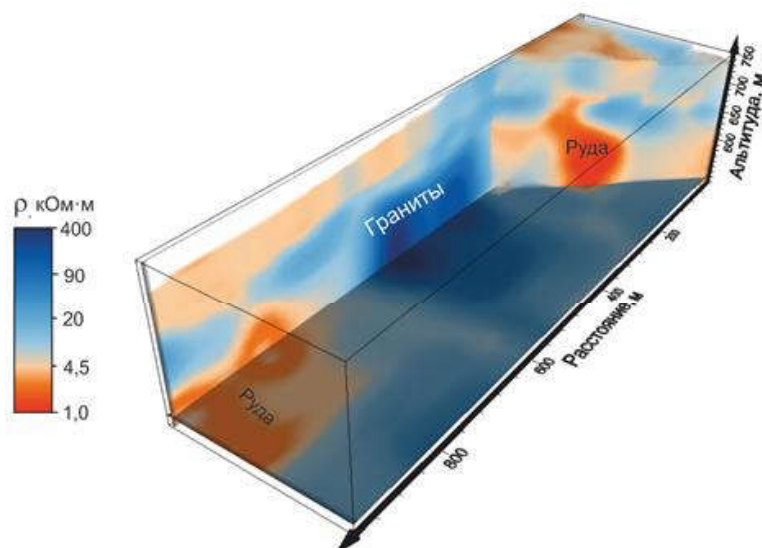


Рис. 3. Объемная модель УЭС на участке исследований по данным 3D-инверсии. Пильненское рудное поле / Fig. 3. Volumetric model of the UES in the area of studies based on 3D inversion data. Pilsnenskoje ore field

Заключение. Таким образом, в результате исследований установлено, что по данным ЭТ рудные зоны, приуроченные к зонам дробления, выделяются локальными аномалиями пониженного УЭС. В некоторых случаях аномалии УЭС сопровождаются аномалиями заряжаемости,

вызванными сульфидной минерализацией. Объемная модель распределения УЭС дает возможность проследить особенности строения рудных зон, оконтурить перспективные участки и с учётом данных опробования разведочных канав оценить прогнозные ресурсы площади исследований по категории P_1 .

Список литературы

1. Агеев В. В. Изучение процессов вызванной поляризации для решения геокриологических задач // Разведка и охрана недр. 2012. № 11. С. 46–49.
2. Бобачев А. А., Горбунов А. А., Модин И. Н., Шевнин В. А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 2. С. 14–17.
3. Гольдфарб Ю. Б., Петров А. Н., Прейс В. К., Скурида Д. А. Проблемы методики разведки россыпей золота // Золотодобыча. 2012. № 8 (165). С. 33–37.
4. Карасев А. П., Птицин А. Б., Юдицких Е. Ю. Быстрые переходные процессы вызванной поляризации. Новосибирск: Наука, 2005. 291 с.
5. Куликов В. А., Бобачев А. А., Яковлев А. Г. Применение электротомографии при решении рудных задач до глубин 300–400 м // Геофизика. 2014. № 2. С. 39–46.
6. Титов К. В., Ильин Ю. Т., Коносовский П. К., Муслимов А. В., Рыбальченко О. В., Орлова О. Г. Изменение физических свойств загрязненного нефтепродуктами песка при бактериальном воздействии // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2012. № 5. С. 455–469.
7. Туляков В. Е., Розов Д. И., Озерова М. М. Изучение условий локализации золотого оруденения формации средних глубин на ряде месторождений БалеЙского и Карийского районов с целью его прогнозирования на глубину: отчет. Чита: ЗабНИИ, 1981. 293 с.
8. Шестернев Д. М., Карасев А. П., Оленченко В. В. Исследование криолитозоны методом РСВП. Новосибирск: СО РАН, 2003. 238 с.
9. Abdel Aal G. Z., Atekwana E. A., Revil A. Geophysical signatures of disseminated iron minerals: a proxy for understanding subsurface biophysicochemical processes // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2014. Vol. 119. P. 1831–1849.
10. Atekwana E. A., Slater L. D. Biogeophysics: a new frontier in Earth science research // Reviews of Geophysics. 2009. Vol. 47.
11. Gurin G., Tarasov A., Ilyin Yu., Titov K. Time domain spectral induced polarization of disseminated electronic conductors: laboratory data analysis through the Debye decomposition approach // Journal of Applied Geophysics. 2013. Vol. 98. P. 44–53.
12. Gurin G., Tarasov A., Ilyin Yu., Titov K. Application of the Debye decomposition approach to time domain induced polarization profiling data: a mining example // 3rd International Workshop on Induced Polarization (6–9 April). Oléron Island. 2014. P. 104–105.
13. Keery J., Binley A., Elshenawy A., Clifford J. Markov-chain Monte Carlo estimation of distributed Debye relaxations in spectral induced polarization // Geophysics. 2012. Vol. 77. P. 159–170.
14. Mewafy F. M., Werkema Jr. D. D., Atekwana E. A., Slater L. D., Aal G. A., Revil A., Ntarlagiannis D. Evidence that bio-metallic mineral precipitation enhances the complex conductivity response at a hydrocarbon contaminated site // Journal of Applied Geophysics. 2013. Vol. 98. P. 113–123.
15. Oldenburg D. W., Li Y. Inversion of induced polarization data // Geophysics. 1994. Vol. 59. P. 1327–1341.
16. Schwarz G. A theory of the low-frequency dispersion of colloidal particles in electrolyte solution // J. Phys. Chem. 1962. Vol. 66. P. 2636–264.
17. Sigel H., Vanhalaz H., Sheard N. Some case histories of source discrimination using timedomain spectral IP // Geophysics. 1997. Vol. 62. P. 1394–1408.
18. Vanhala H., Peltoniemi M. Spectral IP studies of finnish ore prospects // Geophysics. 1992. Vol. 57. P. 1545–1555.
19. Zhang C., Revil A., Fujita Y., Munakata-Marr J., Redden G. Quadrature conductivity: a quantitative indicator of bacterial abundance in porous media // Geophysics. 2014. Vol. 79. P. 363–375.

References

1. Ageev V. V. *Razvedka i ohrana nedr* (Exploration and protection of mineral resources). 2012, no. 11, pp. 46–49.
2. Bobachev A. A., Gorbunov A. A., Modin I. N., Shevnin V. A. *Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki* (Instruments and systems of exploration geophysics). 2006, no. 2, pp. 14–17.
3. Goldfarb Yu. B., Petrov A. N., Preys V. K., Skurida D. A. *Zolotodobycha* (Gold mining). 2012, no. 8 (165), pp. 33–37.
4. Karasev A. P., Ptitsin A. B., Yuditskikh E. Yu. *Bystrye perekhodnye protsessy vyzvannoy polyarizatsii* (Rapid transients caused by polarization). Novosibirsk: Science, 2005. 291 p.
5. Kulikov V. A., Bobachev A. A., Yakovlev A. G. *Geofizika* (Geophysics). 2014, no. 2, pp. 39–46.

6. Titov K. V., Ilyin Yu. T., Konosavsky P. K., Muslimov A. V., Rybalchenko O. V., Orlova O. G. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya* (Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology). 2012, no. 5, pp. 455–469.
7. Tupyakov V. E., Rozov D. I., Ozerova M. M. *Izuchenie usloviy lokalizatsii zolotogo orudneniya format-sii srednih glubin na ryade mestorozhdeniy Baleyskogo i Kariyskogo rayonov s tselyu ego prognozirovaniya na glubinu: otchet* (Study of the conditions for the localization of gold mineralization of the formation of mean depths at a number of deposits in the Baley and Kariisky regions with the aim of predicting it to depth: a report). Chita: ZabNII, 1981. 293 p.
8. Shesternev D. M., Karasev A. P., Olenchenko V. V. *Issledovanie kriolitozony metodom RSVP* (The study of cryolithozone by the method of the RSVP). Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2003. 238 p.
9. Abdel Aal G. Z., Atekwana E. A., Revil A. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* (Journal of Geophysical Research: Biogeosciences), 2014, vol. 119, pp. 1831–1849.
10. Atekwana E. A., Slater L. D. *Reviews of Geophysics* (Reviews of Geophysics), 2009, vol. 47.
11. Gurin G., Tarasov A., Ilyin Yu., Titov K. *Journal of Applied Geophysics* (Journal of Applied Geophysics.), 2013, vol. 98, pp. 44–53.
12. Gurin G., Tarasov A., Ilyin Yu., Titov K. *3rd International Workshop on Induced Polarization (6–9 April)* (3rd International Workshop on Induced Polarization (6-9 April)). Oléron Island, 2014, pp. 104–105.
13. Keery J., Binley A., Elshenawy A., Clifford J. *Geophysics* (Geophysics), 2012, vol. 77, pp. 159–170.
14. Mewafy F. M., Werkema Jr. D. D., Atekwana E. A., Slater L. D., Aal G. A., Revil A., Ntarlagiannis D. *Journal of Applied Geophysics* (Journal of Applied Geophysics), 2013, vol. 98, pp. 113–123.
15. Oldenburg D. W., Li Y. *Geophysics* (Geophysics), 1994, vol. 59, pp. 1327–1341.
16. Schwarz G. J. *Phys. Chem* (Phys. Chem), 1962, vol. 66, pp. 2636–264.
17. Sigel H., Vanhalaz H., Sheard N. *Geophysics* (Geophysics), 1997, Vol. 62, pp. 1394–1408.
18. Vanhala H., Peltoniemi M. *Geophysics* (Geophysics), 1992, vol. 57, P. 1545–1555.
19. Zhang C., Revil A., Fujita Y., Munakata-Marr J., Redden G. *Geophysics* (Geophysics), 2014, vol. 79, pp. 363–375.

Коротко об авторе**Briefly about the author**

Евгений Юрьевич Юдицкий, канд. геол.-минер. наук, зав. базовой кафедрой геофизики, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: геофизика, геология, поиск полезных ископаемых eug71@yandex.ru

Eugeny Yuditskih, candidate of geological-mineralogical sciences, head of Geophysics laboratory, Transbaikali State University, Chita, Russia. Sphere of Scientific interests: geophysics, geology, search for minerals

Образец цитирования

Юдицкий Е. Ю. Опыт применения электротомографии методом вызванной поляризации на пильненско-дмитриевском рудном поле Восточного Забайкалья: поиск золотоносных рудных зон // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2018. Т. 24. № 6. С. 139–145. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-6-139-145.

Yuditskih E. Practical experience of electrical resistivity application by the tomography of induced polarization method at the pilnensko-dmitrievsky ore field of eastern transbaikalia: searching for golden ore zones // Transbaikali State University Journal, 2018, vol. 24, no. 6, pp. 139–145. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-6-139-145.

Статья поступила в редакцию: 28.05.2018 г.
Статья принята к публикации: 01.06.2018 г.