УДК 550.837 DOI 10.21440/2307-2091-2017-1-32-36

СКВАЖИННАЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ В РУДНЫХ ПОЛЯХ

В. М. Сапожников, К. М. Ермолаев

Well electrical prospecting of disjunctive dislocations in the ore fields

V. M. Sapozhnikov, K. M. Ermolaev

During exploration and prospecting works within the ore fields, the important objective is to identify disjunctive dislocation of the deep foundation, which are spatially associated with ore cluster. Effective is the areal study of the field of current source immersed in the well, serving as large installation with high research depth that allows capturing the largest elements of the ore fields' structures, including the major dislocations. Authors consider most informative the maps and graphs of the anomalous potential and its gradient, calculated by excluding the normal field one way or another. With the help of a mathematical model in the form of half-plane conductor, authors show how by areal or specialized negative anomalies of potential one can identify single dislocation or a group of similar objects. On example of the field results authors demonstrate the anomalous field of immersed power source, corresponding to two sub parallel zones of tectonic disturbances, which are spatially associated with ore deposits. It is significant that the anomalous effects from, verified by drilling, extensive disjunctive dislocations manifest more noticeably than from the local ore bodies. This once again confirms the conclusion about the need to study and take into account during interpreting of the anomalies not only of objects of "ore deposit" type, but also of no less important structural elements of the ore fields, including the disjunctive dislocations that often control the formation of deposits of various types.

Keywords: disjunctive dislocation; ore deposit; half-plane–conductor; immersed current source; abnormal potential.

При поисково-разведочных работах в пределах рудных полей важной задачей является выявление разрывных нарушений глубокого заложения, с которыми пространственно связаны рудные скопления. Эффективно площадное изучение поля погруженного в скважину источника тока как установки большого размера с высокой глубинностью исследования, позволяющее фиксировать наиболее крупные элементы структур рудных полей, в том числе крупнейшие дислокации. Наиболее информативны карты и графики аномального потенциала и его градиента, вычисленные путем исключения нормального поля тем или иным способом. С помощью математической модели в форме полуплоскости-проводника показано, как по площадным или профильным отрицательным аномалиям потенциала выявляются одиночное разрывное нарушение или несколько подобных объектов. На примере полевых результатов демонстрируется аномальное поле погруженного источника тока, соответствующее двум субпараллельным зонам тектонических нарушений, с которыми пространственно связаны рудные залежи. Показательно, что аномальные эффекты от подтвержденных бурением протяженных разрывных нарушений проявляются заметнее, чем от локальных рудных тел. Этот факт еще раз подтверждает вывод о необходимости изучения и учета при интерпретации аномалий не только от объектов типа «рудная залежь», но и от не менее важных структурных элементов рудных полей, какими в том числе являются разрывные нарушения, зачастую контролирующие образование месторождений различного типа.

Ключевые слова: разрывное нарушение; рудная залежь; полуплоскость-проводник; погруженный источник тока; аномальный потенциал.

Введение

Известно, что образование многих месторождений полезных ископаемых имеет термодинамическую природу. За счет глубинных источников в верхние слои земной коры по зонам деструкции поступали обогащенные полезными компонентами флюиды, которые в благоприятных по геомеханическим свойствам горных породах создавали скопления в виде рудных или нефтяных месторождений [1–3 и др.]. Результаты изучения физико-геологических моделей казалось бы совершенно разных по полезным компонентам месторождений руд и углеводородов свидетельствует об их удивительной схожести по многим структурным признакам. Залежи этих объектов сформировались, как правило, в хорошо проницаемых средах под литологическими экранами. У разведчиков недр бытуют такие понятия, как рудные и нефтяные столбы, фиксирующие корневые каналы соответствующих залежей.

Поэтому при изучении закономерностей формирования и размещения месторождений полезных ископаемых вопросу выявления тектонических нарушений глубокого заложения специалисты призывают уделять серьезное внимание. Во многих случаях именно геофизические методы позволяют обнаруживать и трассировать глубинные разломы, которые могут быть слабо проявлены в верхних слоях разреза. Например, в работе [4] А. М. Виноградов убедительно продемонстрировал важную роль разломов в формировании рудоносных зон Южного Урала.

Глубинные разломы часто проявляются в виде широких поясов с развитием в них интрузий различного масштаба и сравнительно узких линейных разрывных нарушений. Особый интерес представляют из них те, для которых характерны ветвистость, сопряженность с зонами метасоматических изменений окружающих горных пород и наличие малых интрузий типа даек. Пример рудного поля с сетью даек приведен в работе [5]. Считается, что такое сочетание геологических тел характерно для сред над глубинной крупной материнский интрузией, являющейся потенциальным поставщиком рудоносных растворов.

В практике рудной геологии принято считать, что в пределах рудных полей тектонические нарушения подразделяются на рудоконтролирующие, рудоподводящие и рудораспределяющие. По физическим свойствам разрывные нарушения представля-ют собой высокопроницаемые среды, к тому же часто насыщенные рассеянной сульфидной вкрапленностью. Вследствие этого данные тела могут быть на два порядка электропроводнее неизмененных горных пород, которые они пронизывают [4]. Поскольку эти достаточно протяженные по падению и простиранию объекты, подходящие к дневной поверхности, но плохо проявленные в корах выветривания и пластичных глинистых породах покровных отложений, контрастно выделяются на глубине, наиболее благоприятные предпосылки для их выявления имеют электроразведочные методы с большим радиусом исследований. Наиболее простым является метод заряда, предполагающий проведение площадной съемки потенциала поля погруженного в скважину источника тока. Как показано в [5–7], наиболее информативным является аномальное поле потенциала, выделенное тем или иным способом при обработке данных полевых измерений.

Теоретические модели

Для рассмотрения предпосылок обнаружения разрывных нарушений, имеющих часто пластинообразную форму, можно использовать простую модель полуплоскости-проводника. Решение задачи об аномальном потенциале U_a точечного источника A тока I в пространстве с удельным сопротивлением ρ в присутствии одиночной полуплоскости имеет вид [8]:

$$U_a = -Q/\pi\,(R^+ \operatorname{arctg} r^-/2L - R^- \operatorname{arctg} r^+/2L), \qquad (1)$$

где $Q = \rho I/4\pi$, $R^+ = 1/r_2 + 1/r_1$, $R^- = 1/r_2 - 1/r_1$, $r^- = r_2 - r_1$, $r^+ = r_2 + r_1$; r_1, r_2 – расстояния до точки M измерений поля от источника A и его зеркального отражения в полуплоскости соответственно, $L = [\alpha(1 - \cos\gamma)l(1 - \cos\theta]^{1/2}$; α, l – кратчайшие расстояния от A и M

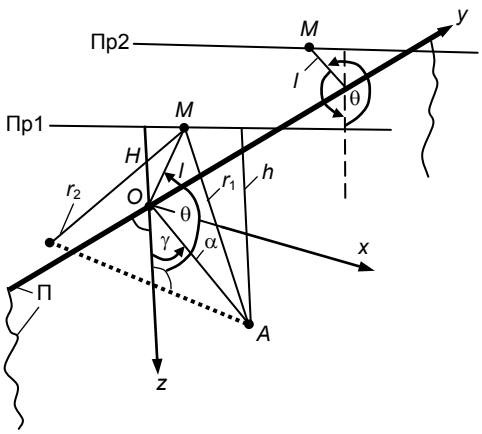

Рисунок 1. Модель полуплоскости П и точечного источника тока *A* с примерами профилей измерения в цилиндрической системе координат с началом в точке *O* – проекции *A* на кромку полуплоскости

до кромки полуплоскости соответственно; γ, θ – соответственно полярные координаты точек *A* и *M* в цилиндрической системе координат с осью, совпадающей с кромкой полуплоскости (рис. 1).

В случае наличия дневной поверхности и полуплоскости-проводника, погруженной вертикально в полупространство с сопротивлением ρ при глубинах кромки полуплоскости *H* и источника тока *A*, решение (1) усложняется. Считается, что среда условно безграничная, но дополнительно вводятся в рассмотрение отображения в плоскости дневной поверхности полуплоскости и источника *A*. При расчетах начало координат иногда удобно переносить в проекцию источника *A* на дневную поверхность, так как при моделировании можно исследовать влияние нескольких полуплоскостей.

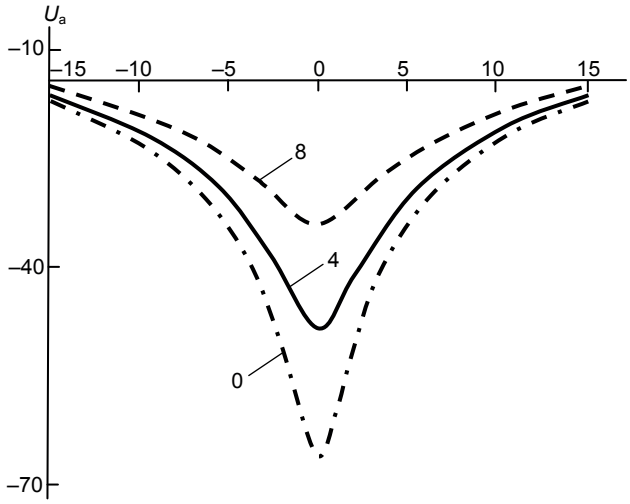

Рисунок 2. Пример графиков аномального потенциала над погруженной вертикальной полуплоскостью (*H* = 1) для трех положений источника тока (x_4 = 4). Параметр кривых – глубина источника *h*.

но (случай, иллюстрированный также рис. 7). По нему видно, что наиболее четко экстремумом отрицательного потенциала проявляется ближняя к источнику тока модель разрывного нарушения. Параллельное ей, но более удаленное от источника тока моделируемое разрывное нарушение может быть обнаружено по локальной отрицательной аномалии, наложенной на аномальное поле от ближней модели.

Практический пример

Метод мелкомасштабного заряда, в котором изучается поле погруженного в скважину источника тока, позволяет оперативно исследовать большую площадь. На приведенном примере съемка потенциала выполнена на квадратном планшете с размером стороны 2,5 км при заземлении в скважине 85 Б. Исследования проводились на перспективном на медноколчеданное оруденение участке в Приполярном Урале. Измерения выполнялись по системе субпараллельных профилей с измерением потенциала поля пропускания тока и вызванной поляризации силами Уральской геолого-съемочной экспедиции.

Для интерпретации данных съемки сложного по характеру поля пропускания статистическим способом [7] выполнено вычисление аномального потенциала. Фрагмент плана изолиний и график аномального потенциала по одному из профилей приведены на рис. 8.

Как видно из этих материалов, в поле погруженного источ-

Результаты расчетов аномального поля над погруженными полуплоскостью-проводником и источником тока, частично приведенные на рис. 2–6, позволяют сделать следующие выводы.

Присутствие полуплоскости проявляется симметричной отрицательной аномалией. На профилях, проходящих вкрест полуплоскости, максимальная аномалия наблюдается над кромкой полуплоскости. Хотя с погружением источника тока амплитуда аномалии уменьшается, относительная величина аномалии (относительно нормального потенциала $U_0 = 2Q/r_1$) увеличивается (рис. 3). Это свидетельствует о том, что скважинная электроразведка имеет преимущество перед ее наземным вариантом.

В простейшем случае, когда с помощью погруженной полуплоскости-проводника моделируется одиночное разрывное нарушение, оно фиксируется системой эллипсовидных изолиний отрицательного потенциала, оси которых соответствуют проекции кромки полуплоскости на плоскость наблюдений. Максимальная отрицательная аномалия наблюдается на уровне источника тока. Показательно, что с приближением источника к полуплоскости изолинии аномального поля становятся близкими к окружностям.

При наличии двух или более разрывных нарушений картина аномального поля усложняется из-за наложения эффектов от каждого из этих объектов. Примеры аномального поля при наличии двух погруженных полуплоскостей, моделирующих картины поля, когда разрывные нарушения пересекаются (рис. 5) или параллельны (рис. 6), дают представление о характере аномального поля в этих случаях.

В случаях сложного характера аномального поля его интерпретации помогут графики по профилям, прокладываемым через аномальные области. Например, на графике аномального потенциала, показанного на рис. 8, можно заметить присутствие двух моделей разрывных нарушений, расположенных параллель-

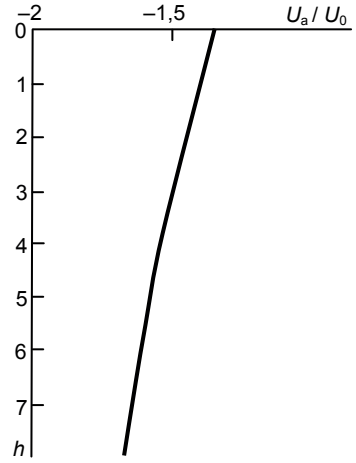

Рисунок 3. Пример зависимости относительной аномалии U_3 / U_0 для модели погруженной полуплоскости-проводника от глубины источника тока *h* (*H* = 1; 4)

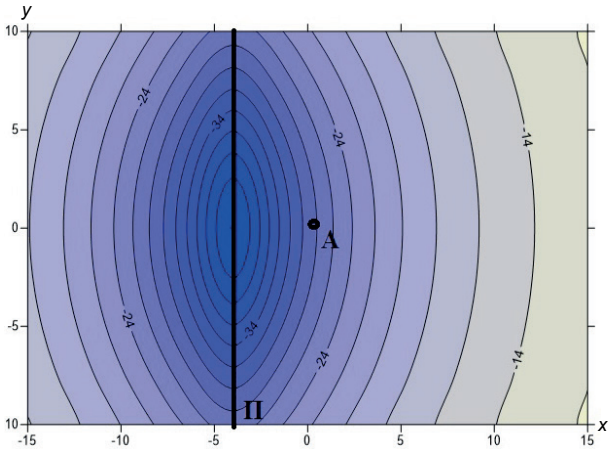

Рисунок 4. План изолиний аномального потенциала над погруженными полуплоскостью-проводником и источником тока *A*; *H* = 1, *h* = 4, x_4 = 4.

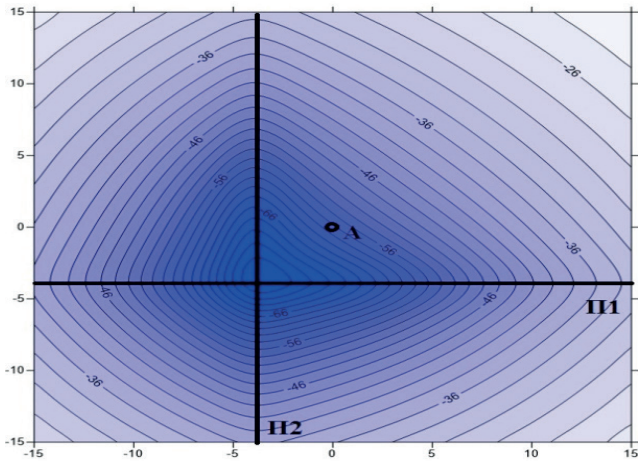

Рисунок 5. План изолиний аномального потенциала над двумя погруженными пересекающимися полуплоскостями-проводниками П1 и П2 и источником тока *A*.

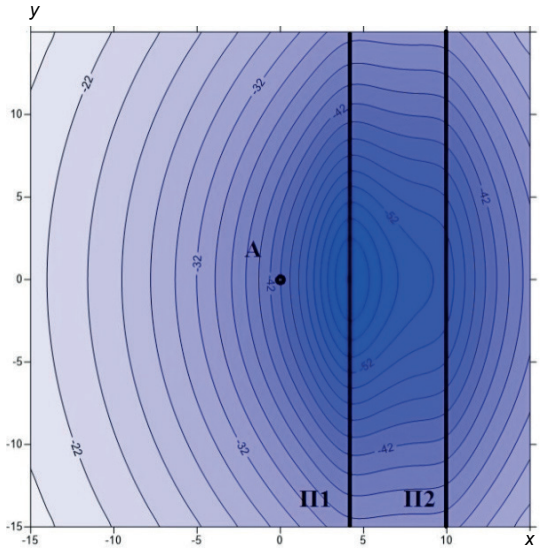

Рисунок 6. План изолиний аномального потенциала при наличии двух параллельных полуплоскостей-проводников

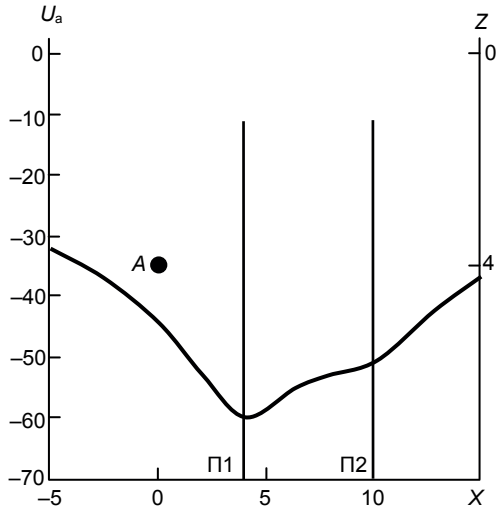

Рисунок 7. График аномального потенциала по профилю, проходящему над погруженным источником тока *A* вкрест двум параллельным полуплоскостям-проводникам П1 и П2

ника тока хорошо выражены отрицательные аномалии, которые связаны, по-видимому, с главными структурными элементами изучаемого комплекса горных пород. Ими являются тектонические разрывные нарушения, как показали результаты разведочных работ, имеющие рудоконтролирующее значение. Например, на геологическом разрезе (рис. 8, б) видно, что локальное рудное тело сформировалось на продолжении трещинной зоны, являющейся ветвью глубинного разрывного нарушения II. Данные электрокаротажа подтверждают высокую электропроводность выделяемых на участке тектонических нарушений. Наиболее четко субмеридиональной отрицательной аномалией фиксируется тектоническое разрывное нарушение, условно обозначенное ТН I. С ним связано рудное тело в северной части планшета.

Две других локальных рудных залежи обнаружены в районе пересечения субмеридионального (ТН II) и субширотного нарушений. Вследствие наложения аномалий от этих объектов и из-за специфики способа выделения аномального поля их присутствие проявляется менее отчетливо, чем нарушение ТН I. Важно отметить, что помимо рудоконтролирующих тектонических нарушений в аномальном поле проявляются границы рудоперспективной площади. Так, на плане изолиний аномального потенциала заметен его рост в северном направлении, что свидетельствует о снижении электропроводности массива горных пород. Такая картина типична для перехода от метаморфизованных к неизмененным горным породам, что свидетельствует о выходе из рудоперспективной зоны.

На изучаемой площади зафиксировано несколько слабых аномалий вызванной поляризации. Часть из них, но далеко не все соответствуют обнаруженным рудным залежам. В связи с этим напрашивается следующий методический вывод. Целесообразно на первом этапе мелкомасштабных поисковых работ откартировать с помощью скважинной электроразведки разрывные нарушения глубокого заложения, а затем выполнять детальные поиски, например методом ВП в скважинном или полевом варианте в окрестностях этих структурных элементов. Дело в том, что при применении метода ВП наиболее перспективно изучение градиента поля, причем возбуждающее поле должно быть ориентировано вкрест простирания аномалиеобразующего объекта. Предполагается, что при наличии данных мелкомасштабной съемки при детальной электроразведке будут соблюдены оптимальные условия для ее проведения.

Заключение

Результаты математического моделирования и практический опыт подтверждают перспективность выделения и интер-

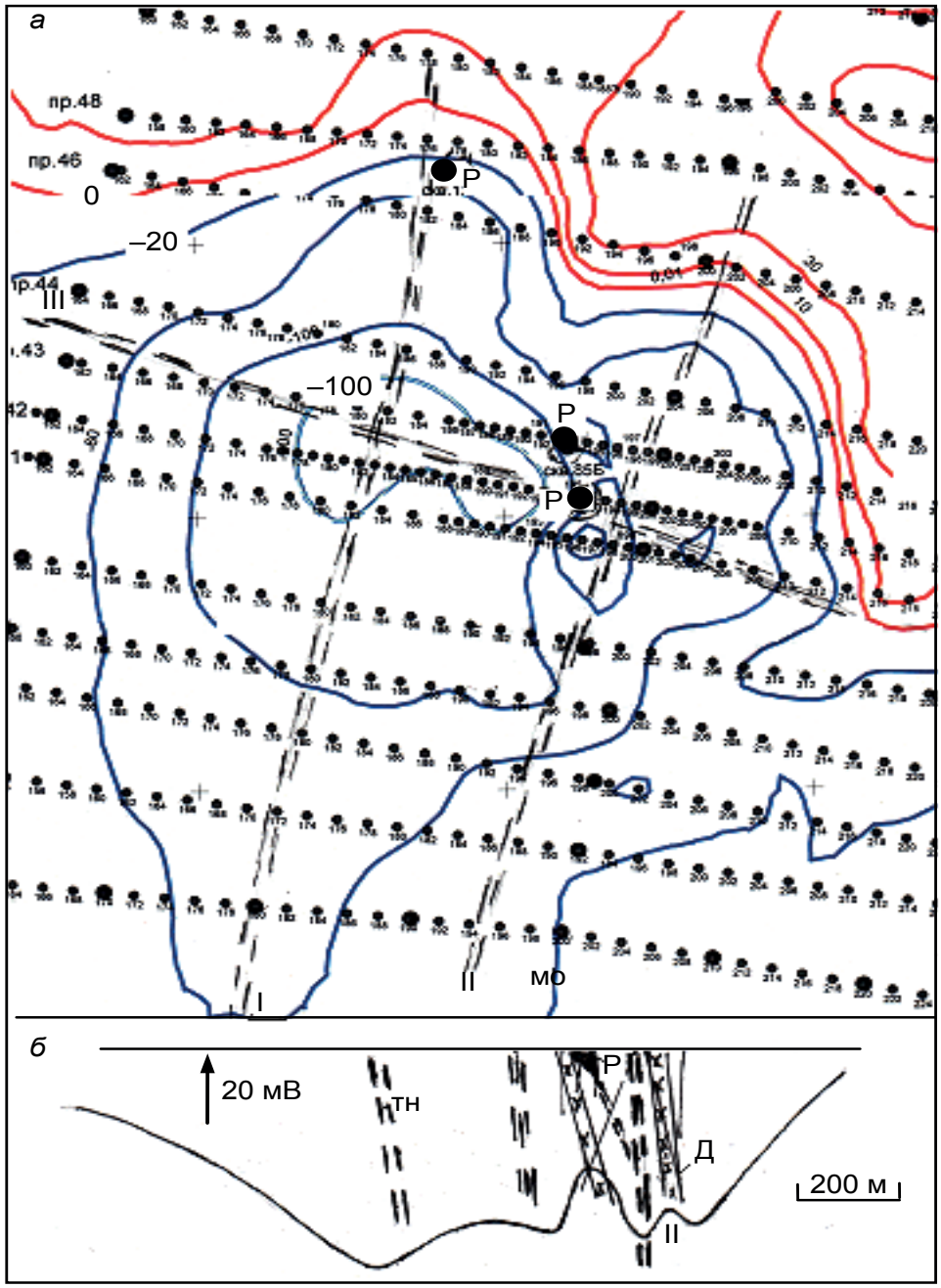

Рисунок 8. План изолиний – *а* и график – *б* аномального потенциала по разведочному профилю 42 на поисково-разведочном участке Западный (по Р. Ф. Гилазтдинову). ТН – разрывные тектонические нарушения, Р – рудные тела, Д – дайки.

претации аномального поля погруженного источника тока для изучения рудоносных структур. Ориентирование скважинной электроразведки только на обнаружение рудных залежей было в какой-то мере оправданным, когда велись поиски на небольших глубинах. Поиски глубокозалегающих объектов требуют учета различных признаков их возможного нахождения. Это участки горных пород со следами метасоматических изменений, системы малых интрузий в виде даек, разрывные тектонические нарушения глубокого заложения. Все эти объекты заметно нарушают однородность среды, являются достаточно крупными и, как показывает практика, могут быть обнаружены при мелкомасштабных исследованиях методами электроразведки. При этом наиболее благоприятные предпосылки существуют для применения скважинной электроразведки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванкин П. Ф. Морфология глубоковскрытых магматогенных рудных полей. М.: Недра, 1970. 288 с.
2. Ivanov K. S., Puchkov V. N., Fyodorov Yu. N., Erokhin Yu. V., Pogromskaya O. E. Tectonics of the Urals and adjacent part of the West-Siberian platform basement: Main features of geology and development // Journal of Asian Earth Sciences. 2013. Vol. 72. P. 12–24.
3. Мегеря В. М., Бембель С. Р., Бембель Р. М. Геосолитонная концепция образования месторождений углеводородов // Геофизика. 2001. Спец. вып. С. 50–53.
4. Виноградов А. М. Геополя и колчеданы Южного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 185 с.
5. Сапожников В. М., Ермолаев К. М., Ковтун Д. Б. Скважинная электроразведка пластинообразных малых интрузий в рудных полях // Изв. УГГУ. 2016. Вып. 3(43). С 46–49.
6. Семенов М. В., Сапожников В. М., Авдевич М. М. и др. Электроразведка рудных полей методом заряда. Л.: Недра, 1984. 216 с.

7. Виноградов А. М., Сапожников В. М. Алгоритмическое представление процесса интерпретации геополей // Изв. УГГУ. 2014. Вып.1(33). С. 5–11.
8. Сапожников В. М. Диск, полуплоскость и плоскость с вырезом, имеющие предельную или конечную электропроводность, в поле точечного источни-ка тока // Изв. УГГУ. Сер. геология и геофизика. 1996. Вып. 5. С. 111–115.

REFERENCES

1. Ivankin P. F. 1970, *Morfologiya glubokovskrytykh magmatogennykh rudnykh poley* [Morphology of deeply dissected magmatic ore fields], Moscow, p. 288.
2. Ivanov K. S., Puchkov V. N., Fyodorov Yu. N. et al. 2013, Tectonics of the Urals and adjacent part of the West – Siberian platform basement; Main features of geology and development. Journal of Asian Earth Sciences, no. 72, pp. 12–24.
3. Bembel' R. M., Megerya V. M., Bembel' S. R. 2001, *Geosolitonnaya kontseptsiya obrazovaniya mestorozhdeniya uglevodorodov* [Geo soliton concept of formation of hydrocarbon deposits]. *Geofizika, 50 let «Khantymansiyskgeofizike»* [Russian Geophysics, 50 years of JSC "Khantymansiyskgeofizika"], pp. 50–53.
4. Vinogradov A. M. 2004, *Geopolya i kolchedany Yuzhnogo Urala* [Geofields and pyrites of the Southern Urals], Ekaterinburg, 185 p.
5. Sapozhnikov V. M., Ermolaev K. M., Kovtun D. V. 2016, *Skvazhinnaya elektrorazvedka plastinoobraznykh malykh intruziy v rudnykh polyakh* [Borehole electric prospecting of small plate-like intrusions in the ore fields]. *Izvestiya UGGU* [News of the Ural State Mining University], no. 3(43), pp. 46–49.
6. Semenov M. V., Sapozhnikov V. M., et al. 1981, *Elektrorazvedka rudnykh poley metodom zaryada* [Electrical prospecting of ore fields by the method of charge], Leningrad, 216 p.
7. Vinogradov A. M., Sapozhnikov V. M. 2014, *Algoritmicheskoe predstavlenie protsessa interpretatsii geopoley* [Algorithmic presentation of the interpretation process of geofields]. *Izvestiya UGGU* [News of the Ural State Mining University], no. 1(33), pp. 5–14.
8. Sapozhnikov V. M. 1996, *Disk, poluploskost' i ploskost' s vyrezom, imeyushchie predel'nuyu ili konechnuyu elektroprovodnost', v pole tochechnogo istochnika toka* [Disc, half-plane, and plane with a cut having a finite limit or conductivity, in the field of the current source as a point]. *Izvestiya UGGU, seriya geologiya i geofizika* [News of the Ural State Mining University, Series Geology and geophysics], no. 5, pp. 11–115.

Вадим Михайлович Сапожников,
elrswm@ursmu.ru
Кирилл Михайлович Ермолаев,
Уральский государственный горный университет
Россия, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Vadim Mikhaylovich Sapozhnikov,
elrswm@ursmu.ru
Kirill Mikhaylovich Ermolaev,
Ural State Mining University
Ekaterinburg, Russia