

СКВАЖИННАЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА ПЛАСТИНООБРАЗНЫХ МАЛЫХ ИНТРУЗИЙ В РУДНЫХ ПОЛЯХ

В. М. Сапожников, К. М. Ермолаев, Д. Б. Ковтун

Well electrical prospecting of platelike minor intrusions in the ore fields

V. M. Sapozhnikov, K. M. Ermolaev, D. B. Kovtun

During exploration and prospecting works, when using the method of a charge within the ore fields there is a problem of accounting influence of inhomogeneities of various genesis. In particular, it concerns the dike complex rocks. For immersed point source of current, authors have made the mathematical simulation of anomalous field caused by the presence of submerged half plane – insulator, and this simulation allowed to justify method of detecting steeply dipping bodies of small intrusions that frequently have ore-controlling value. Calculations show that for a successful separation of platelike anomaly-forming objects such as dikes, models of which can be half planes it is necessary to determine abnormal potential and its gradient. The latter is most convenient for interpretation, since it allows selecting objects confidently, even when there is a system of similar bodies. Practice confirms this condition, as demonstrated in the provided charts of the anomalous field and its gradient. The experience of exploration of ore fields, especially in the areas of active rock crushing, shows that bodies of small intrusions are quite contrasting anomaly-forming objects and without correct interpretation of related field disturbances, the successful interpretation of these measurements is difficult.

Keywords: small intrusion; dike; half-plane; immersed power source; anomalous potential and its gradient.

При поисково-разведочных работах методом заряда в пределах рудных полей возникает проблема учета влияния неоднородностей различного генезиса. В частности, это касается дайкового комплекса горных пород. Для погруженного точечного источника тока выполнено математическое моделирование аномального поля, обусловленного присутствием погруженной полуплоскости-изолятора, позволившее обосновать методику обнаружения крутопадающих тел малых интрузий, имеющих часто рудоконтролирующее значение. Расчеты показывают, что для успешного выделения пластинообразных аномалиеобразующих объектов типа даек, моделями которых могут быть полуплоскости, следует определять аномальный потенциал и его градиент. Последняя характеристика наиболее удобна для интерпретации, так как позволяет уверенно выделять объекты даже тогда, когда имеется система подобных тел. Практика подтверждает это положение, что продемонстрировано на приводимых графиках аномального поля и его градиента. Опыт разведки рудных полей, особенно в регионах активного смятия горных пород, показывает, что тела малых интрузий являются достаточно контрастными аномалиеобразующими объектами и без правильного толкования связанных с ними возмущений поля успешная интерпретация данных измерений затруднительна.

Ключевые слова: малая интрузия; дайка; полуплоскость; погруженный источник тока; аномальный потенциал и его градиент.

Установлено, что большая группа магматогенных рудных месторождений, получивших название корневых, представляет систему рудных залежей, окружающих их гидротермально измененных пород и поздних магматических отщеплений. Все эти объекты имеют общие корни (или рудно- и магмовыводящие каналы), уходящие на глубину внутрь крупного интрузива, производными которого они являются [1–3]. Считается, что создавшие эти образования растворы поступали из верхних частей материнского интрузива в виде потоков, двигавшихся по тектоническим нарушениям, контактам геологических тел и другим проницаемым каналам, определяющим форму новообразований.

Важным элементом формировавшихся при этом структур являются тела малых интрузий, имеющих как дорудное, так и пострудное происхождение. Поскольку формирующие их магматогенные растворы были относительно вязкими, то малые интрузии преимущественно наследуют форму плоских субвертикальных трещин большой протяженности по длине при относительно малой мощности. Достаточно часто малые интрузии не выходят к дневной поверхности и надежно выявляются только по пересечениям в скважинах. Типичными являются образования поясов даек, которые развиваются по системе трещин. Так как последние нередко образуют взаимно ортогональные пересечения, то и следующие их дайки формируют разнонаправленные пояса.

Пластинообразную форму имеют также кварцевые и пегматитовые жилы, угольные пласты и другие объекты, представляющие поисковый интерес. Тела же малых интрузий как типичные объекты рудных полей являются косвенными индикаторами рудоперспективных участков при поисковых работах и требуют внимания при исследовании структуры рудных полей и месторождений на стадии разведки. Неизбежно возникает необходимость в классификации аномалий в сложностроенных средах, типичных для месторождений твердых полезных ископаемых. Поэтому исследование закономерностей в формировании аномалий, связанных с геологическими телами, сопутствующими продуктивным образованиям, представляет несомненный интерес.

Общим для всех отмеченных объектов является их относительно высокое удельное сопротивление, которое особенно аномально в случае,

когда вмещающие их горные породы метаморфизованы и обогащены сульфидами. Например, сопротивление тел малых интрузий в рассматриваемом далее рудном поле на порядок выше, чем у вмещающих их измененных вулканогенных пород. Следовательно, подобные магматогенные тела являются контрастными объектами при применении электроразведки и при оптимальных условиях возбуждения и измерения могут создавать ощутимые аномальные эффекты, по которым возможно их обнаружение.

Для рассмотрения предпосылок обнаружения малых интрузий, имеющих часто пластинообразную форму, можно использовать простую модель полуплоскости – изолятор. Решение задачи об аномальном потенциале U_a точечного источника A тока I в пространстве с удельным сопротивлением ρ в присутствии полуплоскости имеет вид [4]:

$$U_a = \frac{Q}{\pi} \left(R^+ \arctg \frac{r^-}{2L} + R^- \arctg \frac{r^+}{2L} \right), \quad (1)$$

где

$$Q = \frac{\rho I}{4\pi}, R^+ = \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_1}, R^- = \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1},$$

$$r^- = r_2 - r_1, r^+ = r_2 + r_1, L = \sqrt{\alpha(1 - \cos(\gamma))l(1 - \cos(\theta))},$$

r_1, r_2 – расстояния до точки M измерений поля от источника A и его зеркального отражения в полуплоскости соответственно; l – соответственно кратчайшие расстояния от A и M до кромки полуплоскости; 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, погруженной вертикально в полупространство с сопротивлением ρ при глубине кромки H и глубине погружения источника тока h решение (1) усложняется. Считается, что среда условно безграничная, но дополнительно вводятся в рассмотрение отображения в плоскости дневной поверхности полуплоскости и источника A . Удобно начало координат перенести на дневную поверхность, принять $Q=100$, а все линейные размеры выразить в долях $H=1$.

Результаты расчетов аномального поля над погруженными полуплоскостью-изолятором и источником тока, частично приведенные на рис. 2–5, позволили сделать следующие выводы.

Присутствие полуплоскости проявляется знакопеременной аномалией U_a с положительной ветвью, обращенной в сторону погруженного источника. Наиболее четко полуплоскость фиксируется по графику градиента аномального потенциала, который над ее проекцией имеет экстремум. Если градиент вычислять вдоль оси x (рис. 1), экстремум положительный. С погружением источника амплитуда графика U_a уменьшается и его экстремумы отодвигаются от оси полуплоскости (рис. 2, а). Однако положение экстремума градиента аномального потенциала сохраняется и соответствует оси полуплоскости. Хотя с погружением токового источника аномальный потенциал уменьшается, но нормальный потенциал U_0 убывает еще быстрее, и относительная аномалия $U_a/U_0 = f(h)$ увеличивается. Подобная тенденция продемонстрирована на при-

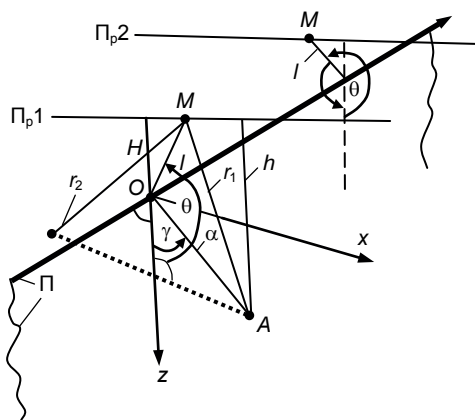


Рисунок 1. Модель полуплоскости П и точечного источника тока А с примерами профилей измерения в цилиндрической системе координат с началом в точке О – проекции А на кромку полуплоскости / Figure 1. Model of half plane (P) and point-source of current (A) with examples of profile measurement in a cylindrical coordinate system with the origin at the point O – projection of A on the edge of the half plane.

мере, представленном на рис. 3. Следовательно, для обнаружения погруженных объектов, подобных рассматриваемой полуплоскости, скважинная электроразведка имеет преимущества перед ее наземным вариантом.

Показательно, что характерные особенности аномального потенциала и градиента сохраняются при применении двухполюсной установки АВ, когда один точечный источник расположен на дневной поверхности, а другой погружен в скважину (рис. 2, б). Следовательно, на практике для картирования геологических объектов пластинчатой формы возможно применение токовой установки с разнополярными электродами, погруженными в скважину на разные глубины.

При площадных измерениях присутствие пластинообразного объекта высокого сопротивления может быть установлено по характерному виду изолиний аномального поля. Типичные картины изолиний представлены на рис. 4.

Как и для профилей, присутствие полуплоскости проявляется по смене знака аномального потенциала со сгущением изолиний над осью данного аномалиеобразующего объекта. На профилях, проложенных вкрест простирания полуплоскости, при их удалении от источника тока экстремумы знакопеременных ветвей аномального потенциала все более отодвигаются от оси полуплоскости. Следовательно, будет ошибкой использование экстремумов для целей корреляции аномалий. Гораздо отчетливее полуплоскость обнаруживается по изолиниям градиента

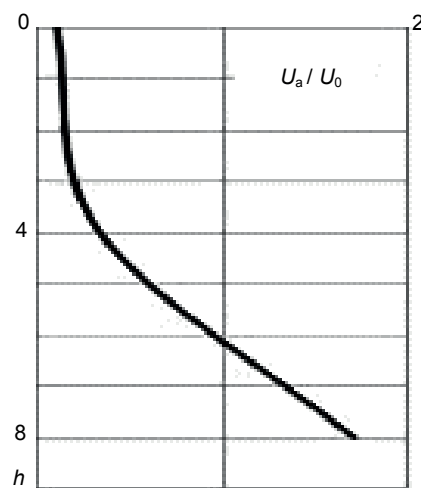


Рисунок 3. Пример зависимости относительной аномалии U_a / U_0 для модели погруженной полуплоскости-изолятора от глубины источника тока h ($H = 1$ и $x_A = 4$) / Figure 3. An example of dependence of the relative anomaly U_a / U_0 for the model of submerged half plane – insulator on the current source depth h ($H = 1$ and $x_A = 4$).

аномального потенциала, оси которых соответствуют проекции кромки полуплоскости на условную дневную поверхность.

Приведем некоторые дополнительные сведения относительно характера аномалий, обусловленных объектом в форме полуплоскости. При наклонном залегании с падением в сторону источника тока на графиках U_a происходит дополнительное удаление максимума аномального потенциала от проекции кромки полуплоскости на ортогональный к ней профиль, и положительная ветвь аномалии превалирует по отношению к отрицательной ветви. При падении полуплоскости в сторону от источника аналогичные изменения происходят с отрицательной ветвью аномального потенциала. Наклонное залегание полуплоскости проще проявляется на графиках и плане изолиний градиента аномального потенциала.

Отмечается нарушение симметрии и выполаживание вида аномалии в сторону падения полуплоскости. При значительной мощности пластинообразного тела аномалия над ним расширяется. Представление о влиянии мощности тела на вид аномалии можно получить, обратившись к монографии [5], на примере вертикального пласта, выходящего к дневной поверхности.

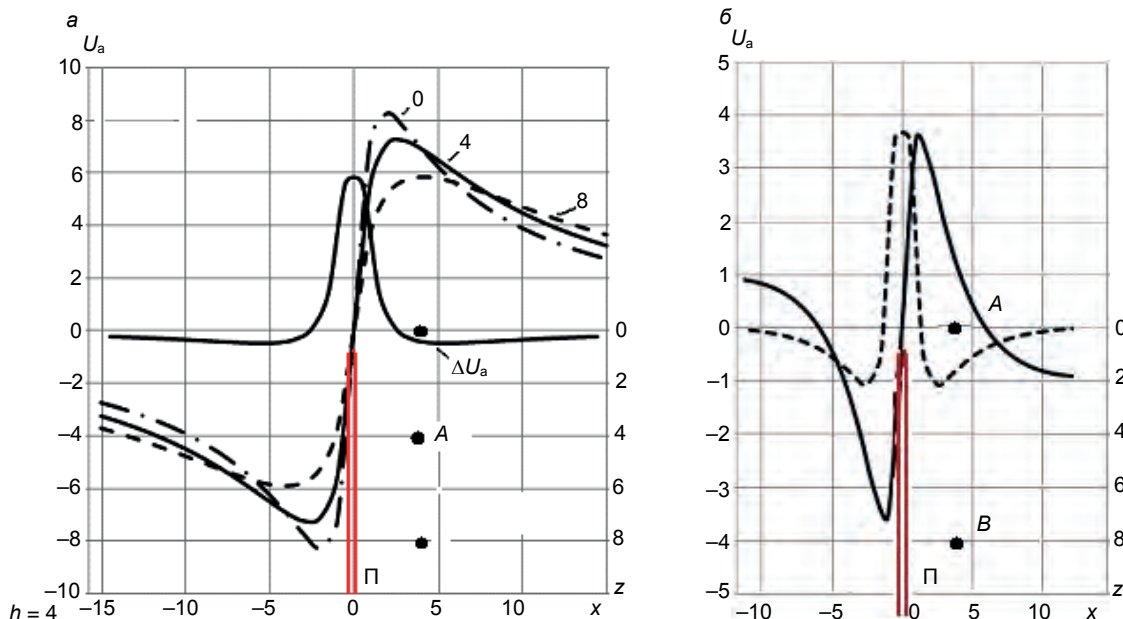


Рисунок 2. Графики аномального потенциала U_a над погруженной полуплоскостью-изолятором ($H = 1$) при различной глубине h (параметр графиков) точечного источника тока А и график градиента аномального потенциала ΔU_a ($h = 4$) – а; графики U_a и ΔU_a для двухполюсной токовой установки АВ ($h_A = 4$, $h_B = 8$) – б / Figure 2. Charts of the anomalous potential U_a over submerged half plane – insulator ($H = 1$) at different depths of h (charts parameter) point current source (A) and a graph of the gradient of anomalous potential ΔU_a ($h = 4$) (a); charts U_a and ΔU_a for bipolar current installation AB ($h_A = 4$, $h_B = 8$) (б).

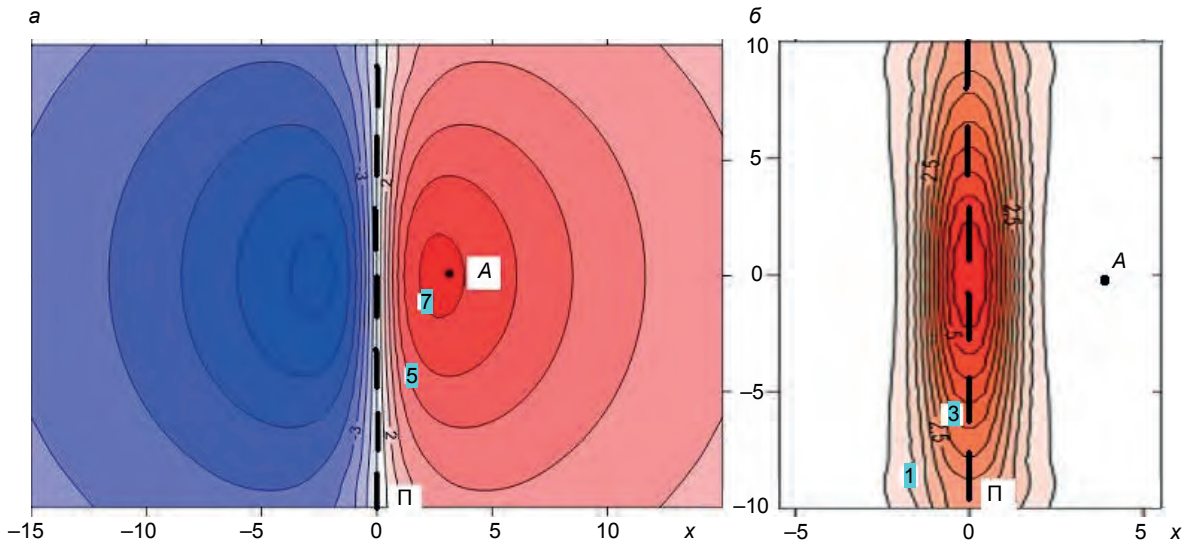


Рисунок 4. Изолинии аномального потенциала – а и его градиента – б на площади границы полупространства (модель дневной поверхности), включающей погруженную полуплоскость-изолятор при $H = 1$, $h = 4$ и $x_A = 4$ / Figure 4. Isolines of the anomalous potential (a) and its gradient (b), on the area of half plane border (day surface model), including a submerged half plane – insulator when $H = 1$, $h = 4$, and $x_A = 4$.

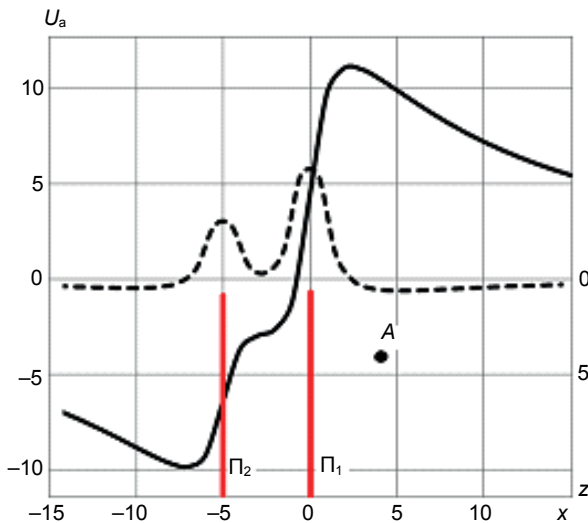


Рисунок 5. Графики аномального потенциала U_a и его градиента ΔU_a (штриховая кривая) поля источника тока A для среды, содержащей две погруженные полуплоскости-изоляторы Π_1 и Π_2 / Figure 5. Charts of the anomalous potential U_a and its gradient ΔU_a (dashed line) of the field current source (A) for a medium, comprising two submerged half planes – insulators (Π_1 and Π_2).

В реальных средах возможно присутствие пояса пластинообразных малых интрузий, например с субпараллельным простираем и падением. В этом случае происходит наложение аномальных эффектов, и картина аномального поля усложняется. В качестве примера на рис. 5 показаны графики U_a и ΔU_a для случая присутствия в среде двух параллельных погруженных полуплоскостей, расположенных по одну сторону от источника тока. Как видим, над более удаленным объектом аномальный потенциал имеет форму, заметно отличающуюся от той, которая характерна для одиночной полуплоскости. По графикам же градиента аномального потенциала удаленная полуплоскость фиксируется достаточно надежно. Следовательно, при практических работах при интерпретации аномального поля погруженного источника тока необходимо использовать градиентную характеристику.

Реальные тела малых интрузий конечно не являются идеальными изоляторами. Однако их заметное превышение по удельному сопротивлению относительно вмещающих пород позволяет считать, что аномалии от них имеют такой же вид, который установлен для применяемой модели-изолятора, хотя амплитуды аномалий будут меньше. Поскольку интерпретация аномального поля носит качественный характер, использование моделей с предельно высоким сопротивлением для установления типичного вида аномалий применительно к широкому кругу высокоомных объектов вполне допустимо. В этом убеждает и практический опыт.

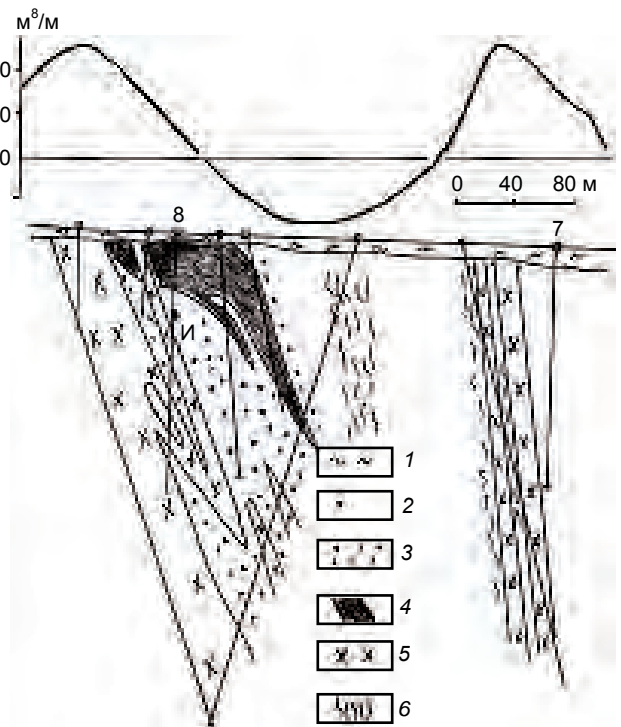


Рисунок 6. Пример проявления малых интрузий в форме даек, которые отметились положительными аномалиями градиента потенциала поля погруженного источника тока, на одном из разведочных профилей с соответствующим геологическим разрезом. 1 – покровные отложения; 2 – вулканогенные породы; 3 – сульфидизация пород; 4 – руды; 5 – габбро-диоритовые тела даек; 6 – зоны трещиноватости и рассланцевания; И – точечный источник тока (по материалам Уральской геолого-съемочной экспедиции, Р. Ф. Гилаздинова, В. М. Сапожникова) / Figure 6. An example of manifestations of small intrusions in the form of dikes, which were noted with the positive anomalies of the field potential gradient of immersed current source, in one of the exploratory profiles with the corresponding geological section (based on the Ural geological survey expedition and R. F. Gilazdinov, V. M. Sapozhnikov).

В качестве примеров проявления малых интрузий при электроразведочных работах на участке рудного поля на рис. 6 и 7 приведены графики градиента аномального поля, полученные при обработке наблюдений поля погруженного точечного источника тока в скважину 8 на глубину 70 м, вскрывшей медно-цинковую залежь (Приполярный Урал). Картина аномального потенциала, выделенного путем исключения нормального поля статистическим способом [6], оказалась достаточно сложной. В нём проявились различные неоднородности среды, включая несколь-

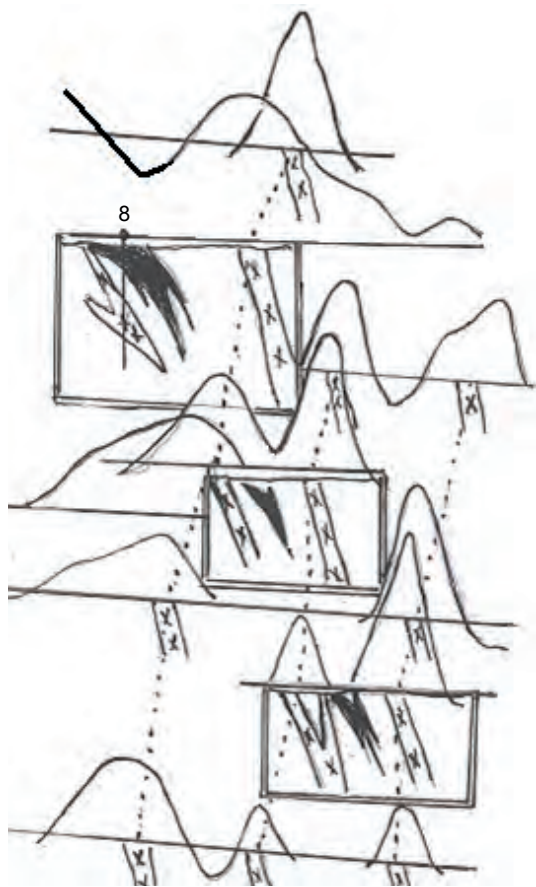


Рисунок 7. Графики градиента аномального потенциала по профилям площадной съемки поля погруженного источника тока в скв. 8, геологические разрезы (в рамках) и корреляционные оси положительных аномалий, соответствующие выделяемым дайкам (по материалам Уральской геолого-съемочной экспедиции, Р. Ф. Гилазтдинова, В. М. Сапожникова) / Figure 7. Charts of the anomalous potential gradient by profiles of aerial survey of the field of immersed current source in the well 8, geological sections (within the limits) and correlation axis of positive anomalies corresponding to allocated dikes (based on the Ural geological survey expedition and R. F. Gilaztdinov, V. M. Sapozhnikov).

ко небольших разобщенных рудных тел. Ограничимся рассмотрением аномалий, связанных с дайками магматогенных пород, пронизывающих вмещающие вулканогенные породы, местами преобразованные гидротермальными процессами с развитием сульфидизации.

Из рис. 6 видно, что на графике градиента аномального потенциала наиболее яркие положительные аномалии соответствуют выходам под покровные рыхлые отложения магматогенным телам в форме крутопадающих даек. Присутствие в разрезе этих даек подтверждено буровой разведкой. По геологическому разрезу хорошо видно, что все аномальные тела (дайки, зоны сульфидизации, незалеченные зоны трещиноватости и расщепления, сульфидная залежь) имеют общие корни и сформиро-

вались из единого очага, каким могла служить более глубокозалегающая крупная материнская интрузия.

На рис. 7 приведена серия графиков градиента аномального потенциала поля источника тока, помещенного в скважину 8. Графики соответствуют профилям площадных наблюдений (на участке протяженностью 1 км), часть из которых близка разведочным профилям с построенными для них геологическими разрезами. Положительные аномалии на этих графиках связываются также с проявлением малых интрузий, образующих пояс субпараллельных даек, присутствие которых частично зафиксировано буровыми работами. На геологических профилях выделены также разобщенные небольшие сульфидные залежи с крутым падением на восток.

Приведенный пример и другие [7] свидетельствуют как о значительной роли малых интрузий при формировании рудных полей, так и о создании ими контрастных неоднородностей, существенно влияющих на аномальные поля в пределах рудных полей. И хотя главный интерес при изучении перспективных площадей представляют руды без учета возмущений, создаваемых малыми интрузиями, продуктивная интерпретация данных электроразведки в подобных условиях будет просто неэффективна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванкин П. Ф. Морфология глубокоовскрытых магматогенных рудных полей. М.: Недра, 1970. 288 с.
2. Казизин Ю. В. Метасоматизм в земной коре. Л.: Недра, 1979. 208 с.
3. Ivanov K. S., Puchkov V. N., Fyodorov Yu. N. et al.: 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. pp. 12–24.
4. Сапожников В. М. Диск, полуплоскость и плоскость с вырезом, имеющие предельную или конечную электропроводность, в поле точечного источника тока // Изв. УГГУ. 1996. Вып. 5. С. 11–15.
5. Семёнов М. В., Сапожников В. М. и др. Электроразведка рудных полей методом заряда. Л.: Недра, 1981. 216 с.
6. Виноградов А. М., Сапожников В. М. Алгоритмическое представление процесса интерпретации геополей // Изв. УГГУ. 2014. Вып. 1(33). С. 5–14.
7. Аузин А. А. Комплексирование методов геофизических исследований в скважинах (на примере Воронежской антиклизы). Воронеж: Научная книга, 2010. 260 с.

REFERENCES

1. Ivankin P. F. 1970, *Morfologiya glubokovskrytykh magmatogennykh rudnykh poley* [Morphology of deeply dissected magmatic ore fields], Moscow, 288 p.
2. Kazitsin Yu. V. 1979, *Metasomatizm v zemnoy kore* [Metasomatism in the earth's crust], Leningrad, 208 p.
3. 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, vol. 72, pp. 12–24.
4. Sapozhnikov V. M. 1996, *Disk, poluploskost' i ploskost' s vyrezom, imeyushchie predel'nuyu ili konechnuyu elektroprovodnost', v pole tochechnogo istochnika toka* [The disc, half-plane, and the plane with a cut having a limited or finite conductivity, in a field of the point current source]. *Izvestiya UGGU* [News of the Ural State Mining University], vol. 5, pp. 11–15.
5. Semenov M. V., Sapozhnikov V. M. et al. 1981, *Elektrorazvedka rudnykh poley metodom zaryada* [Electrical exploration of ore fields by the method of charge], Leningrad, 216 p.
6. 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], vol. 1, pp. 5–14.
7. Auzin A. A. 2010, *Kompleksirovanie metodov geofizicheskikh issledovaniy v skvazhinakh (na primere Voronezhskoy antiklizy)* [Integration of methods of geophysical researches in wells (on the example of the Voronezh anticline)], Voronezh, 260 p.

Вадим Михайлович Сапожников,
elrswm@ursmu.ru

Кирилл Михайлович Ермолаев,
Денис Борисович Ковтун,
Уральский государственный горный университет
Россия, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Vadim Mikhaylovich Sapozhnikov,
elrswm@ursmu.ru

Kirill Mikhaylovich Ermolaev,
Denis Borisovich Kovtun,
Ural State Mining University
Ekaterinburg, Russia