

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЗОН НАРУШЕННОСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ПО ДАННЫМ ПОДЗЕМНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Р.М. Гайсин<sup>1</sup>, А.Ю. Цариков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: rmgaisin@mail.ru

**Аннотация:** Рассмотрен метод точечных источников (МТИ) для определения положения вторичных зарядов, индуцированных на границах раздела сред с различной проводимостью в массиве горных пород. Метод позволяет оконтуривать зоны малоамплитудной нарушенности на основе данных подземной электроразведки. МТИ основан на фундаментальном решении уравнения Лапласа. По данным электроразведочных измерений составляется система линейных уравнений, количество которых определяется числом точек измерений на электроразведочном профиле, что приводит к необходимости ограничивать зону расчета положения вторичных зарядов. Выбор положения зоны расчета основывается на предположении о том, что она приурочена к максимуму аномального сигнала, который определяется как разность измеренных значений потенциала на электроразведочном профиле на нарушенном и ненарушенном массиве. Так как малоамплитудное нарушение приводит в первую очередь к изменению сопротивления на границах «угольный пласт — вмещающая порода», можно считать, что искомые вторичные заряды расположены в плоскости пласта. Для полученных электроразведочных данных составляется система уравнений, ее корректное решение возможно в том случае, если минимальное расстояние  $R$  между точками измерения и зоной расчета не равняется нулю. Решение системы позволяет вычислить величины вторичных зарядов, координаты которых привязаны к центрам ячеек на которые разбита зона расчета. Количество ячеек равно количеству уравнений системы. Результаты расчета сравниваются с определенным порогом, значения ниже порога обнуляются, что позволяет более четко оконтурить аномальную зону. Применение МТИ в комплексе с методом аналитического продолжения позволяет повысить надежность и достоверность геоэлектрического разреза исследуемого участка угольного пласта. Метод аналитического продолжения определяет центр аномальной зоны и соответственно положение зоны расчета, а МТИ оконтуривает ее. Все вычисления были проведены в программной среде MATLAB.

**Ключевые слова:** малоамплитудная тектоническая нарушенность, метод точечных источников, фундаментальное решение уравнения Лапласа, подземная электроразведка, экваториально-дипольное электрическое просвечивание, метод аналитического продолжения, цепные дроби, Matlab.

**Для цитирования:** Гайсин Р.М., Цариков А.Ю. Определение положения зон нарушенности угольных пластов по данным подземной электроразведки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 6. – С. 19–26. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-19-26.

### Location of damage zones in coal seams by underground resistivity prospecting

R.M. Gaysin<sup>1</sup>, A.Yu. Tsarikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia, e-mail: rmgaisin@mail.ru

---

**Abstract:** The distributed point source method (DPSM) can be used to locate secondary charges induced at interfaces of media with different conduction in rock masses. The method allows delineating zones of low-amplitude discontinuity by the data of underground resistivity prospecting. DPSM is based on the fundamental solution of the Laplace equation. By electrical measurements, a system of linear equations is built; the number of the equations is governed by the number of measurement points in the electrical survey line, which limits the location domain of secondary charges. The location domain is selected based on the assumption of adjacency to the maximum anomalous signal which is determined as a difference of measured potentials on the electrical survey lines in the damaged and intact rock mass. A low-amplitude discontinuity changes resistance at the coal–enclosing rock interface; thus, it is assumable that the secondary charges locate in the plane of seam. For the obtained electrical data, a system of equations is constructed. The correct solution of the system is possible if the minimum distance  $R$  between the measurement point and the calculation domain is nonzero. The system solution provides values of secondary charges the coordinates of which are pegged to centers of cells in the meshed calculation domain. The number of cells equals the number of equations in the system. The calculated data are compared with a certain threshold and the lower values are nulled, which allows a more distinct delineation of the anomalous zone. Using DPSM together with the analytical extension method improves efficiency and reliability of resistivity section of a test area in coal seam. The analytical extension method determines the anomalous zone center and, thus, the calculation domain location, while DPSM delineates the latter domain. All calculations are performed in MatLab.

**Key words:** low-amplitude tectonic discontinuity, distributed point source method, fundamental solution of the Laplace equation, underground resistivity prospecting, equatorial dipole electric sounding, analytical extension method, continued fractions, Matlab.

**For citation:** Gaysin R.M., Tsarikov A.Yu. Location of damage zones in coal seams by underground resistivity prospecting. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(6):19-26. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-19-26.

---

## Введение

Определение зон малоамплитудной нарушенности угольных пластов является актуальной задачей. Эти зоны приурочены к зонам проявлений газодинамической активности [1, 2], влияют на скорость продвижения очистного забоя — в среднем, по проведенным исследованиям, от 10% до 53% [3, 4], а также на безопасность ведения горных работ. Выявление и оконтуривание этих зон только маршейдерско-геологическими измерениями не всегда позволяет спрогнозировать их размер и положение. С целью уточнения геологического прогноза на шахтах проводятся геофизические исследования с использованием шахтной сейсморазведки и электроразведки. Возможности шахтной сейсморазведки ограничены следующими условиями: положение плоскости нарушения должно обеспечивать прием отраженных волн

сейсмоприемниками; при проведении сейсморазведочных работ необходимо исключить акустические помехи, связанные с работой технологического оборудования. От этих недостатков свободна подземная электроразведка, но разрешающая способность ее ниже, чем у сейсморазведки. Выходом из создавшегося положения является применение перекрывающихся измерений и компьютерная обработка данных электроразведочных измерений. Решение обратной задачи (определение зон нарушенности) затруднено ограниченностью выбора электроразведочных профилей и ограничением по мощности электрического генератора поля в шахтных условиях, что связано с требованиями безопасности ведения горных работ.

Оптимальным в сложившихся условиях является метод экваториально-дипольного электрического просвечивания. Суть

этого метода состоит в том, что в одной выработке устанавливается генератор электрического квазистационарного поля (электроды заземляются в почву и кровлю пласта), а по параллельной выработке с определенным шагом проводятся измерения разности потенциалов между почвой и кровлей. Вмещающие породы на угольных шахтах Кузбасса имеют пониженное сопротивление по сравнению с угольным пластом. Зоны тектонической нарушенности характеризуются еще более низким сопротивлением, что связывают с повышенной трещиноватостью и обводненностью этих зон.

### Постановка и результаты исследований

На границе раздела сред с различной проводимостью возникают избыточные заряды. Для того чтобы избавиться от влияния более мощного по сравнению с индуцированными зарядами источника поля — генератора, обычно вычитают из измеренных значений потенциала электрического поля значения поля, полученные на участке без аномалий (нарушений). Таким образом удается получить только поле, которое возникает в зоне нарушенности и которое обусловлено вторичными индуцированными зарядами. Сигнал на измерительном профиле можно считать равным

$$U_{\text{изм}} = U_{\text{норм}} + U_{\text{аном}}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{норм}}$  — поле в ненарушенном массиве;  $U_{\text{аном}}$  — поле, создаваемое вторичным источником, аномалией.

Решение обратной задачи — определение параметров и положения образующего аномалии объекта — непростой вопрос. Это связано с неединственностью решения и очень часто с его неустойчивостью.

Для исследования различных методов решения обратной задачи была создана программа моделирования [5]. В данной

программе моделировались электрические поля для различных параметров малоамплитудных тектонических нарушений, то есть решалась прямая задача. Созданное стационарное электрическое поле описывается уравнением Пуассона:

$$\Delta U_{\text{аном}} = f(r), \quad (2)$$

где  $\Delta$  — оператор Лапласа;  $f(r)$  — вещественная функция, которая характеризует распределение зарядов в пространстве [6].

Решение уравнения Пуассона возможно методом точечных источников, которое для потенциала поля  $U_{\text{аном}}$  в произвольной точке  $A$  определяется следующим выражением:

$$U(A) = \sum_{i=1}^N q_i g(A, P_i), \quad (3)$$

где  $q_i$  — заряд в точке  $P_i$ , их число равно  $N$  — количество точек измерения на профиле;  $g(A, P_i)$  определяется уравнением Лапласа и в трехмерном случае равно  $1/R$ ;  $R$  — расстояние между точками  $A$  и  $P_i$  [7, 8].

Уравнение (3) выражает принцип суперпозиции — поле в точке  $A$  является суммой полей, создаваемых всеми зарядами. Функция  $g(A, P_i)$  называется фундаментальным решением уравнения Лапласа и имеет особенность (равна бесконечности) при  $R = 0$ .

Метод точечных источников (МТИ) получил в последнее время распространение при моделировании электрического поля по известному распределению зарядов [6]. Нами предлагается использовать его для нахождения положения зарядов по измеренным значениям поля. Количество линейных уравнений в системе (3) будет определяться количеством точек измерений, следовательно, для решения системы количество зарядов не может быть больше. Мы имеем дело с аномальным  $U_{\text{аном}}$  полем, вызванным вторичными источниками в зоне нарушения, поэтому можно ограничить по-

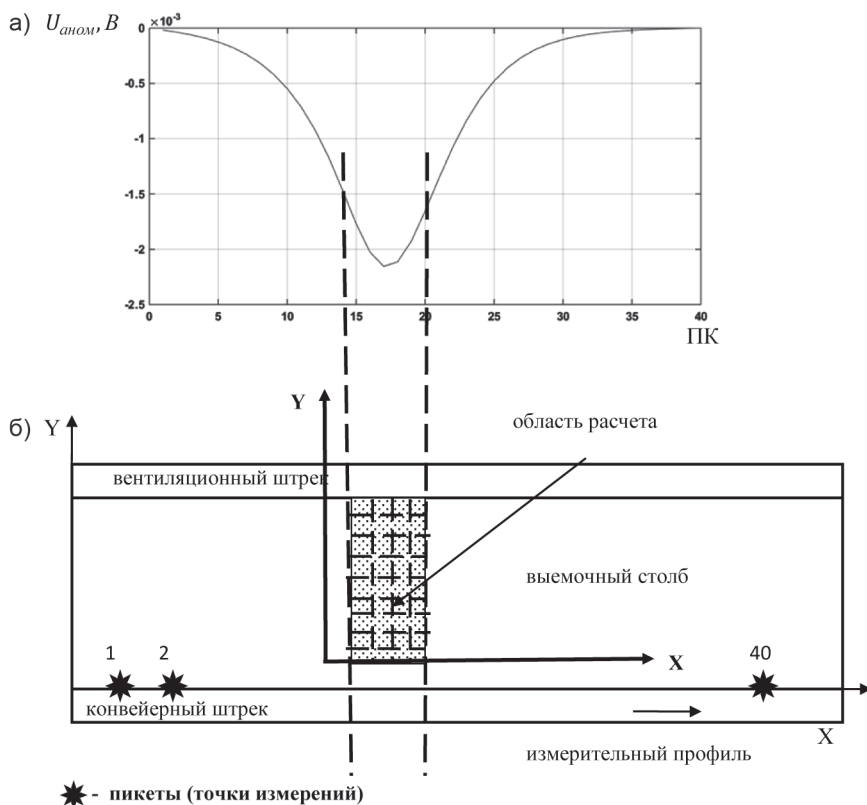


Рис. 1. Привязка положения зоны расчета к аномальному сигналу и ее разбиение на ячейки: значения потенциала, измеренные по конвейерному штреку (а); положение области расчета МТИ в выемочном столбе (б)

Fig. 1. Correlation of the calculation domain with the anomalous signal and meshing: (a) values of measured potential in conveyor drift; (b) location of DPSM domain in extraction panel

ложение зоны расчета в пространстве, привязав ее к максимуму аномального сигнала (рис. 1). Так как малоамплитудное нарушение приводит в первую очередь к изменению сопротивления на границах «угольный пласт — вмещающая порода», можно считать, что искомые вторичные заряды расположены в плоскости пласта. При составлении системы уравнений зона расчета выбирается таким образом, чтобы минимальное расстояние  $R$  между точками измерения и зоной расчета не равнялось нулю. Предварительные вычисления показали, что минимальное значение расстояния  $R$  должно быть больше 5 м. При меньших значениях  $R$  большие коэффициенты в

системе (3) равные  $1/R$  приводят к неустойчивым решениям, то есть небольшие изменения аномальных значений значительно меняют положение аномальной зоны. Выбранная зона расчета разбивается на прямоугольные ячейки, количество ячеек равно количеству точек измерения. Координаты заряда связывается с центром ячейки. Решение системы (3) дает значение заряда в каждой ячейке, максимумы соответствуют положению аномальной зоны.

Были проведены модельные исследования на 400-метровом профиле по аномальным кривым, полученным в соответствии с (1), была выбрана область расчета шириной 40 м (вдоль выработ-

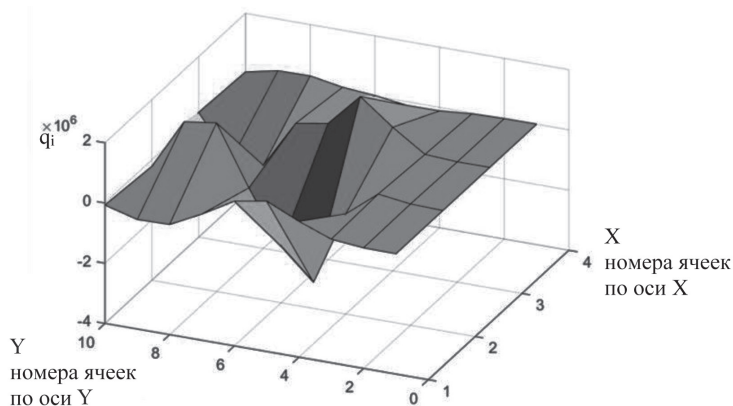


Рис. 2. Визуализация результатов расчета — распределение зарядов по ячейкам в зоне расчета  
 Fig. 2. Visualization of calculation results—distribution of charges in cells in the calculation domain

ки). Количество модельных данных на профиле равнялось 40, в связи с этим область расчета была разбита на 40 прямоугольных ячеек (10×11 м). В программной среде MATLAB [9] были проведены расчеты расстояний от точки измерения до середины ячейки.

Соответственно, было получено 40 уравнений, которые также были решены в программе MATLAB. Фундаментальная функция при расчете имела вид  $g(A, P_i) = 1/R$  (для трехмерного случая). Было проведено сравнение с фундаментальной функцией для двумерного случая вида  $g(A, P_i) = \ln(1/R)$ , которое показало худшее определение положения аномальной зоны.

Результаты расчета визуализированы в виде 3D поверхности, где пики — положительные заряды и впадины — отрицательные (рис. 2).

Для более явного выделения аномальной зоны использовалось пороговое шумоподавление, это позволяет выделить значения величин зарядов, превышающих заданный порог, меньшие значения — обнулялись. В результате был построен геоэлектрический разрез в программе Surfer (рис. 3). Как видно, модельной аномальной зоне (выделена белым квадратом) соответствуют положительные значения потенциала.

Данный метод применим только в случае, когда известна примерная область нахождения аномалии, то есть когда она четко выявляется на графике аномального сигнала. В реальных условиях это не всегда возможно. Поэтому положение центра аномальной зоны определяется методом аналитического продолжения, предложенным К.М. Ермохиным [10—13], а МТИ служит для оконтуривания аномальной зоны. В основе этого метода лежит представление измеренного сигнала в виде комплексного ряда Чебышева, затем комплексный ряд раскладывается в виде цепной дроби. Такое

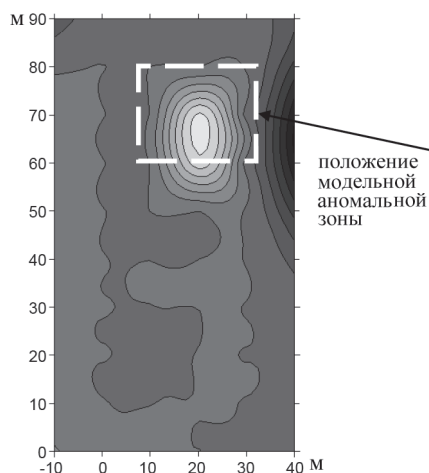


Рис. 3. Геоэлектрический разрез аномальной зоны  
 Fig. 3. Resistivity section of anomalous zone

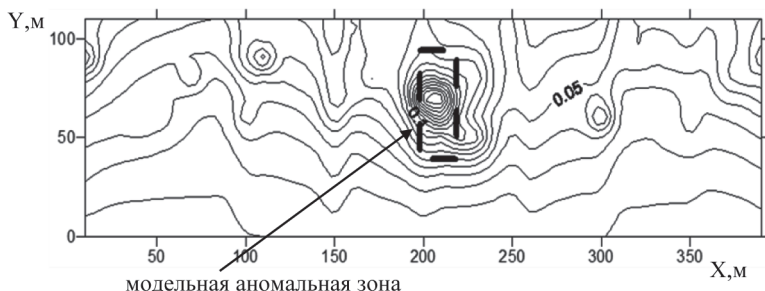


Рис. 4. Определение положения аномальной зоны в выемочном столбе  
 Fig. 4. Location of anomalous zone in extraction panel

представление позволило работать во всей комплексной плоскости, что связано с различными областями сходимости ряда Чебышева и цепной дроби. Результат определения аномальной зоны приведен на рис. 4.

Данный метод хорошо отбивает центр аномалии, более помехоустойчив и позволяет выделять близкорасположенные аномалии. Для обработки реальных данных методом аналитического продолжения в MATLAB была написана программа [14]. Применение этого метода

в комплексе с методом точечных источников позволит повысить достоверность интерпретации электроразведочных измерений.

На основании фактических данных был построен геоэлектрический разрез угольного пласта шахты Есаульская (Кузбасс) (рис. 5) и выявлена аномальная зона, приуроченная к повышенной трещиноватости кровли. В соответствии с вышесказанным для аномальной зоны был использован МТИ, который позволил детализировать аномалию.

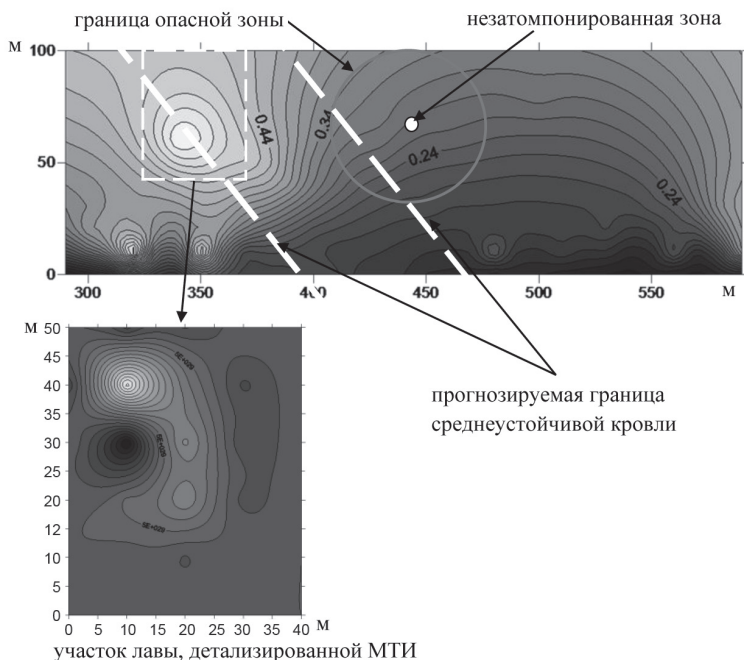


Рис. 5. Геоэлектрический разрез лавы в районе незатомпированной скважины (ш. Есаульская)  
 Fig. 5. Resistivity section of longwall near unstemmed hole (Yesaul Mine)


## Выводы

Метод аналитического продолжения позволяет достаточно точно определить центр зоны нарушенности в угольном пласте, что обеспечивает выделение зоны расчета с использованием метода

точечных источников и детализировать ее.

В конечном итоге более точно оконтуривается нарушенная зона и повышается помехоустойчивость электрометрических измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байкенжина А. Ж. Выявление и картирование тектонических нарушений как индикаторов выбросоопасных зон методом МОГТ-3D в условиях карагандинского угольного бассейна // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2018. — Т. 329. — № 8. — С. 145–155.
2. Cao Y., Davis A., Liu R., Liu X., Zhang Y. The influence of tectonic deformation on some geochemical properties of coals — a possible indicator of outburst potential // International journal of coal geology. 2003. Vol. 53. Iss. 2. Pp. 69–79.
3. Киржнер Ф. М., Скуба В. Н., Козионов Е. Н. и др. Технология разработки нарушенных угольных пластов. — Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1983.
4. Ревнивых Ю. А. Оценка влияния геологических нарушений пологих угольных пластов на технологию и технику механизации очистных работ (на примере шахт Восточного Донбасса): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: МГИ, 1973.
5. Гайсин Р. М., Набатов В. В., Потапов П. В., Царииков А. Ю. Моделирование электрических полей в условиях шахтной электроразведки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 9. — С. 5–10.
6. Бахвалов Ю. А., Щербачев А. А. Решение прикладных задач с помощью метода точечных источников поля // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2016. — № 4. — С. 5–14.
7. Alves C. J. S., Chen C. S., Sarler B. The method of fundamental solutions for solving Poisson's problems / Boundary Elements, Vol. XXIV, eds. C. Brebbia, A. Tadeu and V. Popov (WIT Press, 2002) pp. 67–76.
8. Fairweather G., Karageorghis A. The method of fundamental solutions for elliptic boundary value problems // Advances in Computational Mathematics. 1998. Vol. 9. Pp. 69–9. Computers & Geosciences. Vol. 49, December 2012, Pp. 278–289. Regcont: A Matlab based program for stable downward continuation of geophysical potential fields using Tikhonov regularization. Author links open overlay panel R. Paštekaa, R. Karcolb, D. Kušniráka, A. Mojžeša.
10. Шестаков А. Ф. О концепции особых точек аналитического продолжения геофизических полей и развитии методов их определения с использованием гасящих функций. — Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2013.
11. Ermokhine K. M. Analytical continuation of geophysical fields into the area of anomaly sources by the Continued fraction method (CFCM). Vienne, EAGE2006, abstr. P. 324.
12. Ермохин К. М. Аналитическое продолжение геофизических полей в область источников аномалий с помощью цепных дробей / Вопросы теории и практики интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 34 семинара им. Д. Г. Успенского. — М.: ИФЗ РАН, 2007. — С. 109–113.
13. Ермохин К. М., Жданова Л. А. Эффективный метод аналитического продолжения модельных и практических геофизических полей в область источников / Вопросы теории и практики интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 37-й сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского. — М.: ИФЗ РАН, 2010.
14. Гайсин Р. М., Набатов В. В. Выделение аномальных зон в подземной электроразведке методом аналитического продолжения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 6. — С. 107–112. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-107-112. 

## REFERENCES

1. Baykenzhina A. Zh. Detection and mapping of tectonic faults as indicators of outburst-hazardous zones by 3D common-depth point method in the conditions of the Karaganda coal basin.

*Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*. 2018. Vol. 329, no 8. Pp. 145–155. [In Russ].

2. Cao Y., Davis A., Liu R., Liu X., Zhang Y. The influence of tectonic deformation on some geochemical properties of coals – a possible indicator of outburst potential. *International journal of coal geology*. 2003. Vol. 53. Iss. 2. Pp. 69–79.

3. Kirzhner F.M., Skuba V.N., Kozionov E.N. *Tekhnologiya razrabotki narushennykh ugol'nykh plastov* [Mining technology for faulted coal seams], Yakutsk, Izd-vo YAF SO AN SSSR, 1983.

4. Revnivykh Yu.A. *Otsenka vliyaniya geologicheskikh narusheniy pologikh ugol'nykh plastov na tekhnologiyu i tekhniku mekhanizatsii ochistnykh rabot (na primere shakht Vostochnogo Donbassa)* [Influence of geological faults in flat coal seams on longwall mechanization technology and equipment (in terms of mines in the East Donbass)], Candidate's thesis, Moscow, MGU, 1973.

5. Gaysin R.M., Nabatov V.V., Potapov P.V., Tsarikov A.Yu. Modeling of electric fields in underground resistivity survey. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 9, pp. 5–10. [In Russ].

6. Bakhvalov Yu.A., Shcherbakov A.A. Solution of applied problems using the field point source method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. 2016, no 4, pp. 5–14. [In Russ].

7. Alves C.J.S., Chen C.S., Sarler B. The method of fundamental solutions for solving Poisson's problems. *Boundary Elements*, Vol. XXIV, eds. C. Brebbia, A. Tadeu and V. Popov (WIT Press, 2002) pp. 67–76.

8. Fairweather G., Karageorghis A. The method of fundamental solutions for elliptic boundary value problems. *Advances in Computational Mathematics*. 1998. Vol. 9. Pp. 69–9. *Computers & Geosciences*. Vol. 49, December 2012, Pp. 278–289. Regcont: A Matlab based program for stable downward continuation of geophysical potential fields using Tikhonov regularization. Author links open overlay panel R. Paštekaa, R. Karcolb, D. Kušniráka, A. Mojzeša.

10. Shestakov A.F. *O kontseptsii osobykh toчек analiticheskogo prodolzheniya geofizicheskikh poley i razvitiy metodov ikh opredeleniya s ispol'zovaniem gasyashchikh funktsiy* [Concept of special points in analytical extension of geophysical fields and development of determination method using suppressing functions], Ekaterinburg, Institut geofiziki UrO RAN, 2013.

11. Ermokhine K.M. *Analytical continuation of geophysical fields into the area of anomaly sources by the Continued fraction method (CFM)*. Vienne, EAGE2006, abstr. P. 324.

12. Ermokhin K.M. Analytical extension of geophysical fields in the zone of abnormality sources using continued fractions. *Voprosy teorii i praktiki interpretatsii gravitatsionnykh, magnitnykh i elektricheskikh poley: materialy 34 seminara im. D.G. Uspenskogo*. Moscow, IFZ RAN, 2007. Pp. 109–113. [In Russ].

13. Ermokhin K.M., Zhdanova L.A. Efficient method of analytical extension of model and real geophysical fields in the domain of sources. *Voprosy teorii i praktiki interpretatsii gravitatsionnykh, magnitnykh i elektricheskikh poley: materialy 34 seminara im. D.G. Uspenskogo*. Moscow, IFZ RAN, 2010. [In Russ].

14. Gaysin R.M., Nabatov V.V. Identification of anomalous zones in underground resistivity survey by analytical extension method. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018, no 6, pp. 107–112. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-107-112. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гайсин Роберт Мударисович<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент, e-mail: rmgaisin@mail.ru,

Цариков Александр Юрьевич<sup>1</sup> — аспирант, e-mail: zarikov92@mail.ru,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Гайсин Р.М., e-mail: rmgaisin@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

R.M. Gaysin<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: rmgaisin@mail.ru,

A.Yu. Tsarikov<sup>1</sup>, Graduate Student, e-mail: zarikov92@mail.ru,

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISIS»,

119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: R.M. Gaysin, e-mail: rmgaisin@mail.ru.