

Р.М. Гайсин, В.В. Набатов

ВЫДЕЛЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ЗОН В ПОДЗЕМНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ МЕТОДОМ АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРОДОЛЖЕНИЯ

Аннотация. Выявление зон мелкоамплитудной тектонической нарушенности в угольных шахтах является насущной задачей. Решение этой задачи возможно геофизическими методами, в частности методами подземной электроразведки. Основной проблемой при этом является решение обратной задачи. Ее решение должно однозначно давать координаты аномальных по электропроводности зон, которые связаны с мелкоамплитудной тектонической нарушенностью. Для применяющегося на шахтах Кузбасса электроразведочного метода ЭДЭП-П (экваториально-дипольное электрическое просвечивание параллельное) наилучшим методом решения обратной задачи является метод аналитического продолжения. Рассмотрена технология предложенная К.М. Ермохиным. Суть предложенной технологии в следующем: измеренные на профиле измерения представляются в виде ряда Фурье-Чебышева; полученный ряд приводится к виду степенной функции; степенная функция для продолжения на комплексную плоскость заменяется цепной S -дробью, это связано с различными областями сходимости ряда и дроби; построение S -дроби осуществляется по методу Висковатова; подставляя соответствующие координаты, вычисляется значение аналитической функции; максимумы (полюса) функции соответствуют аномальным значениям. На основании методики предложенной К.М. Ермохиным была разработана программа электротомографии для подземной электроразведки и приведен пример ее использования.

Ключевые слова: электроразведка, аналитическое продолжение, аномальная зона, экваториально-дипольное электрическое просвечивание.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-107-112

Для решения задачи оконтуривания аномальной зоны методами подземной электроразведки в условиях Кузбасса широкое распространение получил метод экваториально-дипольного электрического просвечивания (ЭДЭП). В данном методе проводятся исследования по параллельным подземным выработкам, в одной выработке устанавливаются токовые электроды (АВ) в кровле и почве, а по другой выработке с определенным шагом по профилю проводятся измерения разности потенциала кровля-почва. После прохождения измерительного профиля происходит перестановка токовых электродов в другое по-

ложение и вновь проводятся измерения по разности потенциалов (напряжения).

Как известно, протекание токов в массиве приводит к накоплению зарядов на поверхностях раздела сред с различной проводимостью. Вычитая из данных полученных в среде с аномалией данных в безаномальной (эталонной) среде мы получим значения потенциала создаваемое аномальными (вторичными, наведенными) источниками. Если применить теперь к этим данным метод аналитического продолжения, то можно определить геометрические параметры вторичного (аномалообразующего) источника.

Технология метода аналитического продолжения достаточно подробно описана К.М. Ермохиным. Суть предложенной им технологии заключается в следующем.

Исходные данные или измеренные в точках на профиле значения представленные в виде функции $f(x)$ представляется в виде ряда Фурье-Чебышева

$$f(x) \approx \sum_{k=0}^{\infty} c_k T_k(x)$$

где $T_k(x)$ — многочлены Чебышева первого рода; c_k — коэффициенты.

Коэффициенты ряда Фурье-Чебышева вычисляются по формулам:

$$c_k = \int_{-1}^1 f(x) T_k(x) \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} \quad (k > 0)$$

$$c_0 = \int_{-1}^1 f(x) \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}},$$

или в тригонометрической форме

$$c_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\cos(\theta)) \cos(k\theta) d\theta \quad (k > 0).$$

$$c_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} f(\cos(\theta)) d\theta$$

Полученное разложение приводится к виду степенного, это осуществляется заменой

$$T_n(x) = \cos(n \arccos(x)) = \operatorname{Re}(\exp(in \arccos(x)))$$

Введем обозначение

$$Y = \exp(j \arccos(x)) = x - i\sqrt{1-x^2},$$

заменяем действительную переменную x на комплексную $z = x + iy$.

Получим ряд Чебышева в следующем виде

$$f(x) = \operatorname{Re} \sum_{k=0}^{\infty} c_k Y^k.$$

Это значения нашей функции на профиле измерений, нас интересует продолжение вглубь (по оси Y). Дальше мы будем работать с функцией вида

$$F(Y) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k Y^k.$$

Заменяем представленный ряд цепной дробью (это связано с различными областями сходимости представленного степенного ряда и заменяющей его цепной дробью). Цепная S -дробь имеет вид

$$F(Y) \approx \frac{a_0 Y^{k_0}}{1 + \frac{a_1 Y^{k_1}}{1 + \frac{a_2 Y^{k_2}}{1 + \frac{a_3 Y^{k_3}}{1 + \dots}}}}$$

где k_j — целые положительные числа; a_j — вещественные коэффициенты.

Вычисление коэффициентов S -дроби из известных коэффициентов степенного ряда осуществляется по методу Висковатова. В процессе вычисления подходящие дроби образуют последовательность комплексных чисел $F_1, F_2, F_3 \dots F_M$. Полученные значения проецируются на сферу Римана, среднее значение по метрике Римана и есть предельное значение цепной дроби. После вычисления среднего значения на сфере осуществляется обратная проекция на комплексную плоскость, и получившееся значение принимается в качестве предельного для подходящих дробей. Для интерпретации берутся абсолютные значения $F(Y)$.

Программная реализация данного метода осуществлялась в Matlab (рис. 1). Выбор данной программы обусловлен тем, что в среде Matlab реализованы многие функции для работы с комплексными переменными.

Оценим разрешающую способность данного метода. Зададим поле 2 точечных источников с координатами $x_1 = 60$ м и $x_2 = 90$ м на одинаковой глубине $y_1 = y_2 = 60$ м. Значения потенциала по профилю будет иметь вид (рис. 2). Как видно, по графику трудно предположить, что источников два.

Построенная в программе Surfer карта значений $F(Y)$ приведена на рис. 3.

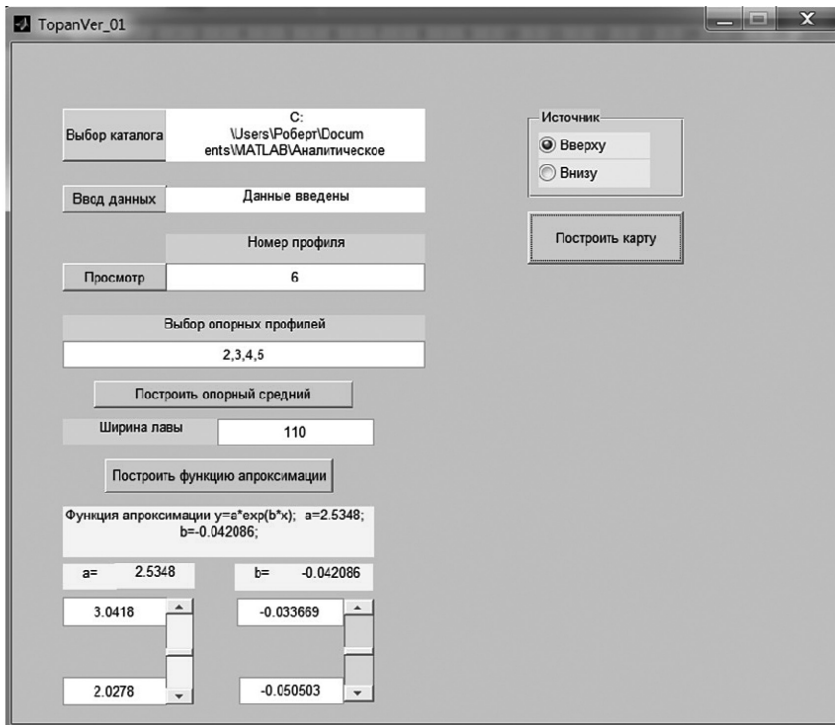


Рис. 1. Вид окна программы электротомографии
 Fig. 1. Window of electric resistivity tomography software

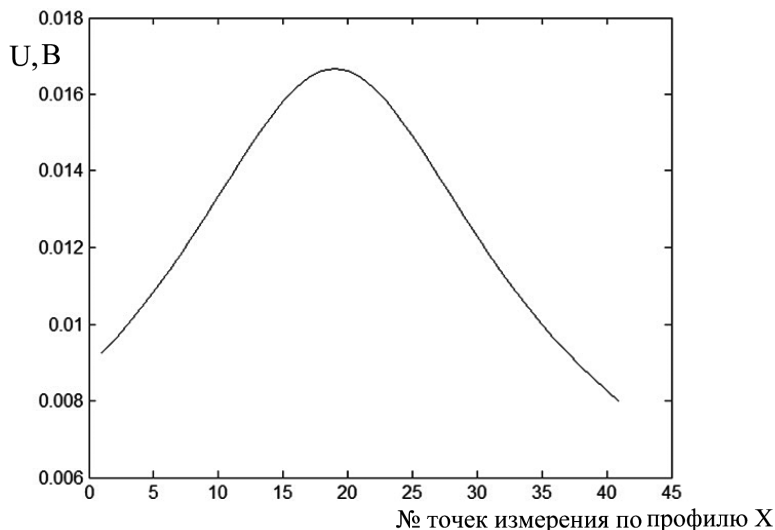


Рис. 2. Значения потенциала на измерительном профиле ($y = 0$, расстояние между точками по профилю $x = 10$ м) от двух точечных источников, координаты источников ($x_1 = 60$ м, $y_1 = 60$ м, $x_2 = 90$ м, $y_2 = 60$ м)
 Fig. 2. Values of a potential in the measurement profile ($y = 0$, distance between the profile points $x = 10$ м) from two point sources, coordinates of the sources ($x_1 = 60$ м, $y_1 = 60$ м, $x_2 = 90$ м, $y_2 = 60$ м)

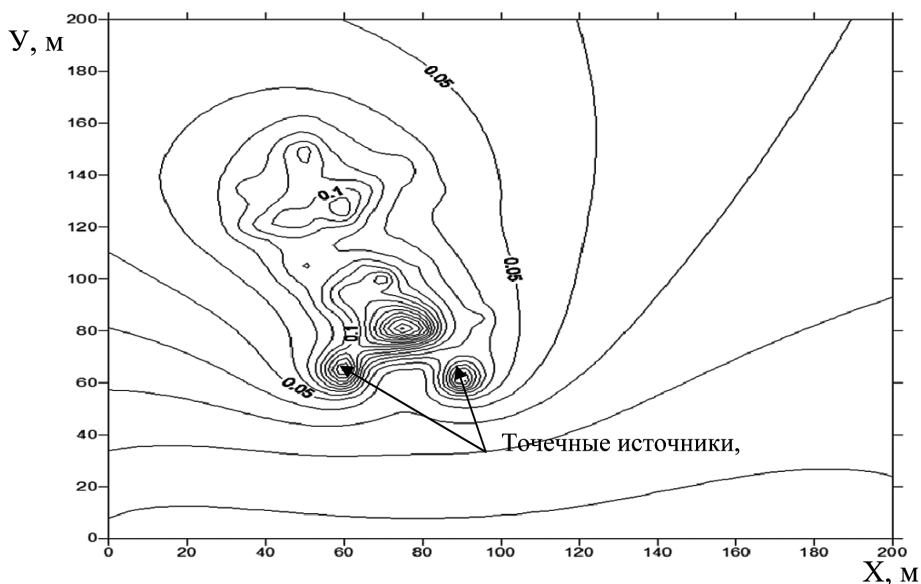


Рис. 3. Определение положений точечных источников методом аналитического продолжения
 Fig. 3. Positioning of point sources by the analytic continuation method

Здесь можно заметить появление ложных аномалий меньшей амплитуды, связано это с малым количеством точек измерения на профиле измерения и немонотонной сходимостью С-дроби. При проведении фактических измерений в шахте, ложные аномалии нивелируются, если измерительные профили частично перекрываются.

Далее по модельным данным была решена обратная задача. В программе моделирования [1] были получены дан-

ные для зоны нарушения, которая по проводимости отличается от вмещающей среды. Разработанной нами программой электротомографии, использующей метод аналитического продолжения, определено положение аномальной зоны (рис. 4). Как видно, максимум аномального значения привязывается к максимуму вторичного (индуцированного) источника.

На основании фактических измерений на шахте им. 7 ноября был постро-

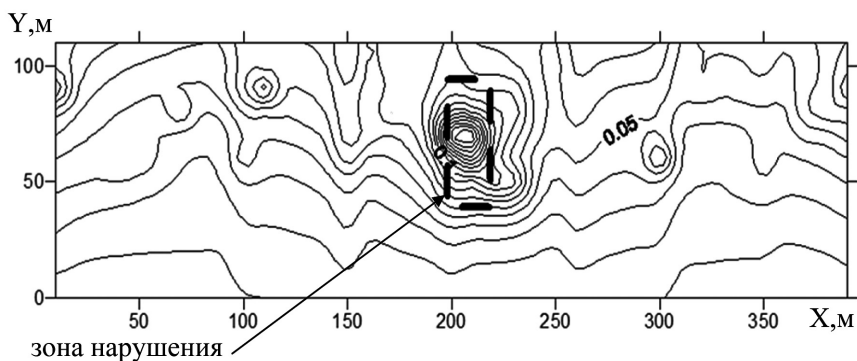



Рис. 4. Определение положения аномальной зоны
 Fig. 4. Location of anomalous zone

ен геоэлектрический разрез по выемочному столбу.

По результатам проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

- метод аналитического продолжения позволяет выделять аномальные зоны по результатам подземной электроразведки;
- предложенный метод обладает хорошей разрешающей способностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайсин Р. М., Набатов В. В., Потапов П. В., Цариков А. Ю. Моделирование электрических полей в условиях шахтной электроразведки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 9. — С. 5—10.
2. Страхов В. Н. Аналитическое продолжение потенциальных полей. Гравиразведка: справочник геофизика / Под ред. Е. А. Мудрецово́й, К. Е. Веселова. — М.: Недра, 1990. — 606 с.
3. Су́етин П. К. Классические ортогональные многочлены. — М.: Наука, 1979. — 415 с.
4. Джоунс У., Трон В. Непрерывные дроби. — М.: Мир, 1985.
5. Viskovatov B. De la methode generale pour reduire toutes sortes des quantitees en fraction continues // Memoires de l' Academie Imperiale des Sciences de St. Petersburg. — 1805.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Paštekaa R., Karcolb R., Kušnirák D., Mojzeša A. 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. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.06.010>.
11. A geophysical analysis of the great falls tectonic zone and the surrounding area, Montana USA Geography, Geology and Planning Missouri State University, May 2017 Master of Science Travis L. Fultz.
12. Kim V.P., Liu J.Y., Hegai V.V. On a possible seismomagnetic effect in the topside ionosphere. Adv. Space Res. 2015. Vol. 56. Pp. 1707—1713. 

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Гайсин Роберт Мударисович¹ — кандидат технических наук, доцент,

Набатов Владимир Вячеславович¹ — кандидат технических наук, доцент,

¹ НИТУ «МИСиС», e-mail:ftkp@mail.ru.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 6, pp. 107—112.

Detection of anomalous zones by the continuation method in underground electric exploration

Gaysin R.M.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Nabatov V.V.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,

¹ National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail:ftkp@mail.ru.

Abstract. It is often very important to detect small-amplitude tectonic disturbances in coal mines. This task is solved using the geophysical methods, in particular, the underground electric exploration. The main difficulty in this case is the inverse problems solving. The solution should unambiguously produce coordinates of anomalous electric conductivity zones associated with the low-amplitude tectonic disturbances. For the method of equatorial dipole parallel electrical sounding applied in the Kuzbass mines, the best approach to the inverse problems solving is the continuation method. The article discusses the technology proposed by K.M. Ermokhin: the measurements are presented in the form of the Fourier–Chebyshev series; the series is reduced to an exponential function; the exponential function is replaced by the continued fraction for the extensions to the plane of complex numbers, which is connected with different domains of convergence of the series and the fraction; the continued fraction is constructed by Viskovatov's method; the analytic function is calculated using the corresponding coordinates; the maximums (poles) of the function conform with the anomalous values. Based on Ermokhin's procedure, the electric resistivity tomography program is developed for underground electric exploration, and the application of the program is described in the article.

Key words: electric exploration, analytic continuation, anomalous zone, equatorial dipole electrical sounding.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-107-112

REFERENCES

1. Gaysin R.M., Nabatov V.V., Potapov P.V., Tsarikov A.Yu. *Modelirovanie elektricheskikh poley v usloviyakh shakhtnoy elektrorazvedki* [Modeling electric fields in underground electric exploration]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 9, pp. 5–10. [In Russ].
2. Strakhov V.N. *Analiticheskoe prodolzhenie potentsial'nykh poley. Gravirazvedka: spravochnik geofizika*. Pod red. E.A. Mudretsovoy, K.E. Veselova [Analytic continuation of potential fields. Gravity exploration: geophysicist's manual. Mudretsova E.A., Veselov K.E. (Ed.)], Moscow, Nedra, 1990, 606 p.
3. Suetin P.K. *Klassicheskie ortogonal'nye mnogochleny* [Classical orthogonal polynomials], Moscow, Nauka, 1979, 415 p.
4. Dzhouns U., Tron V. *Nepreryvnye drobi* [Continued fraction], Moscow, Mir, 1985.
5. Viskovatov B. *De la methode generale pour reduire toutes sortes des quantites en fraction continues*. *Memoires de l' Academie Imperiale des Sciences de St. Petersburg*. 1805.
6. 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.
7. Ermokhin K.M. *Analiticheskoe prodolzhenie geofizicheskikh poley v oblast' istochnikov anomalii s pomoshch'yu tsepnikh drobey* [Analytic continuation of geophysical fields to the domain of anomaly sources using continued fractions]. *Voprosy teorii i praktiki interpretatsii gravitatsionnykh, magnitnykh i elektricheskikh poley: materialy 34 seminarov im. D.G. Uspenskogo*, Moscow, IFZ RAN, 2007, pp. 109–113. [In Russ].
8. Ermokhin K.M., Zhdanova L.A. *Effektivnyy metod analiticheskogo prodolzheniya model'nykh i prakticheskikh geofizicheskikh poley v oblast' istochnikov* [Efficient method of analytic continuation of modeled and applied geophysical fields to the domain of sources]. *Voprosy teorii i praktiki interpretatsii gravitatsionnykh, magnitnykh i elektricheskikh poley: materialy 37-y sessii Mezhdunarodnogo seminarov im. D.G. Uspenskogo*, Moscow, IFZ RAN, 2010. [In Russ].
9. Shestakov A.F. *O kontseptsii osobykh toчек analiticheskogo prodolzheniya geofizicheskikh poley i razvitiya metodov ikh opredeleniya s ispol'zovaniem gasyashchikh funktsiy* [Concept of critical points in analytic continuation of geophysical fields and their determination using quenching functions]. Ekaterinburg, Institut geofiziki UrO RAN, 2013.
10. Paštekaa R., Karcolb R., Kušnirák D., Mojzeša A. *Computers & Geosciences*. Vol. 49, December 2012, Pages 278–289. Regcont: A Matlab based program for stable downward continuation of geophysical potential fields using Tikhonov regularization. Author links open overlay panel; <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.06.010>.
11. *A geophysical analysis of the great falls tectonic zone and the surrounding area*, Montana USA Geology, Geology and Planning Missouri State University, May 2017 Master of Science Travis L. Fultz
12. Kim V.P., Liu J.Y., Hegai V.V. *On a possible seismomagnetic effect in the topside ionosphere*. *Adv. Space Res.* 2015. Vol. 56. Pp. 1707–1713.

