ОХРАНА ТРУДА

УДК 622.822.22 DOI: 10.21440/0536-1028-2024-1-84-94

Диагностирование очага самонагревания в породоугольном массиве по аномалиям естественного электрического поля

Калайгорода В. В.[1]*, Простов С. М.[1]
[1] Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия
e-mail: kalay232@gmail.com

Реферат

Введение. *В производственной практике наиболее распространенным методом обнаружения эндогенного пожара является визуальный, индикаторами являются такие заметные признаки, как дым и огонь. Помимо описанного метода, применяют также метод контроля энергии теплового излучения или замеры содержания газообразных продуктов сгорания угля. Перечисленные методы обладают недостаточной точностью анализа и прогноза зон потенциальной пожароопасности. В данной статье описывается метод геофизической электроразведки, базирующийся на контроле аномалий контрастных электрических полей, возникающих над очагом пожара на поверхности породоугольного массива.*

Цель работы. *Произвести анализ теоретических знаний об образующихся в области очага самовозгорания аномалиях естественного электрического поля и сделать выводы об эффективности геоэлектрического метода для локации зон самовозгорания угольного массива.*

Методология. *Для достижения поставленной цели работы разработана математическая модель образования естественного гоеэлектрического поля в области формирующегося очага самовозгорания угля с использованием методов электроразведки зависимости потенциалов, необходимых для интерпретации данных, полученных при измерениях.*

Результаты. *Изложены теоретические положения, включающие аналитические и графические зависимости изменения геоэлектрического потенциала, сделаны выводы о зависимости потенциала от следующих параметров: температура в очаге, удельное электрическое сопротивление вне и внутри очага, форма очага.*

Выводы и область применения результатов. *Применение метода естественного электрического поля при обнаружении очагов самонагревания в породоугольном массиве особенно эффективно на начальных стадиях развития эндогенных пожаров, когда требуется определить эффективный радиус и глубину расположения зарождающегося очага эндогенного пожара, так как очаг самонагревания представляет поляризованное тело, близкое по форме к сфере, что обеспечивает формирование аномалии геоэлектрического потенциала на земной поверхности. Геоэлектрический метод также эффективен при стадии горения для диагностирования границ аномальной зоны.*

Ключевые слова: *эндогенные пожары; самовозгорание угля; геофизический мониторинг; потенциал электрического поля.*

Введение. Для разработки эффективных мер борьбы с эндогенными пожарами проводятся широкомасштабные и многоплановые исследования процесса самовозгорания породоугольных массивов. Так, в работах [1–4] экспериментально исследовалось влияние на интенсивность тепловыделения начальной температуры окисления, крупности, влажности угля и воздуха, скорости движения газа. Установлено, что наибольшее влияние имеет начальная температура окисления, остальные

факторы сказываются неоднозначно. Самовозгорание угля также исследовалось в крупномасштабных теплоизоляционных камерах. На основе проведенных экспериментов получены термокинетические и теплофизические параметры низкотемпературного окисления [5, 6]. В работе [7] установлены основные обязательные условия самовозгорания как химического процесса: способность угля окисляться при низких температурах, приток воздуха, затрудненная отдача тепла в среду.

Для оперативного обнаружения и локации очагов подземных и открытых эндогенных пожаров активно применяют визуальные, газоаналитические и термометрические методы. Перспективно применение геофизических методов прогноза и контроля развития очагов самонагревания в породоугольных массивах [8].

В частности, геоэлектрические способы, основанные на измерении параметров активных и естественных электрических полей (ЕЭП), наименее трудоемки и наиболее производительны. Комплексное применение геоэлектрических методов позволяет обеспечить оперативный прогноз самонагревания угля на ранних стадиях, а также контроль изменения основных параметров очага пожара на всех его стадиях.

Источником аномалий (отклонений от фоновых значений потенциала ЕЭП) являются очаги самонагревания в угольной среде, например, на разрезах, в забоях шахт, на отвалах и т. д. Одна из причин возникновения очага самонагревания – это окислительные процессы в угле, протекающие с выделением тепла в ограниченной замкнутой области. Установлено, что с ростом температуры удельное электрическое сопротивление углей уменьшается и, наряду с баротоками, возникают термотоки, которые дают дополнительный вклад в потенциал ЕЭП [9, 10].

Оценки, полученные из теории возникновения термо- и баротоков, совпадают по порядку величин с результатами обработки непосредственных измерений в очагах самонагревания, этим можно воспользоваться при решении практических задач [11].

Проблема локации очагов самонагревания углей с использованием полученных экспериментально аномалий ЕЭП – это сложная задача, для решения которой следует применять современную измерительную аппаратуру, математические методы обработки экспериментальных данных и численные алгоритмы решения обратных задач [12].

Определение формы, размеров и глубины расположения источника естественного стационарного поля различной природы (электрической, гравитационной, тепловой, магнитной или другой) является актуальным для задач сейсмики, электро-, магнито- и гравиразведки [13, 14].

С точки зрения прикладной математики все эти задачи являются обратными и некорректными [15, 16]. Большинство существующих теоретических методов и численных алгоритмов посвящены в основном решению линейных обратных задач, т. е. таких, где неизвестная функция является сомножителем какого-то известного выражения, характеризующего среду [17–20]. Разработке и тестированию алгоритмов решения нелинейных обратных задач посвящено гораздо меньше работ [21].

Цель работы. В зоне самонагревания и самовозгорания углесодержащего скопления происходят электрокинетические и электрохимические процессы, способствующие образованию естественного квазистационарного (медленно изменяющегося) геоэлектрического поля. Рассмотрим наиболее существенные факторы, способствующие формированию геоэлектрических полей над очагом зарождающегося пожара. По данным [22], основными потенциалопределяющими факторами являются следующие: фильтрационные электрические поля, окислительно-восстановительные, диффузионно-адсорбционные и концентрационные геополя.

Порядок исследования. Фильтрационные электрические поля (электрокинетический эффект второго рода) обусловлены направленным перемещением заряженных ионов определенного знака из двойного электрического слоя, возникающего на контакте раствора с породой, потоком фильтрующейся жидкости через поры в породном массиве [23]. Напряженность фильтрационного поля определяется следующей зависимостью [24]:

$$E_{ф} = \frac{\varsigma \varepsilon \rho \Delta P}{4\pi\mu}, \tag{1}$$

где ς – величина скачка потенциала в двойном электрическом слое («дзета-потенциал»); ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость породы; ρ – эффективное удельное электрическое сопротивление (УЭС) породы; ΔP – перепад давления на концах капилляра; μ – коэффициент динамической вязкости раствора.

Из (1) следует, что разность потенциалов на концах капилляра имеет порядок ς. По данным лабораторных испытаний эта величина зависит от химического состава породы, концентрации раствора, адсорбционной способности породной поверхности капилляра и изменяется в диапазоне десятков-первых сотен мВ. Причиной фильтрации жидкости в районе очага пожара является ее конвективный перенос в сторону обнажения при нагревании пород. Как было установлено ранее, величина ΔP может изменяться по периодическому закону за счет изменений атмосферного давления, что является физической причиной формирования знакопеременных фильтрационных полей.

Величина окислительно-восстановительного потенциала определяется уравнением Нернста [25]:

$$\varphi_{ОВ} = \varphi_0 \pm \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{ок}}{a_{вос}}, \tag{2}$$

где φ_0 – величина потенциала в стандартных условиях (при стандартных температуре и растворе); R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; n – валентность ионов металла в растворе; F – постоянная Фарадея; $a_{ок}$, $a_{вос}$ – активности окислителя и восстановителя, соответственно.

Из (2) следует, что приращение $\varphi_{ОВ}$ пропорционально температуре T в очаге и нелинейно зависит от изменения окислительно-восстановительных свойств среды.

Диффузионно-адсорбционные и концентрационные электрические поля в данном случае менее интенсивны, чем ранее рассмотренные.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что очаг пожара может рассматриваться как поляризованное тело, ось поляризации которого определяется преимущественным направлением перемещения жидкости в порах, то есть по нормали к обнажению. Предельное значение скачка потенциала на поверхности поляризованного тела, мВ, можно определить с учетом основных рассмотренных факторов:

$$\Delta\varphi_m = \left(\varphi_{ф} + \varphi_{ОВ}\right)_{max} = 100...200.$$

Аппроксимируем очаг самонагревания сферой радиуса a, примем функцию распределения скачка потенциала

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_m \cos\theta,$$

где θ – угол между осью поляризации (вертикалью) и радиусом, проведенным в расчетную точку.

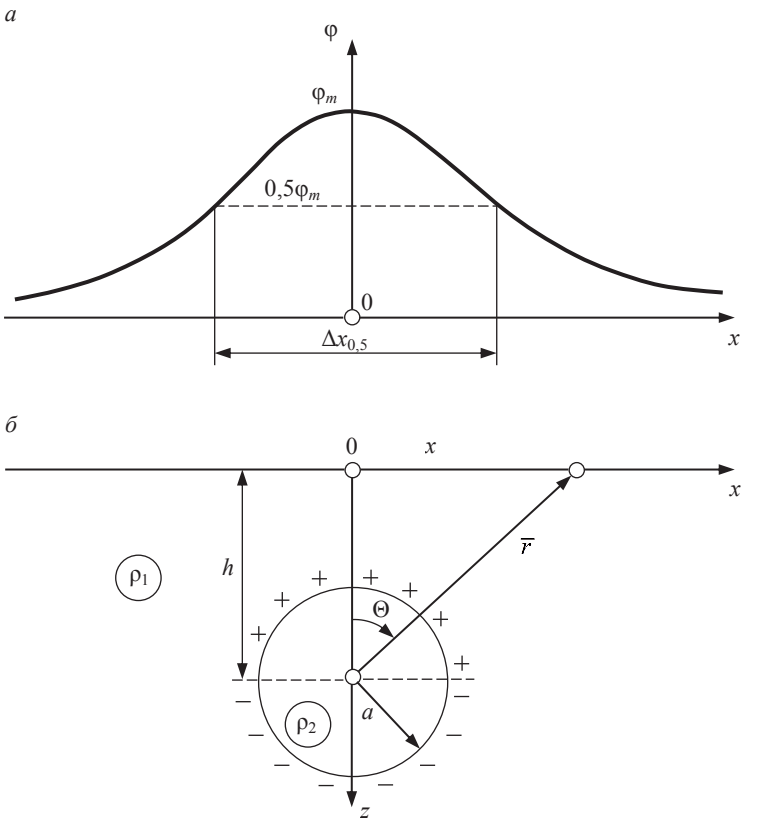

Рисунок 1. Общий вид зависимости – *а* и схема расчета поля поляризованной сферы – *б*
Figure 1. General view of the dependency – *a* and scheme for calculatin the polarized sphere – *б*

Рассматриваемая задача аналогична задаче электроразведки методом потенциала естественного электрического поля. Потенциал φ поляризованного шара, центр которого расположен на глубине h, в плоскости, проходящей через центр шара, определим из уравнения Лапласа в сферических координатах (рис. 1):

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial\varphi}{\partial r}\right)+\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\varphi}{\partial\theta}\right)=0, \tag{3}$$

где r, θ – координаты.

Для решения уравнения (3) принимают традиционные граничные условия:
на бесконечности

$$\lim_{r\to\infty}\varphi(r,\theta)\to 0;$$

на границе сферы

$$\varphi_1(a,\theta)-\varphi_2(a,\theta)=\Delta\varphi; \qquad \frac{1}{\rho_1}\frac{\partial\varphi_1}{\partial r}\Big|_{r=a}=\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial\varphi_2}{\partial r}\Big|_{r=a},$$

где φ_1, φ_2 – потенциал вне и внутри сферы, соответственно; ρ_1, ρ_2 – УЭС вне и внутри сферы.

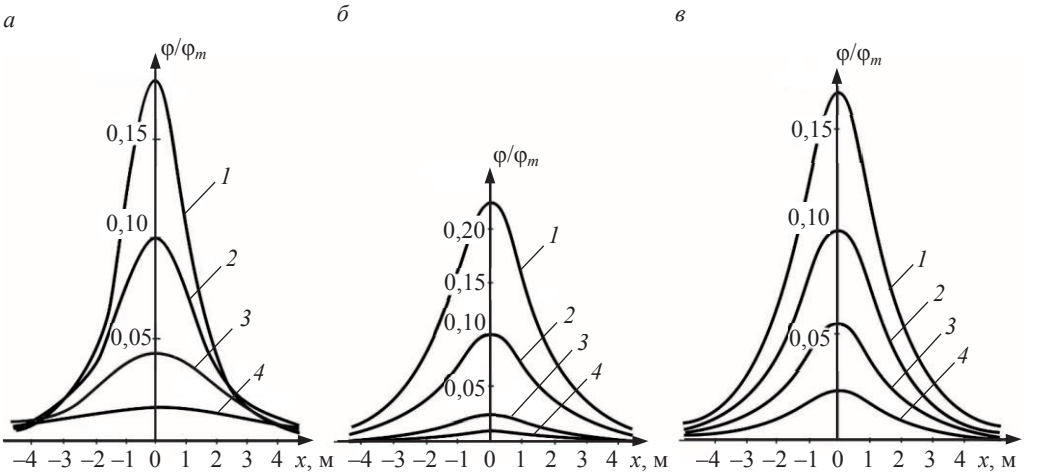

Рисунок 2. Графики теоретической зависимостей $\varphi/\Delta\varphi_m(x)$ при: a = 1 м; ρ_2/ρ_1 = 2 (*1* – h = 1,5 м; *2* – 2; *3* – 3; *4* – 5) – *а*; h = 2 м; ρ_2/ρ_1 = 2 (*1* – a = 1,5 м; *2* – 1; *3* – 0,5; *4* – 0,3) – *б*; a = 1 м; h = 2 м ($1 - \rho_2/\rho_1 = 1$; *2* – 2; *3* – 4; *4* – 10) – *в*

Figure 2. Graphs of theoretical dependences $\varphi/\Delta\ \varphi_m(x)$ under: a = 1 m; ρ_2/ρ_1 = 2 (*1* – h = 1.5 m; *2* – 2; *3* – 3; *4* – 5) – *a*; h = 2 m; ρ_2/ρ_1 = 2 (*1* – a = 1.5 m; *2* – 1; *3* – 0.5; *4* – 0.3) – *б*; a = 1 m; h = 2 m ($1 - \rho_2/\rho_1 = 1$; *2* – 2; *3* – 4; *4* – 10) – *в*

Решение задачи для потенциала φ на земной поверхности (z = 0) при $r \geq h$ имеет вид

$$\varphi = 2\Delta\varphi_m a^2 \frac{\rho_1}{\rho_1 + 2\rho_2}\frac{\cos\theta}{r^2} = 2\Delta\varphi_m a^2 \frac{\rho_1}{\rho_1 + 2\rho_2}\frac{h}{\left(h^2 + x^2\right)^{1,5}}. \quad (4)$$

На рис. 2 представлены графики теоретических зависимостей $\varphi/\Delta\varphi_m = \varphi/\Delta\varphi_m(a, \rho_2/\rho_1, h, x)$ при разных значениях переменных, а на рис. 3 – графики зависимостей потенциала в максимуме над центром сферы $\varphi_m = \varphi_m(a, \rho_2/\rho_1, h)$. Приведенные графики можно использовать для количественной интерпретации данных зондирований.

Из представленных расчетов видно, что в районе поляризованной сферы (очага самонагревания) расчетные аномалии потенциала геоэлектрического поля составляют $\varphi = (0{,}01...0{,}4)\Delta\varphi_m$ = 2...80 мВ, что значительно превышает фоновый уровень.

Расположение центра сферы соответствует максимальному значению $\varphi(x)$. Анализ расчетов позволяет сделать вывод о том, что геоэлектрический метод позволяет по результатам профилирования производить локацию очага самонагревания радиусом более 0,5 м на глубине до 10 м.

Для приближенной оценки глубины h расположения очага можно использовать методику, изложенную в [26], предполагающую измерение градиента потенциала в двух точках профиля. Гораздо мерее трудоемок приближенный способ «срединного» сечения графика $\varphi(x)$, известный из электроразведки, сущность которого заключается в следующем. На графике $\varphi(x)$ профиля, проходящего над центром очага, проводят сечение на уровне $\varphi = 0{,}5\varphi_m$ (рис. 1, *а*), при этом определяют величину соответствующего интервала $\Delta x_{0,5}$.

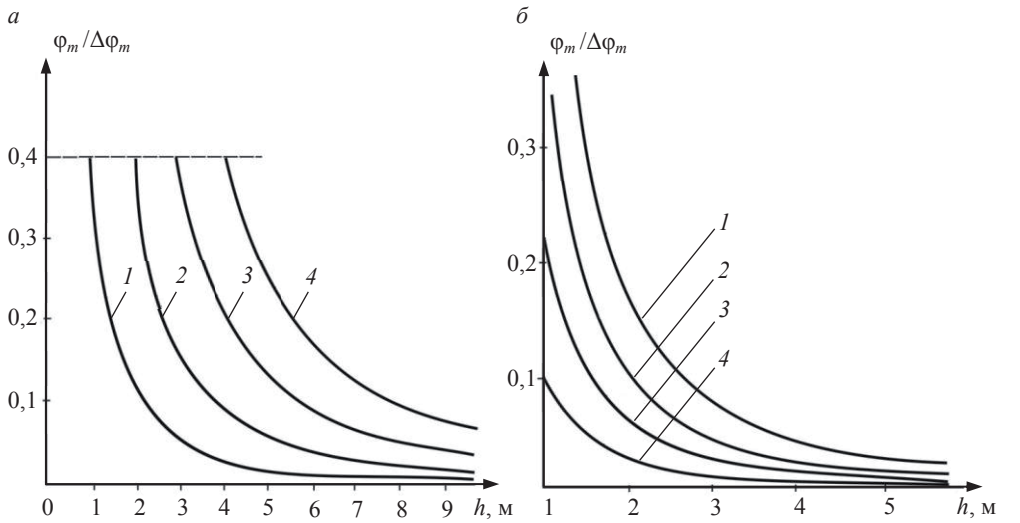

Рисунок 3. Графики теоретической зависимостей $\varphi_m/\Delta\varphi_m(x)$ при: $\rho_2/\rho_1 = 2$ (*1* – *a* = 1 м; *2* – 2; *3* – 3; *4* – 4) – *а*; *a* = 1 м (*1* – $\rho_2/\rho_1 = 1$; *2* – 2; *3* – 4; *4* – 10) – *б*

Figure 3. Graphs of theoretical dependences $\varphi_m/\Delta\ \varphi_m(x)$ under: $\rho_2/\rho_1 = 2$ (*1* – *a* = 1 m; *2* – 2; *3* – 3; *4* – 4) – a; *a* = 1 m (*1* – $\rho_2/\rho_1 = 1$; *2* – 2; *3* – 4; *4* – 10) – *б*

Подставляя в (4) $\varphi = 0{,}5\varphi_m$ и $x = 0{,}5x_m$, можно получить

$$h = 0{,}5\Delta x_{0,5}\left(2^{2/3} - 1\right)^{-0,5} \cong 0{,}65\Delta x_{0,5}. \tag{5}$$

Таким образом, по величине интервала $\Delta x_{0,5}$ можно приближенно оценить глубину h расположения очага самонагревания массива.

Очаг самовозгорания может быть аппроксимирован сферой при наличии в массиве одной свободной поверхности (в полупространстве). При дополнительном поступлении воздуха через поверхность откоса борта карьера с большой вероятностью эта зона может быть представлена вытянутым сфероидом с полуосями c и a ($c > a$, большая ось ориентирована параллельно откосу), для которого распределение потенциала определяется следующим выражением [27]:

$$\varphi = \frac{\rho I}{4\pi l}\ln\frac{1+b}{1-b}, \tag{6}$$

где $l = \sqrt{c^2 - a^2}$ – полуфокусное расстояние; $b = l/r$ – эксцентриситет; r – расстояние от точки замера до фокусов сфероида.

Поместим точку замера на расстоянии h от центра сфероида перпендикулярно большой оси на поверхности уступа. С учетом размеров измерительной установки (рис. 4, *а*) выражение (6) примет внешний вид:

$$\varphi = \frac{\rho I}{4\pi\sqrt{c^2 - a^2}}\ln\frac{1+\sqrt{\left(c^2 - a^2\right)/\left(c^2 + h^2 - a^2\right)}}{1-\sqrt{\left(c^2 - a^2\right)/\left(c^2 + h^2 - a^2\right)}}.$$

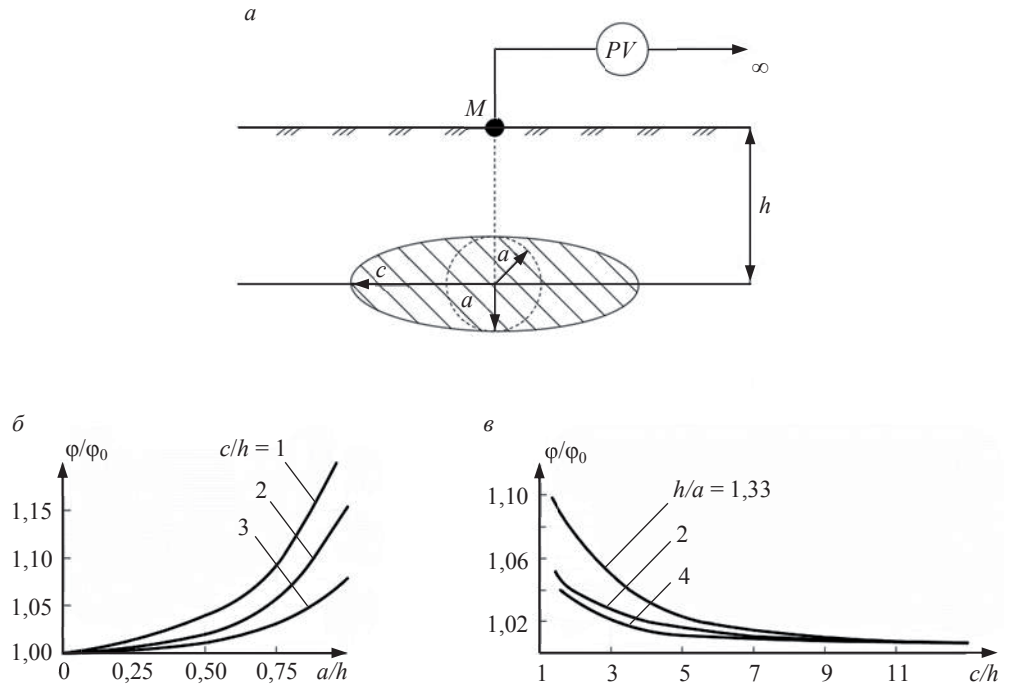

Рисунок 4. Расчетная схема – *а* и графики изменения потенциала φ в точке контроля *M* при изменении размера *a* заряженного тела для вытянутого сфероида – *б*, *в*

Figure 4. Computational model – *a* and graphs of potential φ behaviour at the control point *M* under a changed size *a* of the charged body for an prolate spheroid – *б*, *в*

Потенциал на контуре сфероида φ_0 определится при $a = h$, тогда возможно получить окончательное выражение для потенциала φ:

$$\varphi = \frac{\varphi_0}{K_y h\sqrt{F}} \ln \frac{1+\sqrt{F/(F+1)}}{1-\sqrt{F/(F-1)}},$$

где $F = (c^2 - a^2)/h^2$; K_y – коэффициент, зависящий от геометрических размеров расчетной схемы.

На рис. 4. *б*, *в* приведены графики зависимости φ/φ_0 (a/h) при различных соотношениях c/h и φ/φ_0 (c/h) при различных соотношениях h/a. В данном случае зависимость $\varphi(a)$ существенно нелинейна, причем диапазон изменения потенциала φ в точке контроля *M* снижается при увеличении вытянутости сфероида. Дополнительное приращение контролируемого параметра φ за счет изменения геометрии источника поля не превышает 10–15 %, что соизмеримо с погрешностью измерений методом естественного электрического поля.

Экспериментальная проверка изложенных теоретических положений проводилась на угольном разрезе «Бачатский» в районе эндогенного пожара № 223р [28]. На рис. 5 представлен график изменения геоэлектрического потенциала по продольному профилю *x* над эпицентром запожаренной зоны. Из графика следует, что аномалия φ имеет протяженность Δx = 35 м, с максимальной амплитудой $\varphi_м$ = 53 мВ, что соответствует полученным ранее теоретическим оценкам.

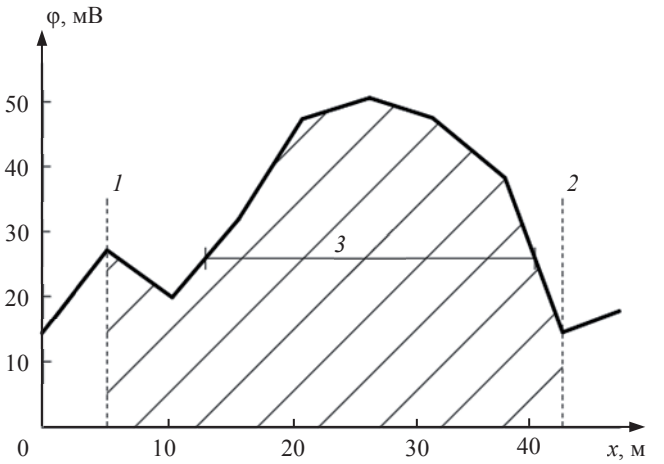

Рисунок 5. Результаты измерений методом геопотенциалов на участке эндогенного пожара № 223р в борту угольного разреза «Бачатский»: *1*, *2* – левая и правая границы запожаренного участка, соответственно; *3* – глубина $\Delta x_{0,5}$ по уровню потенциала

Figure 5. Results of measurements using the geopotential method in the area of endogenous fire no. 223p on the Bachatsky coal mine wall: *1*, *2* – left and right boundaries of the fire area, respectively; *3* – depth $\Delta x_{0,5}$ by potential level

По данным георадиолокации, размеры аномальной зоны в плане составили: продольный – 52 м; поперечный – 18 м (среднее значение – 35 м). Оценка глубины расположения очага пожара по формуле (5) дает $h = 0{,}65\Delta x_{0,5} = 0{,}65 \cdot 25 = 16{,}25$ м. Эта оценка существенно отличается от данных георадиолокации, согласно которым интервал глубины заложения зоны составил от 2 до 5,7 м.

Выводы. Метод естественного электрического поля может эффективно применяться при обнаружении очагов самонагревания в породоугольном массиве на начальных стадиях развития эндогенных пожаров, поскольку вследствие фильтрационных и окислительно-восстановительных процессов очаг самонагревания представляет поляризованное тело, форма которого аппроксимируется сферой или вытянутым сфероидом, что обеспечивает формирование аномалии геоэлектрического потенциала на земной поверхности с амплитудой до 80 мВ, что позволяет методами электроразведки определить эффективный радиус и глубину расположения зарождающегося очага эндогенного пожара.

При развитии эндогенного пожара до стадии горения, когда запожаренная зона имеет значительные размеры в плане (десятки метров) и ограниченный диапазон по глубине (2–6 м), геоэлектрический метод целесообразно применять для диагностирования границ аномальной зоны в плане по результатам профильных или площадных измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tarafadar M. N., Guha D. Application of wet oxidation processes for the assessment of the spontaneous heating of coal // Fuel. 1989. No. 68. P. 315.

2. Nimaje D. S., Tripathy D. P. Thermal studies on spontaneous heating of coal // The Indian Mining & Engineering Journal. 2010. P. 10.

3. Резник М. Г., Горюшкин В. Ф., Жислина И. Л. Влияние некоторых факторов на скорость саморазогревания угля // Физические процессы горного производства. 1982. Вып. 11. С. 99–103.

4. Портола В. А., Бобровникова А. А., Протасов С. И. Оценка склонности к самовозгоранию и газовыделению углесодержащих пород отвалов и шламов угольных предприятий // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 3. С. 74–80.

5. Бонецкий В. А. Температурное поле в воздухопроницаемой реагирующей среде // Проблемы аэрогазодинамики угольных шахт: Сб. науч. тр. ВостНИИ. Кемерово: Кемеровское кн. изд.-во, 1983. С. 130–133.

6. Алиев С. Б., Ходжаев Р. Р., Кенжин Б. М. Определение температурных границ стадий самовозгорания угля // Уголь. 2022. № 9. С. 61–66.

7. Портола В. А., Жданов А. Н., Бобровникова А. А. Анализ условий, способствующих развитию процесса самовозгорания в штабелях угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-1. С. 187–197.

8. Суксова С. А., Тимофеева Ю. В., Долкан А. А., Попов Е. В. Обзор методов идентификации процессов самовозгорания углей // Вестник Евразийской науки. 2021. № 1. С. 1–9.

9. Алексеев Д. В., Егоров П. В. Механизм формирования квазистационарного электрического поля в массиве горных пород при наличии естественных и техногенных тепловых источников // ФТПРПИ. 1994. № 5. С. 3–7.

10. Кроль Г. В. Разработка электрометрического способа контроля самонагревания и самовозгорания каменного угля на разрезах: дис. … канд. техн. наук. Кемерово, 1983. 195 с.

11. Трушникова Н. В. Обратная задача локации очага самовозгорания угля по измерениям потенциала термоэлектрического поля на поверхности угольного разреза // Вестник КузГТУ. 2010. № 3. С. 3–6.

12. Иванов В. В., Трушникова Н. В. Естественное электрическое поле очагов самонагревания углей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2011. № 3(84). С. 12–14.

13. Дашевский Ю. А., Мартынов А. А. Обратные задачи электрических зондирований в сейсмоактивных зонах. Новосибирск: НГУ, 2002. 52 с.

14. Дашевский Ю. А., Суродина И. В., Дашевский О. Ю., Соколов В. П. Прямые и обратные задачи геоэлектрики в неразрушающих методах контроля свайных фундаментов // Сибирский журнал индустриальной математики. 2005 Вып. 8. Т. VIII. С. 57–69.

15. Tarantola A. Inverse problem theory and methods for model parameter estimation. SIAM, 2005. 358 p. DOI: 10.1137/1.9780898717921

16. Neto F. D. M., Neto A. J. S. An introduction to inverse problems with applications. Springer, 2013. 243 p.

17. Morozov V. A. Regularization methods for ill-posed problems. CRC Press, 1993. 273 p.

18. Vogel C. R. Computational methods for inverse problems. SLAM, 2002. 200 p.

19. Bakushinsky A. B., Kokurin M. Yu., Smirnova A. Iterative methods for ill-posed problems. De Gruyter, 2011. 150 p.

20. Wang Y., Yagola A. G,, Yang C. Optimization and regularization for computational inverse problems and applications. Springer, 2011. 350 p.

21. Тихонов А. Н., Гласко В. Б. Применение метода регуляризации в нелинейных задачах // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1965. Т. 5. № 3. С. 463–473.

22. Тарасов Б. Г., Дырдин В. В. Физический контроль массивов горных пород. М.: Недра, 1994. 240 с.

23. Дубов Р. И. Природа фильтрационного эффекта // Известия АН СССР. 1966. № 3. С. 16–24.

24. Семенов А. С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Л.: Недра, 1974. 391 с.

25. Свешников Г. Б. Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях. Ленинград: ЛГУ, 1967. 160 с.

26. Жданов М. С. Электроразведка. М.: Недра, 1986. 316 с.

27. Семенов М. В., Сапожников В. М., Авдевич М. М. Электроразведка рудных полей методом заряда. Л.: Недра, 1984. 216 с.

28. Калайгорода В. В., Простов С. М., Шабанов Е. А., Никулин Н. Ю. Комплексный геофизический мониторинг для локации очагов эндогенных пожаров в борту угольного разреза // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 4. С. 120–131.

Поступила в редакцию 5 июня 2023 года

Сведения об авторах:

Калайгорода Всеволод Владимирович – аспирант кафедры теоретической и геотехнической механики Кузбасского государственного технического университета им. Т. Ф. Горбачева. E-mail: kalay232@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-8445-2869

Простов Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры строительного производства и экспертизы недвижимости Кузбасского государственного технического университета им. Т. Ф. Горбачева. E-mail: psm.kem@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-0780-2690

DOI: 10.21440/0536-1028-2024-1-84-94

Diagnosing a coal-rock mass self-heating source based on natural electric field anomalies

Vsevolod V. Kalaigoroda[1], Sergei M. Prostov[1]
[1] T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia.

Abstract

Introduction. *In industrial practice, the visual method of an endogenous fire detection is the most common, smoke and fire are visible indicators. The method of thermal radiation energy monitoring is also used or coal combustion gas content is measured. The indicated methods lack satisfactory accuracy of analysis and forecast of potential fire hazard areas. This article describes a geophysical electrical prospecting method based on monitoring anomalies of contrasting electric fields above a fire seat on the coal-rock mass surface.*

Research objective *is to analyze theoretical knowledge about natural electric field anomalies in the spontaneous combustion area and evaluate the effectiveness of the geoelectric method for coal mass spontaneous combustion zones location.*

Methods of research. *A mathematical model is developed of a natural geoelectric field formation in the area of a forming coal spontaneous combustion source. The model was developed using electrical prospecting of potential dependences necessary for interpreting the data obtained from measurements.*

Results. *Theoretical principles are presented, including analytical and graphical dependences of the change in geoelectric potential. Conclusions are drawn about the potential dependence on the following parameters: temperature in the fire source, electrical resistivity outside and inside the fire source, and the source shape.*

Conclusions and scope of results. *The natural electric field method in self-heating sources detection in a rock-coal mass is especially effective at the initial stages of endogenous fires development, when the effective radius and depth of incipient endogenous fire source location should be determined. This is due to the fact that the self-heating source is a polarized body, close in shape to a sphere, which ensures the development of an anomaly of geoelectric potential on the earth's surface. The geoelectric method is also effective at the combustion stage for diagnosing the anomalous zone boundaries.*

Keywords: *endogenous fires; spontaneous combustion of coal; geophysical monitoring; electric field potential.*

REFERENCES

1. Tarafadar M. N., Guha D. Application of wet oxidation processes for the assessment of the spontaneous heating of coal. *Fuel.* 1989; 68: 315.

2. Nimaje D. S., Tripathy D. P. Thermal studies on spontaneous heating of coal. *The Indian Mining & Engineering Journal.* 2010: 10.

3. Reznik M. G., Goriushkin V. F., Zhislina I. L. The effect of some factors on the speed of coal self-heating. *Fizicheskie protsessy gornogo proizvodstva = Physical Processes of Mining.* 1982; 11: 99–103. (In Russ.)

4. Portola V. A., Bobrovnikova A. A., Protasov S. I. assessment of spontaneous ignition lability and gas evolution of coal-bearing rocks of dumps and sludges of the coal enterprises. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry.* 2021; 3: 74–80. (In Russ.)

5. Bonetskii V. A. Thermal field in the air-penetrating reactive medium. In: *The problems of coal mine airogas dynamics: collection of studies of Vostochniy Research Institute for Mining Safety.* Kemerovo: Kemerovskoe Publishing; 1983. p. 130–133. (In Russ.)

6. Aliev S. B., Khodzhaev R. R., Kenzhin B. M. Determination of temperature limits of coal self-ignition stages. *Ugol = Russian Coal Journal.* 2022; 9: 61–66. (In Russ.)

7. Portola V. A., Zhdanov A. N., Bobrovnikova A. A. Analysis of the conditions facilitate to the development of the process of self-carrier-burning in coal stacks. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal).* 2022; 6-1: 187–197. (In Russ.)

8. Suksova S. A., Timofeeva Iu. V., Dolkan A. A., Popov E. V. Review of methods for identifying spontaneous combustion of coal. *Vestnik Evraziiskoi nauki = The Eurasian Scientific Journal.* 2021; 1: 1–9.

9. Alekseev D. V., Egorov P. V. The mechanism of quasi-stationary electric field formation in the rock mass in the presence of natural and man-made heat sources. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science.* 1994; 5: 3–7. (In Russ.)

10. Krol G. V. *The development of electrometric method of brown coal self-heating and spontaneous combustion control at open-pits: PhD in Eng. diss.* Kemerovo; 1983. (In Russ.)

11. Trushnikova N. V. Inverse problem of coal spontaneous combustion source location based on of the thermoelectric field potential measurements on the coal mine surface. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of The Kuzbass State Technical University.* 2010; 3: 3–6. (In Russ.)

12. Ivanov V. V., Trushnikova N. V. Natural electric field of coal spontaneous combustion sources. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of The Kuzbass State Technical University.* 2011; 3(84): 12–14. (In Russ.)

13. Dashevskii Iu. A., Martynov A. A. *Inverse problems of electric sounding in seismic zones.* Novosibirsk: NSU Publishing; 2002. (In Russ.)

14. Dashevskii Iu. A., Surodina I. V., Dashevskii O. Iu., Sokolov V. P. Direct and inverse problems of geoelectrics in the nondestructive methods of pile foundation control. *Sibirskii zhurnal industrialnoi matematiki = Journal of Applied and Industrial Mathematics*. 2005; 8(VIII): 57–69. (In Russ.)

15. Tarantola A. Inverse problem theory and methods for model parameter estimation. *SIAM.* 2005. Available from: doi: 10.1137/1.9780898717921

16. Neto F. D. M., Neto A. J. S. *An introduction to inverse problems with applications.* Springer, 2013.

17. Morozov V. A. *Regularization methods for ill-posed problems.* CRC Press, 1993.

18. Vogel C. R. *Computational methods for inverse problems.* SLAM, 2002.

19. Bakushinsky A. B., Kokurin M. Yu., Smirnova A. *Iterative methods for ill-posed problems.* De Gruyter, 2011.

20. Wang Y., Yagola A. G., Yang C. *Optimization and regularization for computational inverse problems and applications.* Springer, 2011.

21. Tikhonov A. N., Glasko V. B. Applying the method of regularization in non-linear problems. *Zhurnal vychislitelnoi matematiki i matematicheskoi fiziki = The Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics.* 1965; 5(3): 463–473. (In Russ.)

22. Tarasov B. G., Dyrdin V. V. *Physical control off rock masses.* Moscow: Nedra Publishing; 1994. (In Russ.)

23. Dubov R. I. The nature of the filtration effect. *Izvestiia AN SSSR = Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR.* 1966; 3: 16–24. (In Russ.)

24. Semenov A. S. *Electrical prospecting by the method of natural electric field.* Leningrad: Nedra Publishing; 1974. (In Russ.)

25. Sveshnikov G. B. *Electrochemical processes at sulphide deposits*. Leningrad: LSU Publishing; 1967. (In Russ.)

26. Zhdanov M. S. *Electrical prospecting*. Moscow; Nedra Publishing; 1986. (In Russ.)

27. Semenov M. V., Sapozhnikov V. M., Avdevich M. M. *Electrical prospecting of ore fields by the method of whole-body excitation.* Leningrad: Nedra Publishing; 1984. (In Russ.)

28. Kalaigoroda V. V., Prostov S. M., Shabanov E. A., Nikulin N. Iu. Complex geophysical monitoring for locating endogenous fires in the coal mine wall. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2023; 4: 120–131. (In Russ.)

Received 5 June 2023

Information about the authors:

Vsevolod V. Kalaigoroda – post-graduate student, Department of Theoretical and Geotechnical Mechanics, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. E-mail: kalay232@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-8445-2869

Sergei M. Prostov – DSc (Engineering), professor of the Department of Construction Production and Real Estate Expertise, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. E-mail: psm.kem@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-0780-2690

Для цитирования: Калайгорода В. В., Простов С. М. Диагностирование очага самонагревания в породоугольном массиве по аномалиям естественного электрического поля // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 1. С. 84–94. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-1-84-94

For citation: Kalaigoroda V. V., Prostov S. M. Diagnosing a coal-rock mass self-heating source based on natural electric field anomalies. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 1: 84–94. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-1-84-94