

Локация очага эндогенного пожара в борту угольного разреза методом электроразведки

Калайгорода В. В.^{1*}, Простов С. М.¹, Смирнов Н. А.²

¹ Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

² Новационная фирма «Кузбасс-НИИОГР», г. Кемерово, Россия

*e-mail: kalay232@gmail.com

Реферат

Введение. Эндогенные пожары трудно предсказать и прогнозировать, особенно на начальных стадиях, поэтому их изучение остается актуальным. Профилактика эндогенных пожаров включает мероприятия по предотвращению возможного развития процессов формирования очагов самовозгорания в выявленных зонах потенциальной пожароопасности. Метод электрических зондирований является перспективным для определения зон действия очагов эндогенных пожаров в породоугольных массивах. При диагностировании очагов эндогенных пожаров в бортах угольных разрезов необходимо учитывать влияние нижнего и верхнего откосов уступа, на котором производится электрическое зондирование.

Цель работы – оценка эффективности метода вертикальных электрических зондирований для локализации очагов эндогенных пожаров; определение поправочных коэффициентов, учитывающих влияние откосов уступов породоугольного борта при изысканиях методом вертикальных электрических зондирований.

Методология – теоретическое определение зависимостей влияния параметров свойств горных массивов на эффективное удельное электросопротивление, плотности тока, напряженности поля; математическое моделирование – один из способов, учитывающих влияние рельефа на результаты вертикального электрического зондирования; выполнение расчета поправочных коэффициентов при помощи моделирования электрического поля уступа методом конечных элементов.

Результаты. Установлены диапазоны поправочных коэффициентов нижнего и верхнего откосов и приведены графики изменения данных коэффициентов в зависимости от базы установки, угла откоса и расстояния до его бровки для симметричных четырехточечных установок.

Выводы и область применения результатов. Метод электрических зондирований может эффективно применяться для обнаружения и локализации очагов эндогенных пожаров в породоугольных массивах на всех стадиях их развития. На стадии самонагревания геометрические параметры аномалии можно оценить по результатам электропрофилирования. При развитии очага пожара в борту карьера для определения границ запожаренной зоны перспективно применение многоэлектродных установок (электротомографов).

Ключевые слова: эндогенные пожары; самовозгорание угля; геофизический мониторинг; вертикальное электрическое зондирование; профилирование; электротомография; откос борта карьера; математическое моделирование.

Введение. Проблема возникновения и прогнозирования эндогенных пожаров на угольных разрезах является одной из актуальных в научных вопросах горной промышленности. Эндогенные пожары ухудшают санитарно-гигиенические условия труда горняков и загрязняют атмосферу прилегающих районов ядовитыми продуктами горения и окисления, а это повышает уровень заболеваемости населения, что доказано мировой практикой [1, 2].

В качестве показателей, определяющих риск возникновения пожара в пласте, в настоящее время используют размер угольных скоплений; отношение теплоты, израсходованной на нагревание угля, к общему ее объему, выделившемуся при окислении; другие параметры.

Чаще всего авторы научных трудов исследовали отдельные параметры пожароопасности. Так, в работах [3, 4] экспериментально исследовалось влияние на интенсивность тепловыделения начальной температуры окисления, крупности, влажности угля и воздуха, скорости движения газа. Получена корреляционная зависимость между количеством эндогенных пожаров и критической температурой самовозгорания углей. В работе [5] найдена зависимость количества эндогенных пожаров от скорости тепловыделения из угля. Исследована зависимость количества пожаров от энергии активации угля. Также исследовалось влияние на пожароопасность химической активности углей, фракционного состава, влажности, дробимости, удельной реакционной поверхности и пр. [6]. Проведенные исследования позволили получить зависимости для определения группы пожарной опасности угольных пластов [7], обосновать критерии оценки склонности углей к самовозгоранию и предложить меры по предупреждению эндогенных пожаров в угольных шахтах. В результате исследований разработан новый комплексный показатель эндогенной пожароопасности органического материала, названный универсальным, который позволяет по данным анализа проб угля в лабораторных условиях находить все его необходимые характеристики: критический размер пожароопасного скопления, пороговое значение критерия оценки склонности к самовозгоранию, инкубационный период, группу пожароопасности.

Цель работы. Применение геофизических методов, в том числе электроразведывание и профилирование угольного пласта, является перспективным способом обнаружения очага эндогенного пожара [8, 9]. Эффективность метода электрического зондирования подтверждают актуальные исследования [10, 11]. Активные методы геоэлектрики, вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), электро-томография (ЭТ) используются при проведении мониторинга электрофизических параметров геологического массива, находящегося под воздействием природных и техногенных геодинамических процессов [12]. Основной целью таких работ является прогнозирование опасных природных явлений, оползней, горных ударов, суффозиозно-просадочных процессов в шахтах, открытых выработках, расположенных в сейсмоактивных районах, либо подверженных сильным техногенным воздействиям.

Метод электротомографии совмещает принципы электрического зондирования и профилирования и обладает высокой разрешающей способностью [13]. Метод ВЭЗ применяется для определения строения разреза до глубин в первые сотни метров, хорошо согласуется с данными ВЭЗ для приповерхностных отложений на глубинах от 50 до 100 м [14].

Эффективное удельное электросопротивление ($УЭС$) углепородного массива в районе очага самонагревания в основном определяется влажностью пород. В естественном состоянии горные породы имеют влажность в диапазоне единиц процентов. При осадках влажность повышается.

Порядок исследования. В ряде работ исследовано влияние умеренного увлажнения (до 5–10 %) на $УЭС$ пород. Например, Э. И. Пархоменко [15] получена экспериментальная зависимость: $\lg \rho = -\alpha \lg W + \beta$, где ρ – $УЭС$ породы, Ом · м; W – относительная влажность породы; α , β – эмпирические коэффициенты, значения α и β изменяются в широких диапазонах, коэффициент α определяется пористостью породы, β – $УЭС$ увлажняющего раствора.

Из результатов анализа следует, что в диапазоне влажности от 1 до 4–6 % происходит резкое уменьшение ρ на несколько порядков, при дальнейшем увлажнении скорость изменения параметра падает. Физической причиной этого является

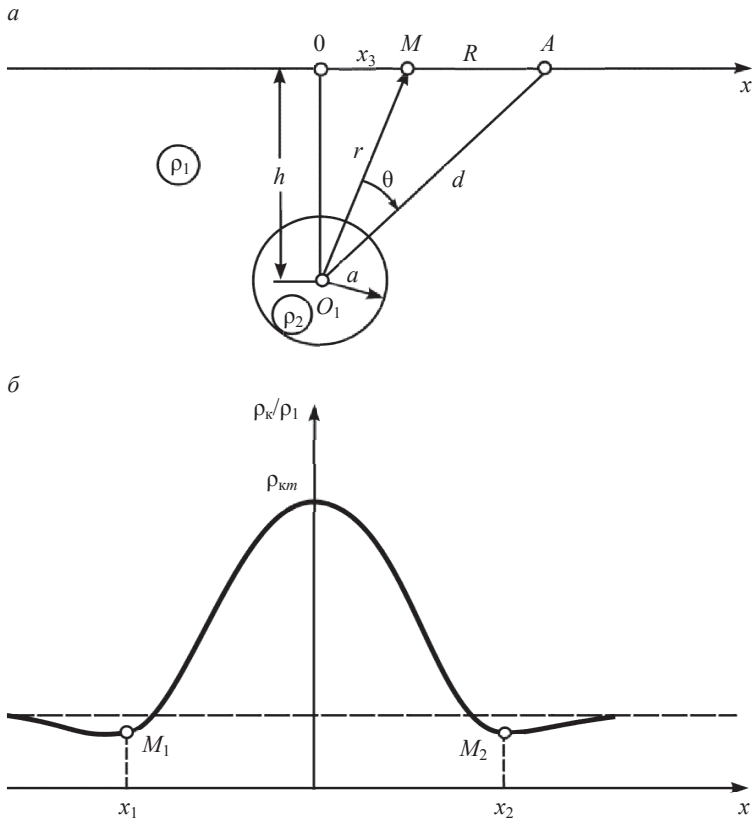


Рисунок 1. Схема расчета поля точечного источника A в районе сферического включения $- a$; общий вид зависимости $\rho(x)$ по профилю, проложенному над центром сферы $- b$: h – глубина залегания сферы; θ – угол между осью поляризации (вертикаль) и радиусом, проведенным в расчетную точку; M – точка наблюдения; A – точечный источник электрического поля; a – радиус сферы; ρ_1, ρ_2 – удельное электрическое сопротивление вне и внутри сферы, соответственно; ρ_k – кажущееся удельное электрическое сопротивление; ρ_{km} – кажущееся удельное электрическое сопротивление над центром сферы; M_1, M_2 – профили точки наблюдения; x_1, x_2 – пересечение оси x с профилями точки наблюдения; x_3 – расстояние между точками 0 и M

Figure 1. Scheme for calculating the point source A field in the region of a spherical inclusion $- a$; general view of the dependence $\rho(x)$ along the profile over the sphere center $- b$: h – the sphere depth; θ – angle between the polarization axis (vertical) and the radius drawn to the reference point; M – observation point; A – point source of electric field; a – the sphere radius; ρ_1, ρ_2 – electrical resistivity outside and inside the sphere; ρ_k – apparent electrical resistivity; ρ_{km} – apparent electrical resistivity above the sphere center; M_1, M_2 – observation point profiles; x_1, x_2 – the x -axis intersection with the observation point profiles; x_3 – distance between points 0 and M

следующее: УЭС породного скелета на несколько порядков выше УЭС минерального раствора. Например, шахтные грунтовые воды имеют УЭС $\rho_B = 1-12 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. В высушенном состоянии породы при отсутствии в их минеральном составе про-

водящих компонентов проявляют диэлектрические свойства, $\rho_n = 10^5\text{--}10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. На начальной стадии увлажнения влага заполняет поры и образует токопроводящие цепочки, что приводит к резкому падению ρ . При дальнейшем увлажнении происходит увеличение эффективного сечения этих каналов.

До начала процесса самонагрева УЭС углеродного скопления одинаково во всех точках массива и определяется условиями его естественной пористости и влажности. С ростом температуры в очаге самонагрева вследствие фильтрации раствора по поровым каналам происходит удаление влаги, что приводит к увеличению УЭС очага. При переходе на стадию интенсивного разогревания при температуре более $70 \text{ }^\circ\text{C}$ происходит выпаривание влаги, и УЭС породы приближается к УЭС минерального скелета.

Зависимость относительной диэлектрической проницаемости ϵ безрудных пород от влажности линейная: при увлажнении ϵ увеличивается от диапазона $\epsilon = 4\text{--}15$, характерного для пород при естественной влажности, до $\epsilon > 80$, соответствующего значению ϵ поронасыщающей жидкости [15]. Таким образом, в очаге эндогенного пожара формируется отрицательная диэлектрическая аномалия. Изложенное позволяет считать очаг самонагрева малопроводящим включением. В простейшем для расчетов случае аномальная по электрическим свойствам зона может быть аппроксимирована сферой. Рассматриваемая задача аналогична задаче электроразведки о поле сферического включения в однородном полупространстве [16–18]. На рис. 1, а представлена схема расчета электрического поля в районе включения.

Распределение потенциала ϕ в точке наблюдения M на поверхности от источника A описывается уравнением Лапласа в сферических координатах при следующих граничных условиях:

– на бесконечности

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \phi \rightarrow 0; \quad (1)$$

– на границе сферы

$$\phi_{1|_{r=a}} = \phi_{2|_{r=a}}; \quad \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial \phi_1}{\partial r} \Big|_{r=a} = \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial \phi_2}{\partial r} \Big|_{r=a}, \quad (2)$$

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

Рассмотрим решение дифференциального уравнения через следующий полином:

$$\phi(r, \theta) = \frac{I\rho_1}{2\pi R} + \frac{I\rho_1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} k_n \frac{a^{2n+1}}{(dr)^{n+1}} P_n(\cos\theta), \quad (3)$$

где $d = O_1A$; $k_n = (n(\rho_2 - \rho_1)) / ((n+1)\rho_2 + \rho_1)$ – коэффициент отражения тока от поверхности сферы; $P_n(\cos\theta)$ – полином Лежандра.

Решение (3) существенно упрощается, если электрическое поле источника A будет однородным. Для этого источник A надо поместить на расстояние от центра сферы, значительно превышающее ее радиус a (используя правильную установку $O_1M \ll O_1A$). При этом $d \gg r, R \gg r, d \gg a$.

Ограничиваясь первым членом полинома Лежандра ($n = 1$), из уравнения (3) можно получить для $r > a$:

$$\varphi(r, \theta) = \frac{I\rho_1}{2\pi R} + \frac{I\rho_1}{\pi R^2} k_1 \frac{a^3}{r^2} \cos\theta.$$

Используя закон Ома, функция потенциала φ может быть выражена через напряженность электрического поля E источника.

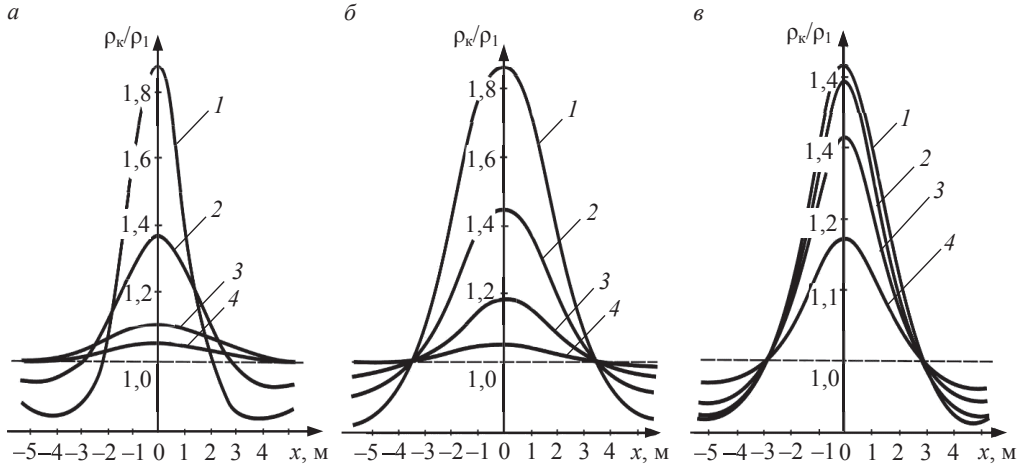


Рисунок 2. Теоретическая зависимость $\rho_k/\rho_1(x)$ при: $a = 3$ м, $\rho_2/\rho_1 = 10$ (h , м, равна 1 – 3; 2 – 4; 3 – 6; 4 – 8) – а; $h = 5$ м, $\rho_2/\rho_1 = 10$ (a , м, равен 1 – 2; 2 – 3; 3 – 4; 4 – 5) – б; $a = 3$ м, $h = 4$ м (ρ_2/ρ_1 равно 1 – 2; 2 – 5; 3 – 20; 4 – 100) – в

Figure 2. Theoretical dependence $\rho_k/\rho_1(x)$ under: $a = 3$ m, $\rho_2/\rho_1 = 10$ (h , m, equal to 1 – 3; 2 – 4; 3 – 6; 4 – 8) – а; $h = 5$ m, $\rho_2/\rho_1 = 10$ (a , m, equals 1 – 2; 2 – 3; 3 – 4; 4 – 5) – б; $a = 3$ m, $h = 4$ m (ρ_2/ρ_1 equals 1 – 2; 2 – 5; 3 – 20; 4 – 100) – в

С учетом геометрических параметров расчетной схемы функции потенциала $\varphi(x)$ и горизонтальной составляющей напряженности поля источника имеют вид:

$$\varphi(x) = -E_x \left(1 + 2k_1 \frac{a^3}{r^3} \right) = -E_x \left[1 + \frac{2k_1 a^3}{(h^2 + x^2)^{1,5}} \right];$$

$$E_x = -\frac{\partial \varphi(x)}{\partial x} = E \left[1 + 2k_1 a^3 \frac{h^2 - 2x^2}{(h^2 + x^2)^{2,5}} \right].$$

При измерениях методом срединного градиента (электроды A и B установки $AMNB$ зафиксированы, измерительные электроды M и N на фиксированном расстоянии перемещают параллельно оси x внутри пространства между A и B) кажущееся (эффективное) УЭС определяют по формуле:

$$\rho_k = \rho_1 \frac{E_x}{E} = \rho_1 \left[1 + 2a^3 k_1 \frac{h^2 - 2x^2}{(h^2 + x^2)^{2,5}} \right] = \rho_1 \left[1 + 2a^3 \frac{(\rho_2/\rho_1) - 1}{2(\rho_2/\rho_1) + 1} \frac{h^2 - 2x^2}{(h^2 + x^2)^{2,5}} \right]. \quad (4)$$

Из (4), в частности, следует, что при $\rho_2/\rho_1 > 1$ аномалии ρ_k над сферой положительны. На рис. 1, б представлен общий вид зависимости $\rho(x)$ при профилировании над центром сферы.

На рис. 2 приведены зависимости $\rho_k = \rho_k(a, \rho_2/\rho_1, h, x)$ при разных значениях переменных. Эти зависимости можно использовать в качестве палеток для количественной интерпретации результатов электропрофилеирования.

Для рассмотренной ранее теоретической модели очага (сферы) глубина расположения h и его радиус a могут быть определены приближенно по симметричному графику $\rho(x)$ (рис. 1, б), который имеет три экстремума. Определим глубину центра аномалии через координаты точек расположения минимумов, взяв производную $\partial\rho_k/\partial x$ и приравняв ее нулю:

$$h \approx 0,82x_1. \quad (5)$$

Подставляя в (4) $x = 0$ и $\rho_2/\rho_1 \gg 1$, получим $a = h(\rho_{km}/\rho_1 - 1)^{0.5}$.

При диагностировании очагов эндогенных пожаров в бортах угольных разрезов необходимо учитывать влияние нижнего и верхнего откосов уступа, на котором производится электрическое зондирование: нижний откос будет завывать плотность тока и измеренное падение напряжения $\Delta\varphi_{MN}$, а верхний откос – наоборот, завывать эти величины. Поэтому необходимо вводить соответствующие поправки, а скорректированную величину эффективного УЭС вычислять по формуле:

$$\rho_k = \frac{K}{K_1 K_2} \cdot \frac{\Delta\varphi_{MN}}{I_{AB}},$$

где K – геометрический коэффициент измерительной установки $AMNB$; K_1, K_2 – поправочные коэффициенты, учитывающие эффективное влияние нижнего ($K_1 > 1$) и верхнего ($K_2 < 1$) откосов, соответственно; $\Delta\varphi_{MN}$ – падение напряжения измерительной цепи MN ; I_{AB} – ток, питающий цепь AB .

Для расчета указанных коэффициентов выполнено моделирование электрического поля уступа методом конечных элементов. Углы откосов α_1 и α_2 изменялись в диапазоне 15° – 90° .

Расчет заключался в решении уравнения Лапласа в декартовых координатах при граничных условиях, аналогичных уравнениям (1), (2), приведенным ранее:

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad}\varphi) = 0.$$

Установка $AMNB$ аппроксимировалась двумя точечными источниками тока, расположенными на поверхности полупространства. Моделировались следующие симметричные установки: установка Шлюмберже, для которой расстояние между приемными электродами MN составляет $1/5$ – $1/12$ от AB , установка Веннера, где расстояние $MN = 1/3$ от AB , а также модифицированная установка, разработанная в Кузбасском государственном техническом университете, основное отличие которой состояло в том, что базовый размер $c = AM = NB$ принимался постоянным, равным 2 – 10 м. Для последней установки при разносах $AB < 3c$ принимают $MN = AM = NB = 1/3 AB$, при $AB > 3c$ увеличивают только размер MN .

Дифференциальное уравнение решалось проекционным методом Галеркина с разбиением расчетной области на конечные элементы. Поправочные коэффициенты K_1 и K_2 вычислялись по формулам: $K_1 = \Delta\varphi_1 / \Delta\varphi_0$; $K_2 = \Delta\varphi_2 / \Delta\varphi_0$, где $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ – измеряемые разности потенциалов в зонах влияния нижнего и верх-

него откосов борта; $\Delta\varphi_0$ – разность потенциалов, рассчитанная по аналитической формуле для однородного полупространства с горизонтальной границей раздела.

Результаты расчетов поправочного коэффициента K_1 представлены на рис. 3, а коэффициент K_2 – на рис. 4.

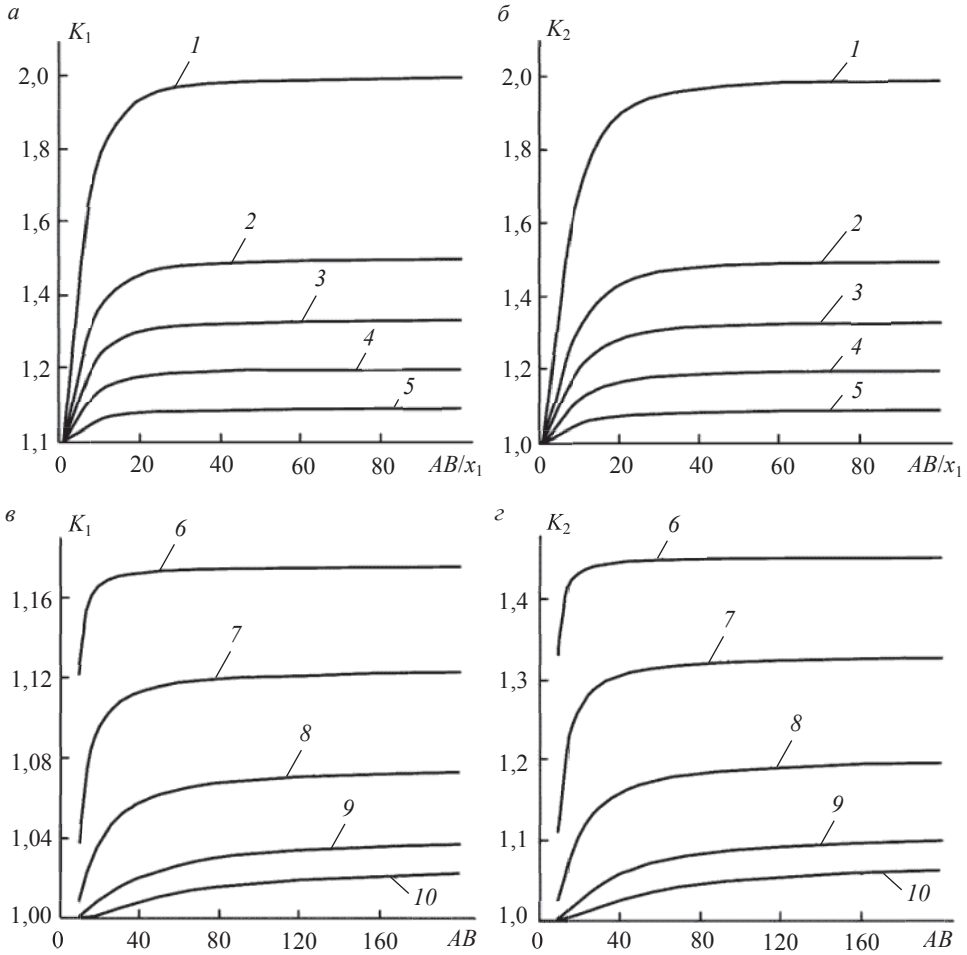


Рисунок 3. Зависимости коэффициента, учитывающего влияние нижнего откоса на измеряемую разность потенциалов, для классической установки вертикальных электрических зондирований при $AB/MN = 5$ – а и $AB/MN = 2$ – б и модифицированной установки при углах откоса $\alpha_1 = 30^\circ$ – в и $\alpha_1 = 60^\circ$ – г от разного AB : 1 – $\alpha_1 = 90^\circ$; 2 – $\alpha_1 = 60^\circ$; 3 – $\alpha_1 = 45^\circ$; 4 – $\alpha_1 = 30^\circ$; 5 – $\alpha_1 = 15^\circ$; 6 – $x_1 = 1$ м; 7 – $x_1 = 1,25$ м; 8 – $x_1 = 5$ м; 9 – $x_1 = 10$ м; 10 – $x_1 = 15$ м

Figure 3. Dependence of the factor which takes into account the impact of the lower slope on the measured potential difference, for the classical installation of vertical electrical soundings under $AB/MN = 5$ – а and $AB/MN = 2$ – б and a modified installation at slope angles $\alpha_1 = 30^\circ$ – в and $\alpha_1 = 60^\circ$ – г from different AB : 1 – $\alpha_1 = 90^\circ$; 2 – $\alpha_1 = 60^\circ$; 3 – $\alpha_1 = 45^\circ$; 4 – $\alpha_1 = 30^\circ$; 5 – $\alpha_1 = 15^\circ$; 6 – $x_1 = 1$ м; 7 – $x_1 = 1.25$ м; 8 – $x_1 = 5$ м; 9 – $x_1 = 10$ м; 10 – $x_1 = 15$ м

Анализ результата расчета показывает, что влияние обоих откосов на точность диагностирования очагов эндогенных пожаров методом электрических зондирований минимально. Поскольку глубина расположения загоревших зон, как правило, не превышает 6–8 м, разнос установки $AB > 50$ м не целесообразен. Из-за наличия бермы безопасности из насыпных пород реально $x_1 > 5$ м. В наиболее

неблагоприятных для измерений условиях при $x_1 > 5$ м и $AB = 50$ м максимальные значения K_1 составляют 1,5 для классических и 1,37 для модифицированной установок.

Из графиков следует, что максимальные значения коэффициента K_1 могут достигать 2,0 для классических установок и 1,47 – для модифицированной, а минимальные значения K_2 – 0,67 и 0,88, соответственно.

Величина x_2 может практически быть минимальной. При $AB > 50$ м и $x_2 < 5$ м величина коэффициента K_2 может составлять $< 0,7$ для классических и $< 0,89$ для модифицированной установок. Это следует учитывать при ВЭЗ на больших разностях и поперечных ВЭЗ и электрическом профилировании на крайних точках профиля. При продольном ЭП параллельно бровке уступа AB , x_1 ; $x_2 = \text{const}$, поэтому значения коэффициентов K_1 и K_2 не изменяются.

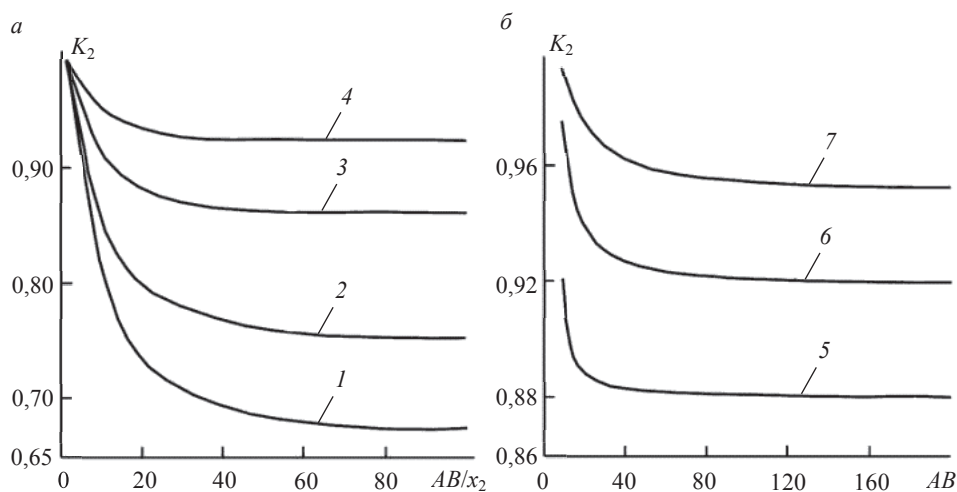


Рисунок 4. Зависимости коэффициента, учитывающего влияние верхнего откоса на измеряемую разность потенциалов, для классической установки вертикальных электрических зондирований при $AB/MN = 5$ – а и модифицированной установки при угле откоса $\alpha_2 = 30^\circ$ – б: 1 – $\alpha_2 = 90^\circ$; 2 – $\alpha_2 = 60^\circ$; 3 – $\alpha_2 = 30^\circ$; 4 – $\alpha_2 = 15^\circ$; 5 – $x_2 = 1$ м; 6 – $x_2 = 2,5$ м; 7 – $x_2 = 5$ м

Figure 4. Dependence of the factor which takes into account the impact of the upper slope on the measured potential difference, for the classical installation of vertical electrical soundings at $AB/MN = 5$ – a and a modified installation at the angle of slope $\alpha_2 = 30^\circ$ – b: 1 – $\alpha_2 = 90^\circ$; 2 – $\alpha_2 = 60^\circ$; 3 – $\alpha_2 = 30^\circ$; 4 – $\alpha_2 = 15^\circ$; 5 – $x_2 = 1$ m; 6 – $x_2 = 2.5$ m; 7 – $x_2 = 5$ m

Экспериментальная проверка изложенных теоретических положений проводилась на двух опытных участках угольного разреза «Бачатский». В работе автора [11] на рисунке 5 представлены результаты ВЭЗ и ЭП по продольному профилю в районе эндогенного пожара № 233р [19]. Расстояния от профиля до бровки нижнего откоса $x_1 = 12$ м, до основания верхнего откоса $x_2 = 18$ м. В соответствии с графиками на рис. 4 и рисунке 5 из [11] влияние откосов борта менее 1–2 %, поэтому корректирование измеренных значений не проводилось.

Из результатов измерений следует, что очаг горения соответствует диапазону ВЭЗ $AB = 15$ –30 м, а с учетом средней для разрезов Кузбасса глубинности зондирования 0,15 глубина залегания $\Delta z = 2,25$ –4,5 м. Интервал зоны горения по профилю составил 40 м. По данным георадиолокации [19] размеры аномальной зоны составили по глубине 3,7 м, в плане: продольные – 52 м, поперечный – 18 м (среднее значение – 35 м). Амплитуда аномалии соответствует теоретическим оценкам (рис. 2).

Оценим возможность использования теоретических расчетных зависимостей по приведенной упрощенной модели с аномальной зоной, аппроксимируемой сферой. По формуле (5) глубина расположения центра аномальной зоны составит $h = 0,82$, $\Delta x = 24,6$ м, а ее радиус $a = h((\rho_{km} / \rho_1) - 1)^{0,5} = 22,2$ м. Существенные отличия параметров h и a от реальных размеров запожаренной зоны, зафиксированных комплексом визуальных и инструментальных методов, объясняются тем, что на стадии разгоревшегося пожара размеры его очага вследствие наличия двух поверхностей обнажения (горизонтальной и наклонной) увеличиваются в наибольшей степени в продольном направлении, в меньшей – в поперечном, а по глубине увеличения не происходит. Таким образом, простейшая модель со сферическим включением применима только на начальных стадиях развития эндогенного пожара.

Выводы. Метод электрических зондирований может эффективно применяться для обнаружения и локализации очагов эндогенных пожаров в породугольных массивах на всех стадиях их развития. На стадии самонагрева, когда очаг пожара может быть аппроксимирован сферой, амплитуда положительной аномалии УЭС над очагом увеличивается с ростом его эффективного радиуса и уменьшением расстояния до земной поверхности. На этой стадии геометрические параметры аномалии можно оценить по результатам электропрофилирования.

При развитии очага пожара в борту карьера его распространение происходит в основном в продольном и поперечном направлениях в плане и незначительно по глубине. В этих условиях границы запожаренной зоны в плане целесообразно определять по границам аномальной зоны УЭС на графиках продольного и поперечного профилирования, а глубину – по графикам зондирования. Перспективно применение для этих целей многоэлектродных установок (электротомографии).

При расположении профилей электрических зондирований ближе 5 м от бровки нижнего откоса или основания верхнего откоса уступа следует учитывать влияние этих откосов при расчете эффективного УЭС путем введения соответствующих поправочных коэффициентов, определяемых по результатам компьютерного моделирования, изменяющихся в диапазонах $K_1 = 1,0-2,0$ и $K_2 = 0,67-1,0$, соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bigliardi A. P., Fernandes C. L. F., Pinto E. A. Blood markers among residents from a coal mining area // *Environmental Science Pollution Reseach*. 2021. Vol. 28(2). P. 1409–1416.
2. Luo Kunli, Wang Douhu, Tan Jianan. Lead emission amount from coal combustion and its environment effect in Xi'an City // *Environ Mental Science*. 2002. No. 23(1). P. 123–125.
3. 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.
4. Nimaje D. S., Tripathy D. P. Thermal studies on spontaneous heating of coal // *The Indian Mining & Engineering Journal*. 2010. Vol. 10. P. 21.
5. Греков С. П., Пашковский П. С., Орликова В. П. Тепловой эффект окисления углей и эндогенная пожароопасность // *Уголь Украины*. 2014. № 10. С. 46–50.
6. Пашковский П. С., Греков С. П., Зинченко И. Н. Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля. Донецк: Арпи, 2012. 656 с.
7. Греков С. П., Пашковский П. С., Зинченко И. Н., Головченко Е. А. Определение группы пожароопасности пластов // *Уголь Украины*. 2008. № 8. С. 25–26.
8. Мельник В. В., Харисов Т. Ф., Замятин А. Л., Харисова О. Д. Оценка эффективности комплекса геофизических методов исследований массива в условиях подземного рудника // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2020. № 4. С. 32–39. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-32-39
9. Суксова С. А., Тимофеева Ю. В., Долкан А. А., Попов Е. В. Обзор методов идентификации процессов самовозгорания углей // *Вестник Евразийской науки*. 2021. Т. 13. № 1. 19 с.
10. Нарский В. А., Портола В. А., Разумов Е. А., Венгер В. Г. Обнаружение и локация подземных очагов самовозгорания методом электрического зондирования // *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2021. № 3. С. 52–58.

11. 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. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-120-131
12. Неведрова Н. Н., Санчаа А. М., Шалагинов А. Е., Пономарев П. В., Рохина М. Г. Характеристика активности разломных структур по данным геоэлектрики с контролируемыми источниками (на примере Горного Алтая) // ГИАБ. 2015. № 12. С. 243–259.
13. Loke M. H., Barker R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. 1996. No. 44(1). P. 131–152. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x
14. Паршаков Е. И. Исследования закарстованности участка методом ВЭЗ // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. труд. Вып. № 14. Пермь: ГИ УрО РАН, 2016. С. 234–235.
15. Пархоменко Э. И. Электрические свойства горных пород. М.: Наука, 1965. 154 с.
16. Жданов М. С. Электроразведка. М.: Недра, 1986. 316 с.
17. Хмелевский В. К. Основной курс электроразведки. Ч. 1. М.: МГУ, 1970. 245 с.
18. Якубовский Ю. В., Ляхов Л. Л. Электроразведка. М.: Недра, 1982. 280 с.
19. Калайгорода В. В., Простов С. М. Диагностирование очага самонагрева в породугольном массиве по аномалиям естественного электрического поля // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 1. С. 84–94. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-1-84-94

Поступила в редакцию 12 марта 2024 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>

Смирнов Николай Александрович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник инновационной фирмы «Кузбасс-НИИОГР». E-mail: smirnovnick@yandex.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-124-135

Locating the endogenous fire source in a coal mine wall by electrical prospecting

Vsevolod V. Kalaigoroda^{1*}, Sergei M. Prostov¹, Nikolai A. Smirnov²

¹ T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

² Kuzbass-NIIOGR innovation company, Kemerovo, Russia

Abstract

Introduction. *Endogenous fires are difficult to predict and forecast, especially in the initial stages, therefore their study remains relevant. Endogenous fires prevention includes measures to prevent the possible development of spontaneous combustion sources formation in the identified fire hazard zones. The electrical sounding method is promising for endogenous fires action zone determination in coal masses. When diagnosing endogenous fires in coal mine walls, it is important to take into account the impact of the lower and upper slopes of the bench the electrical sounding is performed on.*

Research objective *is to assess the vertical electrical sounding method effectiveness for localizing endogenous fire sources; determine correction factors which consider the influence of bench slopes of the coal wall when surveying by the method of vertical electrical sounding.*

Methods of research *include theoretical determination of rock mass properties effect on the effective electrical resistivity, current density, and field strength; mathematical modeling as one of the methods that takes into account the effect the relief has on the vertical electrical sounding results; and correction coefficients calculation by simulating the bench electric field using the finite element method.*

Research results. *Ranges of correction factors for the lower and upper slopes have been established. Graphs are presented showing the correction factors change depending on the installation base, slope angle and distance to slope crest for symmetrical four-point installations.*

Conclusions and application of research results. *The electrical sounding method can be efficiently used to detect and localize endogenous fire sources in coal masses at all stages of fire. At the self-heating stage, the geometry of the anomaly can be estimated from the electrical profiling data. When a fire develops in the pit wall, multi-electrode installations (electric tomographs) are promising for the fire zone boundaries determination.*

Keywords: *endogenous fires; spontaneous combustion of coal; geophysical monitoring; vertical electrical sounding; profiling; electrical tomography; pit wall slope; mathematical modeling.*

REFERENCES

1. Bigliardi A. P., Fernandes C. L. F., Pinto E. A. Blood markers among residents from a coal mining area. *Environmental Science Pollution Reseach*. 2021; 28(2): 1409–1416.
2. Luo Kunli, Wong Douhu, Tan Jianan. Lead emission amount from coal combustion and its environment effect in Xi'an City. *Environ Mental Science*. 2002; 23(1): 123–125.
3. Tarafadar M. N., Guha D. Application of wet oxidation processes for the assessment of the spontaneous heating of coal. *Fuel*. 1989; 68: 315.
4. Nimaje D. S., Tripathy D. P. Thermal studies on spontaneous heating of coal. *The Indian Mining & Engineering Journal*. 2010; 10: 21.
5. Grekov S. P., Pashkovskii P. S., Orlikova V. P. The heating effect of coal oxidation and endogenous fire-hazard. *Ugol Ukrainy = Coal of Ukraine*. 2014; 10: 46–50. (In Russ.)
6. Pashkovskii P. S., Grekov S. P., Zinchenko I. N. *Urgent question of coal spontaneous combustion protection*. Donetsk: Arpi Publishing; 2012. (In Russ.)
7. Grekov S. P., Pashkovskii P. S., Zinchenko I. N., Golovchenko E. A. Determining the class of coalbeds fire-hazard. *Ugol Ukrainy = Coal of Ukraine*. 2008; 8: 25–26. (In Russ.)
8. Melnik V. V., Kharisov T. F., Zamiatin A. L., Kharisova O. D. Assessing the efficiency of a complex of geophysical methods of rock mass research under the conditions of an underground mine. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 32–39. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2020-4-32-39
9. 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; 13(1): 19. (In Russ.)
10. Narskii V. A., Portola V. A., Razumov E. A., Venger V. G. Detection and location of underground of self-combustion foci by electric sensing. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti = Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety)*. 2021; 3: 52–58. (In Russ.)
11. 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.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2023-4-120-131
12. Nevedrova N. N., Sanchaa A. M., Shalaginov A. E., Ponomarev P. V., Rokhina M. G. Characteristics of the active fault structures according geoelectric control source. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 12: 243–259. (In Russ.)
13. Loke M. H., Barker R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*. 1996; 44(1): 131–152. Available from: doi: 10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x
14. Parshakov E. I. Studying cavernous porosity of the area using the vertical electrical sounding method. In: *Strategy and processes of georesources development: Proceedings*. Issue 14. Perm: MI UB RAS Publishing; 2016. p. 234–235. (In Russ.)
15. Parkhomenko E. I. *Electrical properties of rocks*. Moscow: Nauka Publishing; 1965. (In Russ.)
16. Zhdanov M. S. *Electrical prospecting*. Moscow: Nedra Publishing; 1986. (In Russ.)
17. Khmelevskii V. K. *The fundamental course of electrical prospecting*. Pt. 1. Moscow: MSU Publishing. 1970. (In Russ.)
18. Iakubovskii Iu. V., Liakhov L. L. *Electrical prospecting*. Moscow: Nedra Publishing; 1982. (In Russ.)
19. 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. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2024-1-84-94

Information about the authors:

Vsevolod V. Kalaigoroda – PhD 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 and Property Survey, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. E-mail: psm.kem@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0780-2690>

Nikolai A. Smirnov – PhD (Engineering), leading researcher, Kuzbass-NIIOGR innovation company. E-mail: smimovnick@yandex.ru

Для цитирования: Калайгорода В. В., Простов С. М., Смирнов Н.А. Локация очага эндогенного пожара в борту угольного разреза методом электроразведки // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 4. С. 124–135. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-124-135

For citation: Kalaigoroda V. V., Prostov S. M., Smirnov N. A. Locating the endogenous fire source in a coal mine wall by electrical prospecting. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 4: 124–135. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-124-135