



УДК 622.822.22

ОБЪЕМНОЕ ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ В РАЙОНЕ ОЧАГА ЭНДОГЕННОГО ПОЖАРА

Простов С.М., Калайгорода В.В., Бушуев А.А.

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева



Информация о статье

Поступила:
23 октября 2024 г.

Рецензирование:
05 мая 2025 г.

Принята к печати:
19 мая 2025 г.

Ключевые слова:

приповерхностный
породоугольный массив;
эндогенный пожар;
электрическое зондирование;
геоэлектрический потенциал;
физическая модель;
геометрическое подобие.

Аннотация.

Рассмотрена актуальность проблемы диагностирования очагов эндогенных пожаров при подземной и открытой геотехнологиях, основные физико-химические предпосылки самовозгорания угля, методы прогнозирования и локации очагов эндогенных пожаров в приповерхностных породоугольных массивах. Перспективно применение геофизических методов мониторинга, основанных на измерении аномалий активных и естественных электрических полей, вместе с тем, для повышения точности геофизического прогноза необходимо физическое моделирование. Описана лабораторная физическая модель, в которой соответствие натуре обеспечивается совпадением схем, методов измерений, набором материалов модели, совпадающих по диапазону электрических свойств с натурой, а также использованием геометрического подобия. На основе анализа баз экспериментальных данных установлены закономерности и взаимосвязи параметров графиков вертикальных электрических зондирований и геоэлектрических потенциалов с глубиной расположения и размерами аномальной очаговой зоны на начальной и последующих стадиях развития процессов самовозгорания.

Для цитирования: Простов С.М., Калайгорода В.В., Бушуев А.А. Объемное физическое моделирование геоэлектрических аномалий в районе очага эндогенного пожара // Техника и технология горного дела. – 2025. – № 2(29). – С. 26-39. – DOI: 10.26730/2618-7434-2025-2-26-39, EDN: XDCVIE

Введение

Деятельности по добыче полезных ископаемых в условиях горнодобывающей промышленности присвоена высокая степень риска в связи с опасностью для жизни и здоровья рабочих в случае аварии [1]. Несмотря на уменьшение общего числа происходящих аварий на территории угольных разрезов, количество эндогенных возгораний угля не имеет заметного снижения [2].

Возникновение и развитие процессов самовозгорания угля происходит при выполнении следующих необходимых условий [3, 4].

1. Наличие материалов, имеющих свойство окисляться кислородом. На угледобывающих предприятиях кроме собственно угля таким материалом может быть сера, древесные отходы и т.д. Причиной самовозгорания на отвалах Кемеровской области является высокая концентрация угольных фрагментов в теле отвала и т.д., их окисление сопровождается выделением тепла [5].

2. Непрерывающийся доступ кислорода к поверхности, подверженной окислению.

3. Количество тепла, образующееся при окислении, должно превышать количество тепла, потерянного окисляющимся материалом при выделении в окружающее пространство.

Для борьбы с эндогенными пожарами проводят комплексные эксперименты, направленные на изучение процессов возникновения очага самовозгорания. К примеру, в работах [6-8] были



выполнены исследования по определению увеличения интенсивности тепловыделения в зависимости от начальной температуры, крупности, влажности угля и воздуха, скорости движения газа.

Одним из важных требований в вопросе решения проблемы самовозгорания пластов и породугольных скоплений при открытой геотехнологии является своевременный прогноз и последующее снижение отрицательного воздействия на окружающую среду и здоровье населения, поскольку при активном эндогенном возгорании угля происходят крупные перемещения химических компонентов в окружающей среде, негативно отражающиеся на экологии [9].

Выделяют четыре группы методов прогноза эндогенных пожаров [10]:

- визуально-физиологические, основанные на обнаружении внешних признаков органами чувств (зрением, обонянием, ощущением) без специальных приборов и оборудования;
- химико-аналитические, устанавливающие признаки пожара путем химического анализа рудничного воздуха или воды на присутствие в них продуктов горения или термического разложения;
- минералого-геохимические, изучающие пожары по составу горных пород, путем наблюдения за вторичными минералами, образующимися при развитии окислительных процессов;
- геофизические, предусматривающие обнаружение пожаров с помощью приборов по физическим параметрам, зависящим от теплового состояния среды (температуры рудничного воздуха, воды и горных пород, влажности атмосферы, электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости горных пород).

Существуют прямые и косвенные методы прогнозирования и локализации эндогенных пожаров (рис. 1).

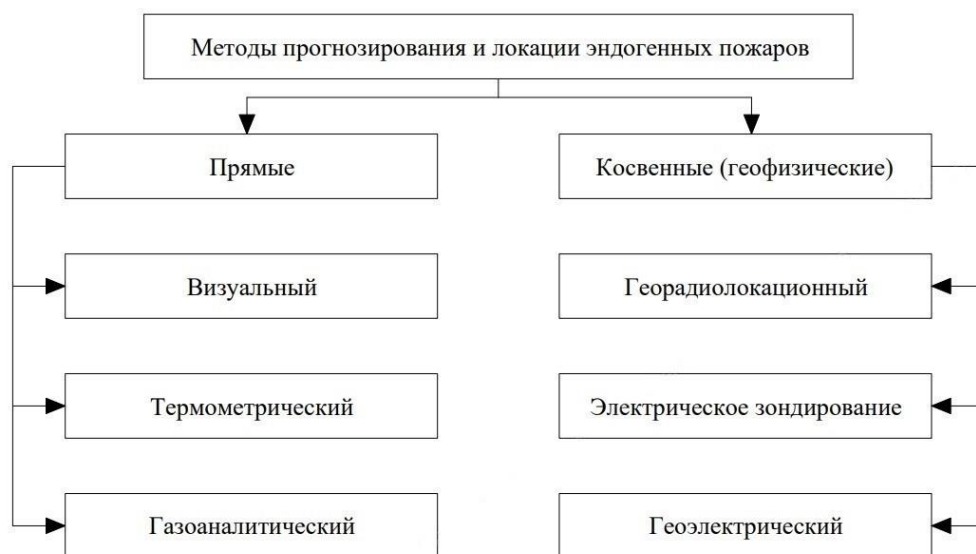


Рисунок 1 – Методы прогнозирования и локализации приповерхностных эндогенных пожаров
Figure 1 – Methods of forecasting and locating near-surface endogenous fires

Для оперативного обнаружения и локализации очагов подземных и открытых эндогенных пожаров активно применяют визуальные и термометрические методы. Например, при ведении открытых горных работ активно применяются методы контроля эндогенной пожароопасности на основе газоаналитического анализа аномалий выделения радона на земной поверхности [11].

При диагностировании и локализации очагов эндогенных пожаров в приповерхностных породугольных аномалиях наибольшее распространение получили следующие методы.

Газоаналитический метод основан на химическом анализе состава газовой смеси на территории породугольных образований [12]. В качестве индикаторных газов выступают оксид CO и диоксид CO_2 углерода, метан CH_4 , водород H_2 , этилен C_2H_4 и ацетилен C_2H_2 .



Термометрический метод подразумевает проведение замеров температуры воздуха и поверхности для локации зоны и очага эндогенного пожара. Каждая стадия протекает в определенном интервале температур. Одним из эффективных направлений в настоящее время является применение тепловизоров, позволяющих получить изображение снимаемой поверхности в инфракрасном диапазоне [13].

Визуальный метод основан на фиксации таких видимых явлений, как появление пламени или дыма [14]. В зимний период над прогретыми зонами тает снег. В некоторых случаях над очагом самовозгорания может меняться цвет угля и пород.

Одними из наиболее информативных и эффективных способов обнаружения очага эндогенного пожара являются геофизические методы, включающие электрическое зондирование, геоэлектрический и георадиолокационный метод [15].

Георадиолокационное зондирование (высокочастотное электромагнитное сканирование) основано на отражении электромагнитных волн от неоднородностей, контрастных по диэлектрическим свойствам [16]. Георадары предназначены для диагностирования зон, аномальных по электромагнитным свойствам, методом бесконтактного подповерхностного зондирования.

Метод электрического зондирования реализуется по схемам вертикального зондирования (ВЭЗ) и электропрофилирования (ЭП) с использованием комплекта аппаратуры, включающего стержневые стальные электроды и каротажный прибор в режиме измерения электросопротивления [17]. Максимум эффективного УЭС массива при профилировании с поверхности соответствует расположению центра очага пожара.

Геоэлектрический метод основан на анализе изменения геопотенциала в зоне распространения естественного геоэлектрического поля, образуемого вокруг очага самонагрева вследствие происходящих фильтрационных и окислительно-восстановительных процессов [18]. Экстремум геопотенциала на поверхности массива соответствует расположению центра очага.

Теория геофизических методов достаточно сложна, при расчетах применяются серьёзные допущения. Часто для проверки и уточнения расчетных зависимостей с их последующим практическим использованием применяют способ физического моделирования. Ниже рассмотрены характерные примеры применения лабораторных физических моделей при диагностировании приповерхностных аномальных зон, контрастных по электромагнитным свойствам.

В работе [19] авторами исследована физическая модель, задачей которой является комплексное использование аналитических методов и физического моделирования при изучении особенностей реализации электротомографии для трехмерных неоднородных анизотропных сред. Для проведения физического моделирования была разработана установка [20], которая позволяет изучать трёхмерные объекты, располагающиеся в однородной среде. В качестве электродов использовались латунные штыри диаметром 1,5 мм. Вся система электродов связана проводниками с дублирующим планшетом, находящимся на рабочем столе наблюдателя. В качестве модели исследования использовалось органическое стекло размером 16×2×5 см, которое находилось во вмещающей среде (воде). Глубина положения верхней кромки модели составляла 7 см. По результатам проведения электропрофилирования получена карта аномалий кажущегося УЭС. Для определения глубины залегания трехмерного ограниченного объекта при моделировании использовался метод ВЭЗ с двухсторонней трехэлектродной установкой [21]. Для измерений использовался регистратор электроразведочный многоканальный из комплекса Рутил-1 со встроенным генератором тока, который обеспечивает режим стабилизации (ограничения) и регистрации фактического значения выходного постоянного тока. По итогам проведения ВЭЗ были построены графики кажущегося УЭС. На графике, полученном при измерениях вдоль простирания объекта, тело выделяется достаточно чётко, а при измерениях вкрест простирания объекта, оно практически не заметно.

В работе [22], с целью физического моделирования электромагнитного поля, генерируемого несимметричным линейным диполем в проводящем полупространстве, была создана экспериментальная установка, включающая в себя электролитическую ванну в форме куба с



ребрами 1.5 м, заполненную водным раствором поваренной соли, источник ЭДС и приемно-регистрирующую систему. Построены графики разностей потенциалов между диполем и зондом на поверхности электролита для трех глубин погружения диполя. Установлено, что на малых расстояниях имеется заметное расхождение теории с экспериментом, теоретические кривые располагается ниже, чем экспериментальные. Экспериментальные кривые при экстраполяции сходятся в некоторой точке, которая соответствует ненулевой разности потенциалов. Теоретическое значение для любой глубины превышает экспериментальное, при этом различие возрастает с уменьшением глубины.

В работе [23] рассмотрена техника и методика применения физической модели многоэлектродной электроразведки постоянным током на примере схемы внутреннего скользящего контакта (МВСК), а также изучены основные приемы интерпретации данных путем численного двумерного моделирования с использованием программных средств решения прямых и обратных задач метода сопротивлений ZondRes2D.

Для решения задачи выявления аномальных объектов в ограниченном массиве было проведено физическое моделирование электроразведочных измерений объектов, ограниченных контрастными границами [24].

Основная идея работы [25] состояла в том, что в условиях сложного рельефа поверхности, который располагается над однородной средой, в результате инверсии в геоэлектрическом разрезе не должны наблюдаться аномальные объекты. Открытыми остаются вопросы точности решения прямой задачи, которая встроена в обратную задачу, неизвестны значения критических углов рельефа, при которых возникают сильные искажения поля. Для решения этой проблемы авторами проведено физическое моделирование на большой однородной песчаной насыпи с искусственным сложным рельефом поверхности. Этот эксперимент позволил выявить ложные аномалии, которые появились в результате двумерной инверсии на геоэлектрических разрезах. Кроме этого, проведено моделирование в лабораторных условиях в прямоугольном баке, заполненном целлюлозно-гидрогелевой смесью. В результате было выделено четыре типа сильных аномалий электрического поля. Показано, что на крутых перегибах рельефа программы двумерной инверсии недостаточно хорошо справляются со своей задачей. При этом аномалии кажущегося электросопротивления разного типа от соседних форм рельефа складываются и создают сложную картину.

В КузГТУ выполнен комплекс исследований аномалий геоэлектрических полей в районах различных объектов мониторинга с помощью физических моделей.

В работе [26] представлены результаты исследования влияния геометрических параметров грунтовых дамб на результаты электрических зондирований. Физическая модель дамбы представляла собой герметичную емкость из непроводящего материала объемом 0,3 м³, заполненную водопроводной водой. С помощью специальных подвижных плоских элементов задавались углы откосов дамб. В модели выполнялись условия геометрического подобия, в результате были получены базы данных поправочных коэффициентов K_n установки $AMNB$:

$$K_n(AB, \xi, v, H, H_3) = \frac{\Delta U_0}{\Delta U(AB, \xi, v, H, H_3)}, \quad (1)$$

где AB – разнос установки, ξ – угол наклона откоса (низового или верхового), v – расстояние от профиля до бровки откоса, H – высота дамбы, H_3 – высота заполнения хранилища.

При исследовании комплекса процессов электрохимического закрепления (ЭХЗ) грунтов на лабораторной физической модели (ванной размерами 1×0,5×0,5 м, заполненной глинистым грунтом) были обеспечены все геологические (механические, гидродинамические и электрические свойства грунта) и технологические (плотность тока, градиент напряжений, длительность обработки) параметры ЭХЗ натуры, что соответствовало выполнению электро- и гидродинамических критериев подобия. Мониторинг изменений УЭС в различных точках модели в пространстве между электродами-инъекторами с помощью 4-электродных микродатчиков позволил установить закономерности гидродинамических и физико-химических процессов в зоне электрообработки при различных режимах в реальном масштабе времени [27].

Аналогичная объемная физическая модель была реализована при изучении процессов электроосмотической очистки грунтов от нефтезагрязнений. С помощью микродатчиков исследовались процессы перехода нефтепродуктов в порах грунта в твердое нерастворимое в воде состояние в межэлектродном пространстве по величине истинного УЭС. Установлены взаимосвязи УЭС с изменениями влажности, пористости и гранулометрического состава обрабатываемых глинистых грунтов [28].

При лабораторных исследованиях бесконтактного индукционного датчика физическая модель проводимой среды представляла систему эталонировочных колец (кольцевой индукционный интегратор), замкнутых или разомкнутых, с включением в разрыв механизма электросопротивлений. Результаты исследований позволили получить осевую и радиальную характеристики датчика, выполнить его тарировку и установить особенности интерпретации каротажных данных при пересечении датчиком зон проникновения укрепляющего раствора и набора прочности [29].

Цель работы

Целью данной работы является проверка адекватности расчетных зависимостей диагностирования и локации очага эндогенного пожара в приповерхностных пороодо-угольных массивах по аномалиям активных и естественных геоэлектрических полей, а также получение эмпирических зависимостей для приближенной интерпретации результатов геоэлектрического мониторинга.

Методика исследований

Схема лабораторной установки представлена на рис.2.

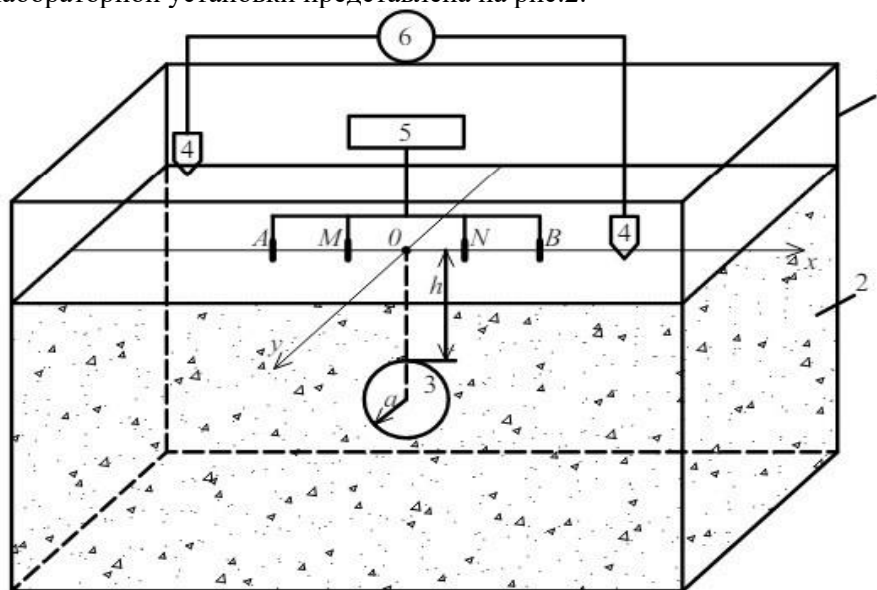


Рисунок 2 – Схема электрофизической модели очага эндогенного пожара: 1 – емкость; 2 – песок, увлажненный раствором NaCl; 3 – электрическая (геоэлектрическая) модель очага пожара; 4 – неполяризующийся хлор-серебряные электроды; 5 – каротажный прибор КП-2; 6 – мультиметр; AMNB - симметричная 4-электродная установка

Figure 2 – Scheme of electrophysical model of endogenous fire centre: 1 – vessel; 2 – sand moistened with NaCl solution; 3 – electrical (geoelectric) model of the fire centre; 4 – non-polarising chlorine-silver electrodes; 5 – logging device KP-2; 6 – multimeter; AMNB – symmetrical four-electrode setup

В емкость 1 из непроводящего материала с гидроизоляцией стенок засыпали послойно песок 2, увлажненный раствором NaCl до получения уровня УЭС, соответствующего натуре. В грунт помещали электрическую или геоэлектрическую модель очага пожара 3. Измерения методом электрических зондирований проводили стержневыми стальными микроэлектродами AMNB, образующими симметричную установку, подключенную к каротажному прибору КП-2 5. Измерения геоэлектрических потенциалов ϕ проводили лабораторными неполяризующимися



электродами ЭВЛ-1М 4, подключенными к мультиметру *EKF M830B Master In-180701-bm830B* 6.

Электрическая модель аномальной зоны представляла собой шар из пенопласта (полипропилена) радиусом a . Конструкция геоэлектрической модели аномалии включала сферический корпус 1 из пенопласта, два полусферических электрода 2 из алюминиевой фольги и элемент *CR2032* 3, подсоединенный к электродам 2, помещенный в проточку корпуса 1 и изолированный (рис.3.).

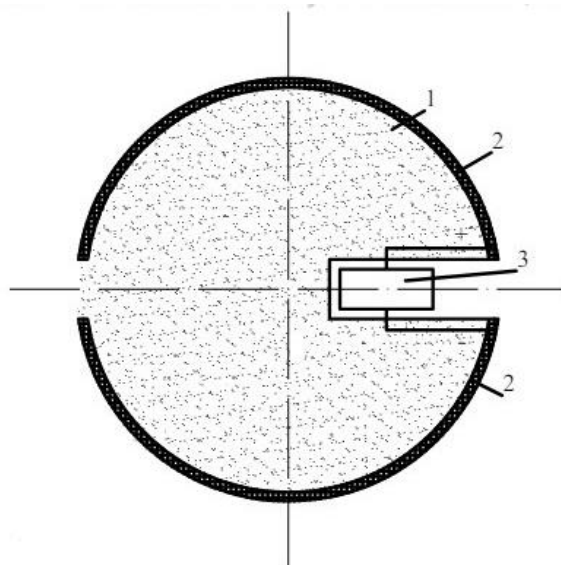


Рисунок 3 – Схема геоэлектрической модели очага пожара: 1 – корпус; 2 – металлическая фольга; 3 – элемент питания *CR2032*.

Figure 3 – Scheme of geoelectric model of fire centre: 1 – case; 2 – metal foil; 3 – *CR2032* battery.

Методика экспериментов состояла в следующем. При исследовании электрической аномалии модель 3 с радиусом a погружали в грунт на глубину h , измерения установкой *AMNB* проводили по схемам зондирования (при увеличении разноса AB), продольного (по оси x) и поперечного (по оси y) профилирования. Увеличивая глубину h , добавляя слой грунта, повторяли измерения. Затем аналогично проводили эксперимент с моделью – сферой большего радиуса a или моделью – эллипсоидом с размерами $A \times B \times C$.

При экспериментах с геоэлектрической моделью заземляющий электрод 4 помещали в угол емкости 1 на максимальное расстояние, а подвижный электрод заземляли по профилям x и y .

Рассмотрим подобие параметров природы и модели. Величины измеряемых эффективных электросопротивлений ($УЭС$) природы и модели определяются из уравнений электроразведки:

$$\rho_{кн} = k_n \frac{\Delta U_n}{I_n}; \quad (2)$$

$$\rho_{км} = k_m \frac{\Delta U_m}{I_m}, \quad (3)$$

где $\rho_{кн}$, $\rho_{км}$ – эффективные $УЭС$ соответственно природы и модели; ΔU_n , ΔU_m , I_n , I_m – соответственно падения напряжения на измерительных электродах M и N , и ток в цепи питающих электродов A и B ; k_n , k_m – геометрические коэффициенты установки *AMNB*, определяемые по формуле:

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BM}}. \quad (4)$$

Поскольку схемы электрического зондирования и измерительная аппаратура совпадают, то $\Delta U_n = \Delta U_m$; $I_n = I_m$, а электрические свойства природы и модели эквивалентны ($УЭС$ грунта изменяется в диапазоне $\rho_r = 50-150$ Ом·м; $УЭС$ очага пожара и пенопласта соответствуют



диапазону $\rho_n = (1-5) \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), истинная величина $\rho_{\text{кн}}$ (в $\text{Ом} \cdot \text{м}$) определяется путем деления членов уравнения (2) на члены уравнения (3):

$$\rho_{\text{кн}} = \rho_{\text{км}} \frac{k_{\text{н}}}{k_{\text{м}}} = \rho_{\text{км}} \cdot m_r, \quad (5)$$

где m_r – коэффициент (масштаб) геометрического подобия $m_r = 100$.

Таким образом, перенос результатов лабораторного моделирования на натурные условия обеспечивается геометрическим подобием модельной установки и природы.

Результаты и обсуждение

Результаты вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) и электропрофилирования (ЭП) над аномальной зоной в форме сферы – диэлектрика (модели очага эндогенного пожара на начальной стадии) радиусом a ($a = 4,5; 6; 7,5 \text{ м}$) представлены на рис. 4 – 6.

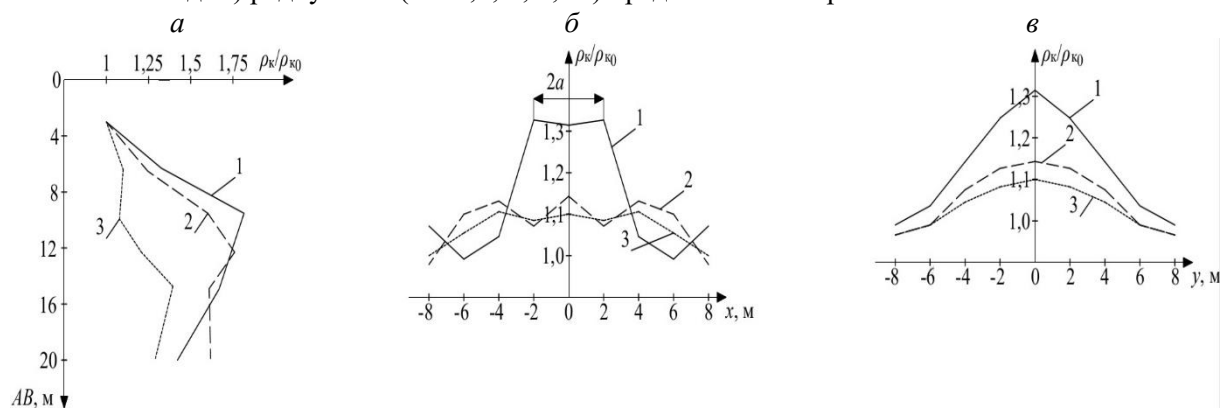


Рисунок 4 – Результат ВЭЗ (а), продольного (б) и поперечного (в) ЭП ($AB = 15 \text{ м}$) при модели-сфере, $a = 4,5 \text{ м}$: 1 – $h = 1 \text{ м}$; 2 – $h = 3 \text{ м}$; 3 – $h = 6 \text{ м}$.

Figure 4 – Result of VES (a), longitudinal (б) and transverse (в) ES ($AB = 15 \text{ м}$) at model-sphere, $a = 4.5 \text{ м}$: 1 - $h = 1 \text{ м}$; 2 - $h = 3 \text{ м}$; 3 - $h = 6 \text{ м}$.

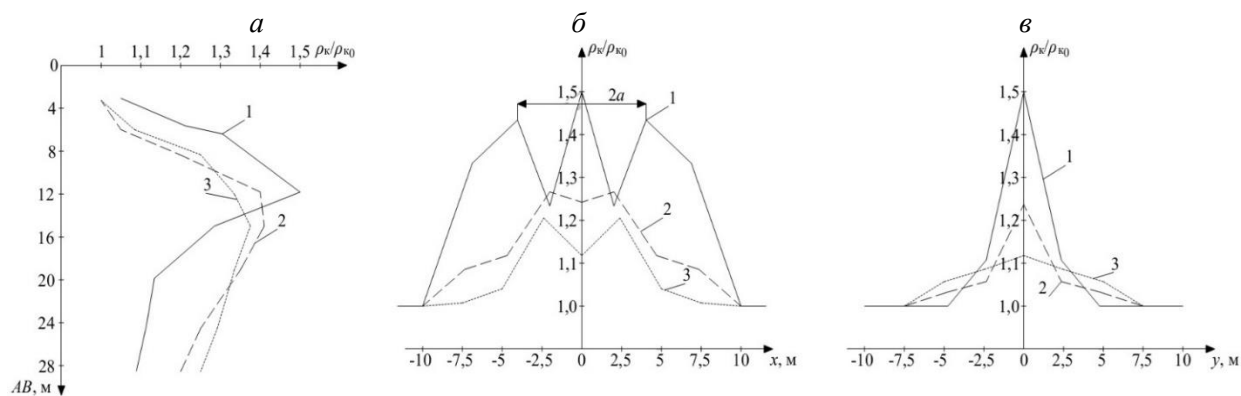


Рисунок 5 – Результат ВЭЗ (а), продольного (б) и поперечного (в) ЭП ($AB = 15 \text{ м}$) при модели-сфере, $a = 6 \text{ м}$: 1 – $h = 1 \text{ м}$; 2 – $h = 3 \text{ м}$; 3 – $h = 6 \text{ м}$.

Figure 5 – Result of VES (a), longitudinal (б) and transverse (в) ES ($AB = 15 \text{ м}$) at model-sphere, $a = 6 \text{ м}$: 1 - $h = 1 \text{ м}$; 2 - $h = 3 \text{ м}$; 3 - $h = 6 \text{ м}$.

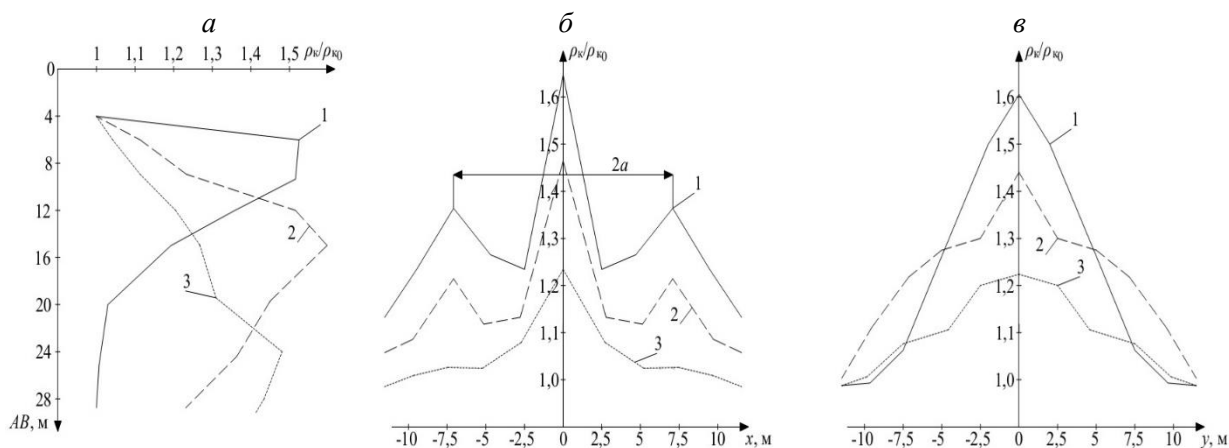


Рисунок 6 – Результат ВЭЗ (а), продольного (б) и поперечного (в) ЭП ($AB = 15$ м) при модели-сфере, $a = 15$ м: 1 – $h = 1$ м; 2 – $h = 3$ м; 3 – $h = 6$ м.
Figure 6 – Result of VES (a), longitudinal (б) and transverse (в) ES ($AB = 15$ m) at model-sphere, $a = 15$ m: 1 – $h = 1$ m; 2 – $h = 3$ m; 3 – $h = 6$ m.

При графической визуализации результатов эксперимента использовались следующие методические приемы, применяемые в электроразведке:

- для отстройки от влияния неравномерности УЭС грунта модели на графиках откладывались относительные значения эффективного УЭС ρ_k / ρ_{k0} (где ρ_{k0} – эффективное УЭС вне зоны влияния аномалии);

- ввиду симметричности модели левые части графиков ЭП строились как зеркальные отражения правых частей.

Основные результаты анализа комплекса приведенных графиков состоят в следующем.

1. На всех графиках ВЭЗ $\rho_k(AB)$ имеет место четкий максимум ρ_k , координата которого AB_m увеличивается по мере заглубления модели аномалии. Обработка баз данных ВЭЗ позволила установить близкую к линейной зависимость отношения глубины центра и радиуса сферы $(a+h)/a$ от величины AB_m (рис. 7).

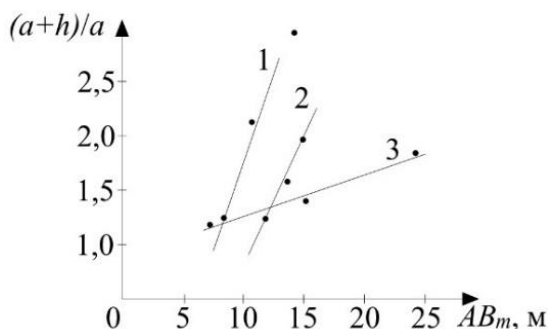


Рисунок 7 – Зависимости между геометрическими параметрами a , h очага и расстоянием до точки максимума AB_m графика ВЭЗ: 1 – $a = 4,5$ м; 2 – $a = 6$ м; 3 – $a = 7,5$ м

Figure 7 – Dependences between geometrical parameters a , h of the hearth and distance to the maximum point AB_m of the VES diagram: 1 – $a = 4,5$ m; 2 – $a = 6$ m; 3 – $a = 7,5$ m

2. Графики продольного (по оси x) и поперечного (по оси y) ЭП принципиально отличаются по форме:

- при продольном профилировании над центром модели при её минимальном заглублении формируется основной максимум графика $\rho_k(x)$ и два локальных максимума, расстояние между которыми соответствует диаметру $2a$ аномалии, с увеличением глубины h расположения аномалии локальные максимумы сглаживаются;



- графики поперечного ЭП имеют правильную форму колоколообразную форму, величина максимального значения ρ_{KM} монотонно убывает с увеличением глубины h аномалии.

При исследовании модели аномальной зоны в форме, близкой к эллипсоиду (конечная стадия эндогенного пожара) полученные результаты существенно отличаются от описанных выше (рис.8):

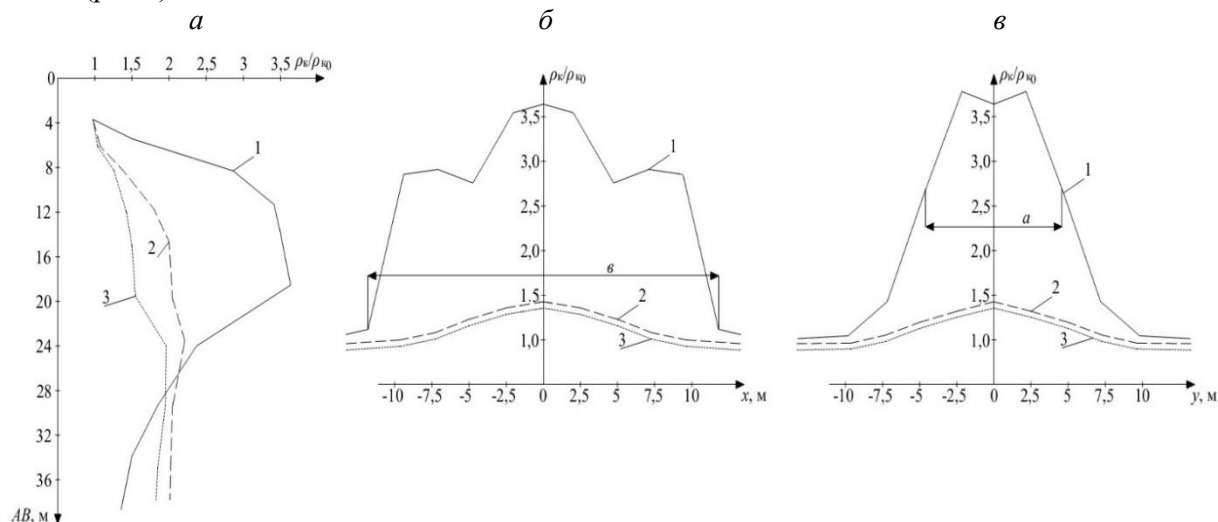


Рисунок 8 – Результат ВЭЗ (а), продольного (б) и поперечного (в) ЭП ($AB = 15$ м) при модели-эллипсоиде, $a = 10$ м, $v = 30$ м, $c = 5$ м: 1 – $h = 1$ м; 2 – $h = 3$ м; 3 – $h = 6$ м.

Figure 8 – Result of VES (a), longitudinal (б) and transverse (в) ES ($AB = 15$ m) at model-ellipsoid, $a = 10$ m, $c = 30$ m, $s = 5$ m: 1 – $h = 1$ m; 2 – $h = 3$ m; 3 – $h = 6$ m.

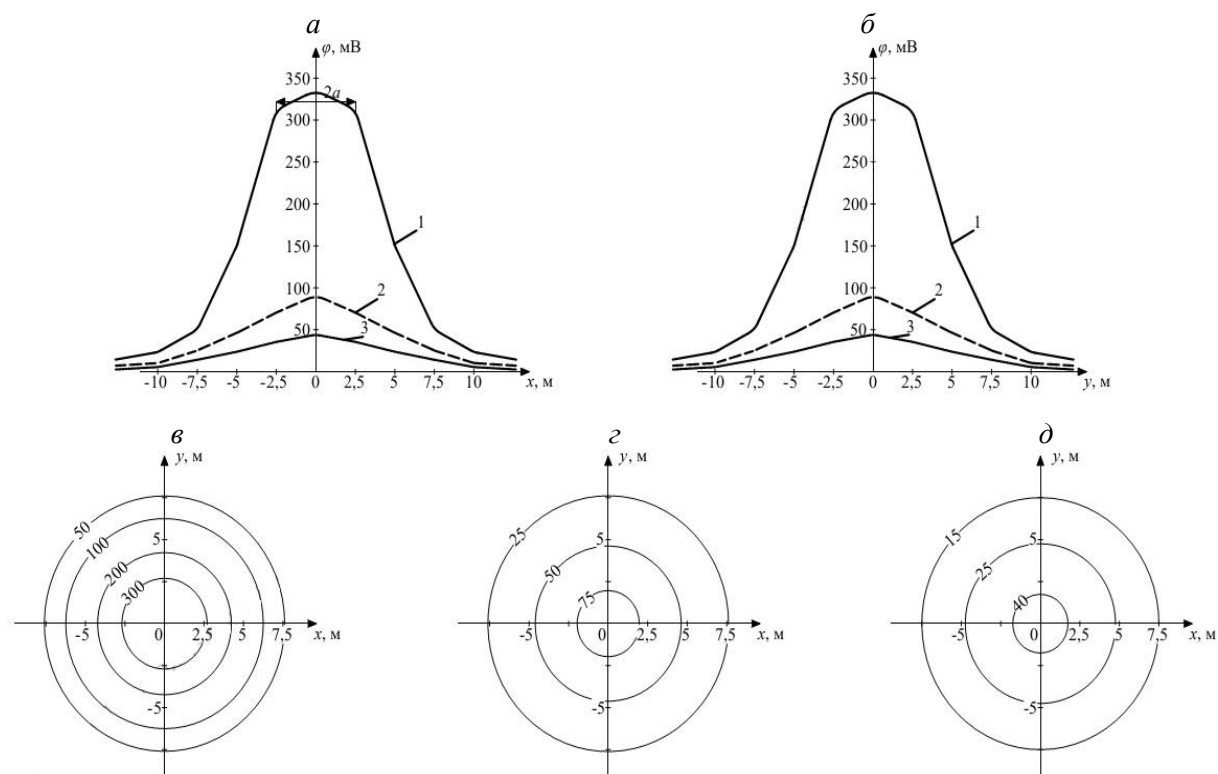


Рисунок 9 – Графики геопотенциала ϕ по продольному x (а), поперечному y (б) профилям, поля изолиний при $h = 1$ м (в), $h = 3$ м (г), $h = 7$ м (д), $a = 9$ м: 1 – $h = 1$ м; 2 – $h = 3$ м; 3 – $h = 7$ м.

Figure 9 – Plots of geopotential ϕ along the longitudinal x (а), transverse y (б) profiles, iso-line fields at $h = 1$ m (в), $h = 3$ m (г), $h = 7$ m (д), $a = 9$ m: 1 – $h = 1$ m; 2 – $h = 3$ m; 3 – $h = 7$ m.



- на графиках ВЭЗ электрическая контрастность аномалии при $h = 1\text{м}$ резко возрастает (ρ_k / ρ_{k0} достигает в максимуме 3,5), глубина расположения максимума AB_m монотонно возрастает с увеличением глубины h расположения модели;

- графики ЭП имеют трапецевидную форму, при этом ширина основания трапеции на графике продольного ЭП равна длине b модели, а ширина средней линии трапеции на графике поперечного ЭП равна ширине a модели.

При моделировании аномалии естественного электрического поля получены экспериментальные зависимости в форме графиков продольного, поперечного профилирования и полей изолиний естественного потенциала ϕ (мВ), которые практически совпадают с теоретическими зависимостями, приведенными в работе [30] (расхождение не превышает 5%) (рис. 9):

- максимум потенциала ϕ располагается над центром электрически поляризованной сферы, а изолинии ϕ мало отличаются от окружностей;

- для приближенной оценки глубины расположения центра сферической аномалии вполне подходит метод срединного сечения (рис.8, а) с расчетом по формуле

$$h + a \approx 0,65 \Delta x_{0,5} = 0,65 \cdot 8,8 = 5,72\text{м (погрешность 4,2\%)}. \quad (6)$$

Выводы

1. Физическое моделирование геоэлектрических аномалий в районе очага эндогенного пожара в открытом пороодо-угольном массиве обеспечивается совпадением схем, метода измерений, подбором материалов модели (песок, увлажненный соевым раствором, пенопласт), совпадающих по диапазону электрических свойств с натурой, а также использованием геометрического подобия.

2. При диагностировании ранних стадий самовозгорания глубина очага, аппроксимируемого сферой, определяется по величине разности AB_m установки ВЭЗ, соответствующий максимуму эффективного УЭС ρ_k с учетом линейной зависимости отношения глубины и радиуса очага от AB_m , а диаметр очага – по расстоянию между локальными максимумами на границах продольного ЭП. Определение размеров в плане аномальной зоны на поздних стадиях развития очага обеспечивается по ширине аномальной зоны на границах продольного и поперечного ЭП. На всех стадиях самовозгорания эффективный центр очага соответствует точке максимума ρ_k на границах ЭП.

3. Геоэлектрическая аномалия потенциала естественного поля ϕ над аномальной сферической поляризованной зоной с погрешностью, не превышающей 5%, описывается ранее разработанной теоретической моделью. При этом центр очага соответствует расположению максимума ϕ на графиках профилей или поля изолиний, а глубина расположения сферического очага определяется методом срединного сечения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Информация об авторах

Простов Сергей Михайлович, д.т.н., профессор кафедры строительных процессов и экспертизы недвижимости
e-mail: psm.kem@mail.ru

Калайгорода Всеволод Владимирович, аспирант кафедры маркшейдерского дела и геологии
e-mail: kalay232@gmail.com

Бушув Александр Александрович, аспирант кафедры строительных процессов и экспертизы недвижимости
e-mail: bushuevaa@kuzstu.ru



Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева
650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Список литературы

1. Куприянов В. В., Бондаренко И. С. Факторы влияния на резерв времени для выхода из подземных аварий в шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 2. – С. 139–149.
2. Гридина Е. Б., Мирошниченко А. К. Устранение очагов самовозгорания угля на основе использования торфяных пожарных стволов // Научно-технический журнал “Вестник”. – 2021. – № 1. – С. 83–86.
3. Портола В. А., Лабукин С. Н. Обнаружение очагов самовозгорания угля на ранней стадии развития // Безопасность труда в промышленности. – 2009. – № 4. – С. 34–37.
4. Такранов Р. А. Геологические и природные факторы эндогенных пожаров на угольных карьерах. – М.: ЗАО «Геоинформмарк, 2000. – 69 с.
5. Брагина П. С. Самовозгорание угольных отвалов в Кемеровской области // Вестник Кузбасской государственной педагогической академии, 2013. – № 4. – С. 57-64.
6. Tarafadar M. N., Guha D. Application of Wet Oxidation Processes for the Assessment of the Spontaneous Heating of Coal // Fuel. – 1989. – № 68. – P. 315.
7. Nimaje D. S., Tripathy D. P. Thermal Studies on Spontaneous Heating of Coal // The Indian Mining & Engineering Journal. – 2010. – № 10. – P. 21.
8. Zhang Y., Liu Y., Shi X., Yang C., Wang W., Li Y. Risk evaluation of coal spontaneous combustion on the basis of autoignition temperature // Fuel. – 2018. – № 233. – Pp. 68-76.
9. 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). – Pp. 1409-1416.
10. Простов С. М., Прошкина К. В., Хафизова Н. Г. Способы и устройства для предотвращения эндогенных пожаров (аналитический обзор) // Кемерово. : КузГТУ, 2012. – 236 с.
11. Портола В. А., Тайлаков О. В., Ли Хи Ун Обнаружение, локация и оценка состояния очагов подземных пожаров по аномалиям радона на земной поверхности // Уголь. – 2021. – № 5. – С. 47-52.
12. Портола В. А., Дружинин А. А., Храмцов В. И. Способы обнаружения и локации очагов подземных пожаров // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 1. – С. 103-108.
13. Портола В. А. Обнаружение опасных температурных аномалий с помощью теплови-зоров при добыче угля открытым способом // Безопасность жиз-недеятельности предприятий в промышленно развитых регионах : Сборник материа-лов XV Международной научно-практической конференции, Кемерово, 21–23 ноября 2023 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. – С. 110-1
14. Нестерова В. Г., Пономарев К. Е., Бахтина Ю. С. Об использовании оптического и термоакустоэмиссионного методов для оценки окисленности ископаемых углей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 4. – С. 180-187.
15. 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.
16. Набатов В. В., Гайсин Р. М. Обработка данных георадиолокационной съемки при выявлении полостей в заобделочном пространстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – №1. – С. 19-25.
17. Шлапаков П. А., Ерастов А. Ю., Сороковых С. В., Рыков А. М. Пат. 2514017 РФ. Способ оценки эндогенной пожароопасности при подземной разработке угольных пластов / Электронный бюл. № 12 2014 г. Изобретения, полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
18. Иванов В. В., Хмяляйнен В. А., Сирота Д. Ю., Трушников Н. В. Геоэлектрический контроль очагов дезинтеграции и самонагрева углей в условиях повышенной сейсмической активности месторождений // Вестник КузГТУ. – 2013. – №6. – С. 27–29.
19. Груздев В. Н., Бакумцев А. А., Рассказчикова Н. И. Результаты физического моделирования электроразведки методами срединного градиента и вертикального электрического зондирования // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2017. – № 3. – С. 107–110.
20. Бакумцев А. А. Оптимизация методики электроразведки методом срединного градиента при изучении археологических объектов // Вестник Воронежского государственного института. Сер.: Геология. – 2017. – № 1. – С.115–118.
21. Якубовский Ю. В., Ренард И. В. Электроразведка // – М. : Изд-во Недр, 1991. – 358 с.



22. Михеев В. А., Пилипенко В. А., Асмандияров И. Р. Физическое и математическое моделирование электромагнитного поля в проводящем полупространстве // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 10-1(17). – С. 5–8.
23. Колесников В. Е. Многоэлектродная электроразведка с применением методики внутреннего скользящего контакта - опыт численного 2D моделирования // Сейсмические приборы. – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 27–34.
24. Гайсин Р. М., Набатов В. В., Буянова Д. С. Физическое моделирование электрометрических исследований участков массива, имеющих контрастные границы // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 8. – С. 71–74.
25. Баранчук К. И., Миргаликызы Т. М., Модин И. Н., Муканова Б. Г. Физическое моделирование электрической томографии на поверхности земли со сложным рельефом // Инженерные изыскания. – 2017. – № 11. – С. 56–65.
26. Простов С. М., Костюков Е. В., Бахаева С. П. Прогноз устойчивости грунтовых дамб // М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высшего проф. образования "Кузбасский гос. технический ун-т", Российская акад. естественных наук. – Кемерово : Кузбассвуиздат - АСТШ, 2006. – 171 с.
27. Простов С. М., Покатилов А. В., Рудковский Д. И. Электрохимическое закрепление грунтов // Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева. – Томск : Национальный исследовательский Томский государствен-ный университет, 2011. – 292 с.
28. Шабанов Е. А. Исследование процессов электроосмотической очистки грунтов от нефтезагрязнений на объемной физической модели // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2016. – № 3. – С. 434–441.
29. Простов С. М., Герасимов О. В., Мальцев Е. А. Электромагнитный геоконтроль процессов укрепления грунтов // Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Кузбасский гос. технический ун-т" Российская акад. естественных наук. – Томск : Изд-во Томского гос. ун-та, 2007. – 211 с.
30. Калайгорода В. В., Простов С. М. Диагностирование очага самонагрева в пороодоугольном массиве по аномалиям естественного электрического поля // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2024. – № 1. – С. 84–94.

VOLUMETRIC PHYSICAL MODELLING OF GEOELECTRIC ANOMALIES IN THE ENDOGENOUS FIRE CENTRE AREA

Sergei M. Prostop, Vsevolod V. Kalaigoroda, Alexandr A. Bushuev

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University



Article info

Received:
23 October 2024

Revised:
05 May 2025

Accepted:
19 May 2025

Keywords: near-surface rock-angular massif; endogenous fire; electrical sounding; geoelectric potential; physical model; geometric similarity

Abstract.

The urgency of the problem of diagnosing endogenous fires in underground and open pit geotechnologies, the main physical and chemical prerequisites of coal spontaneous combustion, methods of forecasting and locating endogenous fires in near-surface rock-coal massifs are considered. The application of geophysical monitoring methods based on the measurement of anomalies of active and natural electric fields is promising; at the same time, physical modelling is necessary to improve the accuracy of geophysical forecasting. The laboratory physical model is described, in which the correspondence to nature is ensured by the coincidence of schemes, measurement methods, a set of model materials matching the range of electrical properties with nature, as well as the use of geometric similarity. On the basis of the analysis of the experimental data bases, the regularities and interrelationships of the parameters of vertical electrical sounding plots and geoelectric potentials with the depth of location and size of the anomalous source zone at the initial and subsequent stages of spontaneous combustion processes development were established.



For citation Prostov S.M., Kalaigoroda V.V., Bushuev A.A. Volumetric physical modelling of geoelectric anomalies in the endogenous fire centre area. *Journal of mining and geotechnical engineering*. 2025;2(29):26-39. DOI: 10.26730/2618-7434-2025-2-26-39, EDN: XDCVIE

References

1. Kupriyanov V.V., Bondarenko I.S. Factor of influence on time allowance in emergency preparedness in underground mines // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. – 2022. – № 2. – Pp. 139–149.
2. Gridina E.B., Miroshnichenko A.K. Coal self-ignition foci suppression based on peat fire nosepieces use // Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti = Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety). – 2021. – № 1. – Pp. 83–86.
3. Portola V.A., Labukin S.N. Detection of coal spontaneous combustion centers at the early stage of development // Labor safety in industry. – 2009. – № 4. – Pp. 34–37.
4. Takranov R.A. Geological and natural factors of endogenous fires at coal pits. – Moscow: CJSC “Geoinformmark, 2000. – Pp. 69.
5. Bragina P.S. Self-ignition of coal dumps in the Kemerovo region // Bulletin of the Kuzbass State Pedagogical Academy, 2013. – № 4. – Pp. 57–64.
6. Tarafadar M.N., Guha D. Application of Wet Oxidation Processes for the Assessment of the Spontaneous Heating of Coal // Fuel. – 1989. – № 68. – P. 315.
7. Nimaje D.S., Tripathy D.P. Thermal Studies on Spontaneous Heating of Coal // The Indian Mining & Engineering Journal. – 2010. – № 10. – P. 21.
8. Zhang Y., Liu Y., Shi X., Yang C., Wang W., Li Y. Risk evaluation of coal spontaneous combustion on the basis of autoignition temperature // Fuel. – 2018. – № 233. – Pp. 68–76.
9. Bigliardi A.P., Fernandes C.L.F., Pinto E.A. Blood markers among residents from a coal mining area // Environmental Science Pollution Research. – 2021. – Vol. 28(2). – Pp. 1409–1416.
10. Prostov S.M., Proshkina K.V., Khafizova N.G. Methods and devices to prevent endogenous fires (analytical review) // Kemerovo. : KuzSTU, 2012. – P. 236.
11. Portola V.A., Tailakov O.V., Lee Hee Un Detection, localization and assessment of the state of underground fire centers by radon anomalies on the earth surface // Ugol. – 2021. – № 5. – Pp. 47–52.
12. Portola V.A., Druzhinin A.A., Khramtsov V.I. Methods of detection and location of underground fires // Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry. – 2014. – № 1. – Pp. 103–108.
13. Portola V.A. Detection of dangerous temperature anomalies with the help of thermal imaging cameras in open pit coal mining // Life safety of enterprises in industrially developed regions: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference, Kemerovo, November 21–23, 2023. – Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 2023. – Pp. 110–111.
14. Nesterova V.G., Ponomarev K.E., Bakhtina Y.S. On the use of optical and thermoacoustic emission methods to assess the oxidation of fossil coals // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2011. – № 4. – Pp. 180–187.
15. Narskiy V.A., Portola V.A., Razumov E.A., Venger V.G. Detection and location of underground spontaneous combustion sources by electrical sensing method // Bulletin of the scientific center for safety of works in the coal industry. – 2021. – № 3. – Pp. 52–58.
16. Nabatov V.V., Gaisin R.M. Processing of georadiolocation survey data in the detection of cavities in the backfill space // Mining information and analytical bulletin. – 2018. – №1. – Pp. 19–25.
17. Shlapakov P.A., Erastov A.Y., Sorokhov S.V., Rykov A.M. Pat. 2514017 RF. Method of endogenous fire hazard assessment during underground coal seam mining // Electronic Bulletin № 12, 2014. Inventions, utility models. Official Bulletin of the Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks.
18. Ivanov V.V., Hyamalyainen V.A., Sirota D.Yu., Trushnikova N.V. Geoelectric control of disintegration and self-heating centers of coal in conditions of increased seismic activity of deposits // Vestnik KuzSTU. – 2013. – №6. – Pp. 27–29.
19. Gruzdev V.N., Bakumtsev A.A., Rasskazhchikova N.I. Results of physical modeling of electrical exploration by methods of median gradient and vertical electrical sensing // Bulletin of Voronezh State University. Series: Geology. – 2017. – № 3. – Pp. 107–110.
20. Bakumtsev A.A. Optimization of the methodology of electrical exploration by the median gradient method in the study of archaeological sites // Vestnik of Voronezh State Institute. Ser. Geology. – 2017. – № 1. – Pp. 115–118.
21. Yakubovsky Yu.V., Renard I.V. Electrical exploration // – M.: Izd-vo Nedra, 1991. – 358 p.
22. Mikheev V.A., Pilipenko V.A., Asmandiyarov I.R. Physical and mathematical modeling of the electromagnetic field in a conducting half-space // International Research Journal. – 2013. – № 10–1(17). – Pp. 5–8.



23. Kolesnikov V.E. Multielectrode electrical exploration using the internal sliding contact technique - experience of 2D numerical modeling // *Seismic Devices*. – 2016. – Т. 52, № 3. – Pp. 27–34.
24. Gaisin R.M., Nabatov V.V., Buyanova D.S. Physical modeling of electrometric studies of massif sections with contrasting boundaries // *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. – 2013. – № 8. – Pp. 71–74.
25. Baranchuk K.I., Mirgalikzyzy T.M., Modin I.N., Mukanova B.G. Physical modeling of electrical tomography on the ground surface with complex relief // *Engineering Surveys*. – 2017. – № 11. – Pp. 56–65.
26. Prostov S.M., Kostyukov E.V., Bakhayeva S.P. Prediction of ground dam stability // Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal Agency for Education, State Educational Institution of Higher Professional Education “Kuzbass State Technical University”, Russian Academy of Natural Sciences. – Kemerovo: Kuzbassvuzizdat – ASTSH, 2006. – 171 p.
27. Prostov S.M., Pokatilov A.V., Rudkovsky D.I. Electrochemical consolidation of soils // Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev. – Tomsk: National Research Tomsk State University, 2011. – 292 p.
28. Shabanov E.A. Study of electroosmotic cleaning of soils from oil contamination on the volumetric physical model // *Science-intensive technologies of development and utilization of mineral resources*. – 2016. – № 3. – Pp. 434–441.
29. Prostov S.M., Gerasimov O.V., Maltsev E.A. Electromagnetic geocontrol of soil strengthening processes // Federal Agency for Education, State Educational Institution of Higher Professional Education “Kuzbass State Technical University” Russian Academy of Natural Sciences. – Tomsk : Tomsk State University, 2007. – 211 p.
30. Kalaigoroda V.V., Prostov S.M. Diagnostics of self-heating center in the rock-coal massif by anomalies of the natural electric field // *Izvestiya vysokikh uchebnykh zavedeniy. Mining journal*. – 2024. – № 1. – Pp. 84–94.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Information about the authors

Sergei M. Prostov, Dr.Sc. (Tech.), Professor
e-mail: psm.kem@mail.ru

Vsevolod V. Kalaigoroda, Post-graduate student
e-mail: kalay232@gmail.com

Alexandr A. Bushuev, Post-graduate student
e-mail: bushuevaa@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesennaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

