

## ОХРАНА ТРУДА

УДК 622.822.22

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-120-131

### Комплексный геофизический мониторинг для локации очагов эндогенных пожаров в борту угольного разреза

Калайгорода В. В.<sup>1\*</sup>, Простов С. М.<sup>1</sup>, Шабанов Е. А.<sup>1</sup>, Никулин Н. Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,  
г. Кемерово, Россия

<sup>2</sup> ООО «ПК «Ноострой», г. Кемерово, Россия

\*e-mail: kalay232@gmail.com

#### Реферат

**Введение.** Существующие способы обнаружения очагов самонагревания в глубине породугольного массива основаны на визуальном определении характерных признаков пожара, измерении температуры или энергии теплового излучения, определении процентного содержания газообразных продуктов сгорания угля с помощью газоанализаторов. Главным недостатком данных способов является недостаточная точность прогноза, поскольку они обеспечивают локацию очага только при его температуре более 70°–85°. Авторы раскрывают перспективность применения геофизических способов контроля, основанных на измерении аномалий электрических полей на поверхности массива над очагом самонагревания. При помощи геофизических методов электроразведки определены расположение и размеры зоны, контрастной по электрическим свойствам.

**Цель работы.** Провести производственные исследования, используя комплексный геофизический метод, и проанализировать его эффективность для локации зон самовозгорания угольного массива.

**Методология.** Для определения эффективности комплексного геофизического метода проведен эксперимент на территории действующего угольного разреза, где наблюдались визуальные признаки подземного пожара. Методика включала подповерхностное зондирование методом георадиолокации с выделением аномальных зон и их последующее изучение методами естественного и активного электрического поля.

**Результаты.** Экспериментально определены границы очага самовозгорания по характерным аномалиям на радарограммах, графиках электрического зондирования, электропрофилирования и естественных потенциалов.

**Выводы и область применения результатов.** Получено качественное и количественное совпадение результатов применения трех геофизических методов, имеющих различную физическую основу, базу измерений, частотный диапазон. Комплексный геофизический мониторинг позволяет своевременно определять местоположение зон породугольного скопления с повышенной температурой, что способствует принятию мер по предотвращению возгорания массива. Каждый из примененных методов может использоваться самостоятельно или в комплексе для локации очагов эндогенных пожаров на различных стадиях развития.

**Ключевые слова:** эндогенные пожары; самовозгорание угля; геофизический мониторинг; электрическое зондирование, потенциал электрического поля, георадиолокационное зондирование.

**Введение.** Разработка угольных месторождений в настоящее время остается одним из наиболее аварийных и опасных видов добычи ископаемых [1]. За последние несколько лет общее количество аварий в угольной отрасли хоть и имеет тенденцию

к снижению, однако число возникающих эндогенных пожаров не снижается [2]. За 2013–2018 гг. в угольной промышленности страны произошло более 50 крупных аварий, при этом эндогенные пожары остаются самым распространенным видом аварий, на который приходится около 40 % от общего числа техногенных происшествий [3].

На высокопроизводительных шахтах глубина ведения горных работ увеличивается практически каждый год, за счет чего увеличивается размер целиков угля [4, 5].

Требования безопасности для угольных шахт регламентируют оставление целиков при отработке склонных к самовозгоранию пластов угля. Это связано с необходимостью надежной изоляции ранее отработанных участков и предотвращением утечек воздуха к ним [6]. Разработаны решения, позволяющие в минимальные сроки ограничить доступ кислорода к очагам возникновения эндогенного пожара и обеспечить своевременное предотвращение локальных очагов пожара в случае интенсификации окислительных процессов [7].

Одним из важных требований в вопросе решения проблемы самовозгорания пластов при открытой геотехнологии является снижение отрицательного воздействия на окружающую среду и здоровье населения. При активном эндогенном возгорании угля происходят крупные перемещения химических компонентов в окружающей среде, негативно отражающиеся на экологии [8].

Для разработки эффективных мер борьбы с эндогенными пожарами проводятся широкие исследования процесса самовозгорания. В работах [9–11] 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. В ВостНИИ самовозгорание угля исследовалось в крупномасштабных теплоизоляционных камерах. На основе проведенных экспериментов получены термокинетические и теплофизические параметры низкотемпературного окисления [12, 13]. В работе [14] установлены основные обязательные условия самовозгорания как химического процесса: способность угля окисляться при низких температурах, приток воздуха, затрудненная отдача тепла в среду.

**Оперативное обнаружение и локация очагов подземных и открытых эндогенных пожаров** предполагают активное применение визуальных, газоаналитических и термометрических методов. Перспективно применение геофизических методов прогноза и контроля развития очагов самонагрева в породугольных массивах.

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

Основные физические закономерности, лежащие в основе геоэлектрических методов, заключены в следующем.

*Образование естественного геоэлектрического поля* вокруг очага самонагрева обусловлено действием ряда потенциалобразующих факторов, наиболее существенными из которых являются фильтрационные и окислительно-восстановительные процессы. Максимальная величина скачка потенциала на границе зоны неоднородности составляет 100–200 мВ. Экстремум геопотенциала на поверхности массива соответствует расположению центра очага. Величина потенциала

в экстремуме зависит от эффективного радиуса очага, глубины его расположения и соотношения электросопротивлений сред. Производят сравнение измеренных величин с фоновым значением потенциала, характерного для данного участка, при этом участки, для которых значения потенциала естественного стационарного электрического поля превышают фоновое значение, относят к области самонагрева угля [15, 16].

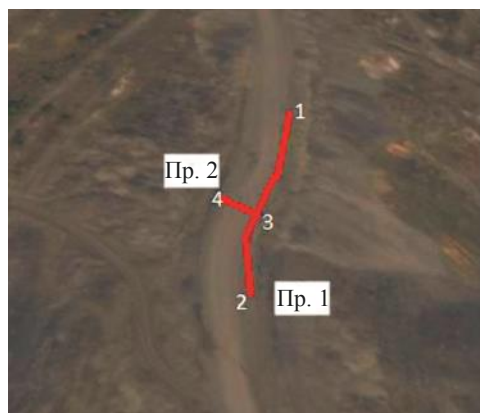
Величина удельного электросопротивления (УЭС) пород в очаге самонагрева и самовозгорания полностью определяется влажностью пород. За счет фильтрации жидкости от центра очага к обнажению и выпаривания влаги УЭС пород может возрасти более чем на 5 порядков. Максимум эффективного УЭС массива при профилировании с поверхности соответствует расположению центра очага пожара. Величина УЭС в максимуме зависит от радиуса очага, его глубины и соотношения УЭС сред. По координатам экстремумов на графике распределения УЭС можно приближенно оценить эффективный радиус и глубину расположения очага.

Относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  в очаге имеет минимальное значение  $\epsilon = 3-6$ , что определяет формирование характерных аномалий на радарограммах, полученных георадаром локационного типа «ОКО» с центральной частотой в диапазоне 150–250 МГц.

На первой стадии развития пожара ( $T < 85-100$  °С) над очагом формируются положительные аномалии УЭС и положительные или отрицательные аномалии геопотенциала. На второй стадии ( $T > 100$  °С) аномалии УЭС достигают максимальных значений, а аномалии геопотенциала стабилизируются.

Для экспресс-анализа данных геоэлектрических измерений достаточно использовать методы качественной интерпретации в комплексе с данными прямых измерений. Проблема точной локации очагов самонагрева углей с использованием экспериментально полученных аномалий естественного электрического поля – это весьма сложная задача, для решения которой следует применять современную измерительную аппаратуру, математические методы обработки экспериментальных данных и численные алгоритмы решения обратных задач.

а



б

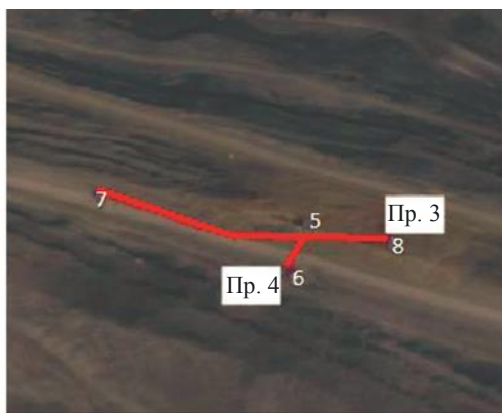


Рисунок 1. Экспериментальные участки: а – участок № 1; б – участок № 2; Пр. 1–4 – профили электрического и георадиолокационного зондирования; 1–8 – крайние точки профилей зондирования

Figure 1. Experimental plots: а – plot no. 1; б – plot no. 2; Пр. 1–4 – profiles of electric and GPR sounding; 1–8 – terminal points of the sounding profile

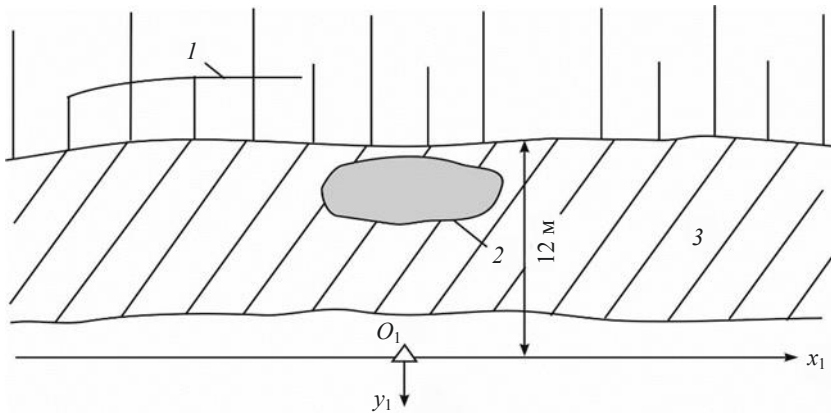


Рисунок 2. Схема расположения геофизического профиля  $O_1x_1$  на участке № 1: 1 – трещина расслоения на откосе борта; 2 – зона максимальной температуры поверхности уступа; 3 – насыпные вскрышные породы

Figure 2. Location map of the geophysical profile  $O_1x_1$  in plot no. 1: 1 – delamination crack on the wall slope; 2 – the zone of maximum temperature of the bench surface; 3 – bulk overburden

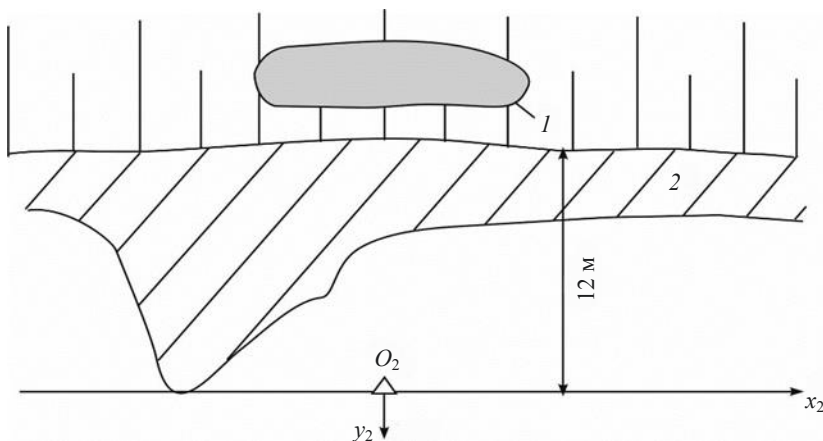


Рисунок 3. Схема расположения геофизического профиля  $O_2x_2$  на участке № 2: 1 – зона оседания и открытого пламени над очагом эндогенного пожара; 2 – насыпные вскрышные породы

Figure 3. Location map of the geophysical profile  $O_2x_2$  in plot no. 2: 1 – subsidence zone and open flame above the seat of endogenous fire; 2 – bulk overburden

**Предложен способ идентификации очага самонагрева угля на разрезах**, основанный на решении обратной задачи и данных геоэлектрических измерений [17]. Суть этого метода состоит в том, что на основе обработки результатов измерений потенциала над очагом самонагрева методом регуляризации А. Н. Тихонова удастся восстановить форму и размеры очага, установить глубину его гипоцентра и оценить среднюю величину температуры угля в этом гипоцентре.

Разработан численный алгоритм и его программная реализация для решения обратной задачи восстановления формы источника электрического поля по измеренным значениям потенциала на земной поверхности [18–21].

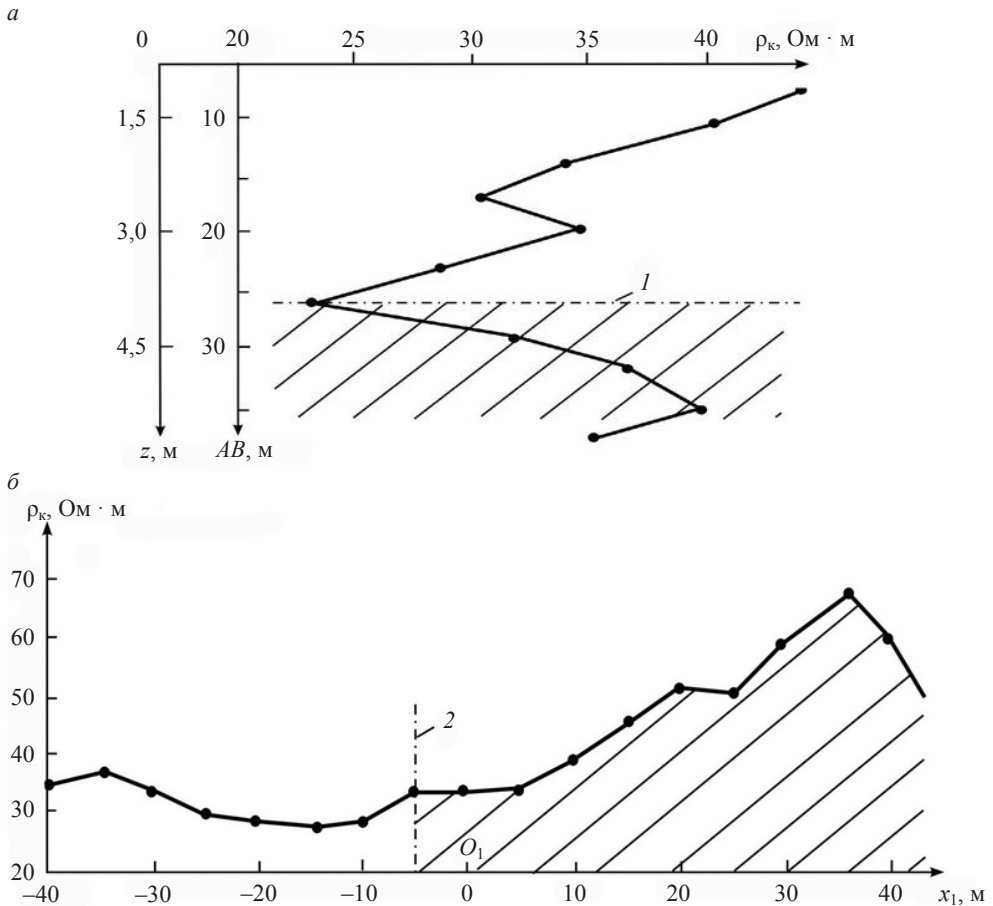


Рисунок 4. Результаты электрических зондирований на участке № 1 (эндогенный пожар № 75) по схемам ВЭЗ – а и ЭП при  $AB = 27$  м – б: 1 – прогнозная глубина зоны возгорания; 2 – прогнозная граница зоны возгорания в плане  
 Figure 4. The results of electrical soundings in plot no. 1 (endogenous fire no. 75) according to the vertical electrical sounding schemes – a and electrical profiling under  $AB = 27$  m – б: 1 – predicted depth of the combustion zone; 2 – predicted boundary of the combustion zone in plan

**Целью данной работы** являются проведение производственных исследований на угольном разрезе «Бачатский» комплексом геоэлектрических экспресс-методов и оценка их эффективности при локации зон самонагрева угольного массива.

Схемы опытных участков описаны в статье [22].

Расположение геоэлектрических профилей на плане горных работ приведено на рис. 1, а в привязке к визуально установленным очагам пожаров – на рис. 2 и 3.

**Электрическое зондирование** по схемам вертикального зондирования (ВЭЗ) и электропрофилеирования (ЭП) проведено комплектом аппаратуры, включающим стержневые стальные электроды и каротажный прибор КП-2 в режиме измерения электросопротивления. Для измерения потенциалов естественного геоэлектрического поля применили медные неполяризующиеся электроды типа ЭН и прибор КП-2 в режиме милливольтметра.

**Георадиолокационное зондирование** проводилось георадаром локационного типа «ОКО-2» с антенным блоком АБ-150, центральная частота которого составляет

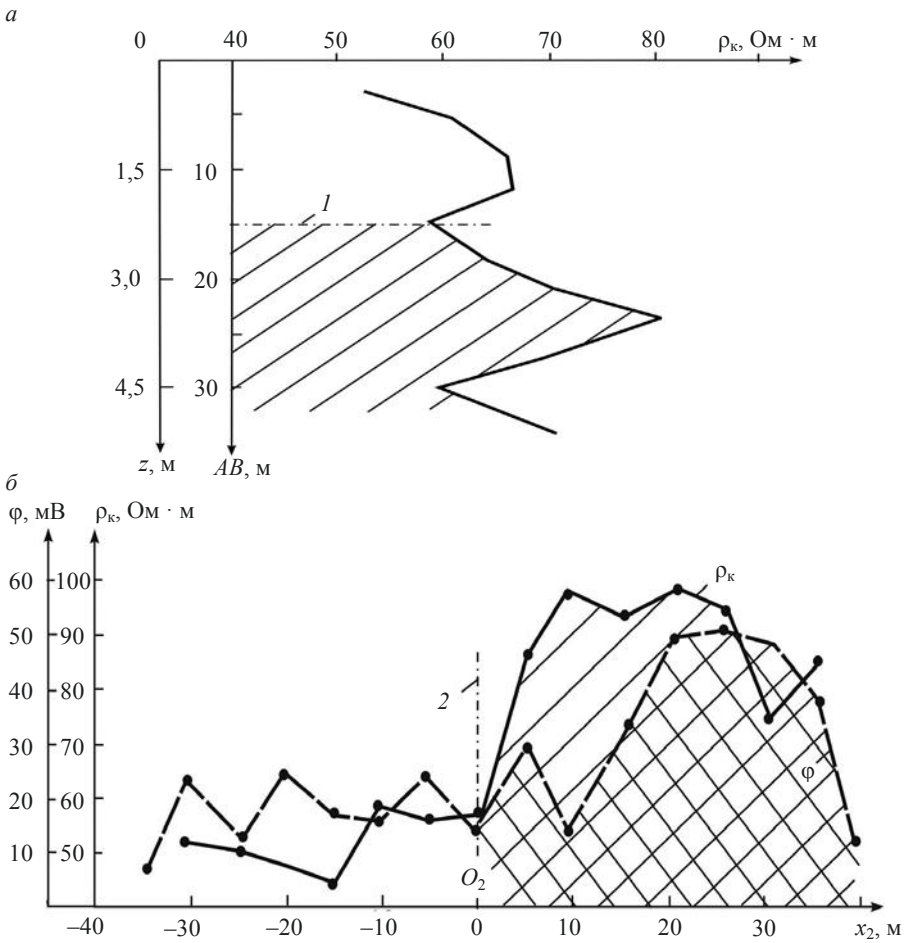


Рисунок 5. Результаты электрических зондирований на участке № 2 (эндогенный пожар № 223р по схемам ВЭЗ – а и ЭП при  $AB = 24$  м и методом естественного электрического поля  $\varphi$  – б: 1 – прогнозная глубина зоны возгорания; 2 – прогнозная граница зоны возгорания в плане

Figure 5. The results of electrical soundings in section no. 2 (endogenous fire no. 223p according to the vertical electrical sounding schemes – a and electrical profiling under  $AB = 24$  m and the natural electric field method  $\varphi$  – б: 1 – predicted depth of the combustion zone; 2 – predicted boundary of the combustion zone in plan

150 МГц. Данный тип антенного блока при благоприятных условиях позволяет производить зондирование на глубину до 14 м. Привязка профилей электромагнитного сканирования осуществлена по их началу и концу, с использованием GPS-приемника и колесного датчика перемещения. Линейная горизонтальная развертка георадиолокационных данных производилась по датчику пути при заданной плотности съемки 20 отсчетов/м. Рабочий временной диапазон составил 90 нс. Накопление принималось равным 16 сигналам на 1 точку измерения.

Для интерпретации данных георадиолокационной съемки использовалась измерительная программа Geoscan32 v2.3 b4 (ООО «Логис»). Geoscan32 позволяет производить усиление сигнала, частотную фильтрацию с целью подавления помех, применять различные цветовые схемы для улучшения визуализации, корректировать глубину исследований путем назначения эффективной диэлектрической про-

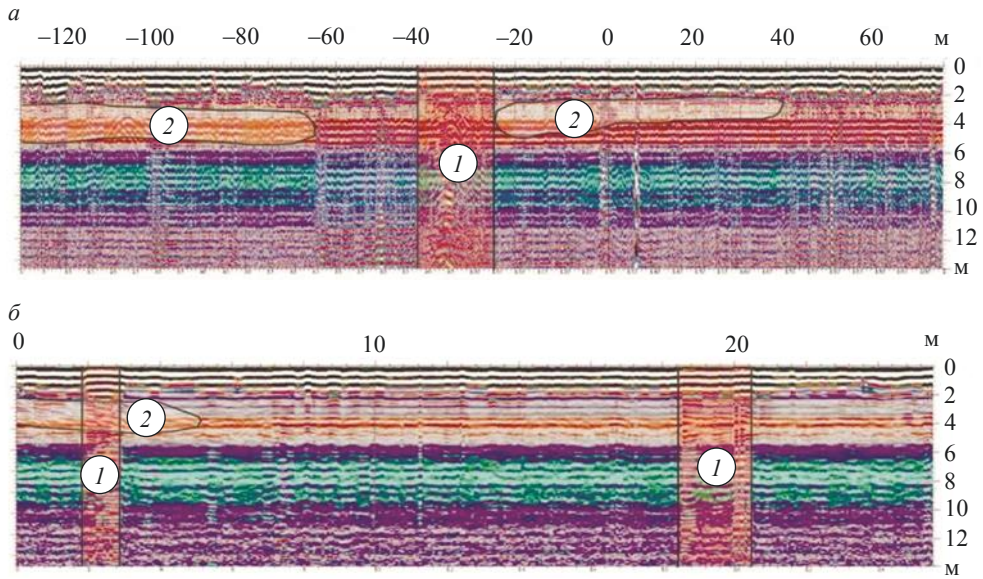


Рисунок 6. Радарограммы, полученные на участке № 1, продольный профиль  $O_{1x_1}$  – а; поперечный профиль  $O_{1y_1}$  – б: 1 – зона с высоким уровнем помех; 2 – зона распространения эндогенного пожара

Figure 6. Radargrams obtained at site no. 1, longitudinal profile  $O_{1x_1}$  – а; transverse profile  $O_{1y_1}$  – б: 1 – zone with a high level of interference; 2 – endogenous fire propagation zone

нищаемости для грунтового массива. Диэлектрическая проницаемость для исследуемых грунтов принималась равной  $\epsilon = 3$  для сухих песчаников.

Оценка очагов пожара осуществлялась по форме осей синфазности. Участки, на которых оси синфазности теряют корреляцию [23], считаются аномальными, данные аномалии связаны с разуплотнением углепородного массива вследствие его выгорания и испарения влаги из порового пространства. На радарограммах на фоне полезного сигнала также фиксировались волны помех, связанные с наличием в разрезе и на поверхности токопроводящих элементов во время проведения исследований.

**Результаты комплексных геофизических исследований** представлены на рис. 4–6: результаты электрических зондирований – на рис. 4 (участок № 1) и рис. 6, а (участок № 2); результаты измерений геоэлектрических потенциалов  $\varphi$  – на рис. 6, б (участок № 2); радарограммы – на рис. 5 (участок № 1) и рис. 7 (участок № 2).

В соответствии с изложенными физическими предпосылками методики геофизического прогноза и закономерностями изменения геоэлектрических параметров массива при развитии очага эндогенного пожара в процессе интерпретации экспериментальных данных учитывалось следующее:

- зона развития пожара соответствует повышенным значениям УЭС  $\rho$  и положительным аномалиям эффективного УЭС  $\rho_k$  на графиках ВЭЗ и ЭП;
- зона максимальных градиентов температуры над очагом возгорания способствует максимальной скорости фильтрации поровой жидкости и соответствует наибольшим приращениям значений геоэлектрического потенциала  $\varphi$ ;
- зоны минимальной влажности характеризуются минимальными значениями диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , что приводит к нарушению синхронности

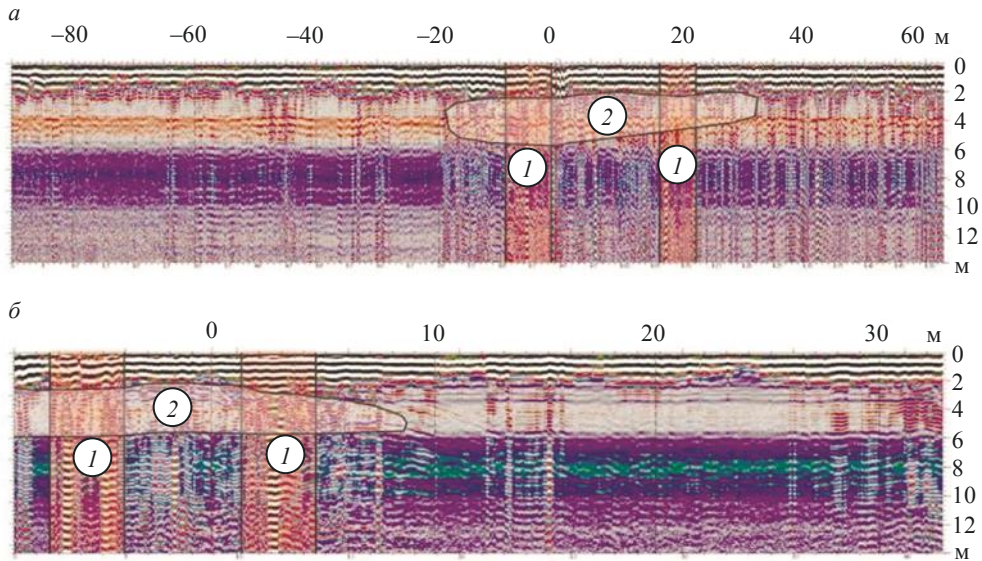


Рисунок 7. Радарограммы, полученные на участке № 2, продольный профиль  $O_2x_2$  – а; поперечный профиль  $O_2y_2$  – б: 1 – зона с высоким уровнем помех; 2 – зона распространения эндогенного пожара

Figure 7. Radargrams obtained at plot no. 2, longitudinal profile  $O_2x_2$  – a; transverse profile  $O_2y_2$  – б: 1 – zone with a high level of interference; 2 – endogenous fire propagation zone

(корреляции осей синфазности) на соответствующем интервале глубин (замене на радарограммах линий синфазности в форме малопериодных гармонических колебаний на нерегулярные).

На графике ВЭЗ на участке № 1 граница положительной аномалии эффективно-го УЭС  $\rho_k$  соответствует разносу  $AB = 25$  м (рис. 4, а). С учетом среднего значения коэффициента глубинности зондирования для условий Кузбасса  $z/AB = 0,15$  глубина расположения запожаренной зоны соответствует интервалу  $z = 3–6$  м. На графике ЭП при разносу  $AB = 27$  м, соответствующем середине аномалий, зона повышенных значений  $\rho_k$  располагается на интервале  $x_1 = -5–45$  м (правая граница аномальной зоны точно не зафиксирована) (рис. 4, б).

На участке № 2 получены качественно аналогичные результаты: расположение очага пожара соответствует интервалу  $AB = 15–30$  м ( $z = 2,25–4,5$  м) (рис. 5, а); интервал запожаренной зоны составил  $x_2 = -15–30$  м (рис. 5, б). На интервале  $x_2 = 10–40$  м зафиксированы повышенные значения геоэлектрического потенциала  $\phi$ , что свидетельствует о развитии процесса самовозгорания именно в этом направлении (рис. 5, б).

Георадиолокационное зондирование показало следующие результаты. На участке № 1 выявлено две зоны горения угля. Первая зона горения распространяется до координаты  $x_1 = -65$  м от условно принятой нулевой отметки (рис. 6, а). Крайняя левая граница зоны не установлена в силу ограниченности профиля. По глубине данная зона располагается на отметках  $z$  от  $-2$  до  $-5,5$  м относительно поверхности земли. Вторая очаговая зона на участке № 1 располагается на интервале  $x_1$  от  $-25$  до  $40$  м с общей протяженностью  $65$  м. Данная зона выявлена также на поперечном профиле  $O_1y_1$  (рис. 6, б), на котором прослеживается протяженность зоны на  $5$  м в сторону технологической дороги. Глубина залегания данной зоны изменяется в диапазоне  $z$  от  $2$  до  $5$  м.



Таблица 1. Сравнение достоинств и недостатков геофизических методов  
Table 1. Comparing advantages and disadvantages of geophysical methods

Метод	Достоинства	Недостатки
Электрических зондирований	Доступность аппаратуры. Помехоустойчивость	Наименее оперативный (время измерений по профилю длиной $L = 60$ м $t = 1-2$ ч). Детальность 2–5 м
Геопотенциалов	Доступность аппаратуры. Оперативность (при $L = 60$ м $t = 0,2-0,5$ ч)	Затрудненность прогноза по глубине. Детальность 1–3 м
Георадиолокации	Наибольшая оперативность (при $L = 60$ м $t = 0,1-0,2$ ч). Неограниченная детальность, разрешающая способность менее 0,5 м	Стоимость аппаратуры более 1 млн р. Влияние помех от металлических элементов и ЛЭП. Отсутствие количественных критериев при интерпретации. Необходима планировка поверхности полигона

На участке № 2 располагается зона интенсивного возгорания с координатами в плане  $x_2$  от  $-20$  до  $32$  м (рис. 7, а). Протяженность зоны вдоль дороги составила  $52$  м. На радарограмме, полученной по поперечному профилю  $O_2y_2$  (рис. 7, б), установлено, что зона распространяется в сторону технологической дороги, граница которой совпадает с краем дороги. Это обусловлено тем, что грунты в основании дороги уплотнены, доступ кислорода ограничен. Глубина залегания данной зоны  $z$  изменяется в диапазоне от  $2$  до  $5,7$  м.

На всех радарограммах имеются зоны с высоким уровнем помех от скрытых металлических элементов.

**Результаты.** Следует отметить, что получено качественное и количественное совпадение результатов применения трех геофизических методов (электросопротивлений, геопотенциалов и георадиолокации), имеющих различную физическую основу, частотный диапазон, базу измерений, глубинность и разрешающую способность. Каждый из этих методов может использоваться самостоятельно или в комплексе для локации очагов эндогенных пожаров и определения границ заповрежденных зон в плане и по глубине.

Достоинства и недостатки испытанных геофизических методов отражены в табл. 1.

**Выводы.** При диагностировании границ зон эндогенных пожаров по глубине и в плане целесообразно использовать упрощенные методики, основанные на применении любого из рассмотренных ранее геофизических методов, при этом необходимо учитывать следующие особенности этих методов:

- положительные (в отдельных случаях в зависимости от химического состава шахтных или грунтовых вод возможны отрицательные) аномалии геопотенциала  $\Delta\phi = 5-40$  мВ соответствуют расположению очага эндогенного пожара на ранних стадиях самовозгорания, самонагревания угля или фронта развития пожара в плане;

- положительные аномалии эффективных УЭС  $D\rho_k = 5-50$  Ом · м соответствуют расположению на графиках ВЭЗ (по глубине) и ЭП (в плане) зон самовозгорания и горения при  $T > 100$  °С;

- зоны нерегулярных линий синфазности на радарограммах соответствуют расположению зон самовозгорания и горения при  $T > 100$  °С по глубине и в плане.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куприянов В. В., Бондаренко И. С. Факторы влияния на резерв времени для выхода из подземных аварий в шахтах // ГИАБ. 2022. № 2. С. 139–149.
2. Гридина Е. Б., Мирошниченко А. К. Устранение очагов самовозгорания угля на основе использования торфяных пожарных стволов // Вестник. 2021. № 1. С. 83–86.
3. Архипов И. А., Филин А. Э. Анализ состояния аварийности на угольных предприятиях России // ГИАБ. 2019. № 1. С. 208–215.
4. Hetao Su, Fubao Zhou, Jinshi Li, Haining Qi. Effects of oxygen supply on low-temperature oxidation of coal: a case study of Jurassic coal in Yima, China // Fuel. 2017. Vol. 202. P. 446–454.
5. Lijiang Yu, Ignatov Y., Ivannikov A., Khotchenkov E., Krasnoshtanov D. Common features in the manifestation of natural and induced geodynamic events in the eastern regions of Russia and China // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 324, No. 1. P. 012004.
6. Kayis C., Kizil M. S. Effects of front abutments around multiple seam mining operations // 17th Coal Operators Conference, 8–10 February, 2017, Wollongong, Australia. University of Wollongong, 2017. P. 17–31.
7. Мажитов А. М., Корнеев С. А., Смяткин А. Н., Габбасов Б. М. Технологические решения по локализации очагов эндогенных пожаров при отработке прибортовых запасов системами с обрушением руды и вмещающих пород // Горная промышленность. 2022. № 1. С. 122–127.
8. Luo Kunli, Wong 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.
9. 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.
10. Nimaje D. S., Tripathy D. P. Thermal studies on spontaneous heating of coal // The Indian Mining & Engineering Journal. 2010. Vol. 10. P. 21.
11. Резник М. Г., Горюшкин В. Ф., Жислина И. Л., Сопова О. О. Влияние некоторых факторов на скорость саморазогревания угля // Физические процессы горного производства. 1982. Вып. 11. С. 99–103.
12. Бонещий 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.
13. Бонещий В. А., Фофанов Е. Д., Джексембинова А. И., Поликарпов А. Г. Исследование процесса самовозгорания бурого угля // Технология подземной разработки месторождений: сб. науч. тр. СГИ. Свердловск. 1982. Вып. 2. С. 86–91.
14. Веселовский В. С., Алексеева И. Д., Виноградова Л. П. Самовозгорание промышленных материалов. М.: Наука, 1964. 247 с.
15. Способ обнаружения очагов самонагревания угля в массиве: СССР Кл. Е 21 F 5/00. № 1145156; заявл. 03.11.80. опубл. 22.03.85. Бюл. № 10. 2 с.
16. Иванов В. В., Трушников Н. В. Естественное электрическое поле очагов самонагревания углей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2011. № 3(84). С. 12–14.
17. Иванов В. В., Трушников Н. В. Метод идентификации очага самонагревания угля на разрезах // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: сб. тр. XIV междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 18–21 сентября 2012. Кемерово: Институт угля СО РАН, 2012. С. 64–67.
18. Сирота Д. Ю., Иванов В. В. Определение угла наклона и формы плоского источника электромагнитного поля по измерениям потенциала на земной поверхности // Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 3. С. 89–95.
19. Sirota D. Y., Ivanov V. V. Determination of the geometric form of a plane of a tectonic gap as the inverse III-posed problem of mathematical physics // E3S Web of Conferences: The Second International Innovative Mining Symposium, Kemerovo, November 20–22, 2017. Kemerovo: EDP Sciences, 2017.
20. Sirota D. Y., Ivanov V. V., Khyamyalyaynen V. A. Definition of the form of coal spontaneous combustion source as the inverse problem of geoelectrics // E3S Web of Conferences, Kemerovo, April 24–26, 2017. Kemerovo: EDP Sciences, 2017.
21. Марченко М. Н. Вертикальное электрическое зондирование. М., 2013. 28 с.
22. Калайгорода В. В., Простов С. М., Шабанов Е. А. Инструментальный мониторинг при локализации очагов эндогенных пожаров в борту угольного разреза // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 2. С. 124–135.
23. Старовойтов А. В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: МГУ, 2008. 192 с.

Поступила в редакцию 4 декабря 2022 года

**Сведения об авторах:**

**Калайгорода Всеволод Владимирович** – аспирант кафедры теоретической и геотехнической механики Кузбасского государственного технического университета имени 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 имени Т. Ф. Горбачева. E-mail: psm.kem@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0780-2690>

**Шабанов Евгений Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительного производства и экспертизы недвижимости Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева. E-mail: shabanovca@kuzstu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2460-6467>

**Никulin Николай Юрьевич** – кандидат технических наук, ведущий инженер-геофизик ООО «ПК «Ноострой». E-mail: n.y.nikulin@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7389-9446>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-120-131

## Complex geophysical monitoring for locating endogenous fires in the coal mine wall

Vsevolod V. Kalaigoroda<sup>1</sup>, Sergei M. Prostov<sup>1</sup>, Evgenii A. Shabanov<sup>1</sup>, Nikolai Iu. Nikulin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia.

<sup>2</sup> LLC PC Noostroy, Kemerovo, Russia.

### Abstract

**Introduction.** The existing methods of detecting the seats of spontaneous heating in coal seams are based on visual identification of typical signs of fire, measuring thermal radiation temperature or energy, determining the percentage of gaseous coal combustion by-products using gas analyzers. The main disadvantage of these methods is insufficient prediction accuracy because they locate the seat of fire only when its temperature exceeds 70–85 °C. This article reveals the prospects of using geophysical methods of control that are based on measuring anomalies of electric fields on the surface of the rock mass over the seat of spontaneous heating. The location and dimensions of a zone with totally opposite electrical properties are determined by geophysical methods of electrical prospecting.

**Research objective** is to conduct production research using a complex geophysical method and analyze its effectiveness for locating the zones of spontaneous coal combustion.

**Methods of research.** In order to determine the effectiveness of a complex geophysical method, an experiment was carried out in the territory of an active coal mine, where visual signs of an underground fire were observed. The methods included subsurface sounding by the GPR method, anomalous zones detection and study by the methods of natural and active electric field.

**Results.** The boundaries of the seat of spontaneous combustion were experimentally determined by typical anomalies on radargrams and on the graphs of electrical sounding, electrical profiling and self-potentials.

**Conclusions.** A qualitative and quantitative agreement of results was obtained for three geophysical methods with different physics, measurement base, and frequency range. Complex geophysical monitoring allows timely locating the higher-temperature zones of coal accumulation, which helps to take measures to prevent coal combustion. Each method can be used alone or in combination with other methods to locate the seats of endogenous fires at various stages of development.

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

### REFERENCES

1. Kupriianov V. V., Bondarenko I. S. Factor of influence on time allowance in emergency preparedness in underground mines. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2022; 2: 139–149. (In Russ.)
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: 83–86. (In Russ.)
3. Arkhipov I. A., Filin A. E. Accident rate analysis in coal mines in Russia. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2019; 1: 208–215. (In Russ.)
4. Hetao Su, Fubao Zhou, Jinshi Li, Haining Qi. Effects of oxygen supply on low-temperature oxidation of coal: a case study of Jurassic coal in Yima, China. *Fuel*. 2017; 202: 446–454.
5. Lijiang Yu, Ignatov Y., Ivannikov A., Khotchenkov E., Krasnoshtanov D. Common features in the manifestation of natural and induced geodynamic events in the eastern regions of Russia and China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 324(1): 012004.
6. Kayis C., Kizil M. S. Effects of front abutments around multiple seam mining operations. In: *17th Coal Operators Conference, 8–10 February, 2017, Wollongong, Australia*. University of Wollongong; 2017. P. 17–31.

7. Mazhitov A. M., Korneev S. A., Smiatkin A. N., Gabbasov B. M. Technological solutions to localize sources of spontaneous fires in mining of near-edge reserves using ore and host rock caving systems. *Gornaia promyshlennost = Mining Industry*. 2022; 1: 122–127. (In Russ.)
8. 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.
9. Tarafadar M. N., Guha D. Application of wet oxidation processes for the assessment of the spontaneous heating of coal. *Fuel*. 1989; 68: 315.
10. Nimaje D. S., Tripathy D. P. Thermal studies on spontaneous heating of coal. *The Indian Mining & Engineering Journal*. 2010; 10: 21.
11. Reznik M. G., Goriushkin V. F., Zhislina I. L., Sopova O. O. Influence of some factors on the rate of self-heating of coal. *Fizicheskie protsessy gornogo proizvodstva = Physical Processes in Mining*. 1982; 11: 99–103. (In Russ.)
12. Bonetskii V. A. Temperature field in an air permeable reacting environment. In: *Problems of aerogas dynamics of coal mines: proceedings of Sverdlovsk Mining Institute*. Sverdlovsk; 1983: 130–133. (In Russ.)
13. Bonetskii V. A., Fofanov E. D., Dzhekseminova A. I., Polikarpov A. G. Research on the process of spontaneous combustion of lignite. In: *Technology of underground development of deposits: proceedings of Sverdlovsk Mining Institute*. Sverdlovsk; 1982. Issue 2. P. 86–91. (In Russ.)
14. Veselovskii V. S., Alekseeva I. D., Vinogradova L. P. *Spontaneous ignition of industrial materials*. Moscow: Nauka Publishing; 1964. (In Russ.)
15. Tarasov B. G., Krol G. V., Dyrdin V. V., Grishaev K. A., Bogatyrev A. V., Sosiura B. V. Method of detecting the spontaneous heating of coal in the rock mass. USSR Patent SU 362929; 1985. (In Russ.)
16. Ivanov V. V., Trushnikova N. V. Natural electric field of the seats of spontaneous coal combustion. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2011; 3(84): 12–14. (In Russ.)
17. Ivanov V. V., Trushnikova N. V. The method of identifying the seat of spontaneous coal combustion in coal mines. In: *Energy Security of Russia. New approaches to the development of the coal industry: Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference, Kemerovo, September 18–21, 2012*. Kemerovo: Institute of Coal SB RAS. 2012. (In Russ.)
18. Sirota D. Iu., Ivanov V. V. Determination of the angle of inclination and shape of a flat source of an electromagnetic field by measuring the potential on the earth's surface. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2016; 3: 89–95. (In Russ.)
19. Sirota D. Y., Ivanov V. V. Determination of the geometric form of a plane of a tectonic gap as the inverse III-posed problem of mathematical physics. In: *E3S Web of Conferences: The Second International Innovative Mining Symposium, Kemerovo, November 20–22, 2017*. Kemerovo: EDP Sciences, 2017.
20. Sirota D. Y., Ivanov V. V., Khyamyalyaynen V. A. Definition of the form of coal spontaneous combustion source as the inverse problem of geoelectrics. In: *E3S Web of Conferences, Kemerovo, April 24–26, 2017*. Kemerovo: EDP Sciences, 2017.
21. Marchenko M. N. *Vertical electrical sounding*. Moscow: 2013. (In Russ.)
22. Kalaigoroda V. V., Prostov S. M., Shabanov E. A. Instrumental monitoring for localization of endogenous fires in the coal mine wall. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 2: 124–135. (In Russ.)
23. Starovoitov A. V. *The interpretation of GPR data*. Moscow: MSU Publishing; 2008. (In Russ.)

Received 4 December 2022

### 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>

**Evgenii A. Shabanov** – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of Department of Construction Production and Real Estate Expertise, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. E-mail: shabanovea@kuzstu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2460-6467>

**Nikolai Iu. Nikulin** – PhD (Engineering), Leading geophysicist, LLC PC Noostroy. E-mail: n.y.nikulin@mail.ru

**Для цитирования:** 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

**For citation:** 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.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-120-131