

УДК 622.822.22
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4418
Шифр специальности ВАК: 2.8.3

Рациональный частотный диапазон и критерии диагностирования зон эндогенных пожаров в породугольных массивах методом георадиолокации

С.М. Простов, В.В. Калайгорода✉, Е.А. Шабанов

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

✉Kalay232@gmail.com

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена недостаточной изученностью влияния физических особенностей зон развития эндогенного пожара в породугольном массиве на результаты диагностирования расположения и границ этих зон методом георадиолокации, что снижает точность прогноза. *Целью* исследования является экспериментально-теоретическое обоснование рационального частотного диапазона и критериев диагностирования зон эндогенных пожаров в породугольных массивах методом георадиолокации с учетом физических особенностей этих зон. *Объект:* физические параметры зоны самовозгорания углепородного массива, влияющие на результаты георадиолокационного мониторинга: геометрия очага пожара; диэлектрическая проницаемость и удельное электрическое сопротивление. *Методы:* анализ по экспериментальным данным диапазонов изменения электромагнитных свойств горных пород при изменении температуры и влажности в диапазоне частот георадиолокации; выявление эффективных принципов расчета режимов георадара, обеспечивающих оптимальное сочетание глубинности и разрешающей способности; анализ банка практических радарограмм с аномальными зонами, аналогичными по свойствам зонам эндогенных пожаров. *Результаты.* Рациональный диапазон центральной частоты георадара может быть определен следующими методами: на основе комплексного параметра, включающего излучаемую мощность антенны, число накоплений и коэффициент отражения от границы объекта; по экстремальному значению функции, включающей глубину и детальность зондирования как функции частоты; решением системы уравнений функции ослабления сигнала и энергетического потенциала георадара. Физические особенности зоны эндогенного пожара состоят в высушивании породугольного массива с образованием аномальной зоны с ярко выраженными диэлектрическими свойствами ($\epsilon' = 4-6$; $\rho > 100$ Ом·м), по форме близка к вытянутому эллипсоиду или сплюснутому по вертикали сфероиду. С учетом этих особенностей рациональный диапазон центральной частоты для георадара «ОКО-2» составил 49,2–132,6 МГц, при этом разрешающая способность составит 0,442–1,152 м. При интерпретации радарограммы запожаренные зоны диагностируют по участкам, отличающимся аномальным ослаблением осей синфазности, а зоны обрушенных пород и пустот над очагом – по аномальной хаотичной волновой картине.

Ключевые слова: эндогенные пожары, самовозгорание угля, геофизический мониторинг, георадиолокационное зондирование, электрическое зондирование, центральная частота, разрешающая способность

Для цитирования: Простов С.М., Калайгорода В.В., Шабанов Е.А. Рациональный частотный диапазон и критерии диагностирования зон эндогенных пожаров в породугольных массивах методом георадиолокации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 68–76. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4418

UDC 622.822.22
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4418

Rational frequency range and criteria for diagnosing endogenous fire zones in coal massifs by using the georadiolocation method

S.M. Prostov, V.V. Kalaygoroda✉, E.A. Shabanov

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

✉Kalay232@gmail.com

Abstract. Relevance. The necessity to improve the accuracy of analysis and prediction of potential fire hazard of rock-coal massifs by using electromagnetic methods of endogenous fire detection. Taking into consideration that the increase in coal temperature changes a number of its parameters, such as dielectric permittivity and electrical resistivity, it is reasonable to use the method of electromagnetic reconnaissance in locating the focus of fire. **Aim.** To analyze the theoretical and practical knowledge about the anomalies formed in the area of spontaneous combustion and to evaluate the effectiveness of electromagnetic methods for locating the spontaneous combustion zones of a coal massif. **Objects.** Physical parameters of the ignition zone of the coal massif, such as dielectric permittivity and electrical resistivity, as well as the range of the GPR central frequency, allowing clearly defining the boundaries of the ignited zone. **Method.** Reviewing the proposed methods of determining the parameters serving for correct location of the fire zone. For GPR it is necessary to determine the center frequency of the standard antenna unit and resolution, then to estimate the rational frequency range of GPR. **Results.** Allow us to draw conclusions about the methods used to determine the rational range of GPR center frequency – it can be calculated by solving the system of equations of the signal attenuation function and energy potential of GPR, by the experimental value of the target function, including the depth and detail of sounding as a function of frequency, or on the basis of a complex parameter of GPR, including the radiated power of the antenna, the number of accumulations and the reflection coefficient from the boundaries. Taking into account such physical features of the fire zone as drying the rock-angle massif and the shape of the anomalous zone, the rational range of the center frequency for the GPR "OKO-2" was determined.

Keywords: endogenous fires, coal spontaneous combustion, geophysical monitoring, georadiolocation sounding, electrical sounding, center frequency, resolving ability

For citation: Prostov S.M., Kalaygoroda V.V., Shabanov E.A. Rational frequency range and criteria for diagnosing endogenous fire zones in coal massifs by using the georadiolocation method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 68–76. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4418

Введение

На сегодняшний день разработка угольных месторождений – один из самых аварийных и опасных видов добычи ископаемых [1]. За последние несколько лет количество аварий в угольной промышленности хоть и имеет тенденцию к снижению, но число эндогенных возгораний угля не уменьшается [2]. В целях разработки действенных мер борьбы с эндогенными пожарами проводятся масштабные исследования процесса самовозгорания породугольных массивов. Так, в работах [3–5] были проведены эксперименты по определению роста интенсивности тепловыделения в зависимости от начальной температуры, крупности, влажности угля и воздуха, а также скорости движения газа. В настоящее время разработаны решения для ограничения доступа кислорода в очаги эндогенных пожаров в минимальные сроки и предотвращения их возникновения в случае протекания интенсивного окислительного процесса [6].

Важным требованием, предъявляемым к открытым геотехнологиям, является снижение негативного воздействия на экологию и здоровье людей. При угольных пожарах в окружающую среду поступает большое количество химических компонентов, что приводит к неблагоприятным экологическим последствиям [7]. Эндогенные пожары ухудшают санитарно-гигиенические условия труда шахтеров, загрязняют воздух прилегающих территорий токсичными продуктами горения и окисления [8].

Для Кузбасса проблема эндогенных пожаров особенно актуальна. Регулярно публикуются научные статьи, отчеты и исследования, в которых опи-

сывается зарегистрированный пожар эндогенного происхождения. Территориями, на которых происходит самовозгорание угольных залежей, выступают различные объекты угольных предприятий – отвалы [9], терриконики [10], пласты ликвидированных шахт [11], угольные склады [12] и т. д.

Проблема эндогенных пожаров волнует не только ученых Кузбасса и России, эту проблему также активно изучают зарубежные исследователи. Их труды направлены на анализ проблем в аспекте самовозгорания угля [13, 14], определение факторов, влияющих на интенсивность разогрева, разработку методов предотвращения и ликвидации эндогенных пожаров [15]. Исследованы такие факторы, способствующие повышению склонности к самовозгоранию, как циклическое замораживание-размораживание угля [16] и приток воздуха, окисляющего уголь, в выработанное пространство [17]. Иностранные исследователи также приводят научный опыт на тему борьбы с последствиями эндогенных пожаров [18, 19].

Одним из наиболее информативных и эффективных способов обнаружения очага эндогенного пожара является применение электромагнитных методов, включающих электрическое зондирование (ЭЗ), геоэлектрический (ГЭ) и георадиолокационный (ГР) метод [20].

Георадиолокационное зондирование (высокочастотное электромагнитное сканирование) основано на отражении электромагнитных волн от неоднородностей, контрастных по диэлектрическим свойствам. Основная область применения георадаров – строительные изыскания с земной поверхности, локация коллекторов, трубопроводов и т. п.

Теории и практике применения георадиолокации посвящено большое количество как отечественных [21–24], так и зарубежных монографий [25–27]; количество же небольших публикаций уже давно исчисляется сотней статей. Однако как первые, так и вторые уделяют внимание в основном практическим аспектам применения георадара в различных геологических условиях, а также вопросам обработки и интерпретации радарограмм. Теоретическим вопросам моделирования (решения прямых и обратных задач) из указанного списка частично или полностью посвящены работы [23, 24, 26].

Возможности георадиолокации для решения задач геомеханики, подземной, открытой и строительной геотехнологии исследованы недостаточно. Кроме технических трудностей, связанных с отсутствием аппаратуры в искробезопасном исполнении, экранированием контура выработки металлическими элементами крепи (рамы, арматура, затяжка), высоким уровнем электромагнитных помех в выработках из-за наличия кабельных ЛЭП и электросиловых установок, активное применение георадаров на шахтах сдерживается отсутствием методик и программного обеспечения для интерпретации подземных радарограмм.

Обнадеживающие результаты получены в Институте горного дела Севера СО РАН. Авторами предложено использовать при интерпретации георадиолокационных данных вейвлет-преобразования, включающего анализ измеренного радаром сигнала на разных частотах и масштабах [28]. Этот подход реализован для радара «Тритон» с центральной частотой 30 МГц. Разработанные теоретические основы и физическое моделирование в данном диапазоне позволили реализовать предложенный метод при изучении мерзлого массива горных пород, отличительной особенностью которого является заполнение пустот и пор породы как льдом, проявляющим диэлектрические свойства, так и электропроводящим талым раствором [29–32].

Проведены испытания георадара ОКО-2 с антенным блоком с центральной частотой 400 МГц в условиях шахты «Талдинская-Западная». Зафиксированы расслоения в кровле подготовительной выработки. Вместе с тем следует отметить, что при интерпретации радарограмм авторы не учитывали указанные выше факторы, существенно влияющие на информативность георадиолокационного метода [33, 34].

В работе [35] изложены результаты использования георадара ОКО-2 с антенным блоком АБ-1200. Основная проблема состояла в сильном влиянии на результаты зондирования полостей, заполненных водой с высокой проводимостью. Применение комплекса корректирующих операций (выравнивание амплитуд, преобразование Гильберта, горизон-

тальная фильтрация) позволило повысить информативность мониторинга.

Целью исследования является экспериментально-теоретическое обоснование рационального частотного диапазона и критериев диагностирования зон эндогенных пожаров в породугольных массивах методом георадиолокации с учетом физических особенностей этих зон.

Материалы и методы

Георадары предназначены для диагностирования зон, аномальных по электромагнитным свойствам, методом бесконтактного подповерхностного зондирования. Основным информирующим электромагнитным параметром при георадиолокации является диэлектрическая проницаемость ϵ , которая для сред с конечной электрической проводимостью может быть выражена в комплексной формуле [21]:

$$\epsilon = \epsilon' + j\epsilon'',$$

где ϵ' – действительная часть ϵ , отражающая процесс поляризации идеального диэлектрика; ϵ'' – мнимая часть, обусловленная проявлением проводимости, зависящая от удельного электросопротивления ($УЭС$) среды ρ и круговой частоты электромагнитного поля $\omega = 2\pi f$, $\epsilon'' = 1/\rho\omega$ (f – циклическая частота).

Зона эндогенного пожара на стадиях самовозгорания и развития пожара характеризуется следующими изменениями электромагнитных свойств породугольного массива: вследствие испарения влаги величины ϵ' и ρ изменяются до значений, соответствующих высушенному состоянию.

Измерения ϵ' в диапазоне частот георадиолокации (50–3000 МГц) связаны со значительными техническими трудностями, поэтому банк экспериментальных данных весьма ограничен. Так, в работе [36] приведены диапазоны ϵ' и ρ на частоте 100 МГц (табл. 1).

Таблица 1. Электромагнитные свойства пород ($f=100$ МГц)

Table 1. Electromagnetic properties of rocks ($f=100$ MHz)

Порода/Rock	Степень влажности/Humidity degree			
	Высушенная Dried		Водонасыщенная Water saturated	
	ϵ'	ρ , Ом·м/Ohms·m	ϵ'	ρ , Ом·м/Ohms·m
Грунт песчаный Sandy soil	4–6	$10^2 - 10^4$	15–30	$10^1 - 10^2$
Суглинок/Loam	4–6	$10^3 - 10^4$	10–20	$10^1 - 10^2$
Грунт глинистый Clay soil	4–6	$10^1 - 10^4$	10–15	$1 - 10^1$
Глина/Clay	2–6	$10^1 - 10^3$	15–40	$1 - 10^1$
Гранит/Granite	5	$10^6 - 10^8$	6	$10^2 - 10^3$
Известняк Limestone	7	$10^6 - 10^9$	8	$10^1 - 10^2$

Кроме того, отмечается, что с повышением температуры влажного пористого грунта величина ρ уменьшается в 1,5–2,0 раза за счет снижения вязкости порозаполняющих жидкостей.

Более детальные данные о характере изменения электромагнитных параметров песчано-глинистых грунтов в диапазоне частот $f=30\text{--}2000$ МГц приведены в работе [37] (рис. 1).

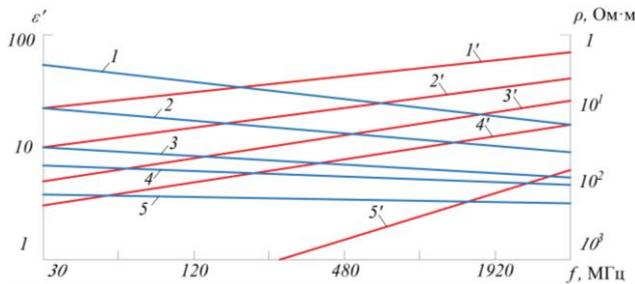


Рис. 1. Зависимость электромагнитных свойств суглинка серого от частоты f : 1 – ϵ' при влажности $W=20\%$; 2 – ϵ' при $W=10\%$; 3 – ϵ' при $W=5\%$; 4 – ϵ' при $W=2,5\%$; 5 – ϵ' при $W=0\%$; 1' – ρ при $W=20\%$; 2' – ρ при $W=10\%$; 3' – ρ при $W=5\%$; 4' – ρ при $W=2,5\%$; 5' – ρ при $W=0\%$

Fig. 1. Dependence of electromagnetic properties of gray loam on frequency f : 1 – ϵ' at humidity $W=20\%$; 2 – ϵ' at $W=10\%$; 3 – ϵ' at $W=5\%$; 4 – ϵ' at $W=2,5\%$; 5 – ϵ' at $W=0\%$; 1' – ρ at $W=20\%$; 2' – ρ at $W=10\%$; 3' – ρ at $W=5\%$; 4' – ρ at $W=2,5\%$; 5' – ρ at $W=0\%$

Из приведенных данных следует, что по мере повышения температуры и снижения влажности породугольного массива ($W \rightarrow 0$) в очаге эндогенного пожара происходит формирование зоны с ярко выраженными диэлектрическими свойствами ($\epsilon' < 4\text{--}6$; $\rho > 100$ Ом·м).

Частотный диапазон георадиолокации в значительной мере влияет на основные параметры точности диагностирования аномальной зоны: глубинность и разрешающая способность.

Оценка глубинности георадиолокационного зондирования представляет собой весьма сложную задачу, поскольку на затухание генерируемых электромагнитных волн влияет целый ряд факторов, точный учет которых в условиях неоднородности среды практически невозможен:

- потери за счет наведения вихревых токов в проводящей среде и формирования вторичного поля (скин-эффект);
- расхождение волны по мере удаления от источника (антенны);
- расхождение и преломление сигнала на границах диэлектрически контрастных слоев.

Под глубиной зондирования H понимают максимальную глубину границы исследуемого

объекта, которая может быть зафиксирована на радарограмме данной аппаратурой, а разрешающая способность – это минимальное расстояние Δ по глубине (в плане) между соседними объектами или их элементами [21]. Выбор рациональной центральной частоты f_0 георадара является задачей оптимизации, поскольку с увеличением f_0 глубинность зондирования H и величина, обратная разрешающей способности ($1/\Delta$), снижаются.

Для решения поставленной в работе задачи возможны следующие пути.

1. Из условий равенства мощности волны, отраженной от границы на глубине H , и мощности собственных шумов приемного тракта следует, что величина H линейно зависит от $\lg Q$ [21]:

$$Q = P_0 N K_{\text{отр}}^2, \quad (1)$$

где Q – комплексный параметр георадиолокации; P_0 – излучаемая мощность антенны; N – число накоплений; $K_{\text{отр}}$ – коэффициент отражения от нижней границы объекта.

Получены линейные зависимости $H = H(f_0, \lg Q, \rho)$, по найденному значению f_0 выбирают ближайшую меньшую центральную частоту штатного антенного блока. Разрешающую способность проверяют из условия:

$$\Delta < \frac{1}{2} \lambda = \frac{c}{2 f_0 \sqrt{\epsilon'}}, \quad (2)$$

где λ – длина волны в среде; c – скорость волны в вакууме.

В работе [38] предложено ввести целевую функцию

$$F(f) = F[H(f, \rho); \Delta(f, \epsilon')],$$

включающую оба критериальных параметра H , Δ , электромагнитные параметры ρ , ϵ' , постоянную, комплексно учитывающую все неизменяемые параметры зондирования, и требуемую детальность.

Теоретическое значение f_0 определится из решения уравнения

$$\frac{dF}{df} = 0: f_0 = \left(\frac{1,125C}{L} K \sqrt{\frac{\rho}{\epsilon'}} \right), \quad (3)$$

где $L=3\text{--}10$ м² – постоянная, отражающая диапазон детальности; $K=3 \cdot 10^{12}$ м·Гц^{1,5}(Ом·м)^{–0,5} – постоянная, включающая неизменяемые параметры зондирования.

2. Наиболее экспериментально и теоретически обоснованной представляется методика, предложенная в работе [22], идея которой состоит в сопоставлении функции ослабления сигнала A (дБ/м) с энергетическим потенциалом E (дБ) георадара. В расчетах были использованы следующие зависимости:

$$A = \frac{20}{\ln(10)} \sqrt{\frac{\pi}{C\varepsilon_0\lambda\rho}};$$

$$E = 20\lg\left(\frac{U_r}{U_t}\right) + 10\lg N - E_{\text{сш}},$$

где U_r , U_t – соответственно, напряжения на выходе генератора и сигнала помехи на входе приемника; N – число накоплений сигнала; $E_{\text{сш}}$ – соотношение (в дБ) «сигнал–шум».

Приведены решения этой системы уравнений относительно f_0 в графической форме (номограммы) для плоскостных, линейных и локальных объектов.

Для оценки разрешающей способности рекомендовано использовать выражение

$$\Delta < \frac{1}{2} \sqrt{\lambda H}. \quad (4)$$

Результаты исследования

Рассмотрим физические особенности зоны эндогенного пожара объекта исследований.

Метод георадиолокации целесообразно применять на стадиях самонагрева и развития пожара, когда электромагнитные свойства пород в очаге изменяются существенно вследствие удаления влаги. По данным экспериментально-теоретических исследований [3, 4, 11] развитие пожара в глубине угленосного массива возможно при условии превышения количества тепла, образующегося при окислении и горении угля за счет притока кислорода, количества тепла, отдаваемого в окружающее пространство вследствие термодинамических процессов. При этом зона развития пожара классифицируется как плоскостной объект с относительно стабильным расположением очага (верхней и нижней границ) в диапазоне $H=3-6$ м. С учетом данных табл. 1 и средних значений электромагнитных свойств, вмещающих безугольных пород для условий Кузбасса [22] необходимые для расчетов значения электромагнитных параметров вне и внутри объекта составят соответственно: $\rho_1=46,3$ Ом·м; $\varepsilon'_1=11,5$; $\rho_2 \approx 10^3$ Ом·м; $\varepsilon'_2=5$. Тогда расчетный коэффициент отражения от верхней границы объекта составит

$$K_{\text{отр}} = \frac{\sqrt{\varepsilon'_1} - \sqrt{\varepsilon'_2}}{\sqrt{\varepsilon'_1} + \sqrt{\varepsilon'_2}} = 0,206.$$

Перейдем к оценке рационального частотного диапазона георадиолокации для рассматриваемого объекта по трем рассмотренным выше методикам для георадара «ОКО-2». Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Для пояснения расчета методом 3 приведены зависимости центральной частоты f_0 от глубины H и числа накоплений N для плоскостных объектов [22. С. 50].

Таблица 2. Результаты расчетов рациональных параметров f_0 и Δ для георадара «ОКО-2»

Table 2. Results of calculations of rational parameters f_0 and Δ for georadar «OKO-2»

Величина Value	Метод 1 [21] (формула) Method 1 (formula)	Метод 2 [38] (формула) Method 2 (formula)	Метод 3 [22] Method 3
Промежуточная величина Intermediate value	(1) $Q=8520$ Вт/В $P_0=200$ Вт/В $N=10^3$	$L=10$ м ² /м ² $K=3 \cdot 10^{12}$ м·Гц ^{1,5} /(Ом·м) ^{-0,5} м·Гц ^{1,5} /(Ohm·m) ^{-0,5}	$H=3$ м/м $N=10^4$
f_0	$\lg Q=3,91$ $\rho_2=10^3$ Ом·м/Ohm·m [21. С. 38] 100 МГц/MHz	(3) 132,6 МГц/MHz	$H=3$ м/м $N=10^4$ (рис. 2) 49,2 МГц/MHz
Δ	(2) 0,442 м/м	(4) $\lambda=0,667$ м/м 0,707 м/м	
			$\lambda=1,770$ м/м 1,152 м/м

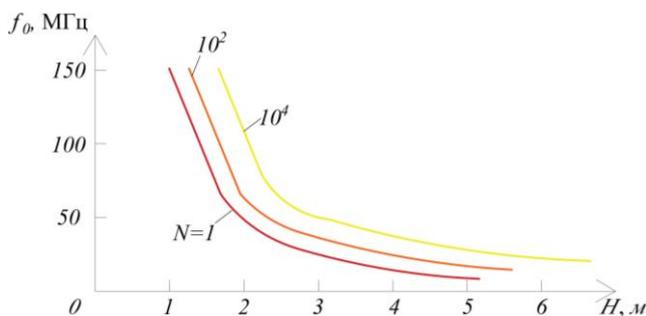


Рис. 2. Расчетные значения f_0 в зависимости от глубины зондирования H и числа накоплений N по данным [22] для плоскостных объектов

Fig. 2. Calculated values f_0 depending on the depth of sensing H and the number of savings N according to [22] for planar objects

Обсуждение и заключение

Таким образом, с учетом физических особенностей зоны эндогенного пожара рациональный диапазон центральной частоты георадиолокации по различным методикам оценки составляет $f_0=49,2-132,6$ МГц, при этом диапазон детальности $\Delta=0,44-1,15$ м.

При диагностировании заповаренных зон на радарограммах следует учитывать следующие особенности этих объектов:

- при развитии пожаров в борту угольного разреза эта зона будет иметь форму вытянутого сфероида с большей осью, параллельной бровке уступа, а при развитии пожара под плоской горизонтальной поверхностью она будет близка к сплюснутому по вертикали сфероиду или цилиндру;
- на начальных стадиях интенсивного горения угля из-за высокой температуры образуются зоны высушенной породы с предельно низкими значениями $\varepsilon'=4-6$, поэтому эти зоны на радарограммах должны характеризоваться понижен-

ными значениями амплитуд отраженного сигнала и существенным ослаблением осей синфазности;

- при длительном горении и выгорании угля вероятно образование пустот, приводящих к обрушению над очагом вплоть до земной поверхности, которые отличаются на радарограммах хаотичным типом волновой картины при практическом отсутствии осей симфазности отраженных волн.

В качестве примера применения приведенных выше критериев интерпретации результатов георадиолокации на рис. 3 приведен фрагмент радарограммы, полученной георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБ-150 ($f_0=150$ МГц) в борту угольного разреза «Бачатский» [39].

На радарограмме достаточно четко выделяются запожаренные участки на интервалах профиля $x = -120 - -60$ м и $x = -20 - -40$ м на глубине 2–4 м (значительно ослаблены линии синфазности), а на интервале $x = -40 - -20$ м между этими зонами радарограмма имеет хаотичную волновую картину, что указывает на вероятное образование пустот и обрушенных пород.

Результаты георадиомониторинга согласуются с данными визуальных наблюдений и контактной геофизики.

Выводы

1. Рациональный диапазон центральной частоты георадара f_0 может быть определен следующими

методами: на основе комплексного параметра георадиолокации, включающего излучаемую мощность антенны, число накоплений и коэффициент отражения от границы объекта; по экстремальному значению целевой функции, включающей глубину и детальность зондирования как функции частоты; решением системы уравнений функции ослабления сигнала и энергетического потенциала георадара. Разрешающая способность Δ с достаточной степенью точности равна половине длины волны в среде.

2. Физические особенности зоны эндогенного пожара на стадиях самовозгорания и интенсивного горения состоят в высушивании породугольного массива с образованием аномальной зоны с ярко выраженными диэлектрическими свойствами ($\epsilon' = 4-6$; $\rho > 100$ Ом·м), по форме близка к вытянутому эллипсоиду (в борту угольного разреза) или сплюснутому по вертикали сфероиду (под плоской поверхностью). С учетом этих особенностей расчетный рациональный диапазон центральной частоты для георадара «ОКО-2» составил $f_0 = 49,2-132,6$ МГц, при этом разрешающая способность составит $\Delta = 0,442-1,152$ м.
3. При интерпретации радарограммы запожаренные зоны диагностируют по участкам, отличающимся аномальным ослаблением осей синфазности, а зоны обрушенных пород и пустот над очагом – по аномальной хаотичной волновой картине.

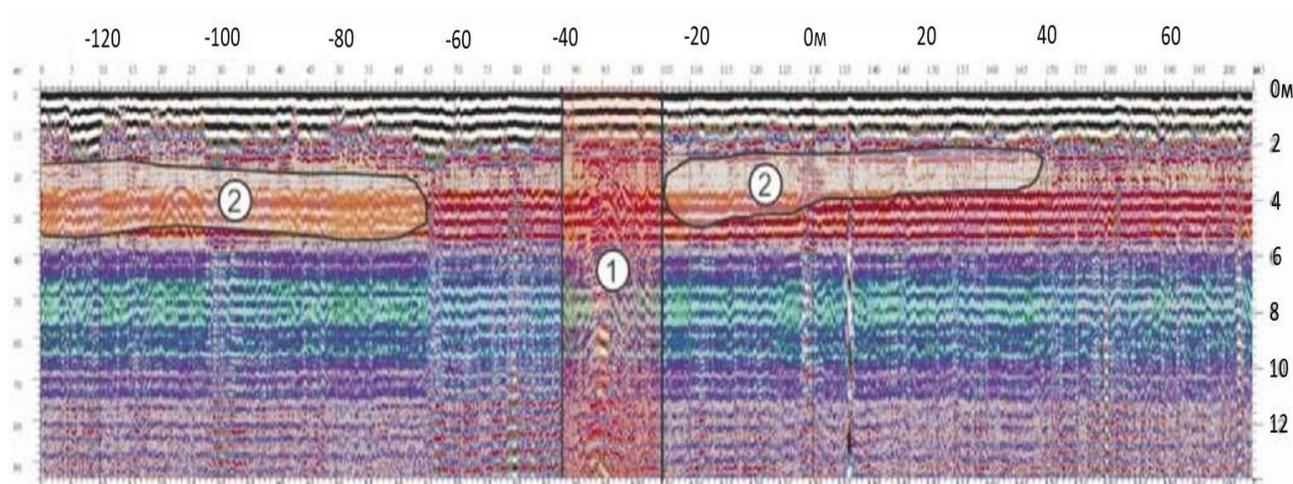


Рис. 3. Радарограмма, полученная на участке борта угольного разреза «Бачатский»: 1 – зона эндогенного пожара; 2 – зона обрушения

Fig. 3. Radarogram obtained at the site of the side of the Bachatsky coal mine: 1 – endogenous fire zone; 2 – collapse zone

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. Tarafadar M.N., Guha D. Application of wet oxidation processes for the assessment of the spontaneous heating of coal // Fuel. – 1989. – Vol. 68. – P. 315–317.
4. Nimaje D.S., Tripathy D.P. Thermal studies on spontaneous heating of coal // The Indian Mining & Engineering Journal. – 2010. – № 48 – P. 10–17.
5. Risk evaluation of coal spontaneous combustion on the basis of autoignition temperature / Y. Zhang, Y. Liu, X. Shi, C. Yang, W. Wang, Y. Li // Fuel. – 2018. – Vol. 233. – P. 68–76.
6. Технологические решения по локализации очагов эндогенных пожаров при отработке прибортовых запасов системами с обрушением руды и вмещающих пород / А.М. Мажитов, С.А. Корнеев, А.Н. Смяткин, Б.М. Габбасов // Горная промышленность. – 2022. – № 1. – С. 122–127.
7. Kunli L., Douhu W., Jianan T. Lead emission amount from coal combustion and its environment effect in Xi'an City // J. Environ. Sci – China. – 2002. – Vol. 23. – P. 123–125.
8. 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). – P. 1409–1416.
9. Портола В.А., Бобровникова А.А., Щербакова В.А. Оценка опасности развития очагов самовозгорания на породном отвале // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2023. – № 1. – С. 48–53.
10. Акулов Н.И., Прокопьев С.А., Прокопьев Е.С. Самовозгорание техногенно-перетолженных угленосных отложений Кузбасса // Уголь. – 2022. – № S12. – С. 53–59.
11. Применение температурной и газовых съемок для обнаружения и локации очагов эндогенных пожаров на выходах пластов ликвидированной шахты / В.А. Портола, А.А. Бобровникова, С.В. Ковалев, Е.А. Киренберг // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – № 3 (157). – С. 79–90.
12. Ерастов А.Ю., Потапов П.В., Шлапаков П.А. Опыт применения геофизической съемки и тепловизионного контроля для выявления очагов самонагрева на угольных складах и выбора способа их тушения // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2012. – № 2. – С. 152–156.
13. Analytical prediction of coal spontaneous combustion tendency: velocity range with possibility of self-ignition / Q. Lin, S. Wang, S. Song, Y. Liang, T. Ren // Fuel Processing Technology. – 2017. – Vol. 159. – P. 38–47.
14. Onifade M., Genc B. Spontaneous combustion of coals and coal-shales // International Journal of Mining Science and Technology. – 2018. – Vol. 28. – P. 993–940.
15. Rosema A., Guan Y., Veld H. Simulation of spontaneous combustion, to study the causes of coal fires in the Rujigou Basin // Fuel. – 2001. – Vol. 80 (1). – P. 7–16.
16. Experimental studies of spontaneous combustion and anaerobic cooling of coal / J. Deng, Y. Xiao, Q. Li, J. Lu, H. Wen // Fuel. – 2015. – Vol. 157. – P. 261–269.
17. Determination and prediction on «three zones» of coal spontaneous combustion in a gob of fully mechanized caving face / J. Deng, C. Lei, Y. Xiao, K. Cao, L. Ma, W. Wang, B. Laiwang // Fuel. – 2018. – Vol. 211. – P. 458–470.
18. Thermal behavior and micro characterization analysis of second-oxidized coal / J. Deng, J.U. Zhao, Y.N. Zhang, C.P. Wang, A.C. Huang // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2017. – Vol. 127. – Iss. 1. – P. 439–448.
19. Tao Xu. Heat effect of the oxygen-containing functional groups in coal during spontaneous combustion processes // Advanced Powder Technology. – 2017. – Vol. 28 (8). – P. 1841–1848.
20. Обнаружение и локация подземных очагов самовозгорания методом электрического зондирования / В.А. Нарский, В.А. Портола, Е.А. Разумов, В.Г. Венгер // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2021. – № 3. – С. 52–58.
21. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 153 с.
22. Изюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С. Теория и методы георадиолокации. – М.: Горная книга, 2008. – 196 с.
23. Александров П.Н. Теоретические основы георадарного метода. – М.: Физматлит, 2017. – 120 с.
24. Theoretical justification for the one-dimensional geolocation method / D. Sirota, S. Prostov, E. Razumov, N. Loskutov // International innovative Mining Symposium E3S Web of Conferences. – Kemerovo, Russian Federation, October 19–21, 2020. – Vol. 174. – P. 1–5.
25. Jol H.M. Ground penetrating radar: theory and applications – Elsevier Science, 2009. – 402 p.
26. Lavoue F. 2D full waveform inversion of ground penetrating radar data: towards multiparameter imaging from surface data. – P.: Earth Sciences, 2014. – 234 p.
27. Bristow C.S., Jol H.M. Ground penetrating radar in sediments. – L.: Geological Society, 2003. – 327 p.
28. Федорова Л.Л., Соколов К.О. Решение задач обработки и интерпретации георадиолокационных данных на основе вейвлет-анализа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 8. – С. 153–158.
29. Соколов К.О. Частотно-временное предоставление георадиолокационных разрезов на основе непрерывного вейвлет-преобразования // ФТПРПИ. – 2014. – № 1. – С. 77–81.
30. Соколов К.О. Вейвлет-критерий для анализа данных георадиолокации мерзлого горного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 11. – С. 262–265.
31. Соколов К.О. Возможности георадиолокации при изучении геомеханических свойств массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 6. – С. 113–115.
32. Прудецкий Н.Д., Соколов К.О., Федорова Л.Л. Физическое моделирование распространения электромагнитной высокочастотной волны в массиве горных пород с трещиной заполненной льдом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 11. – С. 107–113.

33. Анализ обследований состояния горных выработок закрепленных анкерной крепью с применением георадара / В.А. Бакин, Е.Ю. Пудов, Е.Г. Кузин, К.К. Ремпель // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 10. – С. 172–177.
34. Калинин С.М., Пудов Е.Ю., Кузин Е.Г. Перспективы применения георадиолокации для определения состояния кровли шахтовых выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 11. – С. 297–299.
35. 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.
36. Daniels D.J. Surface-Penetrating Radar. – London, UK: IEE, 1996. – 390 p.
37. Финкельштейн М.И., Золотарев В.П., Кутев В.А. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. – М.: Недра, 1986. – 128 с.
38. Простов С.М., Никулин Н.Ю. Обоснование рационального частотного диапазона георадиолокационного мониторинга // Вестник РАЕН. – 2012. – № 14. – С. 38–46.
39. Комплексный геофизический мониторинг для локализации очагов эндогенных пожаров в борту угольного разреза / В.В. Калайгорода, С.М. Простов, Е.А. Шабанов, Н.Ю. Никулин // Известия вузов. Горный журнал. – 2023. – № 4. – С. 120–131.

Информация об авторах

Сергей Михайлович Простов, доктор технических наук, профессор кафедры строительного производства и экспертизы недвижимости, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. psm.kem@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0780-2690>

Всеволод Владимирович Калайгорода, аспирант, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Kalay232@gmail.com

Евгений Анатольевич Шабанов, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительного производства и экспертизы недвижимости, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. evgenhab@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2460-6467>

Поступила в редакцию: 03.10.2023

Поступила после рецензирования: 09.01.2023

Принята к публикации: 24.05.2024

REFERENCES

1. Kupriyanov V.V., Bondarenko I.S. Factors of influence on the reserve of time for recovery from underground accidents in mines. *Mining information and analytical bulletin*, 2022, no. 2, pp. 139–149. (In Russ.)
2. Gridina E.B., Miroshnichenko A.K. Elimination of spontaneous combustion of coal based on the use of peat fire barrels. *Scientific and Technical journal "Vestnik"*, 2021, no. 1, pp. 83–86. (In Russ.)
3. Tarafadar M.N., Guha D. Application of wet oxidation processes for the assessment of the spontaneous heating of coal. *Fuel*, 1989, no. 68, pp. 315–317.
4. Nimaje D.S., Tripathy D.P. Thermal studies on spontaneous heating of coal. *The Indian Mining & Engineering Journal*, 2010, no. 48, pp. 10–17.
5. 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, vol. 233, pp. 68–76.
6. Mazhitov A.M., Korneev S.A., Smyatkin A.N., Gabbasov B.M. Technological solutions for localization of foci of endogenous fires during the development of on-board reserves by systems with collapse of ore and host rocks. *Mining industry*, 2022, no. 1, pp. 122–127. (In Russ.)
7. Kunli L., Douhu W., Jianan T. Lead emission amount from coal combustion and its environment effect in Xi'an City. *J. Environ. Sci – China*, 2002, vol. 23, pp. 123–125.
8. 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.
9. Portola V.A., Bobrovnikova A.A., Shcherbakova V.A. Assessment of the danger of spontaneous combustion on the rock dump. *Bulletin of the Scientific Center for the safety of work in the coal industry*, 2023, no. 1, pp. 48–53. (In Russ.)
10. Akulov N.I., Prokopyev S.A., Prokopyev E.S. Spontaneous combustion of technogenically re-deposited coal-bearing deposits of Kuzbass. *Coal*, 2022, no. S12, pp. 53–59. (In Russ.)
11. Portola V.A., Bobrovnikova A.A., Kovalev S.V., Kirenberg E.A. Application of temperature and gas surveys for detection and location of foci of endogenous fires at the exits of the liquidated mine layers. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2023, no. 3 (157), pp. 79–90. (In Russ.)
12. Erastov A.Yu., Potapov P.V., Shlapakov P.A. The experience of using geophysical survey and thermal imaging control to identify foci of self-heating in coal warehouses and the choice of a method for extinguishing them. *Bulletin of the Scientific Center for safety of work in the coal industry*, 2012, no. 2, pp. 152–156. (In Russ.)
13. Lin Q., Wang S., Song S., Liang Y., Ren T. Analytical prediction of coal spontaneous combustion tendency, velocity range with possibility of self-ignition. *Fuel Processing Technology*, 2017, vol. 159, pp. 38–47.

14. Onifade M., Genc V. Spontaneous combustion of coals and coal-shales. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, vol. 28, pp. 993–940.
15. Rosema A., Guan Y., Veld H. Simulation of spontaneous combustion, to study the causes of coal fires in the Rujigou Basin. *Fuel*, 2001, vol. 80 (1), pp. 7–16.
16. Deng J., Xiao Y., Li Q., Lu J., Wen H. Experimental studies of spontaneous combustion and anaerobic cooling of coal. *Fuel*, 2015, vol. 157, pp. 261–269.
17. Deng J., Lei C., Xiao Y., Cao K., Ma L., Wang W., Laiwang B. Determination and prediction on «three zones» of coal spontaneous combustion in a gob of fully mechanized caving face. *Fuel*, 2018, vol. 211, pp. 458–470.
18. Deng J., Zhao J.U., Zhang Y.N., Wang C.P., Huang A.C. Thermal behavior and micro characterization analysis of second-oxidized coal. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, vol. 127, Iss. 1, pp. 439–448.
19. Tao Xu. Heat effect of the oxygen-containing functional groups in coal during spontaneous combustion processes. *Advanced Powder Technology*, 2017, vol. 28 (8), pp. 1841–1848.
20. Narsky V.A., Portola V.A., Razumov E.A., Wenger V.G. Detection and location of underground spontaneous combustion foci by electric sounding. *Bulletin of the Scientific Center for work safety in the coal industry*, 2021, no. 3, pp. 52–58. (In Russ.)
21. Vladov M.L., Starovoitov A.V. *Introduction to georadiolocation*. Moscow, Moscow State University Publ. House, 2005. 153 p. (In Russ.)
22. Izyumov S.V., Druchinin S.V., Voznesensky A.S. *Theory and methods of georadiolocation*. Moscow, Mountain Book Publ., 2008. 196 p. (In Russ.)
23. Alexandrov P.N. *Theoretical foundations of the georadar method*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2017. 120 p. (In Russ.)
24. Sirota D., Prostov S., Razumov E., Loskutov N. Theoretical justification for the one-dimensional geolocation method. *International innovative Mining Symposium E3S Web of Conferences*. Kemerovo, Russian Federation, October 19–21, 2020. Vol. 174, pp. 1–5.
25. Jol H.M. *Ground penetrating radar: theory and applications*. Elsevier Science, 2009. p. 402.
26. Lavoue F. *2D full waveform inversion of ground penetrating radar data: towards multiparameter imaging from surface data*. Paris, Earth Sciences, 2014. 234 p.
27. Bristow C.S., Jol H.M. Ground penetrating radar in sediments. L., *Geological Society*, 2003. 327 p.
28. Fedorova L.L., Sokolov K.O. Solving problems of processing and interpretation of geo-radar data based on wavelet analysis. *Mining information and analytical bulletin*, 2008, no. 8, pp. 153–158. (In Russ.)
29. Sokolov K.O. Frequency-time provision of georadiolocation sections based on continuous wavelet transform. *FTPPI*, 2014, no. 1, pp. 77–81. (In Russ.)
30. Sokolov K.O. Wavelet criterion for analysis of georadiolocation data of frozen mountain array. *Mining information and analytical bulletin*, 2014, no. 11, pp. 262–265. (In Russ.)
31. Sokolov K.O. Possibilities of georadiolocation in the study of geomechanical properties of a rock mass. *Mining information and analytical bulletin*, 2015, no. 6, pp. 113–115. (In Russ.)
32. Prudetsky N.D., Sokolov K.O., Fedorova L.L. Physical modeling of electromagnetic high-frequency wave propagation in an array of rocks with a crack filled with ice. *Mining information and analytical Bulletin*, 2018, no. 11, pp. 107–113. (In Russ.)
33. Bakin V.A., Pudov E.Y., Kuzin E.G., Rempel K.K. Analysis of surveys of the state of mine workings fixed with anchorage using georadar. *Mining information and analytical bulletin*, 2015, no. 10, pp. 172–177. (In Russ.)
34. Kalinin S.M., Pudov E.Y., Kuzin E.G. Prospects of using georadiolocation to determine the condition of the roof of mine workings. *Mining information and analytical bulletin*, 2015, no. 11, pp. 297–299. (In Russ.)
35. Nabatov V.V., Gaisin R.M. Processing of geo-radar survey data when detecting cavities in the back-up space. *Mining information and analytical bulletin*, 2018, no. 1, pp. 19–25. (In Russ.)
36. Daniels D.J. *Surface-penetrating radar*. London, UK, IEE, 1996. 390 p.
37. Finkelstein M.I., Zolotarev V.P., Kutev V.A. *Application of radar subsurface sounding in engineering geology*. Moscow, Nedra Publ., 1986. 128 p. (In Russ.)
38. Prostov S.M., Nikulin N.Y. Substantiation of the rational frequency range of geo-radar monitoring. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2012, no. 14, pp. 38–46. (In Russ.)
39. Kalaygoroda V.V., Prostov S.M., Shabanov E.A., Nikulin N.Y. Integrated geophysical monitoring for the location of foci of endogenous fires in the board of a coal mine. *Izvestiya vuzov. Mining Journal*, 2023, no. 4, pp. 120–131. (In Russ.)

Information about the authors

Sergey M. Prostov, Dr. Sc., Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyya street, Kemerovo, 650002, Russian Federation. psm.kem@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0780-2690>

Vsevolod V. Kalaygoroda, Postgraduate Student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyya street, Kemerovo, 650002, Russian Federation. Kalay232@gmail.com

Evgeny A. Shabanov, Cand. Sc., Associate Professor, Head of the Department of Construction Production and Expertise, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyya street, Kemerovo, 650002, Russian Federation. evgenshab@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2460-6467>

Received: 03.10.2023

Revised: 09.01.2023

Accepted: 24.05.2024