

УДК 622.831:537.531

РАСЧЕТНАЯ И АППАРАТУРНАЯ БАЗА ГЕОМОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ МАССИВА МЕТОДОМ РЕГИСТРАЦИИ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Простов Сергей Михайлович¹,
psm.kem@mail.ru

Разумов Егор Евгеньевич²,
razumov@vnimi.ru

Мулев Сергей Николаевич²,
smuleva@yandex.ru

Шабанов Евгений Анатольевич¹,
evgenshab@mail.ru

¹ Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

² Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт горной геомеханики маркшейдерского дела –
межотраслевой научный центр ВНИМИ»,
Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Сосновый бор, 1.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки перспективного метода прогноза удароопасности массива по параметрам естественного электромагнитного излучения, возникающего при трещинообразовании в горных породах. Существующие методики интерпретации данных геофизического мониторинга не учитывают связи параметров электромагнитного излучения с основными геомеханическими критериями, определяющими вероятность проявления горного удара: концентрацией напряжений в массиве и расположением их максимума.

Цель: установление рациональных параметров для дальнейшего экспериментального обоснования критериев локального прогноза удароопасности методом регистрации электромагнитного излучения на базе экспериментальной аппаратуры «Ангел-М», разработанной в МНЦ ВНИМИ.

Объекты: массивы горных пород, склонных к динамическим проявлениям горного давления на горнодобывающих предприятиях Кузбасса (шахта «Таштагольская», глубина 700 м; шахта «Зиминка», глубина 300 м; шахта № 12, глубина 340 м).

Методы: анализ физических механизмов электризации пород в поле механических напряжений на основе фундаментальных закономерностей физики твердого тела и электродинамики, экспериментально-теоретические основы метода регистрации электромагнитного излучения в лабораторных и природных условиях.

Результаты. Рассмотрены физические предпосылки возникновения электромагнитного излучения при разрушении твердых тел и горных пород, основные теоретические и экспериментальные результаты, полученные в данной области ведущими научными коллективами. Изложена методика расчета амплитудно-частотной характеристики электромагнитного излучения при трещинообразовании в горных породах, включающая решение волнового уравнения, прямое и обратное преобразование Фурье, эффекты суперпозиции систем трещин и затухания электромагнитного излучения в проводящей среде. Обоснован перспективный метод прогноза удароопасности массива методом регистрации электромагнитного излучения на основе комплексных критериев, косвенно взаимосвязанных с фундаментальными геомеханическими параметрами массива (концентрация напряжений в точке их максимума и расстоянием от контура до этой точки): средняя амплитуда импульсов за интервал регистрации и крутизна графика скорости нарастания импульсов.

Ключевые слова:

Геофизический прогноз, электромагнитное излучение, разрушение горных пород, возмущение естественных электрических полей, волновое уравнение, преобразования Фурье, амплитудно-частотная характеристика, аппаратный комплекс, прогноз удароопасности, комплексный критерий.

Введение

Возникновение импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ) при трещинообразовании в горных породах связано с электродинамическими процессами в очаге разрушения. Принципиально различают две гипотезы механизма радиоизлучения: непосредственное преобразование механической энергии разрушения пород с кристаллической структурой в энергию электромагнитного поля [1–5]; возмущение постоянно действующих электрических полей при скачкообразных изменениях электрофизических свойств разрушающегося материала [6–8].

Рассмотрим более подробно данные концепции.

Причиной заряжения берегов трещин раскалывающегося кристалла является то, что заряженные дислокации, перемещаясь в несимметричном поле напряжений близи вершины трещины, выводят на ее берега противоположные заряды. При образовании микротрещин и развитии магистральной трещины происходит формирование электрического поля с напряженностью, достаточной для электрического разряда в ее устье, и появление токов компенсации, огибающих вершину трещины. Единичный электромагнитный импульс представляет собой продукт суперпозиции массы распределенных в разрушающемся

объеме и перемещающихся точечных импульсных источников волн [1, 2]. В горных породах из-за обилия неоднородностей рассмотренный эффект выражен слабее, чем в монокристаллах [3].

В работах [4, 5] приведен расчет параметров радиоизлучения горных пород. Задав частотный спектр импульсного сигнала, авторы с учетом ослабления поля в ближней и дальней зонах, среднего числа излучающих пор в единичном объеме породы получили зависимость напряженности электрической составляющей сигнала от пористости, максимальной напряженности поля заряженной трещины, частоты, размера очага. Численная проверка формулы дает следующие результаты: максимальный уровень сигнала может составить 10^3 В/м, что наблюдается при сильных сейсмических явлениях, минимальный уровень 10^{-9} В/м соответствует фоновому излучению, средний уровень составляет 10^{-3} В/м.

Вторая концепция теории ЭМИ предполагает существование в массиве постоянно действующих электрических полей, источниками которых могут быть: электризация пород под воздействием естественной радиации, наличие градиентов температур и давлений в земных недрах, естественные стационарные электрические поля химического происхождения и теллурические токи.

В работе [6] рассмотрено изменение напряженности магнитного поля за счет изменения плотности естественного электрического тока при линейных и нелинейных деформациях участка земной коры, сопровождающих прохождение сейсмической волны. Изменение напряжений может составлять десятки процентов, откуда амплитуда магнитных колебаний будет иметь порядок 10^{-3} – 10^{-2} А/м. Напряженность поля фильтрации может резко изменяться при разрушении горных пород и скачкообразном падении давления [7]. Напряженность электрического поля импульсного сигнала при этом может составить не менее 10^{-3} – 10^{-5} В/м.

На основании анализа физических механизмов электризации пород в поле механических напряжений сделан вывод о том, что в горных породах поля, близкие по интенсивности к регистрируемым, могут быть связаны только с формированием линий скольжения дислокаций и скачкообразным распространением трещин. Анализ спектра электромагнитного излучения показал, что основная доля частот находится в диапазоне 10^1 – 10^7 Гц, причем верхняя граница определяется временем релаксации зарядов на берегах трещин [8].

Проведен ряд экспериментальных исследований в зарубежных лабораториях, направленных на выявление электромагнитных предвестников землетрясений [9–11].

Экспериментально-теоретические основы метода регистрации ЭМИ для контроля геомеханического состояния массива горных пород и прогноза опасных геодинамических явлений развивались несколькими научными школами. Наиболее существенные научно-практические результаты получены в КузГТУ (КузПИ) и ИГД СО РАН.

В КузГТУ разработана статистическая теория эмиссионных процессов в напряженных твердых телах и горных породах, в основу которой положены фундаментальные положения кинетической концепции прочности и закономерности терморазрушающих флуктуаций в твердом теле. В результате рассмотрения образования микротрещины как случайного и независимого события сделано предположение, что процесс трещинообразования подчиняется пуассоновскому закону распределения вероятностей. На этой основе получены зависимости средней скорости генерации импульсов от приложенных напряжений для стадий делокализованного и самоускоряющегося развития микротрещин. Из системы уравнений электродинамики получены уравнения для векторного и скалярного потенциалов электромагнитного поля из произвольного объема тела. Для движущейся трещины получена теоретическая форма импульса ЭМИ, которая подтверждена экспериментально на лабораторной установке. Разработаны статистические модели процессов разрушения образцов горных пород, включающие генерацию псевдослучайных чисел и позволяющие прогнозировать момент перехода к стадии разрушения и ресурс долговечности [12, 13].

В работе [14] экспериментально при нагружении образцов скальных горных пород установлены линейные статистически значимые зависимости между регистрируемым числом электромагнитных и световых импульсов, а также между средними значениями числа импульсов обоих типов и стандартными отклонениями. Для образцов песчаника экспериментально подтверждена возможность прогноза усталостной прочности (количества циклов нагружения до разрушения) с погрешностью 1–1,5 %, при этом кинетические константы, входящие в расчетные уравнения, предложено определять методом наименьших квадратов [15]. Для искусственных образцов неоднородной структуры установлено увеличение скорости микротрещинообразования с увеличением размера зерна [16], при этом скорость развития микротрещины оценивалась по длительности фронта нарастания импульса ЭМИ [17]. Цикл лабораторных исследований был направлен на установление наиболее информативных характеристик ЭМИ. Так, в работе [18] получено, что у скальных пород (гранодиорит) при разрешении 20 нс регистрируется 30–35 тыс. импульсов малой амплитуды практически равномерно в процессе деформирования, а при разрешении 10 мкс – не более 1 тыс. импульсов большой амплитуды при нагрузке, составляющей 0,6–0,7 от разрушающей. У осадочных пород (мраморизованный доломит) импульсы ЭМИ регистрируются во всем диапазоне нагружения, причем по их числу достаточно четко выделяются 4 стадии образования микротрещин [19].

В работах [20, 21] предложено использовать автокорреляционную функцию числа импульсов от времени (циклов нагружения), переход которой к отрицательным значениям соответствует началу интенсификации процесса образования микротрещин, и показатель нормированного размаха Херста, изменение угла наклона графика которого соответствует перехо-

ду к стадии, непосредственно предшествующей разрушению.

В Институте горного дела СО РАН исследования ЭМИ твердых тел и горных пород проводятся более 20 лет. Предложена статистическая модель возникновения сигналов ЭМИ с использованием методов максимальных инвариантов для групп преобразований, описывающих априорную неопределенность в задачах обнаружения сигналов. Для регистрации и анализа сигналов ЭМИ в лабораторных условиях разработана специализированная автоматизированная система измерений (АСИ), включающая устройство нагружения, датчики ЭМИ, систему записи и анализа полученной информации. Ядром системы является четырехканальный АЦП с частотой дискретизации 1 МГц, на выходе которого в реальном масштабе времени информация выдается в виде осциллограмм с последующим их представлением в виде спектрально-временных матриц, анализ которых позволяет для каждого типа испытываемых горных пород и других материалов строить специальные S-диаграммы, описывающие разрушение как процесс, включающий ряд стадий. Проведен комплекс натурных исследований ЭМИ в условиях рудников и угольных шахт. Разработаны методики проведения исследований с использованием приборов РЭМИ 1 и РЭМИ 2, выполнены работы по их опробованию в натурных условиях. Выполнен сравнительный анализ импульсного излучения ЭМИ в условиях шахт и рудников и ЭМИ-излучения, регистрируемого при нагружении образцов в лабораторных условиях. Установлено, что результаты этих измерений коррелируют между собой. Выполнены исследования параметров ЭМИ в натурных условиях при статических полях напряжений в массиве горных пород (шахта «Таштагольская», глубина 700 м; шахта «Зиминка», глубина 300 м и шахта № 12, глубина 340 м). Результаты подтвердили ранее установленные экспериментальные результаты об эффекте постоянства интенсивности потока ЭМИ в условиях статических полей напряжений в массиве горных пород [22, 23].

Одним из наиболее существенных научно-практических результатов проведенных исследований является введение коэффициента механо-электромагнитных преобразований M , представляющего собой отношение энергии ЭМИ к потенциальной механической энергии нагружения образца. На специальном стенде с помощью магнитной и токовой антенн в диапазоне частот 70 Гц – 20 кГц получены экспериментальные значения коэффициента M , которые составили от $0,00209 \cdot 10^{-16}$ для мелкообломочных туфов до $129,2 \cdot 10^{-16}$ для мелкозернистых кварцитов. Предложено использовать M для оценки склонности пород к хрупкому разрушению [24].

Для комплексных лабораторных исследований разработана и реализована модернизированная система АСИ-2, отличительные особенности которой состоят в следующем [25]: повышено быстродействие регистрации ЭМИ и нагрузки, что способствует уменьшению потерь измерительной информации; для измерения продольных деформаций применены од-

нонаправленные тензорезисторы, наклеиваемые на образец с последующей термообработкой, специальная мостовая схема измерений, экранировка датчика и термостабилизация; усовершенствованно программное обеспечение, позволяющее вести первичную обработку и визуализацию сигнала.

Наиболее технически совершенной является система синхронной регистрации механических и электромагнитных параметров образцов, оснащенная оптическими датчиками перемещений, действие которых основано на модуляции переменного светового потока, датчиков ЭМИ электрического и магнитного типов в виде стержневых магнитных антенн. Цикл исследований на данной установке позволил установить в качестве диагностических критериев разрушения образцов следующие параметры характеристик сигналов ЭМИ [26–28]: максимальное значение длительности импульса; минимальное значение длительности интервала между импульсами.

Изменение характеристик сигнала ЭМИ в процессе добычи продемонстрированы в работах [29, 30]. В работах [31, 32] показано, что интенсивность ЕЭМИ увеличивается при увеличении скорости распространения трещин.

Целью исследования является установление рациональных параметров для дальнейшего экспериментального обоснования критериев локального прогноза удароопасности методом регистрации ЭМИ.

Методика исследования

Основой разработки измерительной аппаратуры для регистрации ЭМИ является спектр сигнала ЭМИ. Для теоретической оценки этого спектра при разрушении горных пород целесообразно использовать методику, изложенную в работе [33].

Основные этапы расчета состоят в следующем.

1. Физическая постановка задачи.

Поперечное сечение трещины имеет форму эллипса с полуосями $2a$ и $2b$. Из теории электричества [34] следует, что функция напряженности электрического поля вдоль оси трещины x при $a \gg b$ имеет вид (рис. 1):

$$E = \bar{E}_{\infty} \left(\cos \alpha + \frac{x \sin \alpha}{\sqrt{a^2 + x^2}} \right), \quad (1)$$

где \bar{E}_{∞} – вектор напряженности внешнего естественного электрического поля (постоянного или стационарного), которое существует практически на любом месторождении; α – угол между \bar{E}_{∞} и осью x .

При развитии трещины с постоянной скоростью U

$$a = Ut, \quad (2)$$

где t – время.

Из (1) и (2) следует что $E = E(x, t)$, т. е. электрическое поле изменяется в пространстве и во времени, что является физической причиной генерирования электромагнитных колебаний, причем источником этих колебаний можно считать малую область с наибольшим уровнем E , прилегающую к вершине трещины:

$$x = a - r, \quad (3)$$

где $r = 10^{-10}$ м имеет порядок радиуса вершины трещины [35].

Из решения волнового уравнения функция модуля вектора электромагнитного потенциала Π точечного источника для дальней (волновой) зоны имеет вид [36]:

$$\Pi(R, t) = \frac{\mu j}{4\pi R} \left(t - \frac{R}{V} \right), \quad (4)$$

где μ – абсолютная магнитная проницаемость; j – плотность тока, $j = E\lambda$; λ – электропроводимость; R – расстояние от источника излучения; $V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ – скорость электромагнитной волны в среде.

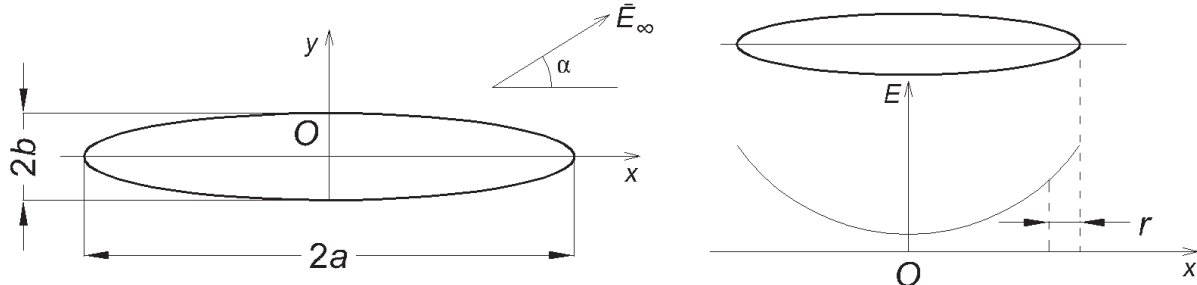


Рис. 1. Расчетные схемы ЭМИ

Fig. 1. Calculation schemes of electromagnetic radiation

С учетом (2) и (3), а также при $\sin \alpha = 1$, уравнение (4) примет вид:

$$\Pi(R, t) = \frac{\mu E_{\infty} \lambda}{4\pi R} \sqrt{\frac{U}{2r}} \left(t - \frac{R}{V} \right). \quad (5)$$

Напряженность электрической составляющей электромагнитного поля определяется из уравнения (5) с учетом эффекта суперпозиции, который состоит в том, что при n одномерно развивающихся в массиве трещинах величина E возрастает в \sqrt{n} раз:

$$E' = \frac{\partial \Pi}{\partial t} = \frac{\mu E_{\infty} \lambda}{8\pi R} \sqrt{n} \sqrt{\frac{U}{2r}} \frac{1}{\sqrt{\left(t - \frac{R}{V}\right)}} = \frac{\Phi}{\sqrt{\left(t - \frac{R}{V}\right)}} \quad (6)$$

где Φ – постоянная, зависящая от механических и электрических свойств массива.

По данным [4] величина n для массива горных пород объемом 1 м^3 составляет 10^6 .

2. Комплексный спектр сигнала может быть получен путем преобразования Фурье при применении метода гармонического анализа:

- в комплексном виде

$$E'(i\omega) = \Phi \left[e^{-i\omega t} \sqrt{\frac{\pi}{2\omega}} (1 - i) \right]; \quad (7)$$

- для модуля комплексного числа

$$|E'(i\omega)| = \Phi \sqrt{\frac{\pi}{\omega}}, \quad (7')$$

где ω – частота гармонической составляющей.

Для получения из уравнений (7), (7') амплитудного спектра сигнала применяется обратное преобразование Фурье:

$$E'(\omega) = \int_{\omega}^{\omega+\Delta\omega} E'(i\omega) e^{i\omega t} d\omega = 2\Phi(\sqrt{\omega + \Delta\omega} - \sqrt{\omega}), \quad (8)$$

где $\Delta\omega$ – полоса пропускания приемного устройства.

Учитывая, что $\omega \gg \Delta\omega$ из уравнения (8) следует

$$E'(\omega) \approx 2\Phi \frac{\Delta\omega}{\sqrt{\omega}} \quad (9)$$

Принимая во внимание, что электромагнитный сигнал в проводящей среде затухает за счет скин-

эффекта, окончательно из (9) получается следующее уравнение:

$$\begin{aligned} E''(\omega) &= E'(\omega) \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\mu\lambda\omega}{2}} R\right) = \\ &= \frac{E_{\infty} \sqrt{n} \cdot \mu\lambda}{8\pi R} \sqrt{\frac{U}{2r}} \frac{\Delta\omega}{\sqrt{\omega}} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\mu\lambda\omega}{2}} R\right). \end{aligned} \quad (10)$$

Результаты

Анализ уравнения (10) позволяет сделать следующие выводы.

Амплитудный спектр сигнала, без учета затухания поля, неравномерный, величина сигнала монотонно снижается с увеличением ω . Величина E'_0 при $\Delta\omega = 10^3$ Гц, $E_{\infty} = 0,1$ В/м, $U = 10^3$ м/с, $\mu = 4\pi \cdot 10^7$ Гн/м вблизи очага разрушения при $R \rightarrow 0$ может составлять $E'_0 > 10^2$ В/м (рис. 2).

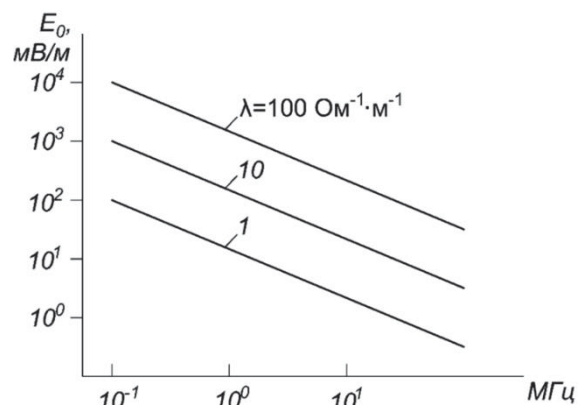
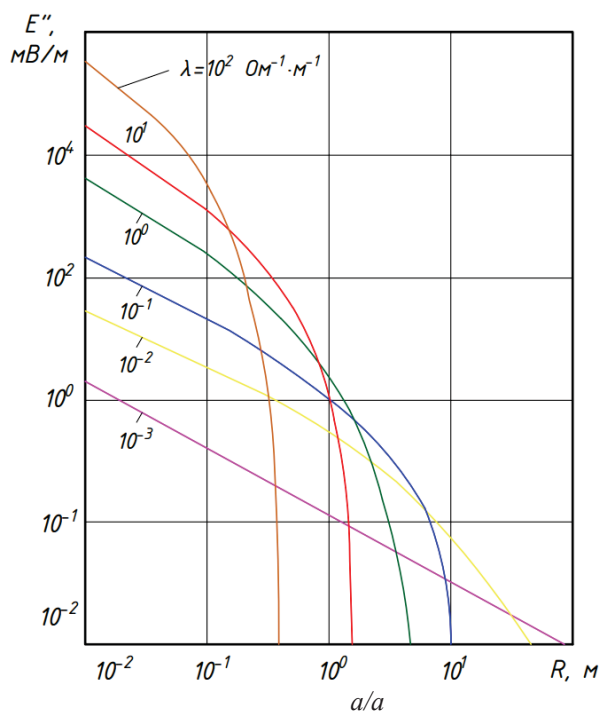


Рис. 2 Амплитудно-частотная характеристика сигнала ЭМИ без учета затухания при $E_{\infty} = 0,1$ В/м; $n = 10^6 \text{ м}^{-3}$; $\mu = 4\pi \cdot 10^7$ Гн/м; $R = 0,1$ м; $U = 10^3$ м/с; $\Delta\omega = 10^3$ Гц

Fig. 2. Amplitude-frequency response of the EMR signal without considering attenuation at $E_{\infty} = 0,1$ V/m; $n = 10^6 \text{ м}^{-3}$; $\mu = 4\pi \cdot 10^7$ H/m; $R = 0,1$ m; $U = 10^3$ m/s; $\Delta\omega = 10^3$ Hz

В проводящей среде сигнал интенсивно затухает, особенно на высоких частотах (рис. 3).



Для $R > 1$ м при $\omega = 0,1$ МГц минимальный уровень сигнала ЭМИ составит $E''_{\min} < 1$ мВ/м, при $\omega = 100$ МГц – $E''_{\min} < 10^{-2}$ мВ/м.

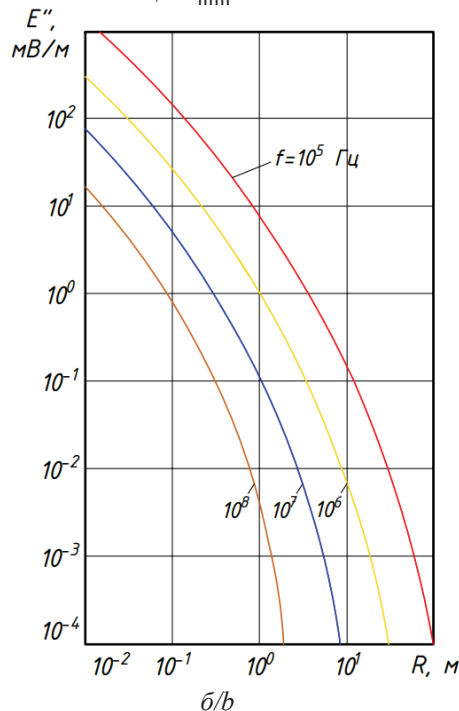


Рис. 3. Зависимости $E''(R, \lambda)$ при $f = 1$ МГц (а), $E''(R, f)$ при $\lambda = 0,1$ Ом⁻¹·м⁻¹ (б)

Fig. 3 Dependencies $E''(R, \lambda)$ at $f = 1$ MHz (a), $E''(R, f)$ $\lambda = 0,1$ $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ (b)

Основные результаты расчета позволили обосновать конструктивные параметры аппаратуры для регистрации ЭМИ в массиве горных пород: максимальная регистрируемая частота $f_{\max} = 100$ МГц; чувствительность по напряженности электрической составляющей поля $E_{\min} = 5$ В/м. Нижнюю границу частотного диапазона принимают из условия максимальной отстройки принимаемого сигнала от помех промышленной частоты.

Одной из первых аппаратных разработок для шахтных исследований является регистратор ЭМИ, функциональная схема которого включает следующие элементы: штыревую антенну, блок высокой частоты; усилитель промежуточной частоты; регулятор уровня чувствительности; аналого-цифровой преобразователь; частотомер; нормализатор амплитуды импульсов; нормализатор длительности импульсов; индикатор [37].

Реализация данной схемы обеспечила следующие основные диапазоны регистрации параметров ЭМИ: $E_{\min} = 0,1$ мВ/м; $f = 0,15\text{--}75$ МГц; частота следования импульсов $N = 0\text{--}10$ кГц.

На первых этапах методика прогноза интенсивности разрушения пород и удароопасности участков выработок на рудных месторождениях была основана на определении критических значений $N_{\text{кр}}$, $E_{\text{кр}}$, которые устанавливались по результатам специальных исследований.

Критерии опасности имели следующий вид:

$N > N_{\text{кр}}$ – опасно; $E > E_{\text{кр}}$ – опасно;

$N < N_{\text{кр}}$ – неопасно; $E < E_{\text{кр}}$ – неопасно.

Исследования, проведенные в ИГД СО РАН, направлены на развитие способов прогноза разрушения горных пород и устройств для их осуществления. Разработанные способы предусматривают не только регистрацию ЭМИ, но и обработку цифровой информации для получения количественных показателей опасности динамических явлений.

Например, в способе [38] момент начала разрушения массива предложено определять по отношению среднеквадратических отклонений от средних значений амплитуд сигнала ЭМИ на интервалах измерений, соответствующих нагруженному состоянию массива и ненагруженному, при котором сигнал считают помехой.

Способ [39] предусматривает регистрацию спектрально-временных характеристик сигналов ЭМИ. О начале процессов нарушения сплошности спектра судят по началу смещения верхней частоты спектра в высокочастотную часть, а критическое состояние массива диагностируют по превышению верхней частоты спектра начального минимального значения в 2–2,45 раза.

Результатом научно-исследовательских разработок ИГД СО РАН является создание регистрационно-диагностического комплекса аппаратуры серии РЭМИ. Проведены шахтные испытания прибора РЭМИ-3 в горных выработках Таштагольского рудника. Экспериментально зафиксировано, что на участках заколообразования и стреляния амплитуда сигналов ЭМИ более чем в 5 раз превышала электромагнитный фон, а на участке формирующегося мик-

роудара сначала существенно увеличивается фоновая составляющая сигнала ЭМИ, а затем происходит его увеличение в 10 более раз [40].

Существенные результаты в рассматриваемой области исследований достигнуты во ВНИМИ. Здесь разработана измерительная аппаратура ЕГ-6, работающая на фиксированной частоте $f = 40$ кГц. Более 20 лет назад создан измерительный комплекс «Ангел», обеспечивающий оперативный экспресс-прогноз удароопасности участков массива. Комплекс нашел широкое распространение на рудниках и угольных шахтах, поскольку показал достаточно высокую эффективность при испытаниях.

Работа аппаратуры «Ангел» основана на автоматической реализации способа определения удароопасности массива по параметрам ЭМИ, включающего измерение в выработке максимальных значений амплитуды и активности ЭМИ, превышающих фоновый уровень. Удароопасными признают участки, на которых выполняются четыре условия в виде неравенств.

Два из условий являются основными [41]:

$$A(x_i) > A_{кр};$$

$$B(x_i) > B_{кр},$$

где A , B – комплексные параметры ЭМИ, определенные в точке замера с координатой x_i ; $A_{кр}$, $B_{кр}$ – критические значения параметров A , B , определяемые на стадии предварительных исследований.

$$A = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n E_k;$$

$$B = \arctg \left(\frac{\log_2 N_{\max}}{\log_2 E_{\max}} \right),$$

где n – число зарегистрированных импульсов ЭМИ за интервал времени замера с амплитудой, превышающей амплитуду фонового излучения $E_k > E_0$; E_{\max} – максимальная амплитуда, В/м; N_{\max} – максимальное количество зафиксированных импульсов с амплитудой, превышающей E_0 .

Два дополнительных условия представляют собой превышение критических значений скоростей изменения параметров A и B в соседних с расчетной точках наблюдения.

Рассмотрим физический смысл параметров A и B с позиций приведенной выше модели ЭМИ. Из уравнения (6) следует, что средневзвешенное значение амплитуд импульсов ЭМИ увеличивается с ростом концентрации трещин n и скорости их развития U :

$$A \sim \sqrt{nU}.$$

Таким образом, параметр A однозначно взаимосвязан с уровнем механических напряжений в зоне их концентрации (очаге возможного динамического проявления).

Из уравнения (10) можно получить, что расстояние до очага излучения R взаимосвязано с отношением амплитуд сигналов E_1 и E_2 на частотах соответственно ω_1 и ω_2 выражением

$$R = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\lambda}{2}} (\sqrt{\omega_1} - \sqrt{\omega_2})} \ln \left(\frac{E_1}{E_2} \sqrt{\frac{\omega_1}{\omega_2}} \right).$$

Отсюда следует, что при увеличении крутизны амплитудного спектра вследствие скин-эффекта величина R возрастает, что снижает опасность динамического проявления, при снижении крутизны спектра очаг разрушения расположен ближе к обнажению, что повышает удароопасность массива, т. е. величина B взаимосвязана с расстоянием до зоны концентрации напряжений.

Таким образом, комплексные параметры ЭМИ A и B отражают фундаментальные положения прогноза категории удароопасности участков массива по двум классическим геомеханическим параметрам: коэффициенту концентрации сжимающих напряжений в точке их максимума и расстоянию от контура выработки до этой точки.

Усовершенствованная аппаратура «Ангел-М» имеет полосу регистрируемых частот 5–150 кГц. Испытания этой аппаратуры проведены в различных горнодобывающих регионах. Так, в шахте № 1–5 рудника Баренцбург диагностирована локальная зона повышенного трещинообразования, в пределах которой зафиксировано резкое увеличение параметра A до уровня 320 мкВ при одновременном снижении параметра B до уровня $<0,05$. Аналогичные результаты получены на шахте «Им. 7 Ноября» ОАО «СУЭК-Кузбасс» при происшедшем обрушении со смещением блоков кровли лавы № 1380. Масштабные испытания на Таштагольском руднике, включающие измерения на участке происшедшего динамического явления в форме толчка, позволили установить критические значения комплексных параметров [42]:

- для выработок, проведенных в рудном теле, $A_{кр}=35$ мкВ, $B_{кр}=0,1$;
- для массивов вмещающих пород $A_{кр}=697$ мкВ, $B_{кр}=0,149$.

Выводы

1. Экспериментально-теоретическая база применения метода ЭМИ для исследования геомеханического состояния массива горных пород и прогноза геодинамических явлений включает расчет регистрируемых параметров на основе законов электродинамики и статистических моделей, а также экспериментальных лабораторных данных о взаимосвязи характеристик электромагнитных, акустических и световых импульсов, геометрических свойств сигнала импульсного излучения при различных режимах нагружения, включая применение автоматизированных и компьютеризированных систем для регистрации процессов в реальном масштабе времени.
2. Математическая модель ЭМИ включает функцию напряженности электрического поля одиночной трещины, решение волнового уравнения с учетом эффекта суперпозиции для системы трещин, прямое и обратное преобразование Фурье, учет зату-

хания электромагнитного сигнала в проводящей среде за счет скин-эффекта. Основным результатом расчетной модели является амплитудный спектр ЭМИ.

3. Основными элементами аппаратных комплексов являются: приемное устройство (антенна); усилитель; аналого-цифровой преобразователь; устройства первичной обработки импульсов, визуализации; программное обеспечение для окончательной обработки информации. Прогноз вероятности динамических проявлений горного давления на основе одиночных критических параметров (амплитуды или частоты импульсов ЭМИ) показал недостаточную достоверность. Наиболее пер-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dependent scattering criterion modification of disordered dispersed particulate medium with the consideration of particle random distribution and high complex refractive index effects / Z. Aoyu, W. Fuqiang, D. Yan, Y. Dongling, X. Weixin // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. – V. 197. – 123331.
2. Yang C.-K., Van Der Drift E.W.J.M., French P.J. Review of scaling effects on physical properties and practicalities of cantilever sensors // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2022. – V. 2 (10). – 103002.
3. Килькеев Р.Ш., Юн Р. Электрические явления при деформировании горных пород // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 1979. – № 2. – С. 102–105.
4. Subsurface waste heat recovery from the abandoned steam assisted gravity drainage (SAGD) operations / C. Wei, A. Nawaz, D. Nath, M. Zirrahi, H. Hassanzadeh // *Energy*. – 2022. – V. 256. – 124615.
5. Hwang J.-D., Liu W.-Y. Hybrid visible-blind ultraviolet photodetector based on NiO thin-film phototransistor and p-NiO/n-Si heterojunction diode // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2022. – V. 149. – 106858.
6. Воробьев А.А. Равновесие и преобразование видов энергии в недрах. – Томск: Изд-во Томского университета, 1980. – 212 с.
7. Progress and trends in non-destructive testing for thermal barrier coatings based on infrared thermography: a review / J. Zhu, Z. Mao, D. Wu, (...), W. Zhu, Z. Liu // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2022. – V. 41 (3). – 49.
8. Pawel D. The azimuths difference method as an effective method of determining the value of horizontal stress acting on mining excavations in underground mines // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings. – Albena, Bulgaria, 2018. – P. 913–924.
9. Glen A.R., Bredy B.T. Laboratory investigation of the electrodynamic of rock fracture // *Nature*. – 1986. – V. 321. – № 6069.
10. Ogawa T. Analysis of measurement techniques of electric fields and currents in the atmosphere // *Kyoto University*. – 1973. – № 13. – P. 111–137.
11. Chi-Yu King. Electromagnetic emission before earthquakes // *Nature*. – 1983. – V. 301. – № 3. – P. 377.
12. Simulation of a fire occurred upon the ventilation network of praid salt mine / D. Cioclea, I. Gherghe, C. Lupu, M.C. Suvar, C. Boanta, F. Radoi, C. Tomescu, V.M. Pasculescu // 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014. Conference Proceedings. – Bulgaria, STEF92 Technology Ltd, 2014. – P. 537–544.
13. Pimonov A.G., Ivanov V.V. Simulation model for the process of crack formation at fracture centers in rocks // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 1990. – № 3. – С. 34–40.
14. Hydrogeological investigations in predicting UCG process influence on groundwater environment in Poland / P. Bukowski, B. Tomaszewska, M. Bukowska, L. Pajak, K. Niedbalska // 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015. – Sofia, 2015. – P. 375–382.
15. Kovin O.N. Assessment of the prospective water inflow hazards using georadar: case study of upper Kama potash deposit // *Mine Water: Technological and Environmental Challenges. Proceedings of International Mine Water Association Conference*. – Perm: Perm State University, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of RAS, 2019. – P. 23–27.
16. The counting and triggers signals formation system for gamma-telescope GAMMA-400 / I.V. Arkhangel'skaja, A.I. Arkhangel'skiy, E.N. Chasovikov, A.M. Galper, M.D. Kheymits, A.E. Murchenko, Y.T. Yurkin // *Physics Procedia. Fundamental Research in Particle Physics and Cosmophysics*. – 2015. – V. 74. – P. 212–219.
17. Design of conception on lightning monitoring system for strikes to structures / V. Shostak, R. Prylepa, O. Kozlov, V. Brzhezitsky // *Technology audit and production reserves*. – 2017. – V. 6. – № 1 (38). – P. 47–59.
18. Integration of robotics design into the learning process at school / A. Kozhagul, Y. Bidaibekov, B. Bostanov, N. Pak, Z. Kozhagulova // *Periodico Tche Quimica*. – 2020. – V. 17. – № 35. – С. 404–424.
19. Мальшин А.А., Дочкин А.С. Определение стадий деформационного разрушения горных пород по данным электромагнитного излучения // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2015. – № 4 (110). – С. 15–21.
20. Kazunina G.A., Malshin A.A. Study of the kinetics of damage accumulation in loaded materials based on impulse electromagnetic and photon emission // *Russian Physics Journal*. – 2009. – № 52 (6). – P. 598–601.
21. Kazunina G.A., Alekseev D.V. Kinetics and distribution clusters of damage in loaded materials: simulation with probabilistic cellular automaton // *Advanced materials research*. – 2013. – V. 705. – P. 191–196.
22. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения / М.В. Курленя, А.Г. Вострецов, Г.И. Кулаков, Г.Е. Яковицкая. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 232 с.
23. A bolt loosening detection method based on patch antenna with overlapping sub-patch / S. Xue, X. Li, L. Xie, Z. Yi, G. Wan // *Structural Health Monitoring*. – 2022. – V. 21 (5). – P. 2231–2243.
24. О коэффициенте механо-электромагнитных преобразований при разрушении образцов горных пород / В.Н. Опарин, Г.Е. Яковицкая, А.Г. Вострецов, В.М. Серяков, А.В. Кривецкий // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2013. – № 3. – С. 3–20.
25. Модернизированная система АСИ-2 для контроля электромагнитной эмиссии образцов горных пород при их одноосном нагружении / В.Н. Опарин, А.В. Кривецкий, Г.Е. Яковицкая, А.В. Вострецов, А.А. Бизяев // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2010. – № 4. – С. 104–115.
26. Sharopova G., Bizyaev A., Jakovitskaya O. Analysis of electromagnetic emission signals accompanying the process of rock destruction // *Progress through Innovations Proceedings 2018 VIII International Academic and Research Conference of Graduate and Post graduate Students*. – Novosibirsk, 2018. – P. 159–160.
27. Вострецов А.Г., Бизяев А.А., Яковицкая Г.Е. Экспериментальные исследования по синхронной регистрации механических и электромагнитных параметров сигналов ЭМИ при нагружении образцов горных пород // *Доклады Академии наук высшей школы РФ*. – 2018. – № 3 (40). – С. 38–46.
28. Измерительная система синхронной регистрации сигналов ЭМИ и механических параметров деформирования образцов горных пород в лабораторных экспериментах / А.Г. Вострецов,

- Г.И. Кулаков, А.А. Бизяев, Г.Е. Яковицкая // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 6. – С. 204–210.
29. Characteristics and precursor information of electromagnetic signals of mining induced coal and gas outburst / L. Qiu, Z. Li, E. Wang, Z. Liu, J. Ou, X. Li, M. Ali, Y. Zhang, S. Xia // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2018. – V. 54. – P. 206–215
30. Measurement of the stress field of a tunnel through its rock EMR / L. Qiu, E. Wang, D. Song, Z. Liu, R. Shen, G. Lv, Z. Xu // Journal Geophys. – 2017. – V. 14. – P. 949–959.
31. Changes in frequency of electromagnetic radiation from loaded coal rock / D. Song, E. Wang, X. Song, P. Jin, L. Qiu // Rock Mech Rock. – 2016. – V. 49. – P. 291–302.
32. Use of electromagnetic radiation from fractures for mining-induced stress field assessment / D. Song, E. Wang, X. He, H. Jia, L. Qiu, P. Chen, S. Wang // Journal Geophys. – 2018. – V. 15. – P. 1093–1103.
33. Иванов В.В., Простов С.М. Параметры импульсного электромагнитного излучения при хрупком разрушении горных пород // Изв. вузов. Горный журнал. – 1981. – № 2. – С. 1–4.
34. A novel method for suppressing phase retrieval error caused by scanning based on amplitude correlative in-situ matching / X. Liu, Y. Liu, H. Jiang, (...), W. Zheng, Q. Tan // Optics and Lasers in Engineering. – 2022. – V. 152. – 106978.
35. Multi-sensor approach combined with Pedological investigations to understand site-specific variability of soil properties and Potentially Toxic Elements (PTEs) content of an industrial contaminated area / S. Vingiani, A. Agrillo, R. De Mascellis, (...), F.A. Mileti, F. Terribile // Applied Sciences (Switzerland). – 2022. – V. 12 (8). – 3993.
36. Multi-sensor measurement and data fusion technology for manufacturing process monitoring: a literature review / L. Kong, X. Peng, Y. Chen, P. Wang, M. Xu // International Journal of Extreme Manufacturing. – 2020. – V. 2 (2). – 022001.
37. Простов С.М., Дырдин В.В., Хмяляйнен В.А. Электромагнитный бесконтактный геоконтроль. – Кемерово: КузГТУ, 2002. – 132 с.
38. Способ прогноза разрушения горных пород и устройство для его осуществления: пат. Рос. Федерация, № 2137920, заявл. 01.08.1997; опубл. 20.09.1999.
39. Способ прогноза разрушения массива горных пород и устройство для его осуществления: пат. Рос. Федерация, № 2289693, заявл. 08.07.2005; опубл. 20.12.2006.
40. Бизяев А.А., Вострцов А.Г., Яковицкая Г.Е. Регистрационно-диагностический комплекс РДК РЭМИ-3 и экспериментальные исследования разрушения горных пород в условиях подземных горных выработок Таштагольского месторождения // Доклады Академии наук высшей школы РФ. – 2015. – № 3 (28). – С. 29–38.
41. Способ определения удароопасности массива горных пород по электромагнитной эмиссии и устройство для его: пат. Рос. Федерация, № 2535329, заявл. 16.10.2013; опубл. 10.12.2014.
42. Яковлев Д.В., Мулев С.Н. Опыт применения многофункциональной геофизической аппаратуры АНГЕЛ-М в угольной и рудной промышленности // Уголь. – 2014. – № 10 (1063). – С. 14–19.

Поступила 14.09.2022 г.

Прошла рецензирование 16.11.2022 г.

Информация об авторах

Простов С.М., доктор технических наук, профессор кафедры строительного производства и экспертизы недвижимости, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева.

Разумов Е.Е., ассистент, научный сотрудник лаборатории геофизических исследований Акционерного Общества «Научно-исследовательский институт горной геомеханики маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр ВНИМИ».

Мулев С.Н., директор по науке Акционерного Общества «Научно-исследовательский институт горной геомеханики маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр ВНИМИ».

Шабанов Е.А., кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительного производства и экспертизы, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева.

UDC 622.831:537.531

CALCULATION AND HARDWARE BASE FOR GEOMONITORING THE STATE OF THE ARRAY BY REGISTERING NATURAL ELECTROMAGNETIC RADIATION

Sergey M. Prostov¹,
psm.kem@mail.ru

Egor E. Razumov²,
razumov@vnimi.ru

Sergey N. Mulev²,
smuleva@yandex.ru

Evgeny A. Shabanov¹,
evgenshab@mail.ru

¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28, Vesennaya street, Kemerovo, 650002, Russia.

² Joint-Stock Company «Scientific Research Institute of Mining Geomechanics of Surveying – Intersectoral Research Center VNIMI»,
1, Sosnovy Bor street, Kemerovo, 650002, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to develop a promising method for predicting the impact hazard of the array according to the parameters of natural electromagnetic radiation that occurs during cracking in rocks. The existing methods of interpretation of geophysical monitoring data do not take into account the relationship of electromagnetic radiation parameters with the main geomechanical criteria determining the probability of a mountain impact: the concentration of stresses in the array and the location of their maximum.

The main aim is to establish rational parameters for further experimental substantiation of the criteria for local prediction of impact hazard by the electromagnetic radiation registration method based on the experimental equipment «Angel-M» developed at the MNC.

Objects: massifs of rocks prone to dynamic manifestations of mountain pressure at Kuzbass mining enterprises (Tashtagolskaya mine, depth 700 m; Ziminka mine, depth 300 m; mine no. 12, depth 340 m).

Methods: analysis of the physical mechanisms of electrification of rocks in the field of mechanical stresses based on the fundamental laws of solid state physics and electrostatics, experimental and theoretical foundations of the method of recording electromagnetic radiation in laboratory and field conditions.

Results. The paper considers the physical prerequisites for electromagnetic radiation occurrence during the destruction of solids and rocks, the main theoretical and experimental results obtained in this field by leading scientific teams. A method for calculating the amplitude-frequency response of electromagnetic radiation during fracturing in rocks is described, including the solution of the wave equation, the forward and inverse Fourier transform, the effects of superposition of crack systems and electromagnetic radiation attenuation in a conductive medium. A promising method for predicting the impact hazard of an array by the electromagnetic radiation registration method is substantiated on the basis of complex criteria indirectly interrelated with the fundamental geomechanical parameters of the array (stress concentrations at their maximum point and the distance from the contour to this point): the average amplitude of pulses during the registration interval and the steepness of the pulse rate graph.

Key words:

Geophysical forecast, electromagnetic radiation, rock destruction, disturbance of natural electric fields, wave equation, Fourier transforms, amplitude-frequency response, hardware complex, shock hazard forecast, complex criterion.

REFERENCES

1. Aoyu Z., Fuqiang W., Yan D., Dongling Y., Weixin X. Dependent scattering criterion modification of disordered dispersed particulate medium with the consideration of particle random distribution and high complex refractive index effects. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 197, 123331.
2. Yang C.-K., Van Der Drift E.W.J.M., French P.J. Review of scaling effects on physical properties and practicalities of cantilever sensors. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2022, vol. 2(10), 103002.
3. Kilkeyev R.S., Yun R. Electrical phenomena during deformation of rocks. *Soviet Mining Science*, 1979, no. 2, pp. 102–105. In Rus.
4. Wei C., Nawaz A., Nath D., Zirrahi M., Hassanzadeh H. Subsurface waste heat recovery from the abandoned steam assisted gravity drainage (SAGD) operations. *Energy*, 2022, vol. 256, 124615.
5. Hwang J.-D., Liu W.-Y. Hybrid visible-blind ultraviolet photodetector based on NiO thin-film phototransistor and p-NiO/n-Si heterojunction diode. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2022, vol. 149, 106858.
6. Vorobyev A.A. *Ravnovesie i preobrazovanie vidov energii v nedrakh* [Equilibrium and transformation of types of energy in the subsurface]. Tomsk, Tomsk University Publ. House, 1980. 212 p.
7. Zhu J., Mao Z., Wu D., Zhu W., Liu Z. Progress and trends in non-destructive testing for thermal barrier coatings based on infrared thermography: a review. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2022, vol. 41 (3), 49.
8. Pawelus D. The azimuths difference method as an effective method of determining the value of horizontal stress acting on mining excavations in underground mines. *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings*. Albena, Bulgaria, 2018. pp. 913–924.
9. Bredy B.T., Rowell G.F. Laboratory investigation of the electro-dynamics of rock fracture. *Nature*, 1986, vol. 321, no. 6069.
10. Ogawa T. Analysis of measurement techniques of electric fields and currents in the atmosphere. *Kyoto University*, 1973, no. 13, pp. 111–137.

11. Chi-Yu King. Electromagnetic emission before earthquakes. *Nature*, 1983, vol. 301, no. 3, pp. 377.
12. Cioclea D., Gherghel I., Lupu C., Suvar M.C., Boanta C., Radoi F., Tomescu C., Pasculescu V.M. Simulation of a fire occurred upon the ventilation network of praid salt mine. *14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014. Conference Proceedings*. Bulgaria, STEF92 Technology Ltd, 2014. pp. 537–544.
13. Pimonov A.G., Ivanov V.V. Simulation model for the process of crack formation at fracture centers in rocks. *Physico-technical problems of mineral development*, 1990, no. 3, pp. 34–40. In Rus.
14. Bukowski P., Tomaszewska B., Bukowska M., Pajak L., Niedbalska K. Hydrogeological investigations in predicting UCG process influence on groundwater environment in Poland. *15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2015*. Sofia, 2015. pp. 375–382.
15. Kovin O.N. Assessment of the prospective water inflow hazards using georadar: case study of upper Kama potash deposit. *Mine Water: Technological and Environmental Challenges. Proceedings of International Mine Water Association Conference*. Perm, Perm State University, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of RAS, 2019. pp. 23–27.
16. Arkhangel'skaja I.V., Arkhangel'skiy A.I., Chasovikov E.N., Galper A.M., Kheymits M.D., Murchenko A.E., Yurkin Y.T. The counting and triggers signals formation system for gamma-telescope GAMMA-400. *Physics Procedia. Fundamental Research in Particle Physics and Cosmophysics*, 2015, vol. 74, pp. 212–219.
17. Shostak V., Prylepa R., Kozlov O., Brzhezitskiy V. Design of conception on lightning monitoring system for strikes to structures. *Technology audit and production reserves*, 2017, vol. 6, no. 1 (38), pp. 47–59.
18. Kozhagul A., Bidaibekov Y., Bostanov B., Pak N., Kozhagulova Z. Integration of robotics design into the learning process at school. *Periodico Tchê Química*, 2020, vol. 17, no. 35, pp. 404–424.
19. Malshin A.A., Dochkin A. S. Determination of the stages of deformation destruction of rocks according to electromagnetic radiation data. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2015, no. 4 (110), pp. 15–21. In Rus.
20. Kazunina G.A., Malshin A.A. Study of the kinetics of damage accumulation in loaded materials based on im-pulse electro-magnetic and photon emission. *Russian Physics Journal*, 2009, no. 52 (6), pp. 598–601.
21. Kazunina G.A., Alekseev D.V. Kinetics and distribution clusters of damage in loaded materials: simulation with probabilistic cellular automaton. *Advanced materials research*, 2013, no. 705, pp. 191–196.
22. Kurlenya M.V., Vostretsov A.G., Kulakov G.I., Yakovitskaya G.E. *Registratsiya i obrabotka signalov elektromagnitnogo izlucheniya* [Registration and processing of electromagnetic radiation signals]. Novosibirsk, SB RAS Publ. house, 2000. 232 p.
23. Xue S., Li X., Xie L., Yi Z., Wan G. A bolt loosening detection method based on patch antenna with overlapping sub-patch. *Structural Health Monitoring*, 2022, vol. 21(5), pp. 2231–2243.
24. Oparin V.N., Yakovitskaya G.E., Vostretsov A.G., Seryakov V.M., Krivetskiy A.V. Mechanical-electromagnetic transformations in rocks on failure. *Journal of Mining Science*, 2013, no. 3, pp. 3–20. In Rus.
25. Oparin V.N., Krivetskiy A.V., Yakovitskaya G.E., Vostretsov A.G., Bizyaev A.A. Modernized electromagnetic emission control system for uniaxial testing of rocks. *Journal of Mining Science*, 2010, vol. 46, no. 4, pp. 458–467.
26. Shaporeva G., Bizyaev A., Yakovitskaya O. Analysis of electromagnetic emission signals accompanying the process of rock destruction. *Progress through Innovations Proceedings 2018 VIIth International Academic and Research Conference of Graduate and Post graduate Students*. Novosibirsk, 2018. pp. 159–160.
27. Vostretsov A.G., Bizyaev A.A., Yakovitskaya G.E. Eksperimentalnye issledovaniya po sinkhronnoy registratsii mekhanicheskikh i elektromagnitnykh parametrov signalov EMI pri nagruzhenii obraztsov gornykh porod [Experimental investigations on synchronous recording of mechanical and electromagnetic parameters of EMP signals under loading of mineral rocks]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiiskoi Federatsii*, 2018, no. 3 (40), pp. 38–46.
28. Vostretsov A.O., Kulakov O.I., Bizyaev A.A., Yakovitskaya O.E. Instrumentation system for synchronous recording of EME and mechanical deformation parameters in lab-scale tests of rock specimens. *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53, no. 6, pp. 1152–1158.
29. Qiu L., Li Z., Wang E., Liu Z., Ou J., Li X., Ali M., Zhang Y., Xia S. Characteristics and precursor information of electromagnetic signals of mining induced coal and gas outburst. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, vol. 54, pp. 206–215.
30. Qiu L., Wang E., Song D., Liu Z., Shen R., Lv G., Xu Z. Measurement of the stress field of a tunnel through its rock EMR. *Journal Geophys.* 2017, vol. 14, pp. 949–959.
31. Song D., Wang E., Song X., Jin P., Qiu L. Changes in frequency of electromagnetic radiation from loaded coal rock. *Rock Mech Rock*, 2016, vol. 49, pp. 291–302.
32. Song D., Wang E., He X., Jia H., Qiu L., Chen P., Wang S. Use of electromagnetic radiation from fractures for mining-induced stress field assessment. *Journal Geophys.* 2018, vol. 15, pp. 1093–1103.
33. Ivanov V.V., Prostov S.M. Parametry impulsnogo elektromagnitnogo izlucheniya pri khrupkom razrushenii gornykh porod [Parameters of pulsed electromagnetic radiation in brittle destruction of rocks]. *Mining journal*, 1981, no. 2, pp. 1–4.
34. Liu X., Liu Y., Jiang H., Zheng W., Tan Q. A novel method for suppressing phase retrieval error caused by scanning based on amplitude correlative in-situ matching. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, vol. 152, 106978.
35. Vingiani S., Agrillo A., De Mascellis R., Mileti F.A., Terribile F. Multi-sensor approach combined with Pedological investigations to understand site-specific variability of soil properties and Potentially Toxic Elements (PTEs) content of an industrial contaminated area. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2022, vol. 12 (8), 3993.
36. Kong L., Peng X., Chen Y., Wang P., Xu M. Multi-sensor measurement and data fusion technology for manufacturing process monitoring: a literature review. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2020, vol. 2 (2), 022001.
37. Prostov S.M., Dyrdin V.V., Khyamyalyaynen V.A. *Elektromagnitnyy beskontaktny geokontrol* [Electromagnetic contactless geokontrol]. Kemerovo, KuzSTU Publ., 2002. 132 p.
38. Kurlenya M.V., Kulakov G.I., Vostretsov A.G., Kushnir V.I., Yakovitskaya G.Y. *Sposob prognoza razrusheniya gornykh porod i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for predicting the destruction of rocks and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2137920, 1999.
39. Oparin V.N., Vostretsov A.G., Yakovitskaya G.E. *Sposob prognoza razlozheniya gornykh porod i ustroystvo dlyayego osushchestvleniya* [Method of forecasting the destruction of a rock mass and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2289693, 2006.
40. Bizyaev A.A., Vostretsov A.G., Yakovitskaya G.E. Registratsionno-diagnosticheskiy kompleks RDK REMI-3 i eksperimentalnye issledovaniya razrusheniya gornykh porod v usloviyakh podzemnykh gornykh vyrabotok Tashtagolskogo mestorozhdeniya [The recording-diagnostic equipment RDK REMI-3 and experimental investigation of rock fracturing under conditions of underground working in the Tashtagolsky field]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly RF*, 2015, no. 3 (28), pp. 29–38.
41. Yakovlev D.V., Mulov S.N., Tsirel S.V., Maksimov A.S., Mazyra M.D., Bondarev A.V., Badanin A.I. *Sposob opredeleniya udaropasnosti massiva gornykh porod po elektromagnitnoy emissii i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for determining the impact hazard of a rock mass by electromagnetic emission and a device for it]. Patent RF, no. 2535329, 2013.
42. Yakovlev D.V., Mulev S.N. Experience of Angel-M multipurpose geophysical equipment use in coal industry and ore mining. *Coal*, 2014, no. 10 (1063), pp. 14–19. In Rus.

Received: 14 September 2022.

Reviewed: 16 November 2022.

Information about the authors

Sergey M. Prostov, Dr. Sc., professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

Egor E. Razumov, assistant, researcher, Laboratory of Geophysical Research, Joint-Stock Company «Scientific Research Institute of Mining Geomechanics of Surveying – Intersectoral Research Center VNIMI».

Sergey N. Mulev, Director of Science, Joint-Stock Company «Scientific Research Institute of Mining Geomechanics of Surveying – Intersectoral Research Center VNIMI».

Evgeny A. Shabanov, Cand. Sc., associate professor, Head of the Department of Construction Production and Expertise, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.