

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ НАРУШЕНИИ СПЛОШНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

А. А. Мешков¹, Н. В. Ледяев¹, А. А. Хамутский¹, А. В. Савченко², А. А. Бизяев²

¹ АО «СУЭК-Кузбасс», г. Ленинск-Кузнецкий, 652507, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, г. Новосибирск 630091, Россия

Аннотация: Проведены натурные измерения сигналов электромагнитной эмиссии в окрестностях зон геологических нарушений в горных выработках шахты «Имени С. М. Кирова» АО «СУЭК-Кузбасс» стационарными блоками регистрации в режиме реального времени с передачей информации на сервер, расположенный на поверхности. Разработанная аппаратура позволила зарегистрировать изменения в амплитудном спектре сигналов в диапазоне до 1,0 МГц. Особенно выделяются на общем фоне сигналы электромагнитной эмиссии, связанные с активным трещинообразованием. Определены параметры сигнала, предшествующие нарушению сплошности угля и вмещающих горных пород. В зонах разрушения и разуплотнения горных пород резко возрастает число единичных высокоэнергетических сигналов, и их амплитудные значения превышают уровень фона более чем в 5 раз. Показано, что перед началом разрушения массива горных пород наряду с увеличением амплитуды электромагнитного излучения наблюдается появление высокочастотной составляющей в спектре сигнала, что позволяет более точно определить начало процесса разрушения горных пород. В разработанном комплексе прогноза опасных динамических явлений, определяемых методом электромагнитной эмиссии, реализован критерий обнаружения опасно нагруженных зон не только по амплитудной, но и по частотной составляющей сигнала, а также их комбинации.

Ключевые слова: горная выработка, электромагнитная эмиссия, регистрация, стационарный комплекс, разрушение, трещинообразование, обрушение, горное давление, динамические проявления горного давления, напряженно-деформированное состояние, электромагнитное излучение, натурные исследования.

Для цитирования: Мешков А. А., Ледяев Н. В., Хамутский А. А., Савченко А. В., Бизяев А. А. Совершенствование способа регистрации электромагнитного излучения при нарушении сплошности горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–2. – С. 135–148. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_135.

Improvement of the method registration electromagnetic radiation preceded to rock failure

A. A. Meshkov¹, N. V. Ledyayev¹, A. A. Khamutsky¹, A. V. Savchenko², A. A. Bizyaev²

¹ «SUEK – Kuzbass» JSC, Leninsk-Kuznetskiy, 652507, Russia;

² Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630091, Russia

Abstract: In-situ electromagnetic radiation signals are recorded in the vicinity of faulting zones in enclosing rock mass around roadways in Kirov S. M. coalmine of «SUEK-Kuzbass» using stationary instrumentation, in real time and with data transfer to a surface server. The developed instrumentation made it possible to record variations in the signal amplitude spectrum in the range to 1.0 MHz. The EMR signals associated with dynamic fracturing are specifically pronounced against the general background. Parameters of a signal preceding discontinuity in coal and host rocks are determined. In the zones of softening and fracture of rocks, the number of single high-energy signals jumps, and their amplitudes exceed the overall background level by more than 5 times. It is shown that prior to rock failure, alongside with an increase in the EMR amplitude, a high-frequency component appears in the signal spectrum, which enables more exact detection of failure initiation. Within the package developed for predicting hazardous gas-dynamic events definable using the method of electromagnetic emission, the identification criterion of hazardous zones by the signal amplitude, frequency and their combination is implemented.

Key words: mine working, electromagnetic emission, recording, stationary instrumentation, rock failure, cracking, crushing, overburden pressure, pressure-induced dynamic events, stress-strain state, electromagnetic radiation, in-situ research.

For citation: Meshkov A. A., Ledyayev N. V., Khamutsky A. A., Savchenko A. V., Bizyaev A. A. Improvement of the method registration electromagnetic radiation preceded to rock failure. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6–2):135–148. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_135.

Введение

Одной из главных задач, стоящих перед руководством горнодобывающего предприятия, является обеспечение условий безопасности труда рабочих. Увеличение глубины и объемов горных работ сопровождается изменением напряженно-деформированного состояния в массиве и нарушением сплошности в нем [1], которое может привести к динамическим проявлениям, в том числе в катастрофической форме [2]. Прогнозирование динамического проявления горного давления [3, 4] на добывающих предприятиях позволяет проводить комплекс своевременных мер по предупреждению опасной ситуации [5–10]. С увеличением глубины горной выработки интенсивность трещинообразования в массиве увеличивается, что накладывает повышенные требования к оперативности выявления опасных участков [11]. Известно [12–14], что разрушение горной породы проходит в несколько стадий: от формирования микротрещин, образующих магистральную трещину, рост которой приводит

к нарушению сплошности, и вплоть до обрушения породы. Также известно, что нарушению сплошности горной породы сопутствует электромагнитное излучение [11, 15–28], спектр которого меняется в зависимости от стадии разрушения [11–13, 16, 19, 27]. В лабораторных условиях при разрушении горной породы наблюдается увеличение количества одиночных импульсов [11 – 13], сигнал по мере разрушения смещается в верхнюю область частотного спектра, а потом обратно в нижнюю, но с большей энергией излучения.

Одним из перспективных и быстро развивающихся геофизических методов прогнозирования динамических проявлений горного давления является регистрация и интерпретация сигнала электромагнитного излучения [6 –11, 18, 19, 21, 25, 27], сопутствующего процессу нарушения сплошности горной породы. Этот метод является бесконтактным, неразрушающим горный массив и находит своё применение в диагностике трещинообразования бетона [5], прогнозе землетрясений [1].

В натуральных условиях локализация участков с повышенным трещинообразованием методом электромагнитного излучения затруднена [6, 7, 15, 16, 19, 26], потому что нет связи параметров электромагнитного излучения с источником, отсутствует методика, позволяющая определять уровень опасности напряженного состояния в массиве горных пород с расположением источника излучения [11].

Поэтому требуется совершенствование способа и разработка технических средств для прогноза проявления динамических явлений и выработки критериев обнаружения опасно нагруженных зон, определяемых методом электромагнитной эмиссии.

Технический комплекс и методы обнаружения сигналов электромагнитного излучения горных пород, представляющих опасным динамическим проявлениям горного давления

Стационарный технический комплекс прогнозирования динамических

проявлений горного давления и выявления опасно нагруженных участков горной выработки методом электромагнитной эмиссии состоит из:

- системы регистрации, сбора и передачи данных;
- комплекса датчиков электромагнитной эмиссии, выполненных в виде антенн;
- сервера сбора и хранения данных.

Стационарный блок регистрации сигналов электромагнитной эмиссии (ЭМИ) предназначен для записи электромагнитного излучения горных пород при динамических проявлениях горного давления. Блок регистрации оснащён каналом передачи данных, позволяющим в режиме реального времени отправлять на поверхность данные об изменении напряженного состояния наблюдаемого массива горных пород.

На рис. 1 приведена структурная схема блока регистрации, передачи, обработки и хранения информации о динамических событиях и связанных с ними изменениях в сигнале электро-

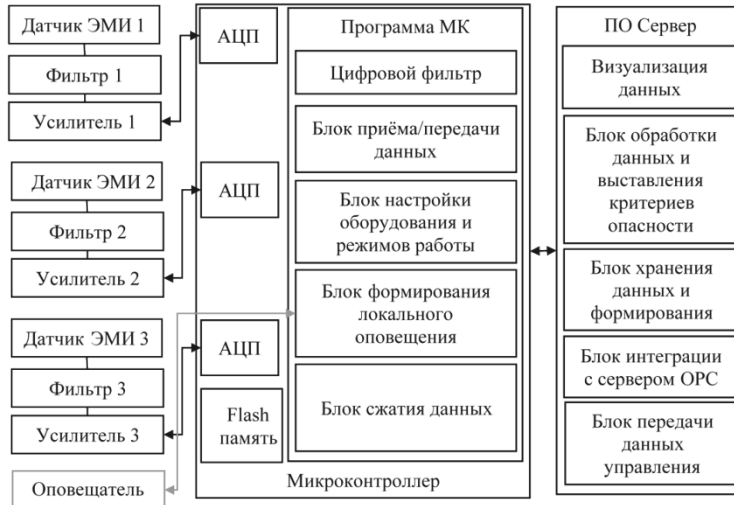


Рис. 1. Структурная схема регистрации, передачи, обработки и хранения сигналов ЭМИ
 Fig. 1. Block diagram of registration, transmission, processing and storage of Electromagnetic Radiation signals

магнитной эмиссии, произошедших на контролируемом участке измерений.

В структурной блок-схеме приняты следующие обозначения:

- Датчик ЭМИ — датчик электромагнитного излучения, предназначен для регистрации сигналов электромагнитной эмиссии в окрестности места наблюдения. Выполнен в виде ферритовой антенны.

- Фильтр — аппаратный фильтр, предназначенный для фильтрации электромагнитных импульсов техногенного происхождения.

- Усилитель — усилительный каскад, предназначен для увеличения уровня сигнала, поступающего с антенны, в 100 раз в частотном диапазоне до 1 МГц.

- АЦП — аналого-цифровой преобразователь, предназначен для преобразования аналогового сигнала в цифровой код.

- Цифровой фильтр — предназначен для цифровой фильтрации в заданном диапазоне частот.

- Блок приёма/передачи данных — программный код, позволяющий реализовывать процесс приёма и передачи данных.

Для определения возможных нарушений сплошности массива на исследуемом участке устанавливается

система датчиков, и по зарегистрированным с них сигналам ЭМИ формируется база данных нарушений, используемая в дальнейшем для идентификации типа нарушения в режиме наблюдения. Если фоновая составляющая сигнала ЭМИ превышена, то информация заносится в базу данных.

Технические характеристики стационарного регистратора приведены в таблице.

Стационарный блок может также работать в режимах накопления и прямой передачи данных. В режиме накопления данные накапливаются в энергонезависимую память, в режиме прямой передачи данных — информация по каналам связи передается на сервер. Блок регистрирует сигналы электромагнитного излучения, поступающего с антенны, и переводит их в показания средневыпрямленного напряжения амплитуды сигнала в цифровом формате, в отсчетах АЦП в диапазоне 0 – 4095. Шаг дискретизации 2×10^6 отсчет/с. Поток данных со скоростью 1.6–2.4 миллионов выборок в секунду обрабатывается в режиме реального времени непосредственно в стационарном блоке без задержек.

Технические характеристики стационарного регистратора **Stationary recorder specifications**

Описание	Значение
Чувствительность антенны, при отношении сигнал/шум 40 дБ	6мВ/м
Выходное напряжение антенны, соответствующее напряженности электрического поля 6 мВ/м	10мкВ
Рабочий диапазон частот антенны	10 Гц ÷ 1МГц
Нелинейность частотной характеристики на частоте 1 кГц	≤ 1 дБ
Разрядность АЦП	12
Интервал усреднения показаний	0,5 с
Объем энергонезависимой памяти	32 Гб
Тип компьютерного интерфейса	Ethernet
Время непрерывной работы от батареи	до 20 часов
Масса с элементами питания (аккумуляторы)	300 г

Передача данных по каналам связи в режиме реального времени происходит после их предварительной обработки и сжатия. Сжатие осуществляется путем усреднения значений сигнала на интервале наблюдения, фильтрации и перемещением окна наблюдения, устанавливаемого дополнительным параметром. На рис. 2 показан результат применения фильтра с окном усреднения интервала наблюдения.

Передача данных осуществляется по протоколу TCP-IP, реализованному на уровне приложения, учитывающему особенности канала связи в случаях изменения его пропускной способности.

Сервер сбора и хранения данных представляет собой персональный компьютер с установленным программным обеспечением и интерфейсом Ethernet для соединения с коммутатором, работающим со скоростью до 100 Мб/с. Для корректной работы и отображения данных объем оперативной памяти должен быть не менее 6 Гб, для хранения данных установлен дополнительный жесткий диск объемом 500 Гб. На сервере установлена операционная система Microsoft Windows 10. Программное обеспечение приложения написано с использованием библиотеки Microsoft Framework 4.5. Настройки протоколов, режимов и параметров системы распо-

ложены в меню программного обеспечения (рис. 3).

Поток данных, поступающий с устройства, сохраняется в файл, название которого соответствует времени и дате записи. Новый файл формируется каждые 10 минут, ссылка на него сохраняется в базе данных Microsoft SQL Server 2019. Взаимодействие с диспетчерским центром текущего визуального контроля шахты осуществляется через SQL-сервер.

Местом проведения наблюдений за состоянием массива горных пород методом регистрации сигналов электромагнитной эмиссии была выбрана шахта «Имени С. М. Кирова» АО «СУЭК-Кузбасс», расположенная в г. Ленинск-Кузнецком Кемеровской области. По метану шахта относится к категории сверхкатегорийная. Работы по выявлению опасных зон проводились в продуктивных пластах: «Болдыревский» — мощностью 1,8–2,4 м, угол залегания от 0 до 10°, и «Полевский» — мощностью 1,4–1,8 м, угол залегания от 0 до 12°. Абсолютная газообильность шахты — 181,7 м³/мин. На шахте 2 действующие лавы по добыче угля и 4 проходческих забоя. Исследования проводились в вентиляционной печи 2463, конвейерной печи 2463, в зоне влияния лавы и вблизи геологических нарушений.

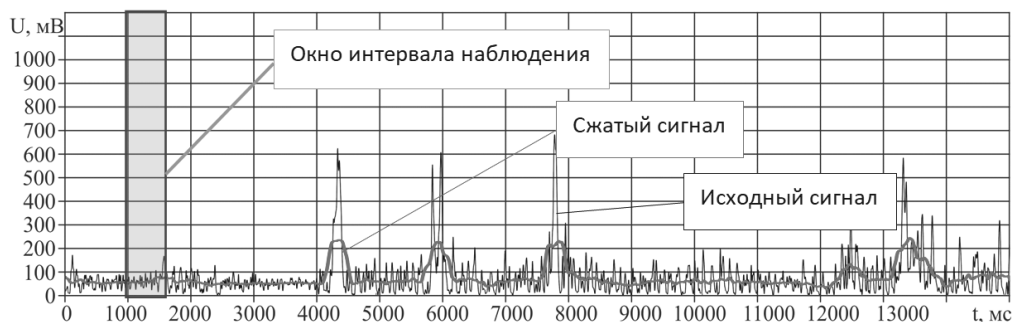


Рис. 2. Сжатие сигнала электромагнитной эмиссии
 Fig. 2. Compression of the electromagnetic emission signal

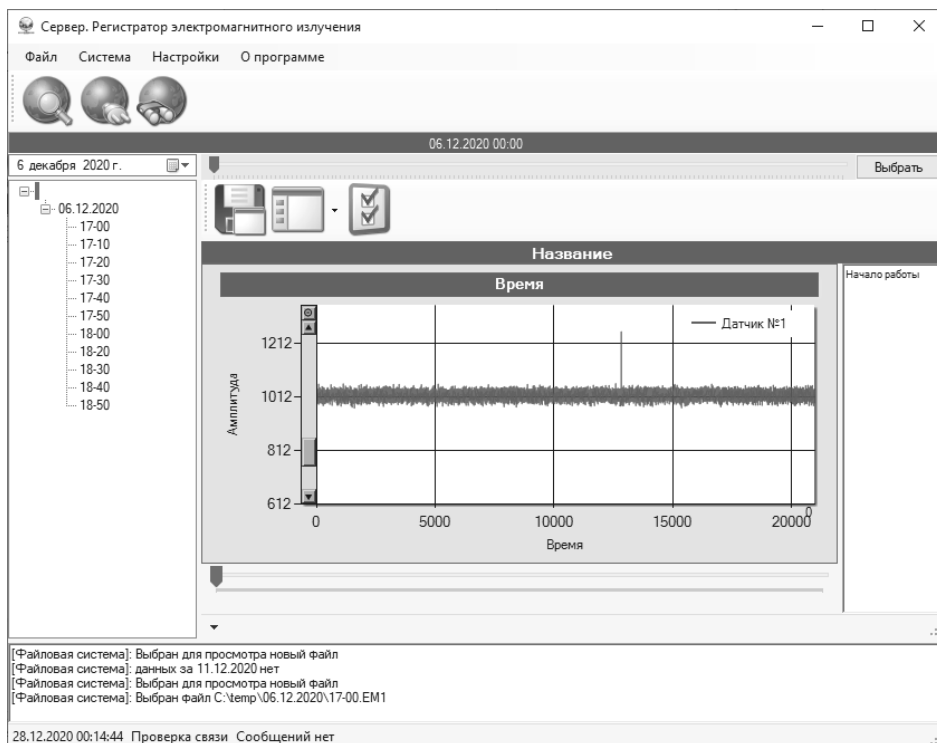


Рис. 3. Внешний вид программного обеспечения верхнего уровня
 Fig. 3. Top-level software appearance

Для оценки влияния наводок от электрической аппаратуры и силовых линий запись сигналов ЭМИ велась, в том числе, в непосредственной близости к участкам с наличием кабельной сети, подстанций и рабочих механизмов.

Фоновая составляющая сигналов электромагнитной эмиссии была определена в капитальных выработках и выработках вдали от ведения очистных работ, без геологических нарушений.

Результаты обработки сигналов электромагнитного излучения горных пород, находящихся в динамически неравновесном состоянии

Из анализа литературных источников [10–14] следует, что перед разрушением горных пород частота максимальной спектральной плотности ЭМИ вначале увеличивается, а затем снижа-

ется. В момент разрушения образцов наряду с низкочастотной возникает и недолго по времени существует высокочастотная составляющая. Максимальная спектральная амплитуда в момент, предшествующий нарушению сплошности образцов горных пород, сдвигается в область более высоких частот, а после нарушения сплошности вновь возвращается в область более низких частот.

Горная порода, находящаяся в неравновесном состоянии, испускает электромагнитное излучение в окружающее пространство выработки. Помимо этого в выработке работает шахтовое оборудование, генерирующее импульсные помехи, амплитуда и спектральная составляющая которых известны. В зарегистрированном сигнале присутствуют постоянная составляющая

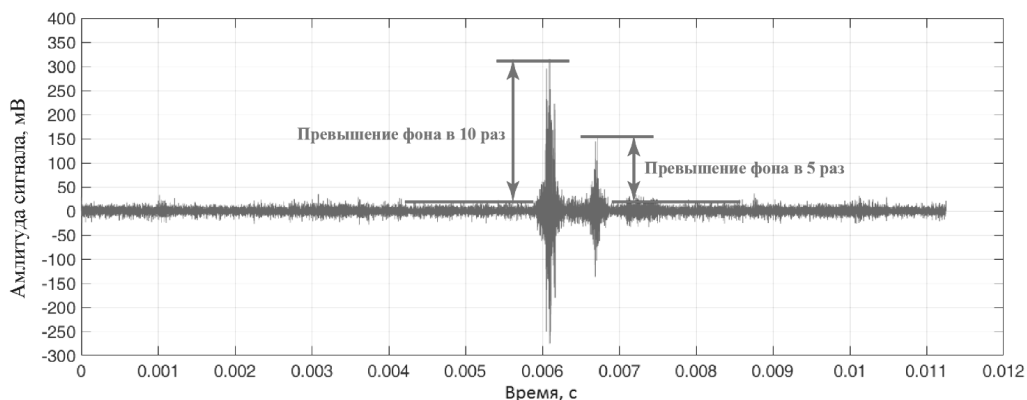


Рис. 4. Сигнал ЭМИ при трещинообразовании в горной породе

Fig. 4. Electromagnetic emission signal during cracking in a rock

и импульсные помехи от работы шахтового оборудования. После предварительного подавления импульсных помех скользящим фильтром Хампеля (Hampel) и наводок блоком фильтров с учётом зеркального эффекта от несущей частоты работающего оборудования получим фильтрованный сигнал, на котором выделяются всплески, связанные с активным трещинообразованием (рис. 4). В ходе многолетних измерений на шахте «Имени С. М. Кирова» не наблюдалось более 10-кратного превышения фона сигнала ЭМИ, и поэтому этот уровень был выставлен на приборе как критический.

Для детального анализа первого сигнала с максимальной амплитудой, приведенного на рис. 4, построим аналог спектрограммы, но с большей детализацией — непрерывное Вейвлет-преобразование. Его спектр приведен на рис. 5. В соответствии с S-образной кривой разрушения горной породы [12, 13] в полученном спектре выделяются стадии, характерные для процесса разрушения. Они характеризуются стадией, при которой произошло накопление микротрещин и образовалась магистральная трещина, при её прорастании и ветвлении спектр сигнала ЭМИ-излучения смещается из области низких частот

в высокочастотную область. На рис. 5 это схематически показано прямой с положительным коэффициентом угла наклона. В последней стадии происходит лавинное разрушение, с которым связано быстрое прорастание системы магистральных трещин и соответствующее нарастание низкочастотной составляющей с одновременным смещением спектра из высокочастотной области в низкочастотную, схематически это показано прямой с отрицательным коэффициентом угла наклона.

Рассмотрим ещё один пример сигнала, зарегистрированного в момент

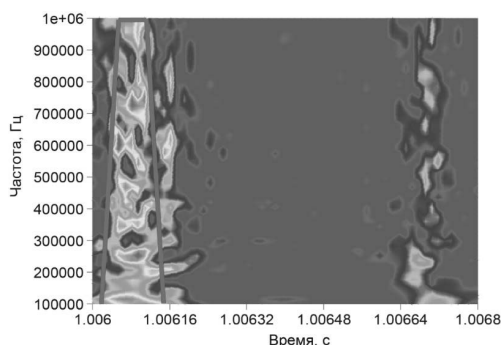


Рис. 5. Непрерывное Вейвлет-преобразование (спектр) при трещинообразовании в горной породе

Fig. 5. Continuous Wavelet transform (spectrum) during fracturing in a rock

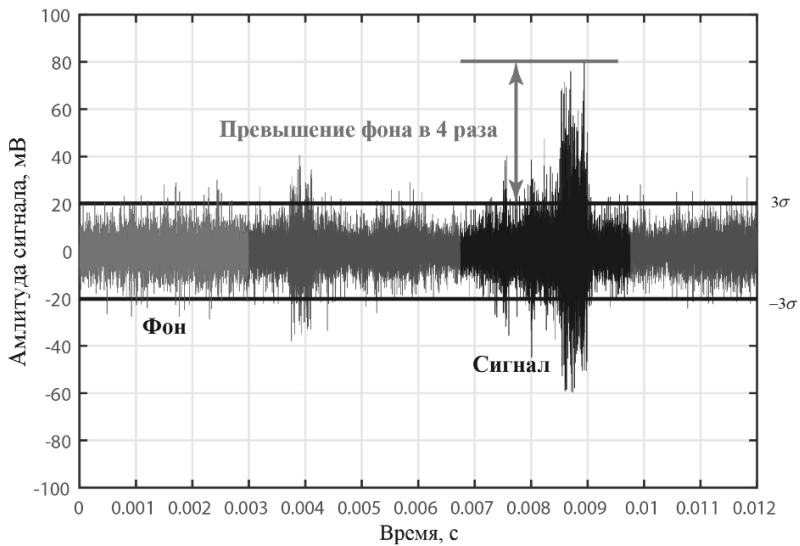


Рис. 6. Сигнал ЭМИ при трещинообразовании в горной породе
 Fig. 6. Electromagnetic emission signal during cracking in a rock

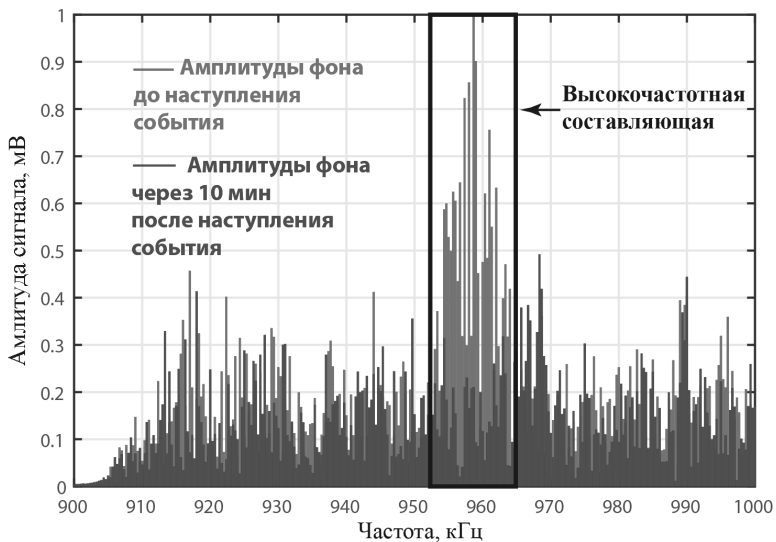


Рис. 7. Сопоставление двух фонов сигнала ЭМИ
 Fig. 7. Comparison of two backgrounds of an electromagnetic emission signal

активного трещинообразования, которое вызвало превышение уровня фона ЭМИ в 4 раза (рис. 6). Разделим фрагмент записи, содержащей отклик на событие, на две части: фон и изменение сигнала ЭМИ при трещинообразовании.

Сопоставим спектры двух сигналов, выбранных за 10 мин и несколько миллисекунд до события. В спектре ЭМИ, предшествующего динамическому событию, отчётливо выделяются амплитуды в высокочастотной части, в диапазоне от 0,9 до 1,0 МГц (рис 7).

Сравнивая амплитуды двух сигналов, видим, что они отличаются в 2 раза.

В период затишья, когда в лаве не работает комбайн, фоновый уровень сигналов ЭМИ уменьшается. На спектрограмме (рис. 8) прослеживаются импульсные помехи на соответствующих частотах работающего оборудования, импульсных блоков питания и т.д.

При разрушении угля комбайном в спектрограмме отчётливо прослеживается рост уровня сигнала ЭМИ в низкочастотной области 1–45 кГц.

В зависимости от характера ведения горных работ и разрушения массива угля прослеживаются изменения амплитуд сигнала в высокочастотной части спектра в диапазоне частот 800–810 кГц (рис. 9).

Проведенные наблюдения за изменением уровня сигналов электромагнитной эмиссии в зоне установки датчиков позволили зафиксировать увеличение амплитудных значений в низкочастотной части спектра, связанное с процессом разрушения угля комбайном, и единичные события в высоко-

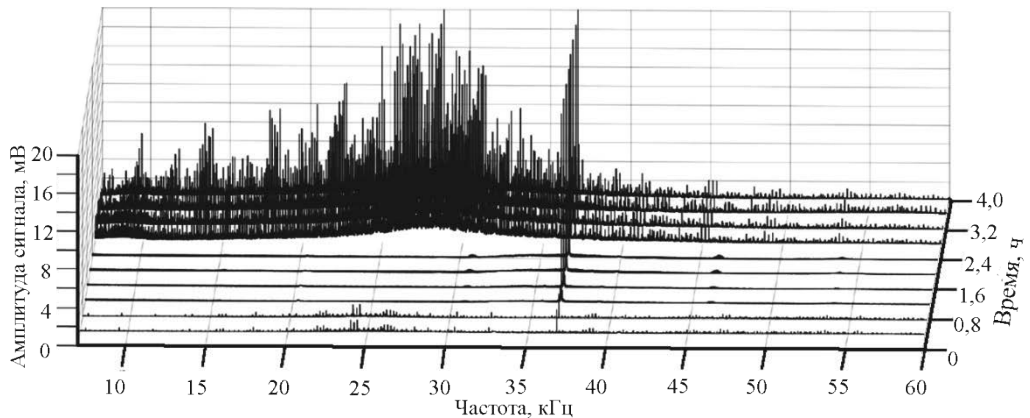


Рис. 8. Спектрограмма сигналов ЭМИ в моменты затишья и работы комбайна

Fig. 8. Spectrogram of electromagnetic emission signals during the moments of standstill and work of the combine

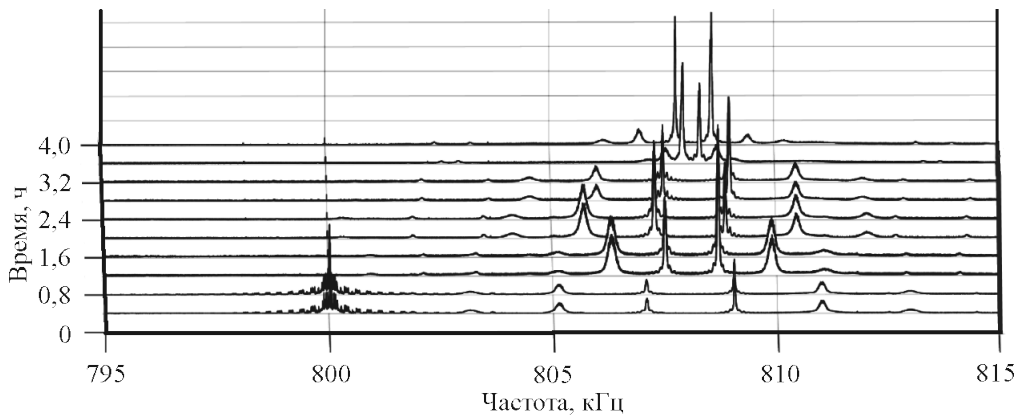


Рис. 9. Спектрограмма сигналов ЭМИ в высокочастотной области

Fig. 9. Spectrogram of electromagnetic emission signals in the high-frequency region

частотной части спектра, связанные с процессом активного трещинообразования в массиве горных пород. Интенсивность нарастания высокоэнергетических сигналов электромагнитной эмиссии на внешнее воздействие не превысило критического уровня и было безопасным для ведения горных работ. По данным служб, ответственных за контроль газодинамических явлений шахты «Имени С. М. Кирова», опасных явлений в период проведения работ не наблюдалось.

Заключение

Разработанная аппаратура позволила зарегистрировать изменение сигнала электромагнитной эмиссии в диапазоне до 1,0 МГц и выделить в высокочастотной части спектра активность, свойственную зарождению микротрещин или фазы, предшествующей разрушению массива горных пород.

В зонах разрушения и разуплотнения горных пород резко возрастает число единых высокоэнергетических сигналов, и их амплитудные значения превышают уровень фона более чем в 5 раз.

На протяжении всего периода наблюдений интенсивность нарастания высокоэнергетических сигналов электромагнитной эмиссии не превы-

сила 10-кратного значения фонового уровня, который для шахты «Имени С. М. Кирова» выбран критическим. Катастрофических проявлений горного давления в период проведения работ не наблюдалось.

В предложенном способе прогноза опасных динамических явлений реализован критерий обнаружения опасно нагруженных зон, определяемых методом электромагнитной эмиссии, не только по амплитудной, но и по частотной составляющей сигнала, а также их комбинации. Предложенный метод позволяет повысить точность прогноза динамических проявлений горного давления и повысить безопасности труда шахтеров.

Вклад авторов

Мешков А. А. – генерация идеи и постановка задачи исследования;

Ледяев Н. В. – организация и проведение работ по сбору данных;

Хамутский А. А. – подготовка технической документации и получение данных для анализа;

Савченко А. В. – анализ результатов исследования и написание текста статьи;

Бизяев А. А. – сбор данных в натуральных условиях.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Батугин А. С.* О роли тектонофизических исследований в оценке промышленной и геоэкологической безопасности разработки угольных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2–1. – С. 241–250. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-241-250.

2. *Курленя М. В., Цупов М. Н., Савченко А. В.* Влияние Бачатского землетрясения в Кузбассе на эмиссию метана в горные выработки угольных шахт // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 5. – С. 3–9. DOI: 10.15372/FTPPI20190501.

3. *Шемякин Е. И., Курленя М. В., Кулаков Г. И.* К вопросу о классификации горных ударов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1986. – № 5. – С. 3–11.

4. *Куксенко В. С., Инжеваткин И. Е., Манжиков Б. Ц.* Физические и методические основы прогнозирования горных ударов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1987. – № 1. – С. 9–22.

5. *Pamukcu S. and Cheng L.* Underground Sensing. Monitoring and Hazard Detection for Environment and Infrastructure. — Elsevier. Academic Press. — 2017. — 522 p.
6. *Song D., Wang E., He X., Jia H., Qiu L., Chen P. and Wang S.* Use of Electromagnetic Radiation from Fractures for Mining-Induced Stress Field Assessment // Journal of Geophysics and Engineering. 2018, vol. 15, no. 4, pp. 1093–1103. DOI: 10.1088/1742-2140/aaa26d.
7. *Rabinovitch A., Frid V., Bahat D.* Directionality of Electromagnetic Radiation from Fractures // International Journal of Fracture. 2017, vol. 204, no. 2, pp. 239–44. DOI:10.1007/s10704-016-0178-7.
8. *Song D., Wang E., Song X., Jin P., Qiu L.* Changes in Frequency of Electromagnetic Radiation from Loaded Coal Rock // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016, vol. 49, no. 1, pp. 291–302. DOI: 10.1007/s00603-015-0738-6.
9. *Song X., Li X., Li Z., Zhang Z., Cheng F., Chen P., Liu Y.* Study on the Characteristics of Coal Rock Electromagnetic Radiation (EMR) and the Main Influencing Factors // Journal of Applied Geophysics. 2018, vol. 148, pp. 216–225. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2017.11.018.
10. *Яковлев Д. В., Мулёв С. Н.* Опыт применения многофункциональной геофизической аппаратуры Ангел-М в угольной и рудной промышленности // Уголь. — 2014. № 10. — С.14 – 19.
11. *Бизяев А. А., Воронкина Н. М., Савченко А. В., Цупов М. Н.* Методика бесконтактного определения опасно нагруженных зон в массиве горной выработки // Уголь. — 2019. — № 11 (1124). — С. 27–31. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-11-27-31.
12. *Яковитская Г. Е.* Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. — Новосибирск: Параллель, 2008. — 315 с.
13. *Яковицкая Г. Е.* Прогноз динамических проявлений массива горных пород на основании регистрации сигналов электромагнитного излучения // Физические проблемы разрушения горных пород: Сб. трудов третьей международной научной конференции 9 – 14 сентября 2002 г. — Новосибирск: Наука. — 2003. — С. 98 – 103.
14. *Бизяев А. А., Вострецов 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 Российской Федерации. — 2015. — № 3 (28). — С. 29 – 38.
15. *Qiu L., Wang E., Song D., Liu Zh., Shen R., Lv G. and Xu Zh.* Measurement of the stress field of a tunnel through its rock EMR // J. Geophys. Eng. 2017, vol. 14, no. 4, pp. 949–973. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2017.11.018.
16. *Li D., Wang E., Li Zh., Jia H., Wang D., Kong X., Wang X., Wang X. and Ali M.* A causal mechanism for anomalous electromagnetic radiations from coal and rock failure // Geophysics. 2018, vol. 83, no. 6, pp. E423–E434. DOI: 10.1190/geo2018-0360.1.
17. *Li Ch., Sun X., Wang Ch., Xu X., Xie B. and Li J.* The correlated characteristics of micro-seismic and electromagnetic radiation signals on a deep blasting workface // J. Geophys. Eng. 2016, vol. 13, no. 6, pp. 1020–1035. DOI: 10.1088/1742-2132/13/6/1020.
18. *Wang E., He X., Liu X., Li Zh., Wang Ch. and Xiao D.* A non-contact mine pressure evaluation method by electromagnetic radiation // J. Appl. Geophys. 2011, vol. 75, no. 2, pp. 338–344. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2011.06.028.
19. *Song D., Wang E., He X., Jia H., Qiu L., Chen P. and Wang S.* Use of electromagnetic radiation from fractures for mining-induced stress field assessment // J. Geophys. Eng. 2018, vol. 15, no. 4, pp. 1093–1103. DOI: 10.1088/1742-2140/aaa26d.
20. *Li Zh., Niu Y., Wang E., Liu L., Wang H., Wang M. and Ali M.* Experimental Study on Electric Potential Response Characteristics of Gas-Bearing Coal During Deformation and Fracturing Process // Processes. 2019, vol. 7, no. 2, pp. 72–103. DOI: 10.3390/pr7020072.
21. *Frid V.* Calculation of Electromagnetic Radiation Criterion for Rockburst Hazard Forecast in Coal Mines // Pure Appl. Geophys. 2001, vol. 158, no. 5–6, pp. 931–944. DOI: 10.1007/PL00001214.

22. Di Y., Wang E. Electromagnetic radiation interference signal recognition in coal rock mining based on recurrent neural networks // *Geophysics*. 2021, vol. 86, no. 4, pp. K1–K10. DOI: 10.1190/geo2020-0726.1.

23. Hu S., Wang E., Liu X. Spatiotemporal multifractal characteristics of electromagnetic radiation in response to deep coal rock bursts // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2014, vol. 14, no. 8, pp. 2089–2103. DOI: 10.5194/nhess-14-2089-2014.

24. Song X., Li X., Li Zh., Zhang Zh., Cheng F., Chen P. and Liu Y. Study on the characteristics of coal rock electromagnetic radiation (EMR) and the main influencing factors // *J. Appl. Geophys.* 2018, vol. 148, pp. 216–225. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2017.11.018.

25. Li X., Wang E., Li Zh., Liu Zh., Song D. and Qiu L. Rock Burst Monitoring by Integrated Microseismic and Electromagnetic Radiation Methods // *Rock Mech. Rock Eng.* 2016, vol. 49, no. 11, pp. 4393–4406. DOI: 10.1007/s00603-016-1037-6.

26. Frid V. Electromagnetic radiation method water-infusion control in rockburst-prone strata // *J. Appl. Geophys.* 2000, vol. 43, no. 1, pp. 5–13. DOI: 10.1016/S0926-9851(99)00029-4.

27. Liu X., Zhang Zh., Wang E., Wang X., Yang B. and Wang H. Characteristics of electromagnetic radiation signal of coal and rock under uniaxial compression and its field application // *J. Earth Syst. Sci.* 2019, vol. 129, no 1, pp. 34-1–34-11. DOI: 10.1007/s12040-019-1309-0. **WAB**

REFERENCES

1. Batugin A. S. On the role of tectonophysical studies in the assessment of industrial and geocological safety of coal field development. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2–1, pp. 241–250. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-241-250.

2. Kurlenya M. V., Tsupov M. N., Savchenko A. V. Influence of the Bachatsky Earthquake on Methane Emission in Roadways in Coalmines. *Journal of Mining Science*. 2019, vol. 55, no. 5, pp. 695–700. DOI:10.1134/S1062739119056051.

3. Shemyakin E. I., Kurlenya M. V., Kulakov G. I. On the issue of rock burst classification. *Journal of Mining Science*. 1986, no. 5, pp. 3–11. [In Russ].

4. Kuksenko V. S., Inzhevatin I. E., Manzhikov B. C. Physical and methodological foundations of rock burst forecasting. *Journal of Mining Science*. 1987, no. 1, pp. 9–22. [In Russ].

5. Pamukcu S. and Cheng L. *Underground Sensing. Monitoring and Hazard Detection for Environment and Infrastructure*. Elsevier. Academic Press. 2017, 522 p.

6. Song D., Wang E., He X., Jia H., Qiu L., Chen P. and Wang S. Use of Electromagnetic Radiation from Fractures for Mining-Induced Stress Field Assessment. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2018, vol. 15, no. 4, pp. 1093–1103. DOI: 10.1088/1742-2140/aaa26d.

7. Rabinovitch A., Frid V., Bahat D. Directionality of Electromagnetic Radiation from Fractures. *International Journal of Fracture*. 2017, vol. 204, no. 2, pp. 239–244. DOI:10.1007/s10704-016-0178-7.

8. Song D., Wang E., Song X., Jin P., Qiu L. Changes in Frequency of Electromagnetic Radiation from Loaded Coal Rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016, vol. 49, no 1, pp. 291–302. DOI: 10.1007/s00603-015-0738-6.

9. Song X., Li X., Li Z., Zhang Z., Cheng F., Chen P., Liu Y. Study on the Characteristics of Coal Rock Electromagnetic Radiation (EMR) and the Main Influencing Factors. *Journal of Applied Geophysics*. 2018, vol. 148, pp. 216–225. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2017.11.018.

10. Yakovlev D. V., Muljov S. N. Experience in the use of multifunctional geophysical equipment Angel-M in the coal and ore industry. *Ugol Publ*, 2014, no. 10, pp.14–19. [In Russ].

11. Bizyaev A. A., Voronkina N. M., Savchenko A. V., Tsupov M. N. Method for non-contact determination of dangerously loaded zones in a mine working. *Ugol Publ*, 2019, no. 11 (1124), pp. 27–31. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-11-27-31 [In Russ].

12. Yakovitskaya G. E. Methods and technical means for diagnosing critical states of rocks based on electromagnetic emission. Novosibirsk, "Parallel", 2008. 315 p. [In Russ].
13. Yakovitskaya G. E. Prediction of dynamic manifestations of a rock mass based on the registration of electromagnetic radiation signals. *Physical problems of rock destruction In proc. of the third Int. Sci. Conf.* Novosibirsk, Nauka, 2003, pp.98–103. [In Russ].
14. Bizyaev A. A., Vostretsov A. G., Yakovitskaya G. E. Registration and diagnostic complex RDK REMI-3 and experimental studies of the destruction of rocks in the conditions of underground mine workings of the Tashtagol deposit. *Reports of the Academy of Sciences of Higher Education of the Russian Federation.* 2015, vol. 3, no. 28, pp. 29–38. [In Russ].
15. Qiu L., Wang E., Song D., Liu Zh., Shen R., Lv G. and Xu Zh. Measurement of the stress field of a tunnel through its rock EMR. *J. Geophys. Eng.* 2017, vol. 14, no. 4, pp. 949–973. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2017.11.018.
16. Li D., Wang E., Li Zh., Jia H., Wang D., Kong X., Wang X., Wang X. and Ali M. A causal mechanism for anomalous electromagnetic radiations from coal and rock failure. *Geophysics.* 2018, vol. 83, no. 6, pp. E423–E434. DOI: 10.1190/geo2018-0360.1.
17. Li Ch., Sun X., Wang Ch., Xu X., Xie B. and Li J. The correlated characteristics of micro-seismic and electromagnetic radiation signals on a deep blasting workforce. *J. Geophys. Eng.* 2016, vol. 13, no. 6, pp. 1020–1035. DOI: 10.1088/1742-2132/13/6/1020.
18. Wang E., He X., Liu X., Li Zh., Wang Ch. and Xiao D. A non-contact mine pressure evaluation method by electromagnetic radiation. *J. Appl. Geophys.* 2011, vol. 75, no. 2, pp. 338–344. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2011.06.028.
19. Song D., Wang E., He X., Jia H., Qiu L., Chen P. and Wang S. Use of electromagnetic radiation from fractures for mining-induced stress field assessment. *J. Geophys. Eng.* 2018, vol. 15, no. 4, pp. 1093–1103. DOI: 10.1088/1742-2140/aaa26d.
20. Li Zh., Niu Y., Wang E., Liu L., Wang H., Wang M. and Ali M. Experimental Study on Electric Potential Response Characteristics of Gas-Bearing Coal During Deformation and Fracturing Process. *Processes.* 2019, vol. 7, no. 2, pp. 72–103. DOI: 10.3390/pr7020072.
21. Frid V. Calculation of Electromagnetic Radiation Criterion for Rockburst Hazard Forecast in Coal Mines. *Pure Appl. Geophys.* 2001, vol. 158, no. 5, pp. 931–944. DOI: 10.1007/PL00001214.
22. Di Y., Wang E. Electromagnetic radiation interference signal recognition in coal rock mining based on recurrent neural networks. *Geophysics.* 2021, vol. 86, no. 4, pp. K1–K10. DOI: 10.1190/geo2020-0726.1.
23. Hu S., Wang E., Liu X. Spatiotemporal multifractal characteristics of electromagnetic radiation in response to deep coal rock bursts. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2014, vol. 14, no. 8, pp. 2089–2103. DOI: 10.5194/nhess-14-2089-2014.
24. Song X., Li X., Li Zh., Zhang Zh., Cheng F., Chen P. and Liu Y. Study on the characteristics of coal rock electromagnetic radiation (EMR) and the main influencing factors. *J. Appl. Geophys.* 2018, vol. 148, pp. 216–225. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2017.11.018.
25. Li X., Wang E., Li Zh., Liu Zh., Song D. and Qiu L. Rock Burst Monitoring by Integrated Microseismic and Electromagnetic Radiation Methods. *Rock Mech. Rock Eng.* 2016, vol. 49, no. 11, pp. 4393–4406. DOI: 10.1007/s00603-016-1037-6.
26. Frid V. Electromagnetic radiation method water-infusion control in rockburst-prone strata. *J. Appl. Geophys.* 2000, vol. 43, no. 1, pp. 5–13. DOI: 10.1016/S0926-9851(99)00029-4.
27. Liu X., Zhang Zh., Wang E., Wang X., Yang B. and Wang H. Characteristics of electromagnetic radiation signal of coal and rock under uniaxial compression and its field application. *J. Earth Syst. Sci.* 2019, vol. 129, no. 1, pp. 34-1–34-11. DOI: 10.1007/s12040-019-1309-0.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мешков Анатолий Алексеевич — Генеральный директор АО «СУЭК-Кузбасс», 652507, Кемеровская область — Кузбасс, г. Ленинск-Кузнецкий, ул. Васильева, д. 1, Россия

Ледяев Николай Владимирович — Заместитель технического директора по противоаварийной устойчивости предприятий — начальник управления противоаварийной устойчивости предприятий АО «СУЭК-Кузбасс», 652507, Кемеровская область — Кузбасс, г. Ленинск-Кузнецкий, ул. Васильева, д. 1, Россия;

Хамутский Алексей Александрович — заместитель главного механика — руководитель проектов по интеллектуальным системам АО «СУЭК-Кузбасс», 652507, Кемеровская область — Кузбасс, г. Ленинск-Кузнецкий, ул. Васильева, д. 1, Россия;

Савченко Андрей Владимирович — канд. техн. наук, доцент, <http://orcid.org/0000-0001-8458-1487>, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Новосибирск, Красный проспект, 54, Россия, e-mail: sav@eml.ru;

Бизяев Алексей Анатольевич — инженер, <http://orcid.org/0000-0002-0659-9267>, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Новосибирск, Красный проспект, 54, Россия, e-mail: bizyaev@ngs.ru.

Для контактов: *Савченко Андрей Владимирович*, e-mail: sav@eml.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Meshkov A. A., General Director, SUEK — Kuzbass JSC, 652507, Kemerovo Region — Kuzbass, Leninsk-Kuznetskiy, st. Vasilyeva, 1, Russia;

Ledyayev N. V., Deputy Technical Director of Industrial Emergency Tolerance — Head of the Department of Industrial Emergency Tolerance, SUEK — Kuzbass JSC, 652507, Kemerovo Region — Kuzbass, Leninsk-Kuznetskiy, st. Vasilyeva, 1, Russia;

Khamutsky A. A., deputy chief mechanic — project manager for intelligent systems, SUEK — Kuzbass JSC, 652507, Kemerovo Region — Kuzbass, Leninsk-Kuznetskiy, st. Vasilyeva, 1, Russia;

Savchenko A. V., Cand. Sci. (Eng.), <http://orcid.org/0000-0001-8458-1487>, Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Krasny Prospekt, 54, Russia, e-mail: sav@eml.ru;

Bizyaev A. A., Engineer, <http://orcid.org/0000-0002-0659-9267>, Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Krasny Prospekt, 54, Russia, e-mail: bizyaev@ngs.ru.

Corresponding author: *Savchenko A. V.*, e-mail: sav@eml.ru.

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 15.04.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 15.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.

