

УДК 622.831:537.531

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ЛОКАЛЬНОГО ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ МЕТОДОМ РЕГИСТРАЦИИ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ШАХТАХ КУЗБАССА

Простов Сергей Михайлович¹,
psm.kem@mail.ru

Разумов Егор Евгеньевич²,
razumov@vnimi.ru

Мулев Сергей Николаевич²,
mulev@vnimi.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, 199026, г. Санкт-Петербург, 22-я линия, 3.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования геофизических методов контроля напряженного состояния и прогноза геодинамических явлений на шахтах Кузбасса, включая системы геодинамического контроля и георадиолокацию.

Цель: обоснование рациональных методик измерения параметров электромагнитного излучения в условиях интенсивной механизированной отработки угольных пластов и установление критериальных значений этих параметров для локального прогноза удароопасности на основе сопоставления с основными геомеханическими параметрами (коэффициентом концентрации напряжений и расстоянием от контура выработки до точки их максимума), полученными прямым базовым методом выхода буровой мелочи.

Объекты: горные выработки очистной лавы на шахте «Им. С.М. Кирова», проходка подготовительных выработок на шахте «Есаульская».

Методы: анализ научно-практических результатов, полученных методом электромагнитного излучения, экспериментально-теоретические основы которого разработаны в ряде организаций.

Результаты. Установлена взаимосвязь амплитуды, формы, частоты следования импульсов, интервалов между ними с уровнем напряжений, раскрытием трещин, скоростью их развития. Разработана и постоянно совершенствуется аппаратура «Ангел», комплексные испытания которой проведены на ряде рудных и угольных месторождений. Доказана на основании результатов промышленных экспериментальных исследований возможность применения метода и аппаратуры регистрации ЭМИ для решения широкого круга инженерно-геологических задач, связанных с геологической подземной доразведкой, диагностированием зон тектонических нарушений, смещений и деформаций. Экспериментально доказана взаимосвязь параметров ЭМИ с концентрацией напряжений в массиве и расстоянием до их максимума, установлены особенности динамики изменения этих параметров во времени. Установлены критериальные значения, и предложена номограмма для локального прогноза удароопасности в очистных и подготовительных выработках шахт Кузбасса.

Ключевые слова:

Геофизический прогноз, естественное электромагнитное излучение, напряженно-деформированное состояние, удароопасность, аппаратурный комплекс «Ангел», помехозащищенность, амплитуда импульсов, распределение амплитуд по энергетическим уровням, критериальные значения, локальный прогноз.

Введение

Прямые производственно-экспериментальные методы контроля свойств среды и мониторинга протекающих в них процессов дают априорную информацию для построения и реализации геомеханических моделей. Они включают: визуальный осмотр обнажений, эндоскопическое исследование стенок скважин (шпуров); метод выхода буровой мелочи (геологическое описание керна, метод дискования керна); метод измерения деформаций массива, конвергенции кровли, почвы и боков выработки; метод частичной разгрузки участка массива; геодинамическое районирование; измерение давления в гидросистеме механизиро-

ванных комплексов, давления породного контура на крепь различного типа. Сопоставление этих данных с расчетными дает возможность настраивать, тарировать программные продукты, оценивать точность прогноза.

Как правило, прямые методы недостаточно оперативны, трудоемки, не обеспечивают требуемой разрешающей способности и непрерывности мониторинга. Весьма интенсивно в последнее время развиваются геофизические методы, систематизация которых рассмотрена в работе [1]. Совершенствование геофизических методов идет в двух направлениях: расширение возможностей измерительной аппаратуры; раз-

вение программно-методического обеспечения при обработке и интерпретации экспериментальных баз данных.

На шахтах Кузбасса и Сибири в настоящее время весьма активно применяются методы геоакустики, электромагнитного зондирования и георадиолокации. Примеры реализации этих методов при решении геомеханических проблем подземной геотехнологии следующие:

- внедрение системы акустического контроля состояния массива горных пород и прогноза динамических явлений САКСМ в шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» (шахта «Им. С.М. Кирова» и др.) [2–4];
- применение георадара с антенным блоком «Трифон» при изучении мерзлого массива горных пород [5, 6], георадара ОКО-2 с антенным блоком на центральной частоте 400 МГц в условиях шахты «Талдинская-Западная» при диагностировании расслоений в кровле подготовительной выработки;
- использование электрического зондирования аппаратурой «Ангел-М» с высокочастотным генератором в комплексе с видеоэндоскопическим обследованием при наблюдении зон расслоений, дробления и контроля фактических параметров анкерной крепи (шахта Березовская и ШУ «Карагайлинское», шахта «Чертинская-Коксовая» [7]).

Наибольший научно-практический интерес связан с изучением возможности применения для контроля НДС массива и прогноза геодинамических явлений метода регистрации электромагнитной эмиссии (ЭМИ).

Экспериментально-теоретические основы этого метода разработаны в работах [8–31], основная часть исследований выполнена в лабораторных условиях. Установлена взаимосвязь амплитуды, формы, частоты следования импульсов, интервалов между ними с уровнем напряжений, раскрытием трещин, скоростью их развития, однако большинство этих закономерностей не доведено до практического использования для решения проблем подземной геотехнологии.

ИГД СО РАН разработаны приборы РЭМИ 1 и РЭМИ 2, выполнены работы по их опробованию в природных условиях. Сравнительный анализ параметров импульсного ЭМИ в условиях шахт и рудников на глубинах от 300 до 700 м (шахты «Таштагольская», «Зиминка», № 12) и регистрируемого при нагружении образцов в лабораторных условиях коррелируют между собой. Критические параметры ЭМИ, характеризующие опасное состояние массива, не исследовались [12–18].

В МГГУ проведен цикл исследований с аппаратурой «Ангел», отличительной особенностью которых является практическая направленность на решение задачи контроля НДС горных пород [32].

В лабораторных условиях реализована оригинальная методика с использованием измерительного приемника SMV-11 с рамочной антенной FMA-11, позволяющая с помощью корректирующего коэффициента K пересчитывать амплитуду выходного сигнала A в универсальную характеристику – спектральную плотность напряженности поля S . По данным эксперимента для прибора «Ангел» $K=0,231$ м·Гц. При из-

мерениях в выработках с использованием трех основных положений рамочной антенны во взаимно перпендикулярных плоскостях предложено, решая систему уравнений, определять основные компоненты напряженности поля ЭМИ.

Выполнены натурные исследования аппаратурой «Ангел» в условиях Новомосковского гипсового месторождения в выработках, ограничивающих три целика с различным сроком службы (45, 25 лет и 1 год). Измерения проводили вдоль выработок при двух положениях рамочной антенны: перпендикулярно и параллельно борту целика (источники электромагнитных помех отсутствовали). Установлено, что амплитуда сигналов ЭМИ из целиков большего возраста выше, чем из нового целика. Обработка полученных экспериментальных данных позволила установить 6 категорий геомеханического состояния целиков по величине максимальных амплитуд ЭМИ в диапазоне $A=6,5–10$ мкВ ($S=28,1–43,3$ мкВ/(м·Гц)). При отсутствии разрушений уровень внешнего сигнала ЭМИ составил $A=0,5$ мкВ ($S=2,17$ мкВ/(м·Гц)) при уровне собственных шумов $A<6,0$ мкВ ($S<25,9$ мкВ/(м·Гц)).

Весьма перспективной представляется идея комплексирования методов ЭМИ и акустической эмиссии (АЭ). На лабораторной установке определено, что на начальной стадии нагружения образцов гипса коэффициент корреляции между параметрами ЭМИ и АЭ $R>0$, а при достижении стадии запредельного деформирования $R<0$, что связано с переходом от хаотического локального разрушения по всему объему образца к кластеризации этих процессов в зонах концентрации напряжений. Результаты компьютерного моделирования НДС массива вокруг одиночной выработки позволили авторам обосновать метод оценки пространственного расположения зон активного трещинообразования и опорного давления по результатам каротажных измерений в скважинах пиковых значений амплитуд ЭМИ. Натурные исследования в гипсовых целиках различного возраста (от нескольких до 50 лет) позволили зафиксировать перемещение максимума опорного давления от приконтурной зоны вглубь целика и переход его от устойчивого состояния к разделению на несколько блоков, а затем к полному разрушению. При этом зона опорного давления расположена перед точкой, в которой график коэффициента корреляции между пиковыми амплитудными значениями параметров ЭМИ и АЭ переходит в отрицательную область ($R<0$).

Исследования, проводимые АО «ВНИМИ» для решения данной проблемы, характеризуются практической направленностью. Разработан и постоянно совершенствуется аппаратный комплекс «Ангел», комплексные испытания которого проведены на ряде рудных и угольных месторождений. Результаты промышленных экспериментальных исследований показали, что метод и аппаратура регистрации ЭМИ могут применяться для решения широкого круга инженерно-геологических задач, связанных с геологической подземной доразведкой, диагностированием зон тектонических нарушений, смещений и деформаций [33–35]. Высокая оперативность и широкие возможности дан-

ного метода способствовали его включению в состав нормативной инструкции по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений [36].

Целью исследования, результаты которого представлены в настоящей статье, является обоснование рациональных методик измерений параметров ЭМИ в условиях интенсивной механизированной отработки угольных пластов и установление критериальных значений этих параметров для локального прогноза удароопасности на основе сопоставления с основными геомеханическими параметрами (коэффициентом концентрации напряжений и расстоянием от контура выработки до точки их максимума), полученными прямым базовым методом выхода буровой мелочи.

Методика исследования

Комплексные исследования проведены на шахтах «Им. С.М. Кирова» и «Есаульская».

На ш. «Им. С.М. Кирова» исследования проведены в выработках лавы 25-101 пласта Поленовский. Пласт

характеризуется относительно выдержанной средней мощностью 3,5 м. Строение пласта от простого до сложного, состоит из одно-двух, реже трех угольных пачек. Пласт Поленовский является угрожаемым по горным ударам с глубины 150 м и по внезапным выбросам с глубины 535 м. Максимальная глубина ведения горных работ составляет 445 м.

Измерения параметров ЭМИ и прогноз удароопасности по выходу буровой мелочи проводились на участках выработок, характерных по напряженно-деформированному состоянию: в середине зоны повышенного горного давления (ПГД); на краю и вне этой зоны; в средней части очистного забоя (ОЗ); на сопряжениях с ОЗ. Параметры опытного участка определялись в соответствии с Инструкцией [37]: ширина зоны ПГД 58 м; глубина прогнозных шпуров по методу выхода буровой мелочи 6,2 м, диаметр 43 мм.

План опытного участка представлен на рис. 1, а схема расположения контрольных шпуров – на рис. 2.

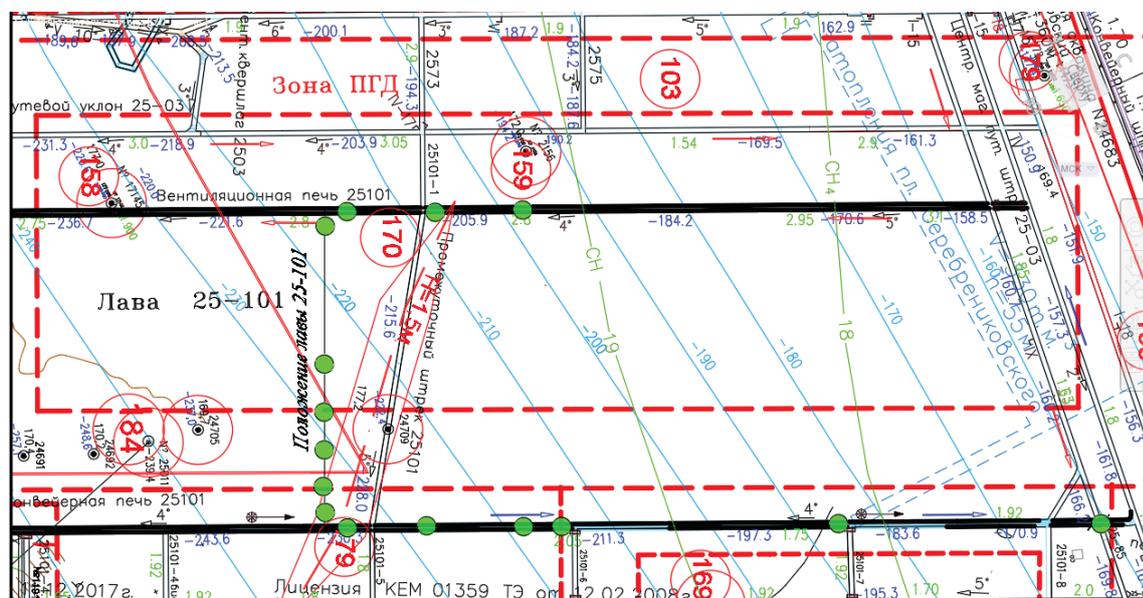


Рис. 1. План опытного участка на ш. «Им. С.М. Кирова»: ● – место проведения измерений

Fig. 1. Plan of the experimental site at the mine named after S.M. Kirov: ● – location of measurements

На ш. «Им. С.М. Кирова» комплексные исследования проведены на 15 пунктах (более 3000 замеров).

На ш. «Есаульская» исследования проводились в подготовительных выработках по пласту 29а. Пласт залегает ниже отработанного пласта 30 в 55–65 м, относительно выдержанный, имеет строение от простого до сложного. Общая мощность пласта изменяется от 1,02 до 7,50 м, средняя мощность равна 3,55 м. Единичные крайние значения мощности пласта наблюдаются в зонах нарушений и у выхода его под наносы. Пласт 29а является угрожаемым по горным ударам с глубины 200 м и по внезапным выбросам с глубины 420 м. Максимальная глубина проходческих работ 450 м.

Объем измерений представлен в табл. 1, а схема расположения контрольных участков при проходке конвейерного штрека 29-39 – на рис. 3.

Таблица 1. Объем измерений по ш. Есаульская в 2019 г.

Table 1. Volume of measurements for the Esaulskaya mine in 2019

Пласт, глубина ведения горных работ (м) Formation, depth of mining operations (m)	Участок измерений Measurement area	Количество циклов измерений Number of measurement cycles	Количество замеров Number of measurements
29а, 400–420	Конвейерный штрек 29-39 Conveyor drift 29-39	7 (7 пунктов) 7 (7 points)	1428
29а, 230	Вентиляционный штрек 29-39 Ventilation drift 29-39	2 (4 пункта) 2 (4 points)	400
29а, 390	Конвейерный штрек 29-37 Conveyor drift 29-37	3 (4 пункта) 3 (4 points)	624
29а, 350	Вентиляционный штрек 29-37 Ventilation drift 29-37	3 (6 пунктов) 3 (6 points)	286

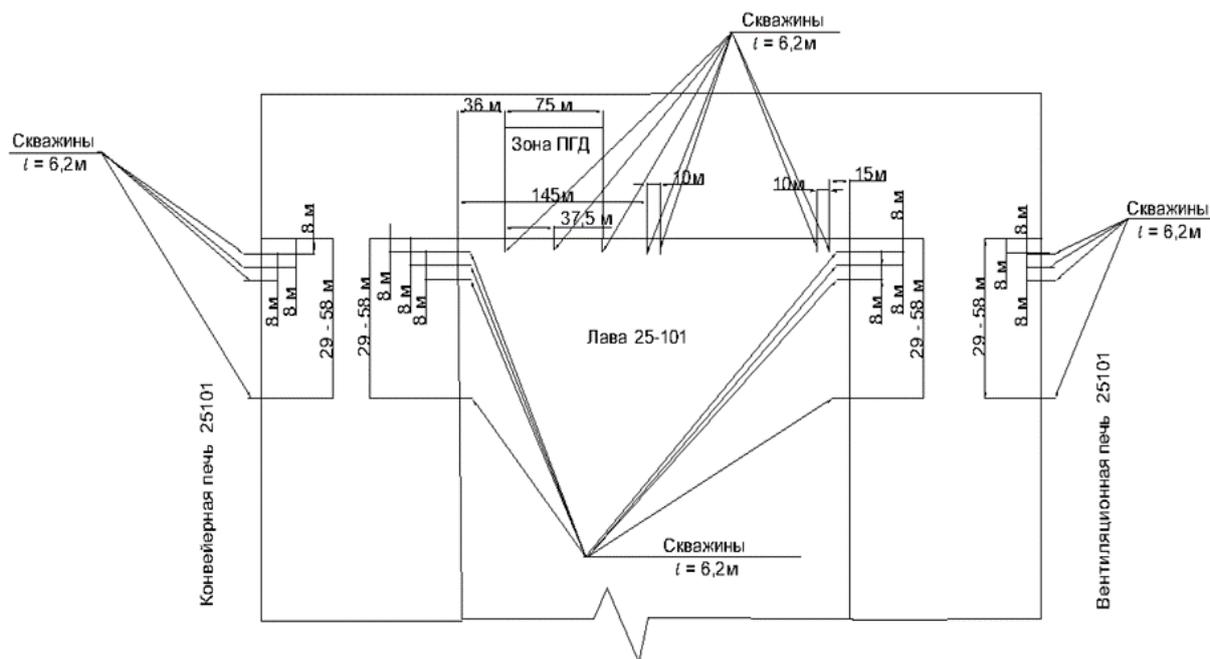


Рис. 2. Схема расположения контрольных штуров в очистной и подготовительных выработках
 Fig. 2. Layout of the control boreholes in the treatment and preparatory coal mining

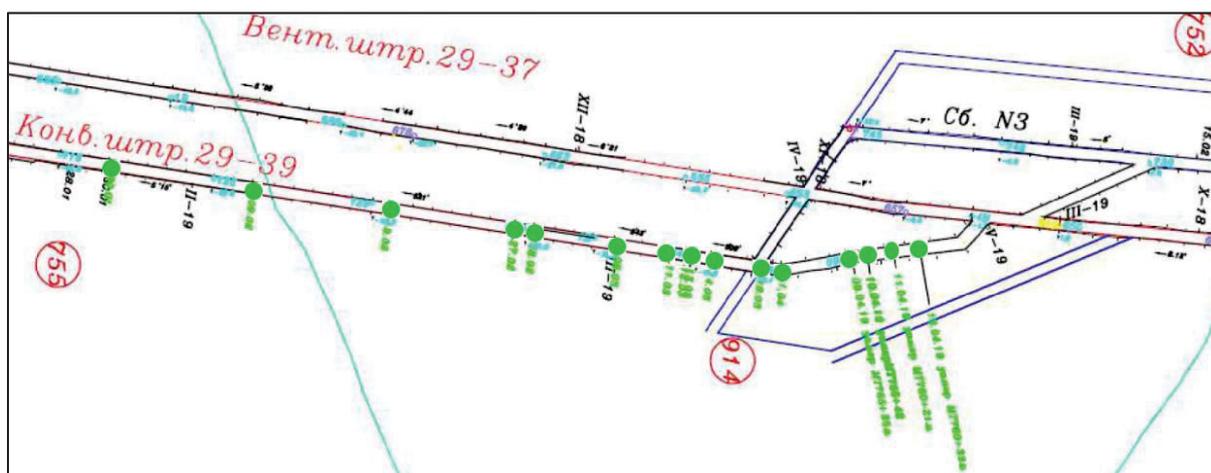


Рис. 3. Выкопировка из плана горных работ по конвейерному штреху 29-39 с нанесением места и даты производимых замеров: ● – место проведения измерений
 Fig. 3. Copy of the mining plan for the conveyor drift 29-39 with the application of the place and date of measurements: ● – location of measurements

В соответствии с Инструкцией [37] локальный прогноз удароопасности по выходу буровой мелочи при проходке выработок проводился в 7 шпурах, 3 из которых бурили в забой и по 2 в бока выработки. Выход буровой мелочи определялся мерным сосудом, шкала которого позволяла измерять объем буровой мелочи с точностью не менее $\pm 0,1$ л. Категории «опасно» или «неопасно» участков каменноугольных пластов определяются по номограмме с разграничительной линией параболической формы:

$$V = f\left(\frac{r}{m}\right),$$

где V – выход буровой мелочи, л/м; r – глубина шпура, м; m – мощность пласта, м.

Прогноз удароопасности методом ЭМИ выполнялся в соответствии с номограммой (рис. 4). Измерения методом ЭМИ проводились геофизической аппаратурой «Ангел-М».

Результаты и их обсуждение

На ш. «Им. С.М. Кирова» исследовались критерии прогноза удароопасности при ведении очистных работ высокопроизводительным очистным комплексом.

Основное содержание исследований включало: отработку рациональной методики измерений при различных положениях приемной антенны; оценку влияния источников электромагнитных помех и обоснование способа снижения этого влияния; определение критериальных значений параметров A и B .

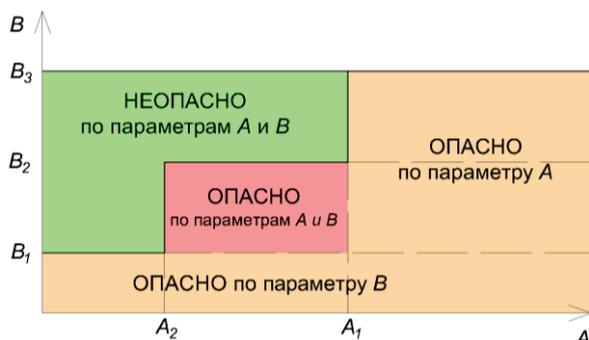


Рис. 4. Номограмма для определения удароопасности методом ЭМИ. Основные параметры номограммы следующие: A – средняя амплитуда импульсов ЭМИ за заданный интервал времени, мкВ; B – показатель распределения количества амплитуд A по уровням; A_1 – критерий по максимальному значению параметра A , мкВ; B_1 – критерий по минимальному значению параметра B ; A_2 – критерий по минимальному значению параметра A ; B_2 – критерий по максимальному значению параметра B ; B_3 – величина B , при которой сигнал признается помехой

Fig. 4. Nomogram for determining the impact hazard by the EMR method. The main parameters of the nomogram are as follows: A – the average amplitude of the EMR pulses for a given time interval, μV ; B – the indicator of the distribution of the number of amplitudes A by levels; A_1 – the criterion for the maximum value of parameter A , μV ; B_1 – the criterion for the minimum value of parameter B ; A_2 – the criterion for the minimum value of parameter A ; B_2 – the criterion for the maximum value of parameter B ; B_3 – the value B at which the signal is recognized as a hindrance

В рамках решения первой задачи в лаве 25-101 были проведены измерения параметров A и B при трех положениях приемной антенны: параллельно оси выработки ($A_{||}$, $B_{||}$); на забой (борт) (A_3 , B_3); на кровлю (A_k , B_k).

Из результатов измерений (рис. 5) следует, что наиболее информативным участком профиля является интервал между 6 и 24 точками замера протяженностью 180 м. На этом интервале A_3 , $A_k > A_{||}$, B_3 , $B_k < B_{||}$. За пределами этого диапазона закономерного изменения параметров A и B не зафиксировано.

На рис. 6 приведены графики изменения разностей $\Delta A_3 = A_3 - A_{||}$, $\Delta A_k = A_k - A_{||}$, $\Delta B_3 = B_{||} - B_3$, $\Delta B_k = B_{||} - B_k$.

Поскольку в эксперименте не были известны источники фонового локального ЭМИ и фиксировался суммарный полезный сигнал из кровли и угольного пласта, специально исследовалось влияние цепей электроосвещения: в выработке чередовались участки с включенным и отключенным освещением (показаны темным и светлым тоном на рис. 7).

Из графиков на рис. 7 следует, что на неосвещенных участках при всех схемах измерений амплитуда ЭМИ находится в диапазоне $A=5-40$ мкВ, а на освещенных $A=10-140$ мкВ.

Разности ΔA и ΔB можно использовать в качестве корректировок для снижения влияния фонового излучения, однако более эффективным является отношение $F=A/A_0$, где A_0 – величина параметра A , определенная при расположении антенны в шпуре глубиной 0,8–1,0 м (рис. 8).

Таким образом, на участках, где нет возможности полностью исключить влияние источников фоновых помех, целесообразно вести прогноз по относительному параметру F .

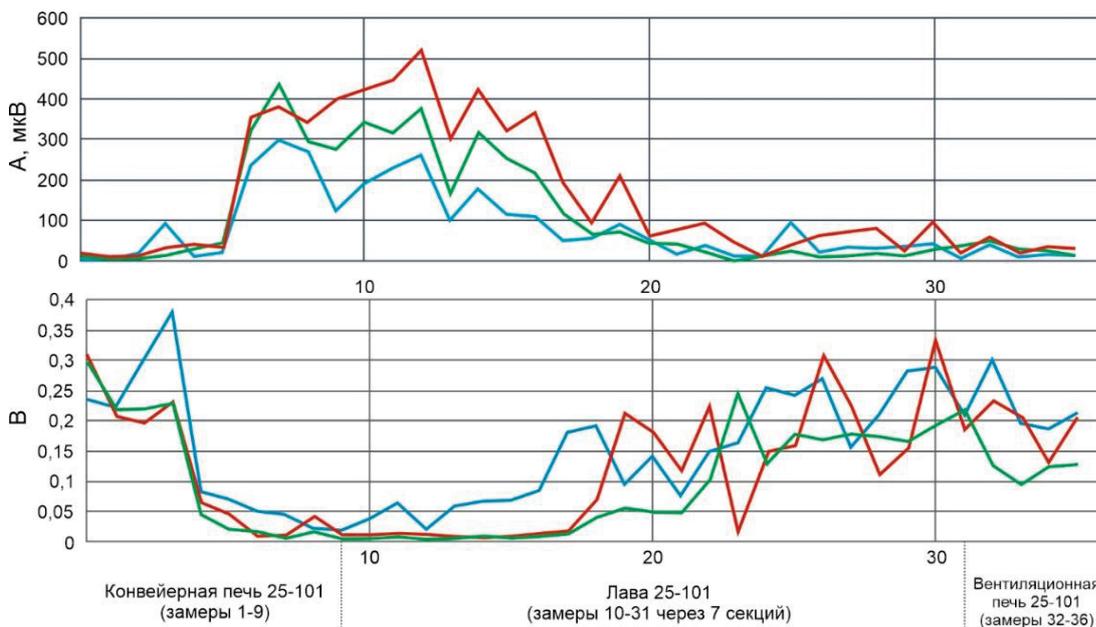


Рис. 5. Распределение параметров ЭМИ A и B при различных положениях приемной антенны (шаг измерения 10 м): — вдоль выработки, — в грудь забоя, — в кровлю

Fig. 5. Distribution of EMR parameters A and B at different positions of the receiving antenna (measurement step of 10 m): — along the coal mining, — into the slaughter chest, — into the roof

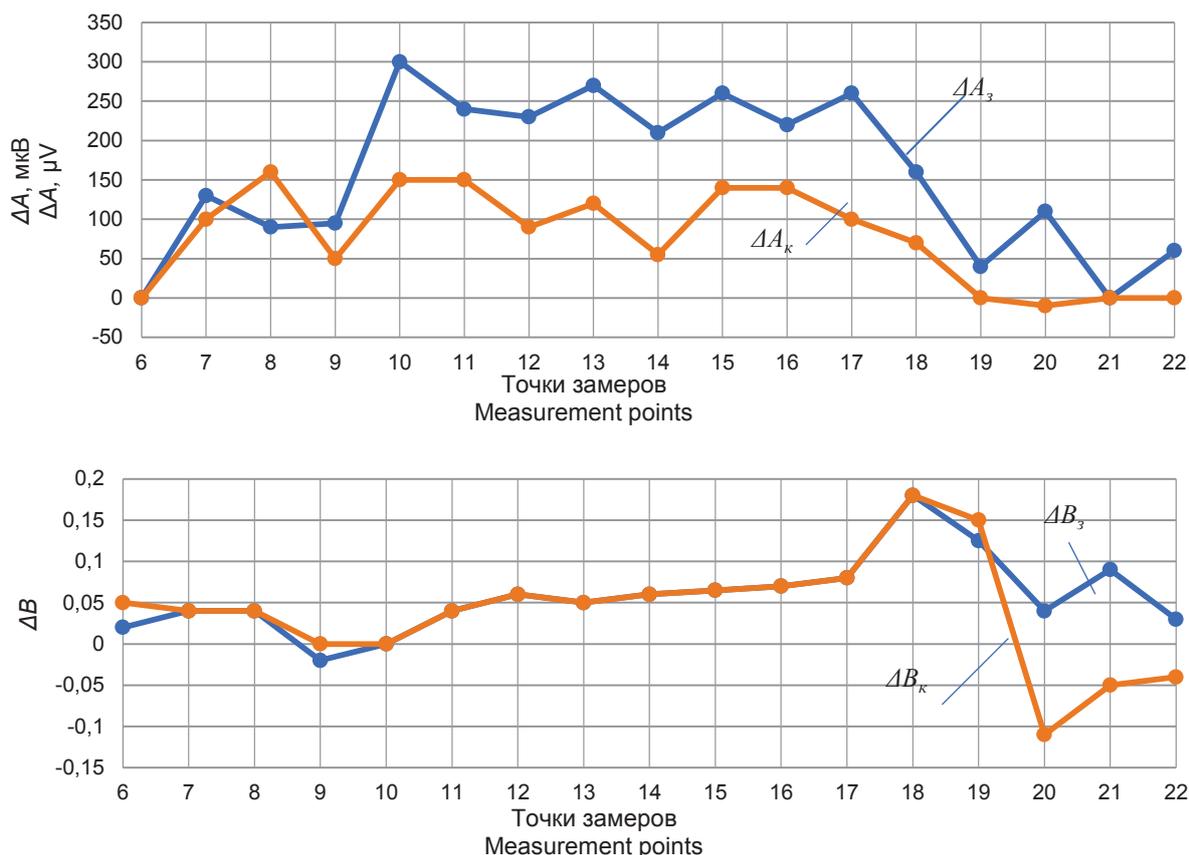


Рис. 6. Графики изменения разностных параметров по длине лавы 25-101
Fig. 6. Graphs of changes in the difference parameters along the length of the lava 25-101

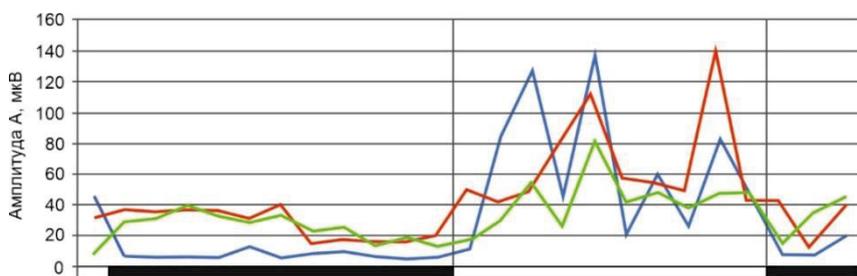


Рис. 7. Изменение амплитуды сигнала А на участках с включенным и отключенным освещением. Направление антенны: — вдоль выработки, — в грудь забоя, — в кровлю
Fig. 7. Change in the amplitude of the A signal in areas with on and off lighting. Antenna direction: — along the coal mining, — into the slaughter chest, — into the roof

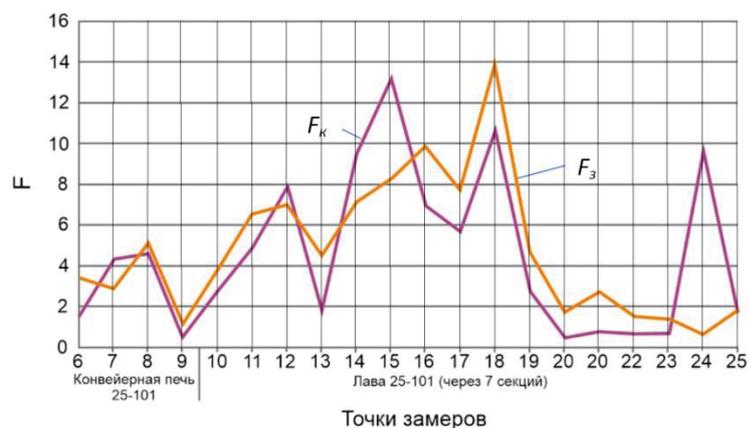


Рис. 8. Изменение относительного параметра F по длине лавы 25-101
Fig. 8. Change of the relative parameter F along the length of the lava 25-101

На заключительном этапе экспериментальных исследований в лаве 25-101 ш. «Им. С.М. Кирова» были определены критические значения комплексных параметров A и B . В качестве базового был использован метод выхода штыва. На рис. 9 приведены графики выхода штыва V по шпурам, пробуренным в пределах зоны ПГО и вне ее, из которых следует, что величина V в зоне ПГД в 1,5–3 раза выше. На всех участках зафиксирована категория «неопасно». Результаты электромагнитного мониторинга приведены в табл. 2.

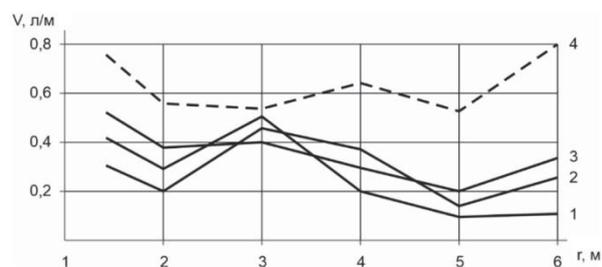


Рис. 9. Результаты измерений методом выхода штыва: 1–3 – вне зоны ПГД; 4 – в зоне ПГД; 1 – забой лавы в 30 м от конвейерной печи; 2, 3 – вентиляционная печь в борт лавы; 4 – забой лавы в 7 м от конвейерной печи

Fig. 9. Results of measurements by the dust coal exit method: 1–3 – outside the IMP zone; 4 – in the IMP zone; 1 – lava face 30 m from the conveyor furnace; 2, 3 – ventilation furnace into the side of the lava; 4 – lava face 7 m from the conveyor furnace

В результате статистической обработки баз данных получены критериальные значения параметров A и B для пласта Поленовский (рис. 3): $A_2=10,6$ мкВ; $A_1=19,9$ мкВ; $B_1=0,159$; $B_2=0,189$.

Таблица 2. Диапазоны параметров ЭМИ по пл. 25-101

Table 2. Ranges of EMR parameters for the reservoir 25-101

Участки прогноза Forecast sections	A , мкВ μV	L_1 , мкВ μV	L_2 , мкВ μV	B
Вне зоны ПГД Outside IMP zone	3,9–5,8	10,5–15,0	20,3–92,8	0,130–0,226
В зоне ПГД In the IMP zone	9,5–13,6	18,5–20,2	72,2–102,9	0,170–0,189

На ш. «Есаульская» основная часть исследований проводилась при проходке подготовительных выработок, их основное содержание состояло в следующем: анализ взаимосвязи параметров ЭМИ с результатами, полученными методом выхода штыва, и их временной динамики; установление критериальных значений параметров A и B .

На рис. 10 приведены схема опытного участка в забое подготовительной выработки, включающая бурение семи прогнозных шпуров, и характерные графики выхода штыва $V(r)$ при измерениях в забое и боку выработки (вент. штрек 29-37).

Для оценки взаимосвязи параметров ЭМИ с НДС (табл. 3) исследуемого участка массива построены графики зависимости между средними значениями следующих параметров (рис. 11): \bar{A} – средняя амплитуда сигнала ЭМИ по всем сериям измерений, мкВ; \bar{B} – средняя величина показателя B ; \bar{V} – средний выход штыва по всем прогнозным скважинам опытного участка, л/м; \bar{x} – среднее расстояние от контура выработки до точки с максимальным выходом штыва, м.

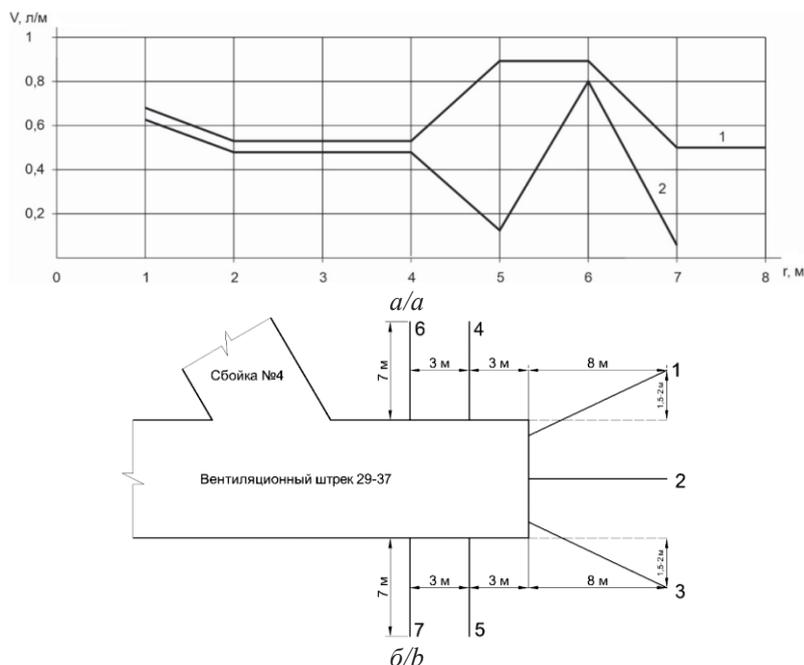


Рис. 10. Схема опытного участка (а) и результаты измерений методом выхода штыва (б): 1 – забой выработки; 2 – бок выработки

Fig. 10. Scheme of the experimental site (a) and the results of measurements by the dust coal exit method (b): 1 – coal mining face; 2 – sideways from coal mining

Таблица 3. Значения параметров оценки удароопасности по выходу штыба и ЭМИ

Table 3. Values of parameters for assessing the impact hazard at the output of the dust coal and EMR

Наименование опытного участка Name of the test area	\bar{V} , л/м/л/м	\bar{A} , мкВ/μV	\bar{x} , м/м	\bar{B}
Конвейерный штрек 29-39 Conveyor drift 29-39	0,752	32	5,0	0,11
Вентиляционный штрек 29-37 Ventilation drift 29-37	0,737	25	7,0	0,19
	0,596	6,5	6,2	0,19
		6,2		0,18
Конвейерный штрек 29-37 Conveyor drift 29-37	0,769	80	5,7	0,18
Вентиляционный штрек 29а Ventilation drift 29а	0,721	25	7,2	0,20
	0,769	80	5,2	0,12

Таблица 4. Корреляционные зависимости

Table 4. Correlation dependencies

Корреляционные зависимости Correlation dependencies		Коэффициент детерминации Determination coefficient	Среднеквадратическое отклонение Standard deviation
Экспоненциальная Exponential	$\bar{A} = 0,0046 \cdot e^{12,196\bar{V}}$	$R^2=0,8075$	14,27095 мкВ/μV
	$\bar{B} = 0,0356 \cdot e^{0,251\bar{x}}$	$R^2=0,7436$	0,017497
Логарифмическая Logarithmic	$\bar{A} = 203,25 \ln \bar{V} + 109$	$R^2=0,6380$	17,23922 мкВ/μV
	$\bar{B} = 0,2347 \ln \bar{x} - 0,2547$	$R^2=0,8049$	0,013924
Линейная Linear	$\bar{A} = 305,73\bar{V} - 178,66$	$R^2=0,6543$	16,84768 мкВ/μV
	$\bar{B} = 0,038\bar{x} - 0,0639$	$R^2=0,7686$	0,015163

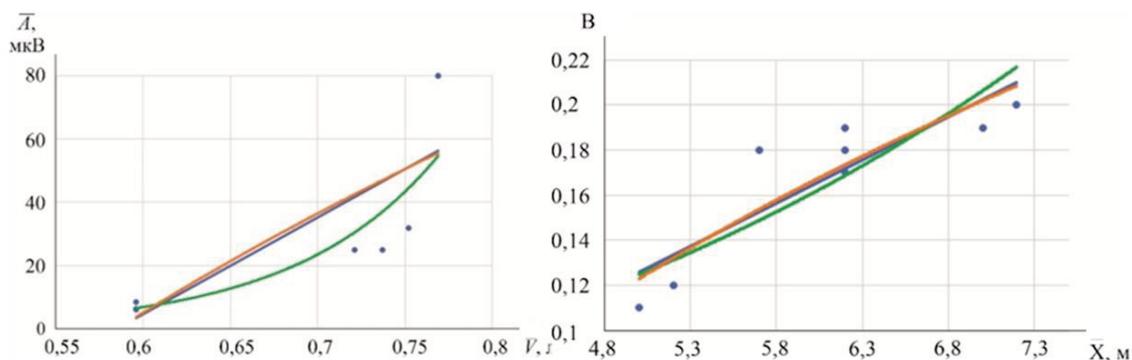


Рис. 11. Взаимосвязь между усредненными параметрами \bar{A} и \bar{B} ЭМИ, выхода бурового штыба \bar{V} и расстояния до максимальных напряжений X по всем опытным участкам. Зависимости: — линейная; — экспоненциальная; — логарифмическая

Fig. 11. Relationship between the averaged parameters \bar{A} and \bar{B} EMR, the output of the drill pin \bar{V} and the distance to the maximum stresses X for all experimental sites. Dependencies: — linear; — exponential; — logarithmic

Обработка данных показала наличие следующих корреляционных зависимостей, представленных в табл. 4.

Данные зависимости подтверждают, что амплитуда A ЭМИ возрастает с увеличением концентрации напряжений в массиве, а показатель распределения амплитуд B уменьшается при приближении максимальных напряжений к контуру выработки.

Из графиков изменения во времени средних значений параметров \bar{A} и \bar{B} следует, что характер развития геомеханических процессов на опытных участ-

ках весьма различается: в конвейерном штреке 29-39 ситуация относительно стабильна, в вентиляционном штреке 29-37 вероятность динамического проявления заметно снижается, а в конвейерном штреке 29-37 резко увеличивается (рис. 12).

Проведено обобщение экспериментальных данных по всем опытным участкам. На рис. 13 приведена база данных параметров A и B для всех опытных участков по всем сериям наблюдений в вентиляционном штреке 29-37.

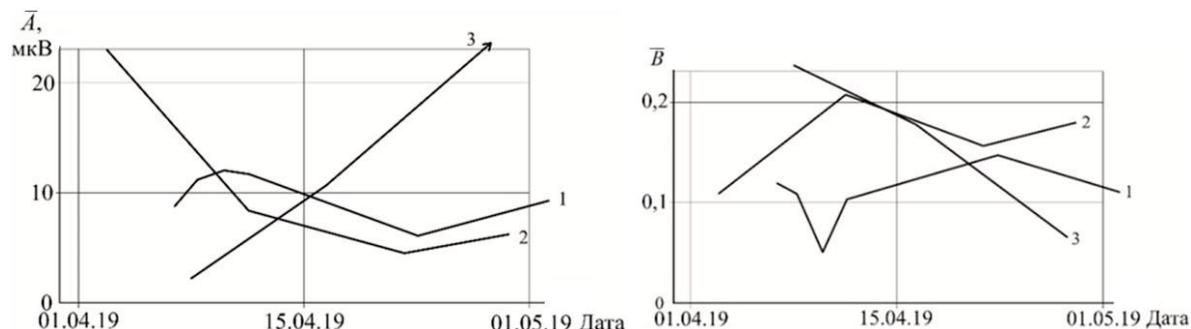


Рис. 12. Изменение средних значений параметров \bar{A} и \bar{B} во времени: 1 – конвейерный штрек 29-39; 2 – вентиляционный штрек 29-37; 3 – конвейерный штрек 29-37

Fig. 12. Change of average values of parameters \bar{A} and \bar{B} in time: 1 – conveyor drift 29-39; 2 – ventilation drift 29-37; 3 – conveyor drift 29-37

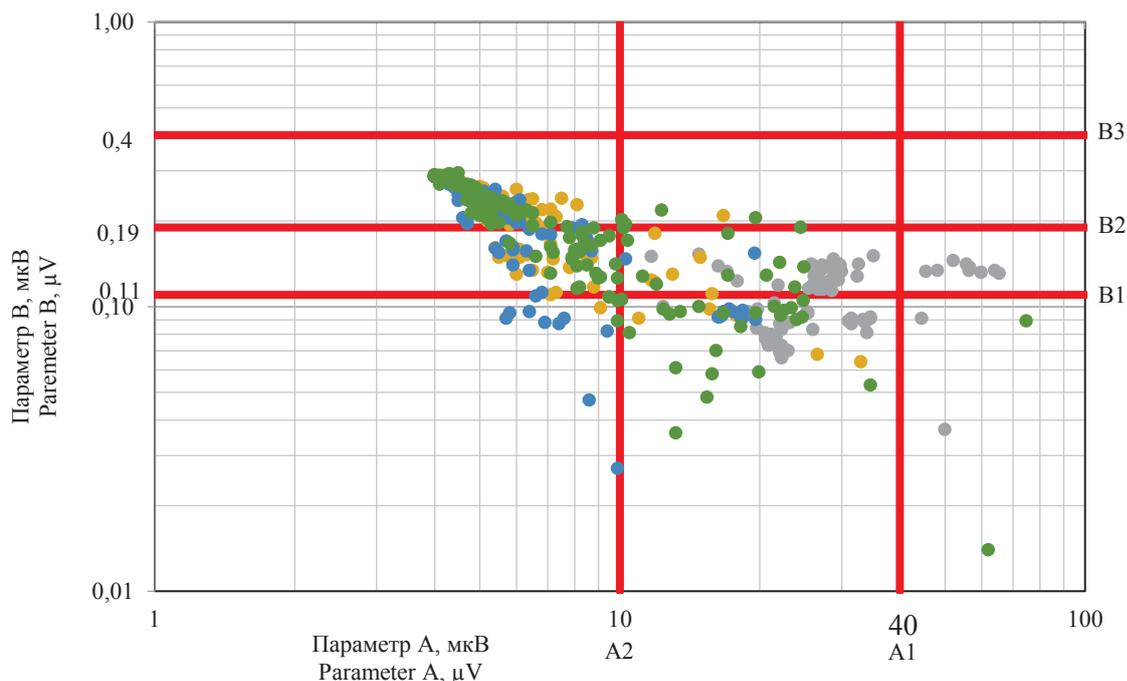


Рис. 13. Обобщенные данные ЭМИ-мониторинга по вентиляционному штреку 29-37: ● – 05.04.2019; ● – 05.04.2019; ● – 05.04.2019; ● – 05.04.2019 – даты замеров

Fig. 13. Generalized EMR monitoring data on the ventilation drift 29-37: ● – 05.04.2019; ● – 05.04.2019; ● – 05.04.2019; ● – 05.04.2019 – date of measurements

Окончательная статическая обработка полученных баз данных по всем выработкам ш. «Есаульская» позволила получить следующие критериальные значения прогнозных параметров ЭМИ (в скобках указаны ранее полученные значения для пласта 26а): $A_2=13,6$ (14,9) мкВ; $A_1=68,4$ (83,5) мкВ; $B_1=0,149$ (0,15); $B_2=0,262$ (0,4).

Выводы

1. Наиболее информативным методом измерения параметров ЭМИ в действующих выработках угольных шахт является ориентирование осью антенны на забой, при этом необходимо полное отключение источников электропотребления, включая осветительные приборы. Для дополнительного

снижения влияния фонового излучения на контрольно-измерительные приборы следует относить измеренные амплитуды ЭМИ к начальному значению, измеренному при помещении антенны в шпур на глубину до 1 м.

2. Экспериментально доказана взаимосвязь комплексных параметров A и B с концентрацией напряжений в массиве и расстоянием от контура выработки до их минимума.
3. Установлены критериальные значения комплексных параметров ЭМИ A и B для выработок очистной лавы (ш. «Им. С.М. Кирова») и для строящихся подготовительных выработок (ш. Есаульская).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров А.П., Рыжов В.А. К вопросу систематизации геофизических исследований геомеханического состояния массива горных пород и земной поверхности для оперативного контроля безопасности ведения горных работ на угольных шахтах // Уголь. – 2019. – № 10. – С. 22–28.
2. Копылов К.Н., Смирнов О.В., Кулик А.И. Акустический контроль состояния массива и прогноз динамических явлений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 7. – С. 82–88.
3. Испытания автоматизированной системы акустического контроля состояния массива горных пород / К.Н. Копылов, О.В. Смирнов, А.И. Кулик, П.В. Потопов // Уголь. – 2015. – № 7. – С. 44–47.
4. Смирнов О.В., Кулик А.И., Лапин Е.А. Прогноз геологических нарушений по параметрам акустического сигнала // Уголь. – 2015. – № 11. – С. 76–79.
5. Соколов К.О. Частотно-временное представление георадиолокационных разрезов на основе непрерывного вейвлет-преобразования // ФТПРПИ. – 2014. – № 1. – С. 77–81.
6. Прудеский Н.Д., Соколов К.О., Федорова Л.Л. Физическое моделирование распространения электромагнитной высокочастотной волны в массиве горных пород с трещиной, запол-

ненной льдом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 11. – С. 107–113.

7. Повышение эффективности оценки состояния пород кровли выработок с применением различных методов в условиях шахты «Чертинская-Коксовая» / П.В. Гречишкин, В.Ф. Харченко, Е.Ю. Розанов, В.С. Горностаев, С.Ф. Панин // Уголь. – 2019. – № 10. – С. 42–45.
8. 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.
9. 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. – P. 913–924.
10. 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. – Albena, Bulgaria, 2014. – P. 537–544.

11. 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.
12. Аппаратура регистрации сигналов ЭМИ в условиях подземных горных выработок / А.Г. Вострецов, А.В. Кривецкий, А.А. Бизяев, Г.Е. Яковицкая // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2008. – № 2. – С. 115–122.
13. Модернизированная система АСИ-2 для контроля электромагнитной эмиссии образцов горных пород при их одноосном нагружении / В.Н. Опарин, Г.Е. Яковицкая, А.В. Кривецкий, А.Г. Вострецов, А.А. Бизяев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 4. – С. 104–115.
14. Измерительная система совместной регистрации давления, перемещений и сопутствующего электромагнитного излучения при одноосном испытании образцов горных пород / В.Н. Опарин, Г.Е. Яковицкая, А.Г. Вострецов, А.В. Кривецкий, А.А. Бизяев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 5. – С. 6–16.
15. Бизяев А.А., Яковицкая Г.Е. О контроле динамических проявлений горного давления с использованием усовершенствованной аппаратуры регистрации сигналов ЭМИ // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 5. – С. 115–123.
16. Вострецов А.Г., Бизяев А.А., Яковицкая Г.Е. Алгоритм оценки стадийности процесса разрушения горных пород на основе регистрации сигналов ЭМИ // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – Т. 1. – № 3. – С. 23–28.
17. Прогнозирование трещинообразования в деформируемых конструкционных материалах и горных породах по их ЭМИ / Г.И. Кулаков, Г.Е. Яковицкая, М.Д. Шарапова, В.И. Щелканова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 163–168.
18. 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.
19. Study on the characteristics of coal rock electromagnetic radiation (EMR) and the main influencing factors / X. Song, X. Li, Z. Li, Z. Zhang, F. Cheng, P. Chen, Y. Liu // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – V. 148. – P. 216–225.
20. Rabinovitch A., Frid V., Bahat D. Surface oscillations – a possible source of fracture induced electromagnetic radiation // Tectonophysics. – 2007. – V. 431. – P. 15–21.
21. 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.
22. 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. Eng. – 2017. – V. 14. – P. 949–959.
23. Changes in frequency of electromagnetic radiation from loaded coal rock / D. Song, E. Wang, X. Song, P. Jin, L. Qiu // Rock Mech Rock Eng. – 2016. – V. 49. – P. 291–302.
24. 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. Eng. – 2018. – V. 15. – P. 1093–1103.
25. Liu X., Wang E. Study on characteristics of EMR signals induced from fracture of rock samples and their application in rockburst prediction in copper mine // Journal Geophys. Eng. – 2018. – V. 15. – P. 909–920.
26. 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. – № 74. – P. 212–219.
27. 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.
28. 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. – P. 404–424.
29. 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.
30. 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
31. 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.
32. Оценка устойчивости приконтурного массива пород по результатам совместных скважинных измерений параметров акустической и электромагнитной эмиссии / А.С. Вознесенский, В.Л. Шкуратник, В.В. Набатов, Я.О. Куткин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 8. – С. 64–70.
33. 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.
34. Панин С.Ф., Мулев С.Н., Штирц В.А. Совершенствование технологии прогноза удароопасного состояния массива с использованием аппаратного комплекса «АНГЕЛ-М» в условиях Таштагольского и Шерегешевского рудников // Научно-технические проблемы разработки и использования минеральных ресурсов. – 2014. – № 1. – С. 368–375.
35. Мулев С.Н., Старников В.Н., Романевич О.А. Современный этап развития геофизического метода регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) // Уголь. – 2019. – № 10. – С. 6–15.
36. Методика бесконтактного определения опасно нагруженных зон в массиве горной выработки / А.А. Бизяев, Н.М. Воронкина, А.В. Савченко, М.Н. Цупов // Уголь. – 2019. – № 11. – С. 127–131.
37. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при обработке угольных месторождений». Сер. 05. Вып. 49. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2017. – 150 с.

Поступила 14.09.2022 г.

Прошла рецензирование 26.10.2022 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

JUSTIFICATION OF CRITERIA FOR LOCAL PREDICTION OF IMPACT SAFETY BY REGISTERING NATURAL ELECTROMAGNETIC RADIATION AT THE MINES OF AO «SUEK-KUZBASS»

Sergey M. Prostov¹,
psm.kem@mail.ru

Egor E. Razumov²,
razumov@vnimi.ru

Sergey N. Mulev²,
mulev@vnimi.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»,
3, 22 line, St. Peterburg, 199026, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to improve geophysical methods for monitoring the stress state and forecasting geodynamic phenomena in the mines of Kuzbass, including geodynamic control systems and geo-location.

The main aim is to substantiate rational methods for measuring electromagnetic radiation parameters in conditions of intensive mechanized mining of coal seams and to establish criteria values of these parameters for local prediction of impact hazard based on comparison with the main geomechanical parameters (stress concentration coefficient and distance from the coal mining contour to their maximum point) obtained using the direct basic method of drilling fines extraction.

Objects: mine workings of purifying lava purification on the Kirov coalmine and when sinking preparatory workings on the coalmine Esaulskaya.

Methods: analysis of scientific and practical results obtained by the electromagnetic radiation methods, which experimental and theoretical bases have been developed in different organizations.

Results. The interrelation of the amplitude, shape, pulse repetition frequency, intervals between them with the stress level, crack opening, and the rate of their development is established. «The Angel» hardware complex was developed and is constantly being improved. Its complex tests were carried out at a number of ore and coal deposits. Based on the results of industrial experimental studies the authors proved the possibility of using the method and equipment for recording electromagnetic radiation for solving a wide range of engineering and geological tasks related to geological underground exploration, diagnosing zones of tectonic disturbances, displacements and deformations. The relationship of the electromagnetic radiation parameters with the stress concentration in the array and the distance to their maximum was experimentally proved, and the features of the dynamics of changes in these parameters over time were established. Criteria values are established and a nomogram is proposed for the local prediction of impact hazard in the treatment and preparatory workings of Kuzbass mines.

Key words:

Geophysical forecast, natural electromagnetic radiation, stress-strain state, impact hazard, Angel hardware complex, noise immunity, pulse amplitude, amplitude distribution by energy levels, criteria values, local forecast.

REFERENCES

- Egorov A.P., Ryzhov V.A. On the issue of systematization of geophysical studies of the geomechanical state of the rock mass and the Earth's Surface for operational control of the safety of mining operations at coal mines. *Coal – Russian Coal Journal*, 2019, no. 10, pp. 29–33.
- Kopylov K.N., Smirnov O.V., Kulik A.I. Acoustic monitoring of the array state and prediction of dynamic phenomena. *Mining information and analytical bulletin*, 2015, no. 7, pp. 82–88. In Rus.
- Kopylov K.N., Smirnov O.V., Kulik A.I., Potapov P.V. Tests of an automated acoustic monitoring system for the condition of a rock mass. *Coal – Russian Coal Journal*, 2015, no. 7, pp. 44–47. In Rus.
- Smirnov O.V., Kulik A.I., Lapin E.A. Forecast of geological disturbances by acoustic signal parameters. *Coal – Russian Coal Journal*, 2015, no. 11, pp. 76–79. In Rus.
- Sokolov K.O. Time-frequency representation of geo-radar sections based on continuous wavelet transform. *Journal of Mining Science*, 2014, vol. 1 pp. 77–81. In Rus.
- Prudetskiy N.D., Sokolov K.O., Fedorova L.L. Physical simulation of the propagation of an electromagnetic high-frequency wave in an array of rocks with a crack filled with ice. *Mining information and analytical bulletin*, 2018, no. 11, pp. 107–113. In Rus.
- Grechishkin P.V., Kharchenko V.F., Rozonov E.Yu., Gornostayev V.S., Panin S.F. Improving the efficiency of assessing the condition of the roof rocks of workings using various methods in the conditions of the Chertinskaya-Koksovaya mine. *Coal – Russian Coal Journal*, 2019, no. 10, pp. 42–45. In Rus.
- 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.
- 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.
- Cioclea D., Gherghe 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*, Albena, Bulgaria, 2014. pp. 537–544.
- 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.
12. Vostretsov A.G., Krivetskii A.V., Bizyaev A.A., Yakovitskaya G.E. EMR recording equipment for underground mines. *Journal of Mining Science*, 2008, vol. 44, pp. 218–224.
 13. Oparin V.N., Krivetskii 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, pp. 458–467.
 14. Oparin V.N., Vostretsov A.G., Krivetskii A.V., Bizyaev A.A., Yakovitskaya G.E. Integrated measurement and recording of loads, displacements and electromagnetic emission in rocks under uniaxial compression. *Journal of Mining Science*, 2011, vol. 47-5, pp. 547–557.
 15. Bizyaev A.A., Yakovitskaya G.E. Monitoring dynamic rock pressure events on the control of dynamic manifestations of mountain pressure using advanced equipment for recording EMR signals. *Journal of Mining Science*, 2015, no. 5, pp. 115–123. In Rus.
 16. Vostretsov A.G., Bizyaev A.A., Yakovitskaya G.E. An algorithm for estimating the stages of the process of rock destruction based on the registration of EMR signals. *Journal of Mining Science*, 2016, vol. 1, no. 3, pp. 23–28. In Rus.
 17. Kulakov G.I., Yakovitskaya G.E., Sharapova M.D., Shchelkanova V.I. Prediction of crack formation in deformable structural materials and rocks by their EMI. *Interexpo GEO-siberia*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 163–168. In Rus.
 18. Vostretsov A.G., Kulakov G. I., Bizyaev A.A., Yakovitskaya G.E. Measuring system for synchronous recording of EMR signals and mechanical parameters of deformation of rock samples in laboratory experiments. *Physical and technical problems of mineral development*, 2017, no. 6, pp. 204–210. In Rus.
 19. 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.
 20. Rabinovitch A., Frid V., Bahat D. Surface oscillations – a possible source of fracture induced electromagnetic radiation. *Tectonophysics*, 2007, vol. 431, pp. 15–21.
 21. 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.
 22. 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.
 23. 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.
 24. 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.
 25. Liu X., Wang E. Study on characteristics of EMR signals induced from fracture of rock samples and their application in rockburst prediction in copper mine. *Journal Geophys*, 2018, vol. 15, pp. 909–920.
 26. Arkhangelskaja I.V., Arkhangelskiy 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.
 27. Shostak V., Prylepa R., Kozlov O., Brzhezitsky 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.
 28. Kozhagul A., Bidaibekov Y., Bostanov B., Pak N., Kozhagulova Z. Integration of robotics design into the learning process at school. *Periodico Teche Quimica*, 2020, vol. 17, no. 35, pp. 404–424.
 29. 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.
 30. 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.
 31. 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.
 32. Voznesensky A.S., Shkuratnik V.L., Nabatov V.V., Kutkin Ya.O. Assessment of the stability of a contour array of rocks based on the results of joint borehole measurements of acoustic and electromagnetic emission parameters. *Mining information and Analytical Bulletin*, 2013, no. 8, pp. 64–70. In Rus.
 33. Yakovlev D.V., Mulyov S.N. Experience in the use of multifunctional geophysical equipment ANGEL-M in the coal and ore industry. *Coal – Russian Coal Journal*, 2014, no. 10, pp. 14–19. In Rus.
 34. Panin S.F., Mulyov S.N., Shtirz V.A. Improvement of the technology for predicting the impact-hazardous state of the array using the ANGEL-M hardware complex in the conditions of the Tashtagol and Sheregeshevsky mines. *High-tech technologies for the development and use of mineral resources*, 2014, no. 1, pp. 368–375. In Rus.
 35. Mulev S.N., Starnikov V.N., Romanevich O.A. The current stage of development of the geophysical method of registration of natural electromagnetic radiation (EMR). *Coal – Russian Coal Journal*, 2019, no. 10, pp. 6–15. In Rus.
 36. Bizyaev A.A., Voronkina N.M., Savchenko A.V., Tsupov M.N. The method of non-contact determination of dangerously loaded zones in the mining massif. *Coal – Russian Coal Journal*, 2019, no. 11, pp. 127–131. In Rus.
 37. *Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Instruktsiya po prognozu dinamicheskikh yavleniy i monitoringu massiva gornyykh porod pri otrabotke ugolnykh mestorozhdeniy»* [Federal norms and rules in the field of industrial safety «Instructions for the prediction of dynamic phenomena and monitoring of rock mass during mining of coal deposits»]. Moscow, ZAO «Scientific and Technical Center for Industrial Safety Research» Publ., 2017. Vol. 05, no. 49, 150 p.

Received: 14 September 2022.

Reviewed: 26 October 2022.

Information about the authors

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

Egor E. Razumov, assistant, researcher, 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.