

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.25

РАЗРАБОТКА МЕТОДА СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ОЧИСТНЫХ ЗАБОЯХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

М. Ройтер, М. Крах, У. Кисслинг, Ю. Векслер

*Marco Systemanalyse und Entwicklung GmbH,
E-mail: Sekretariat@marco.de, Hans-Böckler-Str., 2, г. Дахау, Германия*

Приведены экспериментальные данные сейсмоакустического мониторинга состояния массива в окрестности автоматизированного очистного забоя. В качестве прогностических параметров состояния массива приняты активность акустической эмиссии и повышение частоты следования импульсов одновременно в соседних секциях крепи. Рассчитано трещинообразование в призабойной части лавы.

Лавы, активность акустической эмиссии, частота следования импульсов, трещинообразование

DOI: 10.15372/FTPRPI20210104

Высокая производительность современных очистных забоев, достигающая на шахтах компании АО “СУЭК-Кузбасс” более 1 млн т угля в месяц, связана с большими скоростями их продвижения, что повышает интенсивность силового воздействия на пласт угля и вероятность динамических проявлений горного давления. Ситуация ухудшается вследствие увеличения длины лавы и глубины разработки. Для обеспечения безопасной работы очистных забоев требуется постоянный мониторинг геомеханического состояния массива в окрестности лавы, позволяющий своевременно распознать опасные ситуации и предпринять меры для их устранения.

Сейсмоакустический мониторинг — один из методов контроля состояния лавы. Для прогнозирования динамических явлений в очистных забоях применяются разные методы контроля, например сейсмоакустический программно-аппаратный комплекс [1]. На шахте им. С. М. Кирова АО “СУЭК-Кузбасс” проведены испытания и адаптация системы акустического контроля состояния массива в очистном забое и четырех подготовительных выработках [2].

Фирма “Марко” разрабатывает метод автоматизированного сейсмоакустического мониторинга состояния забоя, входящий в автоматизированную систему управления Robotic Mining. Данный метод позволяет прослушивать, наблюдать с помощью видеокамер состояние забоя на отдельных участках лавы при расположении сейсмоакустических датчиков на секциях крепи и оперативно оценивать ситуацию. Первые результаты апробации метода приведены в [3].

В настоящей статье представлены результаты экспериментов при расположении датчиков на каждой шестой секции крепи. Опыты проводились 14 ноября 2019 г. в лаве на шахте “Полысаевская” (АО “СУЭК-Кузбасс”). Сейсмоакустические датчики “Марко” с частотным диапазоном 2.5 – 25 000 Гц закреплялись на перекрытиях секций крепи 65, 71 и 77 у стойки. Ширина крепи 1.75 м, расстояние между датчиками 10.5 м. Схема крепи с датчиком и прибором управления крепью приведена на рис. 1.

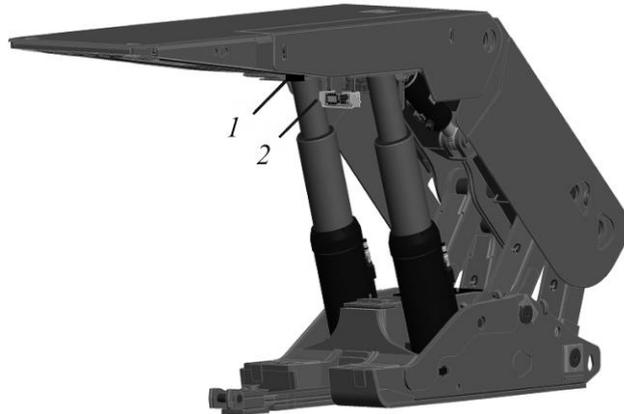


Рис. 1. Секция крепи с сейсмоакустическим датчиком “Марко” (1) и прибор управления крепью pm32 со скоростью передачи данных 100 МБ/с (2)

Информация с сейсмоакустического датчика передавалась на прибор управления крепью, от него — подземному взрывозащищенному компьютеру фирмы “Марко” и компьютеру на поверхности для анализа. Запись акустической эмиссии (АЭ) массива осуществлялась во время работы комбайна и в течение 45 мин после его остановки (рис. 2). На данной стадии мониторинга импульсы акустической эмиссии выделялись в сейсмограммах на слух и путем сравнения их сейсмограмм и спектров с известными аналогами. Уровень дискриминации 0.15 мВ. Спектры импульсов определялись с помощью программы Audacity. Выделено и проанализировано 53 импульса у секции 65, 181 импульс — у секции 71 и 190 импульсов — у секции 77. На рис. 3 показано распределение выделенных импульсов во времени вдоль участка лавы. Максимальное количество импульсов возникло у секций 71 и 77.

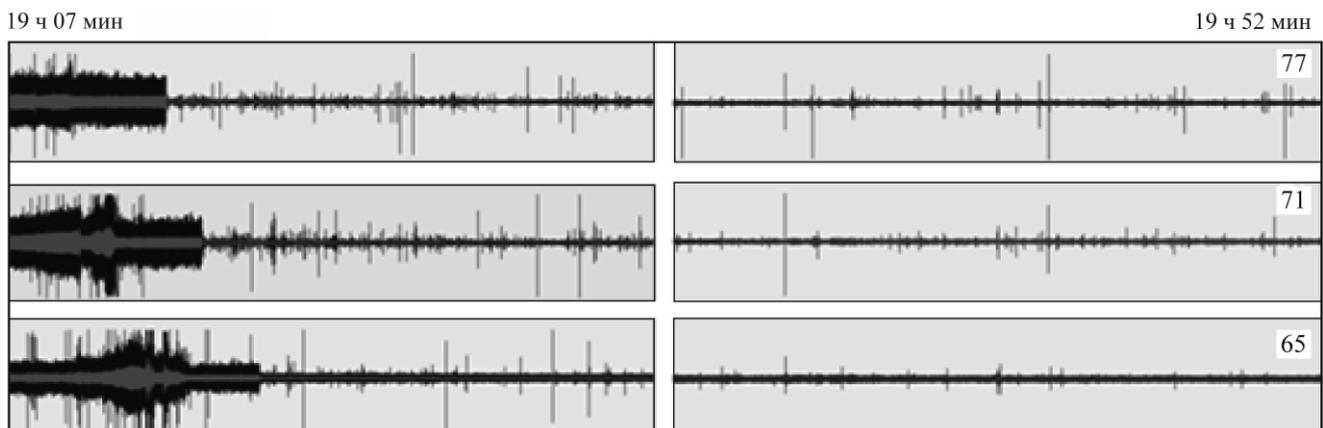


Рис. 2. Сейсмограммы сейсмоакустической эмиссии массива в работающей лаве: 65, 71, 77 — номер секций крепи; 19 ч 07 мин и 19 ч 52 мин — время начала и окончания записи акустической эмиссии массива

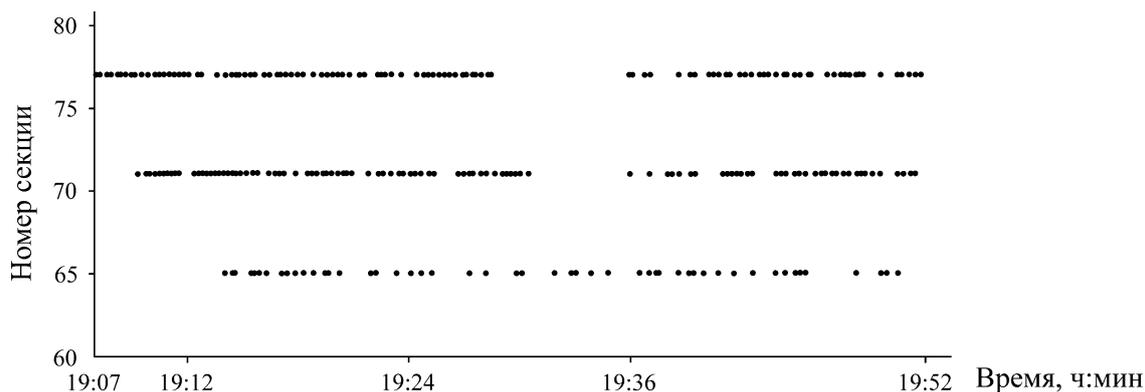


Рис. 3. Импульсы акустической активности массива сразу после остановки комбайна (левая часть) и через 22–29 мин после его остановки (правая часть); точки — моменты вступления импульсов

На рис. 4 приведено распределение частот спектральных максимумов импульсов у рассматриваемых секций. На рисунке не включены по одному импульсу с частотой спектрального максимума 1716 Гц у секции 65 и частотой 957 Гц у секции 71. Возможные паразитные импульсы можно было ожидать на частотах 49–51 Гц. У секции 65 обнаружено 3 таких импульса из 53, у секции 77 — 3 из 190, у секции 71 они отсутствовали. Незначительное количество паразитных импульсов (6 из 424) на этих частотах свидетельствуют о хорошей экранировке системы управления от электромагнитных помех, что не повлияет на результаты определения прогностических параметров опасности.

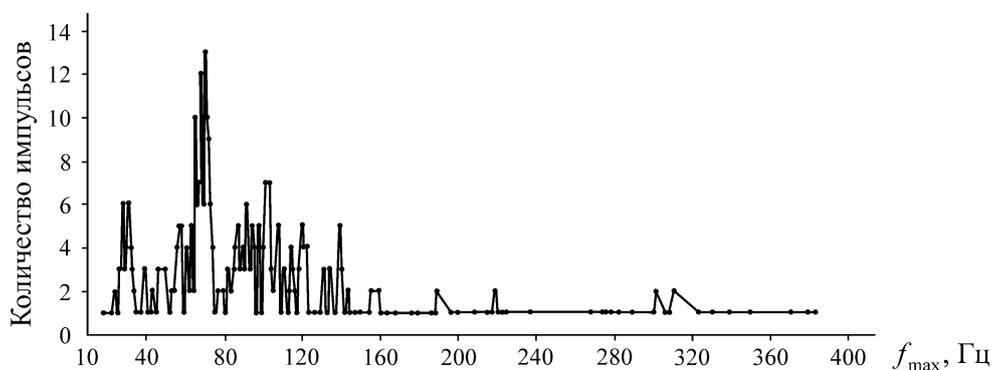


Рис. 4. Распределение частот спектральных максимумов импульсов

В качестве прогностических параметров опасности динамических явлений в лавах приняты активность акустической эмиссии массива и повышение частоты следования импульсов. Также оценивались энергетические уровни импульсов.

Последовательность суммы акустических импульсов при нагружении твердых тел соответствует закономерностям проявления ползучести твердых тел с ускорением на ее заключительной стадии, приводящим при достижении предельных значений к разрушению [4]. При приближении к стадии разрушения значительно изменяется спектральный состав акустической эмиссии [5]. В случае нагружения конструкций повторения стадий происходят неоднократно [6]. Аналогичные закономерности наблюдаются в очистных забоях угольных шахт. Накопление импульсов за время регистрации характеризует активность сейсмических событий.

На рис. 5 показаны распределения суммы импульсов во времени в призабойной части лавы у секций 65, 71 и 77, отражающие на кривых 1–3 многократные повторения во времени стадий растрескивания массива (с затуханием, постоянной скоростью и возникающими ускорениями). В некоторые моменты времени происходят одновременные ускорения сумм импульсов у соседних секций 71 и 77 (рис. 5, небольшие овалы) или у группы соседних секций 65, 71 и 77 (рис. 5, большие овалы), свидетельствующие об активации геомеханических процессов во времени и о переходе части массива на этом участке лавы длиной 20–30 м в неустойчивое состояние. Известно, что переход части массива в неустойчивое состояние может привести к горному удару [7].

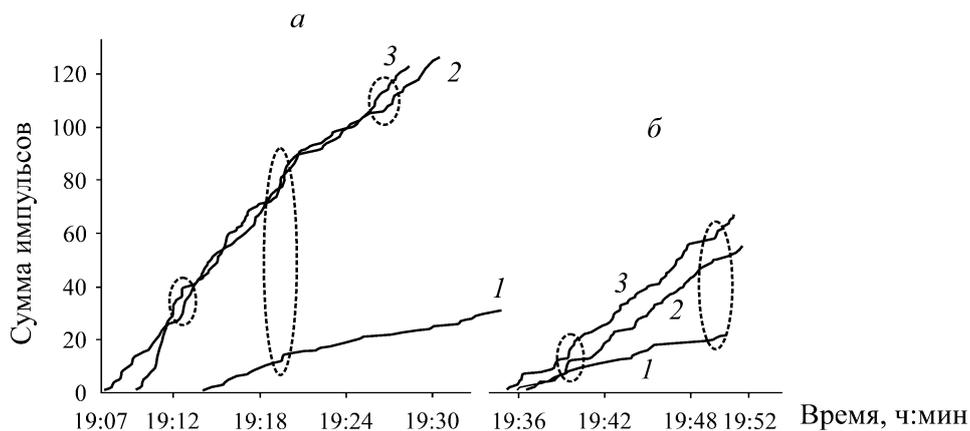


Рис. 5. Распределение суммы импульсов во времени у секций крепи 65 (1), 71 (2), 77 (3): а — сразу после остановки комбайна; б — через 22–29 мин после его остановки. Овалы — одновременные ускорения суммы импульсов

В данном случае прогностическими параметрами динамических явлений могут быть одновременные ускорения накопления импульсов у группы соседних секций 65, 71 и 77. Почти одинаковое количество импульсов у секций 71 и 77 и значительно большее, чем у секции 65, может быть следствием усиления горного давления в этой части лавы из-за его волнообразного изменения вдоль ее длины [8] и, соответственно, усилением трещинообразования. Другим фактором уменьшения количества импульсов у секции 65 может быть низкая чувствительность датчика. Однако это маловероятно, поскольку датчики тарируются. Результаты показали, что растрескивание массива в призабойной зоне пласта развивается непрерывно во времени с разной интенсивностью. Следовательно, формируемые трещиноватостью зоны отжима пласта и зоны опорного давления лавы также изменяются со временем, причем неодинаково по всей ее длине.

Активность АЭ массива отражает интенсивность его растрескивания в призабойной части лавы. В [3] запись активности АЭ массива велась в течение 5 мин. На рис. 5 видно, что одновременные ускорения суммы импульсов при обоих измерениях повторяются 3 раза через 7 мин и 1 раз через 2 мин (в среднем через 6 мин). Это время включает в себя полный цикл ползучести от замедления скорости до ее ускорения и является характерным параметром нагружения массива в данных условиях. В данном эксперименте расчет активности АЭ принимался для каждых 6 мин записи. В зависимости от горно-геологических условий для каждой лавы это время может корректироваться.

На рис. 6 показано распределение активности АЭ массива во времени в течение каждых 6 мин. Максимальное значение в массиве у всех секций возникает сразу после остановки комбайна, что указывает на наиболее опасный по внезапным выбросам угля и газа участок угольного пласта. Затем активность АЭ уменьшается. Разрыв во времени в течение 22–29 мин в распределении активности эмиссии у разных секций крепи мог произойти вследствие поступления импульсов ниже уровня дискриминации из-за снижения горного давления в результате уменьшения длины зависающей консоли кровли при ее обрушении в выработанном пространстве лавы. Далее активность АЭ возрастает. Наиболее нагруженные участки лавы в обоих случаях находятся у секций крепи 71 и 77. Тенденции изменения активности АЭ характеризуют улучшение или ухудшение состояния лавы.

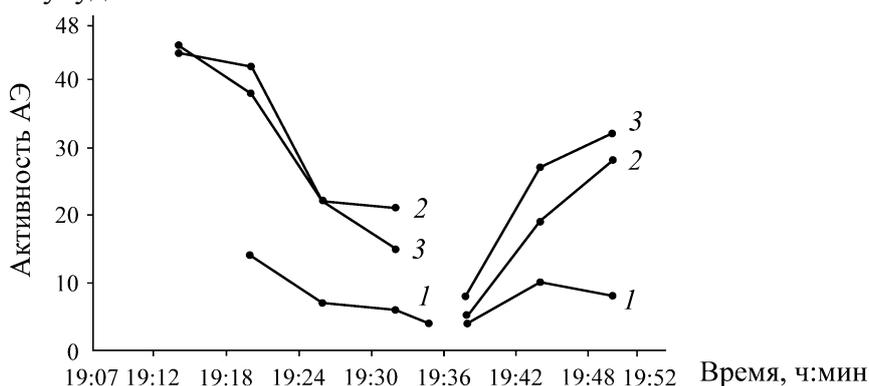


Рис. 6. Активность акустической эмиссии массива в призабойной части лавы для секций крепи 65 (1), 71 (2) и 77 (3)

Сопоставление уровня растрескивания массива с активностью АЭ показало, что при большем растрескивании активность эмиссии со временем уменьшается, при меньшем — возрастает (рис. 5, 6). Для установления возможной закономерности изменения активности АЭ необходимы наблюдения в других условиях. В течение длительного времени после проведения мониторинга динамические явления в массиве не происходили, и установленные значения прогностических параметров следует считать соответствующими безопасному состоянию лавы. Для определения пороговых значений прогностического параметра — активности АЭ необходимо наблюдать за состоянием массива не менее 6 мес [9].

На основе данных о сейсмоакустической активности массива возможна оценка трещинообразования в призабойной части лавы. Известно, что основная частота импульсов, снижающаяся с увеличением размера очага разрушения, определяется размером образующихся трещин. С увеличением размеров сливающихся трещин должны увеличиваться преобладающий период излучаемых колебаний и длительность продольной полуволны [10–13]. В [14] установлено, что длина трещины $L = VT/2$ ($T/2$ — полупериод нарастания интенсивности продольной упругой волны, $V \approx 10^3$ м/с — скорость выделения упругой энергии). Для расчета длин трещин L , генерирующих импульсы АЭ, воспользуемся результатами [15], где указано, что период первого вступления зависит от размеров щели и “видимый период продольной волны в 4–6 раз больше времени пробега этой волны вдоль нее”. Примем для минимальной длины трещины $L = VT/6$ ($T = 1/f_{\max}$ — видимый период спектра импульса, f_{\max} — частота спектрального максимума импульса, $V = 1500$ м/с — скорость продольной волны в угле [16], 6 — принятый масштабный фактор для минимальной длины трещины). Результаты расчета длин минимальных трещин по данным спектрального анализа для каждой секции приведены на рис. 7. Преимущественная длина трещин у каждой секции составляет 3–6 м.

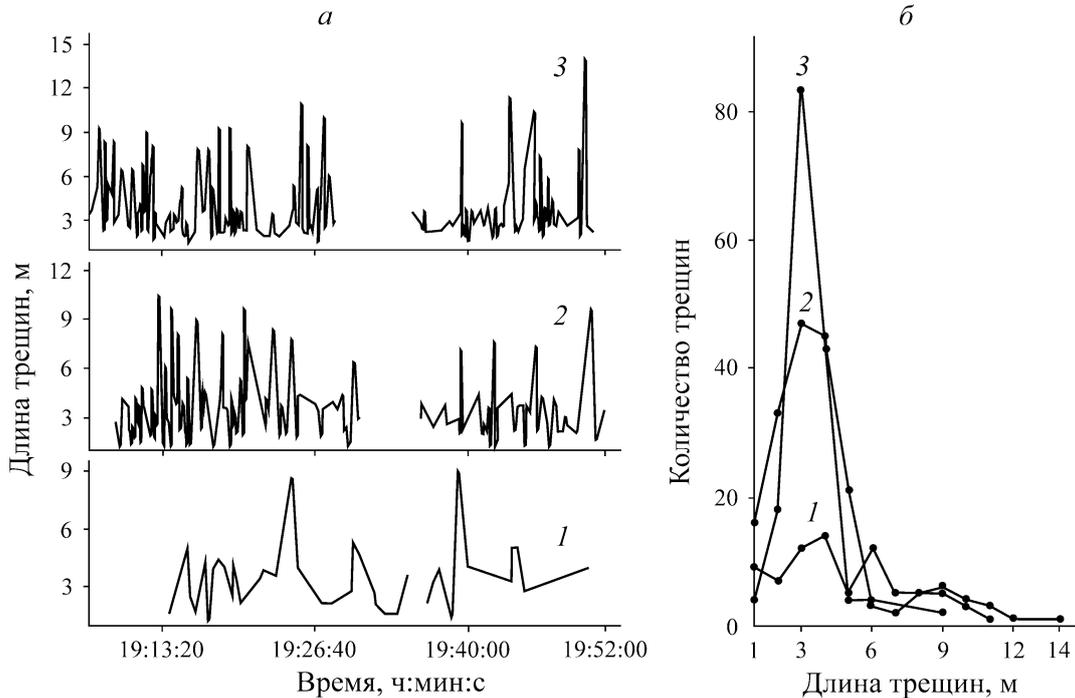


Рис. 7. Рассчитанные длины трещин (а) и их повторяемость (б) для секции крепи 65 (1), 71 (2) и 77 (3)

Трещины в пласте могут возникать параллельно забою, под небольшим углом к нему или в направлении от забоя в массив. На рис. 8 видно выдавливание блоков угля из забоя вдоль трещин, направленных от забоя в массив угля. Фотография разрушения забоя лавы на одной из шахт с системой управления “Марко” Robotic Mining сделана видеокамерой, установленной на секции крепи.

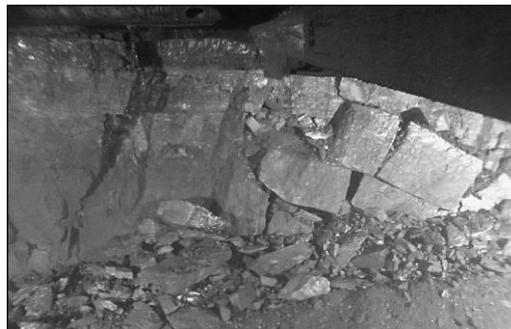


Рис. 8. Разрушение забоя лавы (выдавленные блоки угля из забоя)

В моменты одновременного ускорения суммы импульсов у секций 65, 71 и 77 длины трещин составляют 4, 8 и 9 м в первом случае и 4, 10 и 14 м — во втором (см. рис. 7). В первом — их суммарные длины при возможном слиянии составили бы 21 и 28 м, что совпадает по порядку с длиной участка лавы между секциями. Их мгновенное объединение может привести к значительному выделению свободной энергии и возможному динамическому явлению. Во втором случае при приближении забоя лавы к участку геологического нарушения в пласте может произойти мгновенное объединение трещины с нарушением, а также выделение большого количества энергии и инициирование динамического явления. Одновременное ускорение суммы им-

пульсов у группы соседних секций приводит к возникновению длинных трещин и повышению вероятности динамического явления, что подтверждает обоснованность прогностического параметра опасности. Интегрирование программы сейсмоакустического мониторинга в систему управления Robotic Mining позволяет установить и с помощью видеокамер на каждой секции крепи оперативно осмотреть участки лавы с прогностическими параметрами опасности.

По известным значениям длины возникших трещин можно определить выделяющуюся при их образовании энергию: $\lg L = 0.33 \lg E - 0.4$ (L — размер дефекта, E — упругое энерговыделение при образовании дефекта) [17]. Рассчитанные значения энергии показаны на рис. 9. Преобладающие значения выделившейся энергии импульсов находятся в интервале до 300 Дж. Значения энергии некоторых событий в лаве на шахте в Воркутинском бассейне имеют такой же порядок величины [18]. Сопоставимость энергетических параметров сейсмоакустического мониторинга в разных лавах и при разных методах их определения свидетельствует о корректном выделении импульсов АЭ. В настоящее время разрабатывается программа автоматизации выделения импульсов АЭ и расчета прогностических параметров опасности динамических явлений, когда на экранах подземного и поверхностного компьютеров отражаются обозначенные точками записанные импульсы АЭ (см. рис. 3) и выдаются протоколы с рассчитанными прогностическими параметрами опасности.

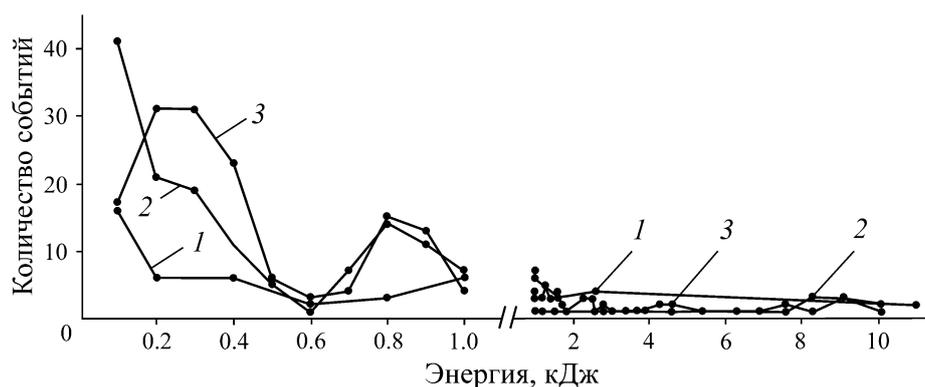


Рис. 9. Повторяемость выделившейся энергии для секций крепи 65 (1), 71 (2) и 77 (3)

ВЫВОДЫ

Представлены экспериментальные результаты сейсмоакустического мониторинга в одной из лав на шахте “Полысаевская” АО “СУЭК-Кузбасс” с расположением сейсмоакустических датчиков фирмы “Марко” на перекрытиях секций крепи. Метод мониторинга включен в автоматизированную систему управления лавой “Марко” Robotic Mining и позволяет оперативно определять опасное состояние отдельных участков лавы.

Обоснованы прогностические параметры динамических проявлений горного давления — активность АЭ массива и ускорение частоты следования импульсов АЭ у нескольких соседних секций крепи. Определены энергетические уровни импульсов АЭ и возможные длины возникших трещин. Сейсмоакустический мониторинг позволяет оперативно рассмотреть с помощью видеокамер на секциях крепи участки забоя лавы с признаками опасности.

Авторы выражают благодарность компании АО “СУЭК-Кузбасс” за поддержку и помощь в проведении шахтных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассказов И. Ю., Цирель С. В., Розанов А. О., Терешкин А. А., Гладырь А. В. Использование данных сейсмоакустических наблюдений для определения характера развития очага разрушения породного массива // ФТПРПИ. — 2017. — № 2. — С. 29–38.
2. Копылов К. Н., Смирнов О. В., Кулик А. И. Акустический контроль состояния массива и прогноз динамических явлений // Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 8. — С. 32–37.
3. Ройтер М., Крах М., Кисслинг У., Векслер Ю., Копылов К. Н., Костеренко В. Н., Смирнов Р. О., Аксенов З. В. Сейсмоакустический мониторинг автоматизированной лавы // Фундам. и приклад. вопр. горн. наук. — 2019. — Т. 6. — № 1. — С. 206–210.
4. Щербakov И. П., Куксенко В. С., Чмель А. Е. Накопительная стадия сигналов акустической эмиссии при компрессионном и ударном разрушении гранита // ФТПРПИ. — 2012. — № 4. — С. 78–82.
5. Шкуратник В. Л., Николенко П. В., Кошелев А. Е. Спектральные характеристики акустической эмиссии при нагружении образцов каменного угля и их использование для прогноза разрушения // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 23–29.
6. Carpinteri A. and Lacidogna G. Introduction. Acoustic Emission and Critical Phenomena. Struct. Mech. to Geophys., 2008. — P. 1–10.
7. Bräuner G. Gebirgsschläge und ihre Verhütung im Ruhrbergbau. Verlag Glückauf GmbH, Essen, 1992.
8. Ройтер М., Курфюрст В., Майрхофер К., Векслер Ю. Волнообразное распределение горного давления вдоль забоя лавы // ФТПРПИ. — 2009. — № 2. — С. 38–45.
9. Приказ Ростехнадзора № 339 от 15.08.2016. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности угольных месторождений.
10. Анцыферов М. С., Анцыферова Н. Г., Каган Я. Я. Сейсмоакустические исследования и проблема прогноза динамических явлений. — М.: Наука, 1971. — 135 с.
11. Heusinger P-P. Weiterentwicklung des seismoakustischen Verfahrens zur Überwachung der Emissionsaktivität in Steinkohlenlagerstätten, Glückauf-Forschungshefte, 1980, Vol. 41, No. 4.
12. Виноградов С. Д., Кузнецова К. И. Некоторые вопросы лабораторных исследований по физике землетрясений. Физические основания поисков методов прогноза землетрясений — М.: Наука, 1970. — С. 42–48.
13. Куксенко В. С., Гайворонский Г. Б., Манжиков Б. Ц., Мансуров В. А., Торгоев И. А. Возможности метода акустической эмиссии при прогнозировании деформирования и разрушения горных пород // VII Междунар. конгресс по маркшейдерскому делу: сб. докладов. — Л., 1988. — С. 3–13.
14. Куксенко В. С., Ляшков А. И., Мирзоев К. М., Негматуллаев С. Х., Станчиц С. А., Фролов Д. И. Связь между размерами образующихся под нагрузкой трещин и длительностью выделения упругой энергии // ДАН СССР. — 1982. — Т. 264. — № 4. — С. 846–848.
15. Парийский Б. С., Радченко В. П., Кейлис-Борок В. И. Продольные волны, возникающие при разрыве. Анализ сейсмических наблюдений на электронных машинах. Вычислительная сейсмология. — М.: Наука, 1966. — С. 92–106.
16. Курленя М. В., Сердюков А. С., Сердюков С. В., Чеверда В. А. Локация очагов аккумуляции метана в угольном пласте сейсмическим методом // ФТПРПИ. — 2010. — № 6. — С. 37–49.
17. Касахара К. Механика землетрясений. — М.: Мир, 1985. — 264 с.
18. Локальная система ГИТС. Лава 211, пл. Четвертый. — СПб.: ВНИМИ, 2020.

Поступила в редакцию 28/IX 2020

После доработки 08/XI 2020

Принята к публикации 15/I 2021