

## 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.

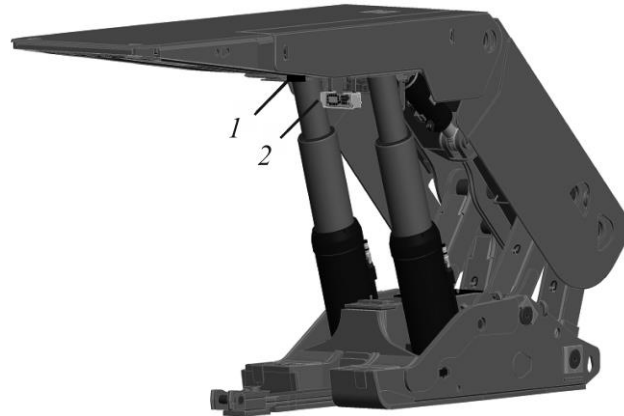


Рис. 1. Секция крепи с сейсмоакустическим датчиком “Марко” (1) и прибор управления крепью pm32 со скоростью передачи данных 100 МБ/с (2)

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.

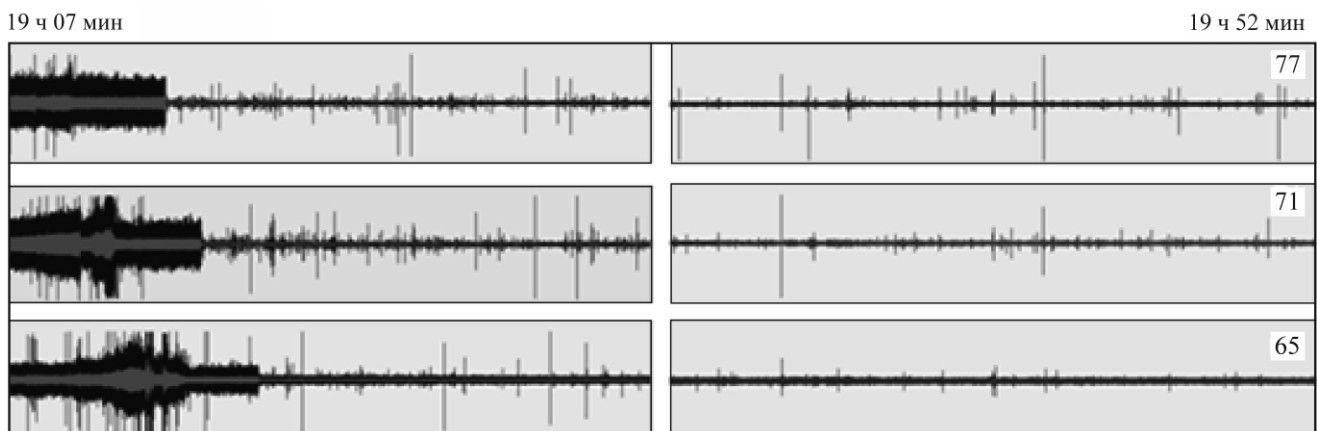


Рис. 2. Сейсмограммы сейсмоакустической эмиссии массива в работающей лаве: 65, 71, 77 — номер секций крепи; 19 ч 07 мин и 19 ч 52 мин — время начала и окончания записи акустической эмиссии массива

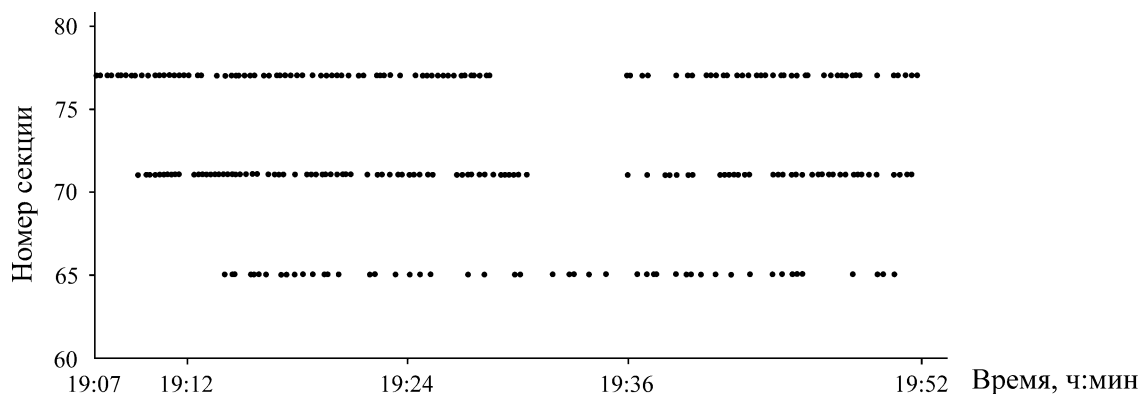


Рис. 3. Импульсы акустической активности массива сразу после остановки комбайна (левая часть) и через 22–29 мин после его остановки (правая часть); точки — моменты вступления импульсов

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.

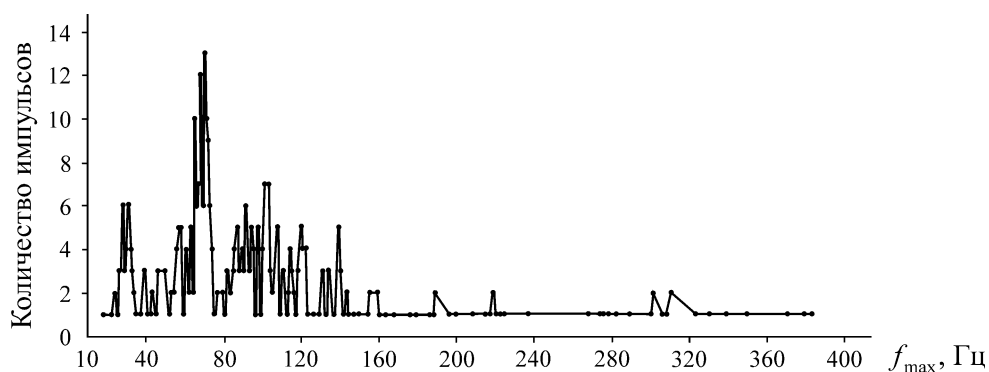


Рис. 4. Распределение частот спектральных максимумов импульсов

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].

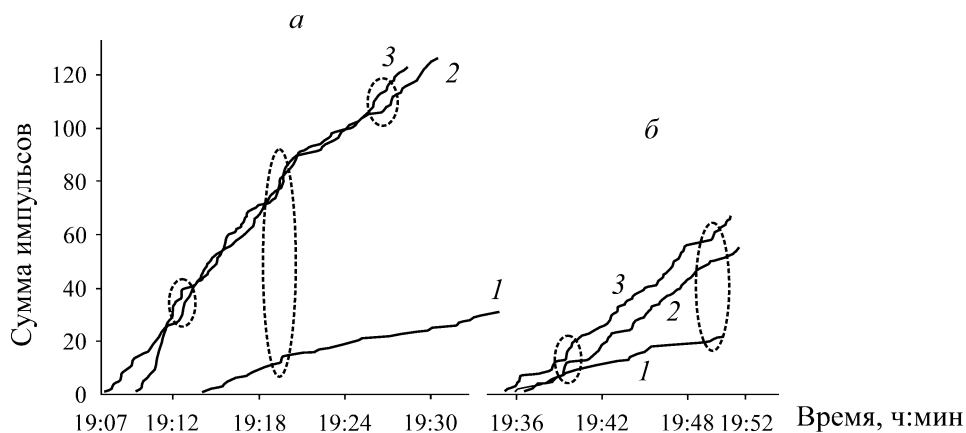


Рис. 5. Распределение суммы импульсов во времени у секций крепи 65 (1), 71 (2), 77 (3): а — сразу после остановки комбайна; б — через 22–29 мин после его остановки. Овалы — одновременные ускорения суммы импульсов

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.

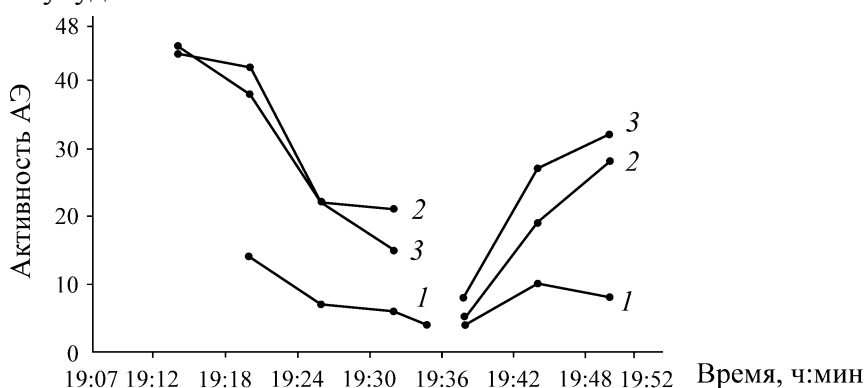


Рис. 6. Активность акустической эмиссии массива в призабойной части лавы для секций крепи 65 (1), 71 (2) и 77 (3)

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.

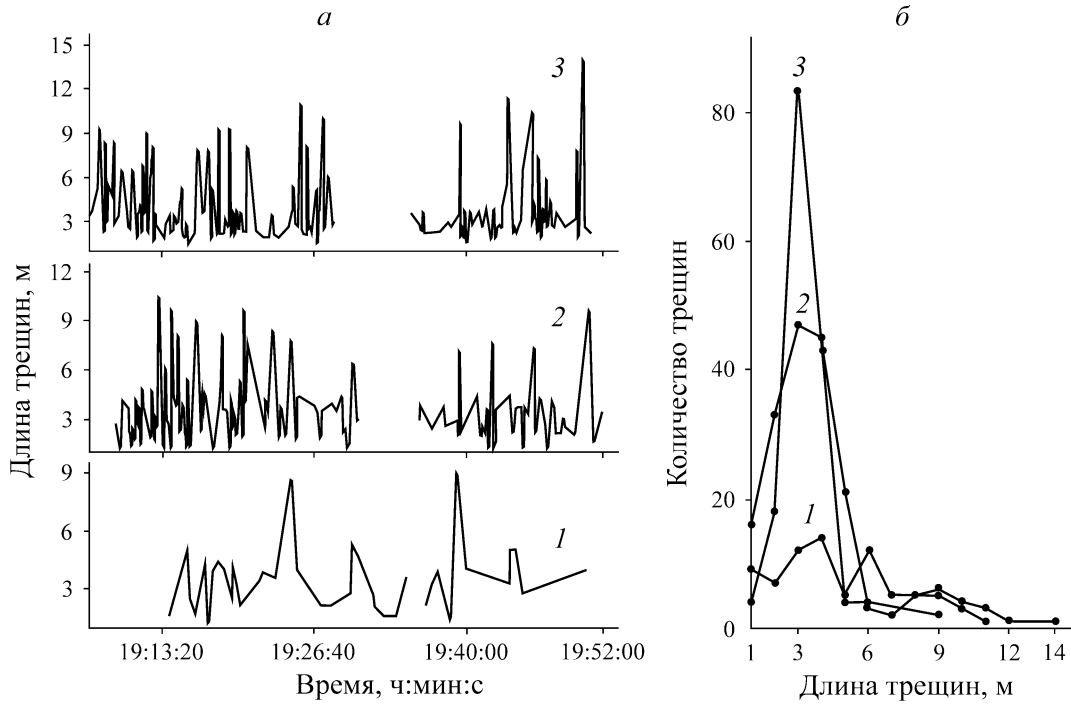


Рис. 7. Рассчитанные длины трещин (а) и их повторяемость (б) для секции крепи 65 (1), 71 (2) и 77 (3)

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.

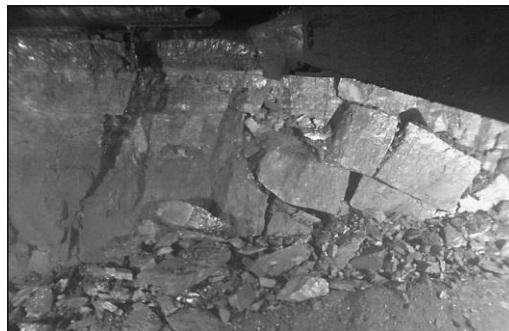


Рис. 8. Разрушение забоя лавы (выдавленные блоки угля из забоя)

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.

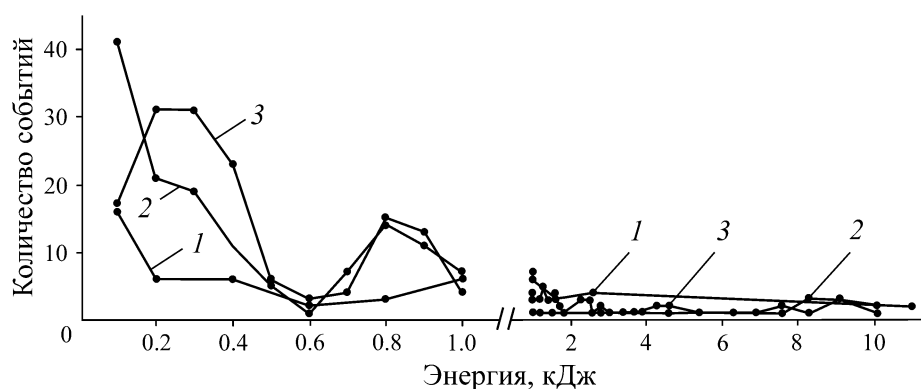


Рис. 9. Повторяемость выделившейся энергии для секций крепи 65 (1), 71 (2) и 77 (3)

## 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. **Щербаков 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*