



**СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛАВЫ**

**М. Ройтер<sup>1</sup>, М. Крах<sup>1</sup>, У. Кисслинг<sup>1</sup>, Ю. Векслер<sup>1</sup>, К. Н. Копылов<sup>2</sup>,  
В. Н. Костеренко<sup>2</sup>, Р. О. Смирнов<sup>2</sup>, З. В. Аксенов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Marco Systemanalyse und Entwicklung GmbH,*

E-mail: Sekretariat@marco.de, ul. Hans-Böckler-str. 2, Dachau 85521, Deutschland

<sup>2</sup>*АО СУЭК “Сибирская угольная энергетическая компания”*

E-mail: office@suek.ru, ул. Дубининская 53, стр. 7, г. Москва 115054, Россия

Рассмотрены результаты экспериментов сейсмоакустического мониторинга массива горных пород в районе механизированного очистного забоя. В качестве прогностических параметров состояния массива приняты параметры акустической эмиссии, конвергенции забоя лавы.

*Лавы, акустическая эмиссия, прогностический параметр*

**SEISMOACOUSTIC MONITORING OF AN AUTOMATED LONGWALL FACE**

**M. Reuter<sup>1</sup>, M. Krach<sup>1</sup>, U. Kiessling<sup>1</sup>, Yu. Veksler<sup>1</sup>, K. N. Kopylov<sup>2</sup>,  
V. N. Kosterenko<sup>2</sup>, R. V. Smirnov<sup>2</sup>, and Z. V. Aksenov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Marco Systemanalyse und Entwicklung GmbH,*

E-mail: Sekretariat@marco.de, Hans-Böckler-str. 2, Dachau, 85521 Deutschland

<sup>2</sup>*JSC SUEK, E-mail: office@suek.ru, ul. Dubininskaya 53/7, Moscow 115054, Russia*

Experimental results of seismoacoustic monitoring of the rock mass in a longwall are analysed for different cases of rock bumps. Characteristic values and parameters of acoustic emission and convergence of the face are accepted as predictive parameters of the rock mass state.

*Longwall, acoustic emission, predictive parameter*

Для обеспечения безопасности горных работ при больших скоростях подвигания механизированных очистных забоев необходим непрерывный мониторинг призабойного массива для определения участков лавы с повышенным горным давлением. На шахтах АО “СУЭК-Кузбасс” функционирует автоматизированная система акустического контроля состояния массива горных пород, позволяющая своевременно прогнозировать динамические явления и частично мониторить состояние призабойного массива [1–4]. При мониторинге выдается общее заключение о повышении опасности ведения горных работ, но при этом отсутствует определение места и времени проявления такой опасности.

В системе управления Марко “Robotic Mining” [5] определяются прогностические параметры для оценки геомеханического состояния лавы. Задача состоит в раннем распознавании участков с повышенным горным давлением, потенциально опасных по проявлениям внезапных обрушений пород и приведению выработок в аварийное состояние, участков с “событиями, предшествующими динамическим явлениям” [6].

Анализ разработки опасных по динамическим проявлениям горного давления пластов показывает, что перед горными ударами часто происходил переход части массива в окрестности выработок в неустойчивое состояние, возникающее вследствие ускорения ползучести пород [7] или резкого скачка скорости деформации [8]. Неустойчивость обусловлена усилением трещиноватости пород и сопровождается акустической эмиссией (далее — АЭ) массива.

По оценке активности АЭ пласта разработан метод сейсмоакустического прогноза динамических явлений [9, 10]. В Компании “СУЭК” прогноз всех видов динамических явлений осуществляется по параметрам искусственного акустического сигнала [4].

Разрабатываемый автоматизированный мониторинг массива включает анализ сейсмоакустической эмиссии массива и конвергенции забоя лавы. Импульсы АЭ могут поступать из зон растрескивания в пласте или в породах кровли или почвы в окрестности регистрирующего датчика. Расчеты показали, что в некоторых участках массива значительно увеличивается плотность энергии формоизменения [11] и соответственно трещинообразование и акустическая эмиссия массива.

Исследование параметров АЭ проводилось в лавах на шахтах АО “СУЭК-Кузбасс” “Полысаевская” в январе – феврале 2017 г. и “Им. С. М. Кирова” в мае 2018 г. В лаве на ш. “Полысаевская” сейсмоакустические датчики ps/ks/b закреплялись на перекрытиях каждой пятой секции крепи у стойки, включались в момент, когда комбайн находился в пяти секциях крепи перед ними и выключались после прохода комбайном следующих пяти секций. На ш. “Им. С. М. Кирова” сейсмоакустические датчики находились на секциях 7, 60, 70, 80, 89, 100 и 110 и включались последовательно через 1 мин. Продолжительность записи АЭ изменялась от 1 до 12 мин. Область измерения частот сейсмоакустического датчика составляет 2.5 – 25 000 Гц при собственном резонансе 50 кГц. Сейсмоакустическая информация передавалась на приборы управления на секциях крепи pm32 и далее — на подземный и поверхностный компьютеры для анализа. На данном этапе до разработки автоматизированного распознавания информативных импульсов АЭ из массива они определялись на слух, сравнением с имеющимися аналогами сейсмограмм импульсов от трещин и по типу спектров импульсов АЭ. На ш. “Им. С. М. Кирова” с учетом уровня дискриминации выделялись импульсы АЭ с большими амплитудами. Результаты записи АЭ массива в течение 5 мин показаны на рис. 1.

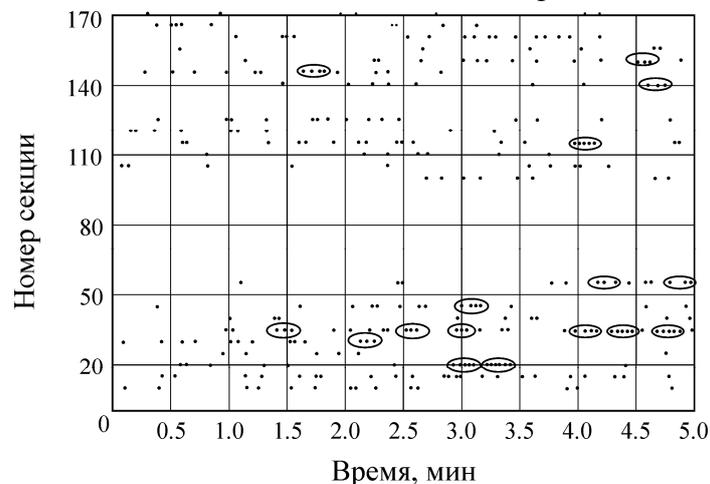


Рис. 1. Акустическая эмиссия массива: точки — вступления импульсов АЭ; овалы объединяют импульсы с повышенной частотой следования

Видно, что импульсы АЭ поступают рассеянно или концентрированно с повышенной частотой следования. Повышение частоты поступления импульсов является следствием формирования трещиноватых зон в массиве у этих участков лавы. В рассматриваемом случае наиболее интенсивно повышение частоты следования импульсов происходит в нижней части лавы.

Одним из прогностических параметров геомеханического состояния лавы является активность АЭ –  $N$ . Оценка состояния участка лавы у секции крепи с сейсмоакустическим датчиком проводится по изменению активности АЭ

$$\Delta N = N_i - N_{i-1},$$

где  $N_{i-1}$  и  $N_i$  — активности АЭ в последовательные моменты времени. Значение  $\Delta N > 0$  показывает ухудшение состояния забоя вследствие повышения горного давления.

Примем в качестве активности АЭ количество импульсов АЭ, зарегистрированных в течение 1 мин. Изменение активности АЭ у некоторых секций крепи в лаве на шахте “Им. С. М. Кирова” со временем показано на рис. 2. Данные рис. 2 свидетельствуют о различной нагрузке на пласт на разных участках лавы. Одновременные повышения активности АЭ ( $\Delta N > 0$ ) у группы секций 60, 70, 80 и 100 и секций 60–80 через 14 ч могут быть следствием цикличности нагружения кровли на протяженном участке лавы. Активность АЭ у разных секций в лаве изменялась от 1 до 5 имп./мин, средняя активность АЭ на отмеченных овалом участках лавы — от 4 до 2.2 имп./мин, что свидетельствует о снижении горного давления и улучшении состояния лавы. Пороговое значение активности АЭ можно будет установить после набора достаточного количества информации в безопасных условиях.

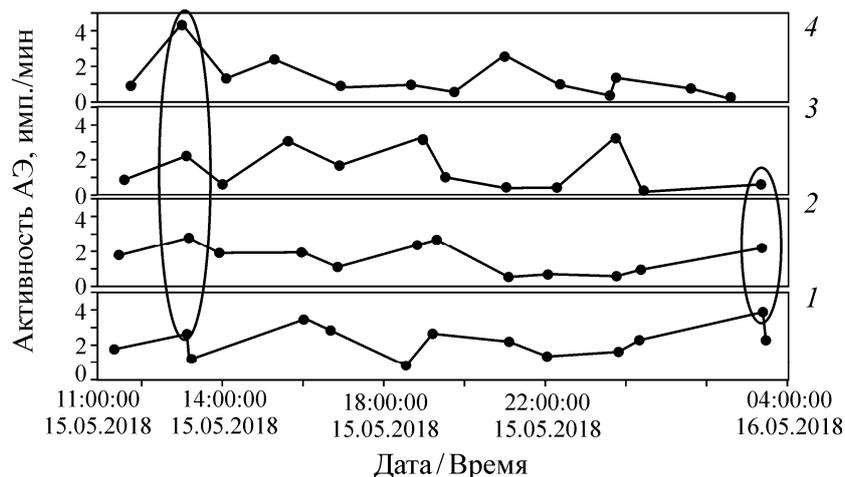


Рис. 2. Изменение активности АЭ во времени на участке лавы: 1 — секция крепи 60; 2 — 70; 3 — 80; 4 — 100; овалы объединяют участки лавы с одновременным ростом активности АЭ

Повышение частоты следования импульсов АЭ у некоторых секций крепи происходит в результате перехода части массива в их окрестности в нестабильное состояние и является одним из прогностических параметров состояния лавы, показывающим начало интенсивного трещинообразования в массиве.

На рис. 3 показана детализация ситуации в лаве на шахте “Полысаевская” из второй половины рис. 1. Повышения частоты следования импульсов зафиксированы как у отдельных секций крепи, так и одновременно у нескольких соседних секций. Последний случай может быть следствием интенсивного развития трещин в большом объеме массива.

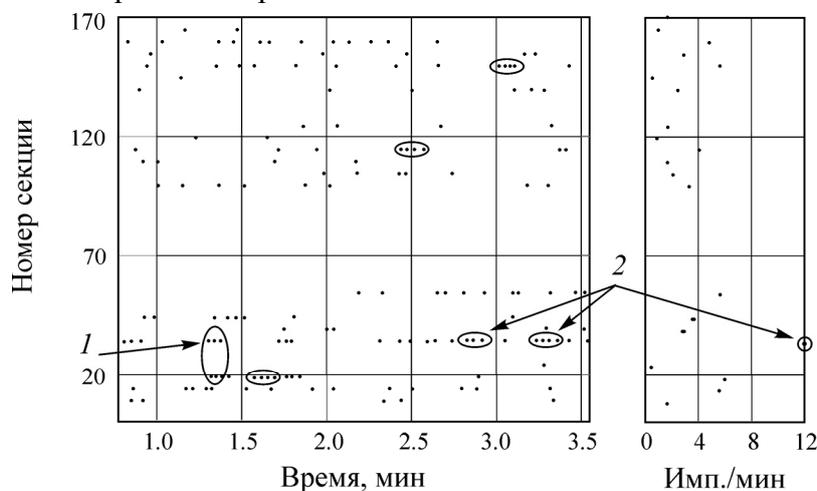


Рис. 3. Протокол сейсмоакустического мониторинга вступления импульсов АЭ (слева) и активности АЭ (справа): овал 1 — повышение частоты следования импульсов одновременно у соседних секций; 2 — повышение частоты следования импульсов при максимальной активности АЭ

Из приведенных данных следует, что наиболее нагруженным является участок лавы у секций 20–35 из-за большой области массива горных пород, перешедшей одновременно в нестабильное состояние, и максимальной активности АЭ у секции 35. Поскольку какие-либо динамические явления в рассматриваемый период времени не происходили, можно полагать, что уровень активности АЭ не более 12 имп./мин для этой лавы можно считать безопасным.

Один из параметров геомеханического мониторинга — одновременное ускорение конвергенции забоя у нескольких соседних секций крепи (метод KVA). Анализ показал, что в лавах на шахтах Германии и Китая напротив таких участков или выше, или ниже их границ происходили горные удары [5]. Ускорение конвергенции забоя лавы одновременно у нескольких соседних секций указывает на возникновение очага растрескивания пород в их окрестности. Он может сформироваться вследствие локальной дезинтеграции пласта, пород кровли или почвы в окрестности забоя. Дальнейшее развитие ситуации в очаге будет зависеть от интенсивности трещинообразования, показателем которой является уровень активности АЭ. Комбинация двух независимых прогностических параметров АЭ и конвергенции забоя на участке лавы позволит оценить уровень нагружения пласта.

### ВЫВОДЫ

Приведены результаты исследования АЭ массива горных пород в районе действующих очистных забоев. Прогностическими параметрами для выявления участков в лаве с повышенным горным давлением могут служить активность АЭ и частота следования импульсов АЭ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Artem'ev V. B.** “SUEK” JSC in 2018 — Advanced and Innovations in the service of production, *Ugol'*, 2019, no. 3, pp. 4–13. [**Артемьев В. Б.** АО “СУЭК” в 2018 году — прогрессивные технологии и инновации на службе производства // *Уголь*. — 2019. — № 3. — С. 4–13.]
2. **Kopylov K. N., Smirnov O. V., Kulik A. I., and Potapov P. V.** Testing of the automated rock conditions acoustic monitoring system, *Ugol'*, 2015, no. 7, pp. 44–48. [**Копылов К. Н., Смирнов О. В., Кулик А. И., Потапов П. В.** Испытания автоматизированной системы акустического контроля состояния массива горных пород // *Уголь*. — 2015. — № 7. — С. 44–48.]
3. **Smirnov O. V., Kulik A. I., Shilov V. I., and Gorbachev A. S.** Automated forecast of dynamic phenomena, *Dobuvayushchaya promyshlennost'*, 2016, no. 2, pp. 58–65. [**Смирнов О. В., Кулик А. И., Шилов В. И., Горбачев А. С.** Автоматизированный прогноз динамических явлений // *Добывающая промышленность*. — 2016. — № 2. — С. 58–65.]
4. **Kopylov K. N., Smirnov O. V., and Kulik A. I.** Acoustic control of the state of the massif and the prognosis of dynamic phenomena, *Bezop. Trud. Prom.*, 2015, no. 8, pp. 32–37. [**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.]
5. **Reuter M., Krach M., Kiessling U., and Veksler Yu.** Monitoring of the geomechanical state of the Strebs in control system Marco “the digital pit”, *Fundamental and Applied Mining Science*, 2016, vol. 1, no. 3, pp. 156–163. [**Ройтер М., Крах М., Кисслинг У., Векслер Ю.** Мониторинг геомеханического состояния очистного забоя угольной шахты в системе управления марко “Цифровая шахта” // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. — 2016. — Т. 1. — № 3. — С. 156–163.]
6. **Federal standards and rules in industrial safety** “Instruction on prediction of dynamic phenomena and rock mass monitoring in mining coal deposits” approved by Decree 339 of Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision, 15.08.2006. [**Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений”**, утвержденные приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 августа 2016 г., № 339.]

7. **Bräuner G.** Gebirgsschläge und ihre Verhütung in Ruhrbergbau. Verlag Glückauf GmbH, Essen. 1992.
8. **Kuksenko V. S., Makhmudov Kh. F., and Manzhikov B. Ts.** Concentration model of the destruction of solid bodies and the forecasting of catastrophic situations of large-scale objects, *Journal of Mining Science*, 2010, no.4, pp. 29–40. [**Куксенко В. С., Махмудов Х. Ф., Манжиков Б. Ц.** Концентрационная модель разрушения твердых тел и прогнозирование катастрофических ситуаций крупномасштабных объектов // ФТПРПИ. — 2010. — № 4. — С. 29–40.]
9. **Antsiferov M. S., Antsiferova N. G., and Kagan Ya. Ya.** Seismoacoustic research and the problem of forecasting dynamic phenomena. Moscow, Nauka, 1971, 136 pp. [**Анциферов М. С., Анциферова Н. Г., Каган Я. Я.** Сейсмоакустические исследования и проблема прогноза динамических явлений. — М.: Наука, 1971. — 136 с.]
10. **Dokukin A. V., Antsiferov M. S., Antsiferova N. G., Ivanov V. S., and Santalova T. I.** Correlation methodology of forecasting the danger of dynamic phenomena according to the periodic components of the seismacoustic regime, Moscow, IGD im. Skochinskogo, 1975. [**Докукин А. В., Анциферов М. С., Анциферова Н. Г., Иванов В. С., Санталова Т. И.** Корреляционная методика прогноза опасности динамических явлений по периодическим составляющим сейсмоакустического режима. — М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1975.]
11. **Veksler Yu. A., Zhdankin N. A., and Kolokolov S. B.** Initial mechanism of the sudden coal and gas outbreak beside geologic disturbances, *Journal of Mining Science*, 1983, no. 2, pp. 3–8. [**Векслер Ю. А., Жданкин Н. А., Колоколов С. Б.** О механизме инициирования внезапного выброса вблизи геологического нарушения // ФТПРПИ. — 1983. — № 2. — С. 3–8.]