2023

Nº 5

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 622.831

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЛОКАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ УДАРООПАСНОСТИ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ

И. Ю. Рассказов, П. А. Аникин, А. П. Грунин, Д. С. Мигунов, А. А. Терешкин

Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН, E-mail: adm@igd.khv.ru, ул. Дзержинского, 54, 680000, г. Хабаровск, Россия

В результате модернизации аппаратной части прибора Prognoz-L на основе современной электронной базы и накопленного опыта разработан прибор Prognoz-L2 для экспрессоценки состояния массива горных пород. Приведены результаты апробации прибора в условиях месторождения опасного по горным ударам.

Удароопасность, массив горных пород, акустическая эмиссия, локальный контроль, алгоритмы, прогноз удароопасности

DOI: 10.15372/FTPRPI20230519

Разработка месторождений полезных ископаемых и подземные горные работы в сложных горно-геологических условиях на больших глубинах сопровождаются динамическими проявлениями горного давления. Наиболее опасные формы таких явлений — горные и горнотектонические удары нередко приводят к тяжелым и катастрофическим последствиям. Прогноз и предупреждение опасных геодинамических явлений представляет собой весьма сложную задачу, что обусловлено многофакторностью условий и причин их возникновения, а также высокой неоднородностью свойств и состояния разрабатываемых массивов горных пород.

Наиболее эффективным представляется подход с применением как региональных, так и локальных методов контроля удароопасности. Последние могут быть реализованы с помощью геофизических методов и измерительных средств, в том числе основанных на регистрации параметров акустической эмиссии (АЭ) и электромагнитного излучения (ЭМИ) [1–3]. Геоакустический метод наиболее технологичный и оперативный по сравнению с геомеханическим и рядом других методов [4–8]. В последние годы на многих месторождениях для локаль-

Исследования выполнены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием "Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН", финансируемого Минобрнауки России (проект № 075-15-2021-663).

ного контроля удароопасности используется портативный прибор Prognoz-L, измеряющий ряд параметров естественной акустической эмиссии с автоматическим расчетом показателей и категории удароопасности [8–10]. География его использования охватывает рудники Дальнего Востока, Забайкалья, Республики Саха-Якутия, Кольского полуострова и Казахстана [11–13].

По результатам исследований удароопасности с помощью прибора Prognoz-L совершенствовалась методика проведения измерений и обработки данных. Анализ накопленных данных и опыта эксплуатации прибора позволил разработать и применить новые алгоритмы регистрации и цифровой обработки сигналов АЭ [8, 13–16] для оценки геомеханического состояния массива горных пород в условиях преобладающих технологических помех. Аппаратные возможности прежней версии прибора не позволяют реализовать разработанные алгоритмы и расширить его функционал. В результате модернизации аппаратной части на основе современной компонентной базы и накопленного опыта эксплуатации разработан и апробирован прибор нового поколения Prognoz-L2 для экспресс-оценки удароопасности.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРА PROGNOZ-L2

Прибор Prognoz-L2 основан на современной, более производительной компонентной базе. Функциональная схема прибора представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема прибора Prognoz-L2

Технические характеристики прибора Prognoz-L2:

Динамический диапазон	99 дБ
Частотный диапазон	1-30 кГц
Частота дискретизации сигнала	96 кГц
Степень защиты прибора	IP65
Интерфейсы беспроводной связи	BT, Wi-Fi
Тип пьезоэлектрического акселерометра	AP20XX-1000
Количество измерений с полностью заряженным элементом питания	до 24 шт. (по 10 мин)
Питание (встроенный)	3.7 В, 3.2 А·ч
Напряжение питания датчика	$16\pm1.0\;B$
Максимальная потребляемая мощность	1.9 Вт
Размеры ($\mathcal{I} \times \mathbf{III} \times \overline{\Gamma}$)	$226 \times 90 \times 45 \text{ mm}$
Вес прибора	0.45 кг

Для регистрации параметров АЭ в приборе применяются пьезокерамические вибропреобразователи серии AP20XX-1000 или 1VXXX (ООО "ГлобалТест", ООО "ГТЛаб", г. Саров). Вибропреобразователи серии AP20XX-1000 разработаны специально для Prognoz-L2 и отличаются высокой чувствительностью, низким уровнем собственных шумов, равномерностью AЧX в диапазоне 1–16 кГц. Технические характеристики вибропреобразователей серии AP20XX (датчики внесены в реестр СИ РФ) следующие:

Осевая чувствительность (±10%)	100 м $B/м \cdot c^{-2}$
Рабочий диапазон температур	$-40 \div + 125 \ ^{\circ}C$
Частотный диапазон (неравномерность ± 1 дБ)	0.5-16000 Гц
Резонансная частота в закрепленном состоянии	>15 кГц
Выходное сопротивление	<500 Ом
Напряжение питания	$15-30 \mathrm{B}$
Ток питания	2-20 мА
Масса (без кабеля)	35 г
Длина кабеля для подключения к прибору	4 м

В приборе реализована искробезопасная цепь уровня ic, что обеспечивает возможность использовать прибор в шахтных условиях (PBExib исполнение). Для оцифровки аналогового сигнала от вибропреобразователя используется АЦП PCM1808PW. Обработанный сигнал преобразуется в цифровой код разрешением 24 бит с частотой дискретизации 96 кГц. В дальнейшем оцифрованные данные поступают в центральный процессор для обработки.

Для повышения безопасности при проведении измерений параметров АЭ на удароопасном участке в приборе реализовано дистанционное прослушивание аудиопотока оператором по беспроводному интерфейсу Bluetooth, а также управление и обмен данных с внешними устройствами (гарнитура, ноутбук, планшет, ПК) по интерфейсу Wi-Fi. Это позволяет получать результат и управлять прибором в процессе измерения на расстоянии до 20 м. Информация о результатах измерений, а также история работы прибора сохраняется на встроенной карте памяти формата micro-SD объемом до 128 ГБайт. Память прибора без выгрузки может вместить до 3000 измерений с частотой дискретизации 96 кГц и длительностью по 5 мин.

В приборе применяется пленочная клавиатура, которая позволяет использовать прибор в шахтных условиях с повышенной влажностью.

Для индикации данных в процессе измерения применяется цветной IPS дисплей разрешением 800 × 480 пикселей и диагональю 4 дюйма. На дисплей прибора по окончании измерения выводится оперативная информация и результаты в текстовом и графическом виде.

Важная часть разработанного прибора — наличие новых алгоритмов в программной оболочке. В Prognoz-L2 реализовано: измерение текущего уровня шумов; измерение АЭ; динамические пороги обнаружения сигнала при измерении АЭ; визуализация результатов и процесса измерения; просмотр сигналограмм и параметров сигналов; статистические параметры принятых сигналов АЭ; настройки фильтров; критерии оценки удароопасности; учетные записи пользователей; возможность воспроизводить записи и просматривать результаты из истории измерений; передача звука по Bluetooth; выгрузка данных на сторонние устройства через Wi-Fi и т. д. Разработан набор рабочих видовых экранов и всплывающих оконных сообщений. Взаимодействие основных блоков с центральным процессором обработки организовано под управлением открытой операционной системы Raspbian.

РЕГИСТРАЦИЯ, ОБРАБОТКА И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ

После начала измерения входной сигнал оцифровывается АЦП и поступает на центральный процессор обработки Raspberry Pi Zero W. Входной поток фильтруется перестраиваемым фильтром с конечной импульсной характеристикой (КИХ). Отфильтрованная сигналограмма поступает на STA/LTA обнаружитель, где из общего потока выделяются отдельные сигналы акустической эмиссии. Для каждого из них вычисляются макропараметры и сохраняются в буфере. По окончании измерения на основании параметров обнаруженных сигналов рассчитывается категория удароопасности массива пород.

Для фильтрации входного сигнала применяется цифровой КИХ-фильтр, обладающий линейной фазовой характеристикой. Фильтр состоит из четырех последовательно включенных каскадов. Каждый каскад может быть настроен как фильтр нижних частот, фильтр верхних частот, полосовой или полосно-заграждающий (режекторный) фильтр.

Алгоритм автоматической обработки STA/LTA используется для выделения полезных сигналов [9]. В основе данного алгоритма лежит методика детектирования микросейсмических событий. Она основывается на анализе отношения амплитуд в коротком и длинном временных окнах (STA/LTA), которым моделируется отношение "сигнал – шум" (SNR). Если f_i — отсчеты принимаемого сигнала, N_{STA} , N_{LTA} — количество отсчетов короткого и длинного окна усреднения, то критерий STA/LTA для k-го отсчета выражается соотношениями:

$$\mathrm{STA}_{k} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{STA}}} \left| f_{k+i} \right|}{N_{\mathrm{STA}}}, \quad \mathrm{LTA}_{k} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{LTA}}} \left| f_{k+i} \right|}{N_{\mathrm{LTA}}}, \quad \mathrm{SNR}_{k} = \frac{\mathrm{STA}_{k}}{\mathrm{LTA}_{k}}.$$

Для рассматриваемых данных эмпирически выбраны $N_{\text{STA}} = 300 \ (\sim 3 \text{ мc})$ и $N_{\text{LTA}} = 100\ 000 \ (\sim 1 \text{ c})$. В случае превышения порогового значения коэффициента SNR > 3 сигнал считался обнаруженным. Порог получен эмпирически в результате обработки зарегистрированных экспериментальных данных.

Состояние горного массива оценивалось прибором локального контроля Prognoz-L2 с использованием апробированных методик [17, 18]. В качестве критериев выступают интенсивность АЭ без видимого влияния технологических процессов N_{15} и показатель амплитудного распределения b [9]. Показатель N_{15} позволяет судить о достижении предельных нагрузок в горных породах краевой части массива, показатель b характеризует неустойчивость процесса деформирования, нарастание количества импульсов высокой энергии.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ШАХТНЫХ УСЛОВИЯХ

Апробацию прибора проводили в условиях удароопасных полиметаллических месторождений Восточного Приморья. Для определения характеристик прибора и разработки новых алгоритмов выделения сигналов АЭ на фоне интенсивных технологических помех проведены экспериментальные исследования имитационных (эталонных) форм сигналов в массиве горных пород. Имитационные импульсы генерировали с помощью вибрационной (безмембранной, неодимовой) портативной акустической системы (излучателя), конструкция которой позволяет использовать любую поверхность как диффузор. Сигналы регистрировались прибором поочередно в пунктах измерения с помощью датчика серии АР2099-1000. Измерения проводились в борту горной выработки Южного месторождения на различном (от 0.2 до 13.0 м) расстоянии от излучателя с шагом 1.0 м. В процессе эксперимента генерировалась аудиодорожка, включающая следующие виды сигналов: многочастотный импульс длительностью 20 мс, содержащий частоты в диапазоне 6–12 кГц с шагом 500 Гц; одночастотные сигналы прямоугольной формы длительностью 5 и 20 мс с несущей частотой 6–12 кГц с шагом 500 Гц; сигналы треугольной формы длительностью 5 мс с несущей частотой 6–12 кГц с шагом 500 Гц.

Сигналы выстраивались в группы с паузой 50 мс. Группы сигналов разделялись паузой 150 мс и изменяли свою амплитуду с шагом 10% от максимальной мощности. Зафиксировано 400 различных по характеристикам вариантов сигналов. Общее число сгенерированных сигналов составило 1200.

Амплитудно-частотная характеристика излучателя оставалась неизменной на протяжении всего проведения эксперимента. Это позволило проанализировать затухание каждой из частот в диапазоне 6–12 кГц с шагом 500 Гц в исследуемом участке горного массива.

На рис. 2 приведен спектр многочастотного импульса, принятого в точке 2 (на расстоянии 2 м от излучателя) и в точке 13 (на расстоянии 13 м от излучателя). Расстояние между точками 11 м. В исследуемом участке горного массива анализировалась скорость затухания каждой из исследуемых частот в диапазоне 6-12 кГц с шагом 500 Гц. В результате выявлено наличие в регистрируемых сигналах шумовой компоненты на частоте 12 ± 0.5 кГц, что затрудняет корректное определение параметров затухания в данном диапазоне.



Рис. 2. Спектр многочастотного импульса в различных точках массива

На частоте 10 кГц, наблюдалось аномальное изменение амплитуды сигнала в различных точках массива. На рис. 3 приведены вычисленные значения скорости затухания исследуемых частот в массиве горных пород Южного месторождения.



Рис. 3. Зависимость скорости затухания волн АЭ от частоты в массиве горных пород

Полученные значения позволяют определить границы зоны регистрации прибором сигналов акустической эмиссии в диапазоне 6–12 кГц. С учетом скорости затухания указанного диапазона частот и уровня собственных шумов прибора определен радиус зоны регистрации полезного сигнала (максимально до 60 м) в зависимости от спектрального состава сигналов естественной акустической эмиссии.

В процессе натурных испытаний прибора Prognoz-L2 в условиях действующего горнодобывающего предприятия выполнена серия тестовых замеров параметров АЭ. На руднике "2-й Советский" участка Южный в забое транспортно-вентиляционного съезда на отм. 470 м наблюдались визуальные признаки динамических проявлений горного давления в виде шелушения бортов и заколообразования кровли. По данным АСКГД Prognoz-ADS, на этом участке рудничного поля регистрировались сейсмоакустические события с различной энергией.

Во время измерения фиксировались помехи от бурового оборудования и отчетливо прослушивались короткие щелчки в массиве, идентифицируемые как естественные события АЭ. На рис. 4*a* представлен частотный спектр принятого сигнала без применения фильтрации, на котором видно наличие постоянного техногенного шума в области 70, 5000 и 12000 Гц. Наличие указанных гармоник не позволяет встроенному алгоритму обнаружить сигналы акустической эмиссии. На рис. 4*б* показано эффективное устранение гармоник из спектра, вызванных техногенными сигналами, путем включения встроенной функции фильтрации.



Рис. 4. Амплитудный спектр зашумленного техногенными помехами АЭ-сигнала: *а* — без фильтрации; *б* — после фильтрации

На рис. 5 представлен фрагмент звуковой дорожки после применения каскада полоснозаграждающих фильтров, позволяющего выделить сигналы акустической эмиссии на фоне шумов.



Для оценки категории удароопасности участка массива горных пород измерялись акустические эмиссии с включенным каскадом фильтров в течение 5 мин и определялись следующие параметры: количество событий АЭ в единицу времени N₁₅, показатель амплитудного распре-

деления *b*, а также показатель, характеризующий закономерное снижение частоты акустических сигналов. В ходе измерения осуществлялся слуховой контроль регистрации эмиссии с использованием беспроводной гарнитуры. Каждый сигнал АЭ, зарегистрированный в ходе измерения, сохранялся в памяти прибора, а весь процесс и результат выводился сразу на экран.

За время измерения 5 мин зафиксировано 148 импульсов АЭ. Расчетные параметры составили $N_{15}=26.50$ и b=0.37, что соответствует категории "опасно" для условий месторождения Южное ($N_{15}>4$, $b \le 1$). Максимальная амплитуда зарегистрированных акустических импульсов составила – 39 дБ, частота сигналов АЭ в диапазоне 6–13 кГц, длительность 2–11 мс.

По результатам анализа и обобщения экспериментальных данных, полученных с помощью прибора локального контроля Prognoz-L2 в условиях рудника "2-й Советский", участка Южный, предстоит уточнить закономерность изменения спектральных характеристик сигналов АЭ в зависимости от удаления источника сигналов от точки их регистрации.

выводы

На основе современной компонентной базы разработан портативный прибор для локального контроля и оценки категории удароопасности Prognoz-L2 нового поколения, который позволяет регистрировать и проводить анализ амплитудно-частотных характеристик сигналов акустической эмиссии в условиях интенсивных технологических шумов действующего горнодобывающего предприятия.

В условиях подземного рудника определена естественная акустическая эмиссия массива горных пород с оценкой его удароопасности.

Прибор локального контроля удароопасности Prognoz-L2 обладает возможностью загрузки обновлений внутренней прошивки прибора пользователями, что создает условия для развития перспективных направлений приема и обработки сигналов, включая предварительную оценку шумовой обстановки в частотной области непосредственно перед проведением измерений и автоматическую настройку необходимых фильтров, применения технологий машинного обучения для анализа параметров регистрируемых АЭ-событий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Ардашев К. А., Ахматов В. И., Катков Г. А. Методы и приборы для исследования проявлений горного давления. М.: Недра, 1981. 129 с.
- Бизяев А. А., Яковицкая Г. Е. О контроле динамических проявлений горного давления с использованием усовершенствованной аппаратуры регистрации сигналов // ФТПРПИ. 2015. № 5. С. 115–123.
- 3. Яковицкая Г. Е., Опарин В. Н., Серяков В. М., Вострецов А. Г. Измерительная система совместной регистрации давления, перемещений и сопутствующего электромагнитного излучения при одноосном сжатии образцов горных пород. Коэффициент механико-электромагнитных преобразований // Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горно-технических и природных системах. Т. 2. Новосибирск: СО РАН, 2019. С. 376–402.
- 4. He S. Q., Song D. Z., Li Z. L., He X. Q., Chen J. Q., Li D. H., and Tian X. H. Precursor of spatio-temporal evolution law of MS and AE activities for rockburst warning in steeply-inclined and extremely-thick coal seams under caving mining conditions, Rock Mech. Rock Eng., 2019, Vol. 52. P. 2415–2435.

- Lou Q., Song D., He X., Li Z., Qiu L., Wei M., and He S. Correlations between acoustic and electromagnetic emissions and stress drop induced by burst-prone coal and rock fracture, J. Safety Sci., 2019, Vol. 115. — P. 310–319.
- 6. Feng G. L., Feng X. T., Chen B. R., Xiao Y. X., and Yu Y. A microseismic method for dynamic warning of rockburst development processes in tunnels, Rock Mech. Rock Eng., 2015, Vol. 48, No. 5. P. 2061–2076.
- 7. Liang Zhang, Ting Ren, Xiangchun Li, and Lihai Tan Acoustic emission, damage and cracking evolution of intact coal under compressive loads: Experimental and discrete element modelling, Eng. Fracture Mechan., 2021, Vol. 252.
- 8. Рассказов И. Ю., Аникин П. А., Мигунов Д. С., Гладырь А. В., Макаров В. В., Искра А. Ю., Желнин Д. О., Сидляр А. В. Совершенствование технических средств локального контроля удароопасности при ведении горных работ в сложных горногеологических условиях // ГИАБ. — 2014. — № S4-2. — С. 22-30.
- 9. Рассказов И. Ю., Мигунов Д. С., Аникин П. А., Гладырь А. В., Терешкин А. А., Желнин Д. О. Геоакустический портативный прибор нового поколения для оценки удароопасности массива горных пород // ФТПРПИ. 2015. № 3. С. 169–179.
- 10. Терешкин А. А., Рассказов И. Ю., Аникин П. А., Мигунов Д. С. Результаты применения геоакустического метода локального контроля удароопасности на рудниках Дальнего Востока // ГИАБ. 2017. № S24. С. 338–347.
- Rasskazov I. Yu., Saksin B. G., Anikin P. A., Gladyr A. V., Potapchuk M. I., Usikov V. I., Tereshkin A. A., and Sidlyar A. V. Methods and technical facilities for the assessment of geodynamic risk and geomechanical monitoring of burst-hazard rock massif, Geomech. Geodyn. Rock Masses, 2018, Vol. 1–2. — P. 1501–1506.
- Tereshkin A. A., Rasskazov I., Anikin P. A., Gladyr A. V., and Migunov D. S. Improvement of technology and procedures of local rockburst hazard control, IOP Conf. series: Earth and Env. Sci.: Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior, 2021, Vol. 773. — 012062.
- 13. Liang W. Z., Sari Y. A., Zhao G. Y., McKinnon S., and Wu H. Probability estimates of short-term rockburst risk with ensemble classifiers, Rock Mech. Rock Eng., 2021, Vol. 54. P. 1799–1814.
- 14. You Ting, Li Pei, Tong Guan, and Shen Jian. Development of acoustic emission high-speed data acquisition system, Advanced Materials Res., 2012. P. 433-440.
- 15. Mothe G. S., Dandawate Y. H., and Achwal V. Signal processing system design for acoustic emission signatures detection and analysis, 2nd IEEE Int. Conf. on Recent Trends in Electronics, Information and Communication Technology (RTEICT), Bangalore, India, 2017. P. 1373–1378.
- Freiberger W. F. An approximate method in signal detection, Quarterly Appl. Math., 1963, Vol. 20. P. 373-378.
- **17.** Методические указания по сейсмоакустическим и электромагнитным методам получения критериев степени удароопасности. Л.: ВНИМИ, 1986. 32 с.
- 18. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых.
 ФНП в области промышленной безопасности. Утверждены приказом Ростехнадзора 08.12.2020,
 № 505. М., 2020. 275 с.

Поступила в редакцию 09/VI 2023 После доработки 12/IX 2023 Принята к публикации 15/IX 2023