



**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ ИМИТАЦИОННЫХ ИМПУЛЬСОВ  
ВО ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОДАХ НИКОЛАЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

**А. А. Терешкин, М. И. Рассказов, Д. И. Цой, А. В. Константинов, П. А. Аникин**

*Институт горного дела ДВО РАН, E-mail: andrey.tereshkin@bk.ru, rasm.max@mail.ru, denis.tsoi@mail.ru, alex-sdt@yandex.ru, pav.anik@mail.ru, ул. Тургенева 51, г. Хабаровск 680000, Россия*

Проведены экспериментальные исследования закономерностей распространения упругих волн в удароопасном массиве горных пород. Установлена зависимость удаления имитационного импульса от первичного преобразователя относительно значений параметров амплитуды и длительности, которая может быть использована при расчете энергетической составляющей акустико-эмиссионного события и разработки дополнительного критерия для более достоверной оценки степени удароопасности локальных участков массива горных пород с помощью прибора локального контроля "Prognoz- L".

*Акустическая эмиссия, горный удар, прибор локального контроля, мониторинг горного давления, удароопасность*

**STUDY OF WAVE PROPERTIES OF SIMULATION PULSES  
IN HOST ROCKS OF THE NIKOLAEVSKY DEPOSIT**

**A. A. Tereshkin, M. I. Rasskazov, D. I. Tsoi, A. V. Konstantinov, and P. A. Anikin**

*Institute of Mining, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, E-mail: andrey.tereshkin@bk.ru, rasm.max@mail.ru, denis.tsoi@mail.ru, alex-sdt@yandex.ru, pav.anik@mail.ru, ul. Turgenev 51, Khabarovsk 680000, Russia*

The dependence of the simulation pulse removal from the primary transducer with respect to the values of amplitude and duration parameters has been determined. This dependence can be used to calculate the energy component of an acoustic emission event and to develop an additional criterion for a more reliable assessment of rockburst hazard level in local sections of the rock mass using a local control device Prognoz- L.

*Acoustic emission, rock burst, local control device, rock pressure monitoring, rockburst hazard*

При разработке месторождений полезных ископаемых подземным способом производственники нередко сталкиваются с проблемой повышенного горного давления, обусловленного влиянием толщи залегающих выше пород, а также региональными и местными тектоническими проявлениями [1–5]. Зачастую горное давление возникает вследствие неправильно выбранной системы отработки месторождения и может проявляться как в статической, так и в динамической форме.

В современном мире существует ряд различных геофизических и геомеханических методов для мониторинга зон повышенного горного давления. Из геофизических более всего используются сейсмический, акустический и электромагнитный методы. В основе данных методов лежит

зависимость энергии, амплитуды, длительности, частоты, скорости распространения и других параметров акустических и электромагнитных колебаний от напряженного состояния и физико-механических свойств горных пород [6–9]. Для контроля горного давления акустическим методом применяются методики и инструменты регионального и локального мониторинга [10–13].

Цель работы — установление закономерности значений основных параметров акустической эмиссии посредством генерации имитационных импульсов.

**Методика и инструменты мониторинга.** Разработанный в ИГД ДВО РАН прибор локального контроля “Prognoz-L” (рис. 1), основанный на расчете значений параметров акустической эмиссии, успешно эксплуатируется в условиях подземных рудников Николаевского, Южного и Силинского (АО “ГМК Дальполиметалл”), Восток-2 АО (“Приморский ГОК”), рудников Айхал и Интернациональный (АК “Алроса”), Глубокий (ПАО “ППГХО”), Объединенного Кировского рудника, рудника Расвумчорр (АО “Апатит”), месторождения Олений ручей (АО “Северо-Западная фосфорная компания”).



Рис. 1. Локальный прибор “Prognoz-L”

В процессе эксплуатации локального прибора горными предприятиями регулярно ведется сбор данных натурных измерений [14], которые передаются в ИГД ДВО РАН, по результатам их обработки корректируются критерии и дается предварительное заключение о степени удароопасности отдельных участков массива в выработках на глубоких горизонтах месторождений.

Портативный прибор состоит из двух основных частей — первичного приемного преобразователя (датчика) и измерительного блока. Монтаж датчика производится на открытую поверхность участка горной выработки с геодинамическими проявлениями. Характеристики прибора: амплитудный диапазон менее 65.5 дБ, частотный диапазон 4–16.5 кГц, неравномерность в полосе пропускания менее 10 %. Параметры первичного преобразователя AP2099-1000: осевая чувствительность ( $\pm 10\%$ ) 100 мВ/мс<sup>-2</sup>, относительная поперечная чувствительность менее 5 %, амплитудный диапазон 0.5 мс<sup>-2</sup>, частотный диапазон (неравномерность  $\pm 1$  дБ) 0.5–10000 Гц, резонансная частота в закрепленном состоянии более 15 кГц, уровень шума (1 Гц–10 кГц) менее 0.00001 мс<sup>-2</sup>. В приборе локального контроля реализован ряд алгоритмов для выделения полезных сигналов акустической эмиссии (АЭ) и фильтрации технологических помех различной природы.

Для оценки состояния горного массива прибором локального контроля “Prognoz-L” используются методики, в которых в качестве критериев выступают: интенсивность АЭ без видимого влияния технологических процессов  $N_{АЭ}$  и показатель амплитудного распределения  $b$ . Показатель интенсивности  $N_{АЭ}$  позволяет судить о достижении предельных нагрузок в горных породах краевой части массива. Показатель амплитудного распределения  $b$  характеризует неустойчивость процесса деформирования, нарастание количества импульсов высокой энергии и рассчитывается по формуле:

$$b = \lg \frac{N_{\text{АЭ}}^1}{N_{\text{АЭ}}^2} / \lg \frac{A_2}{A_1}, \quad (1)$$

где  $b$  — соотношение числа акустических импульсов с разной амплитудой (энергией);  $A_1$  и  $A_2$  — пороги (уровни чувствительности прибора);  $N_{\text{АЭ}}^1$  и  $N_{\text{АЭ}}^2$  — интенсивность АЭ при различных порогах.

Многостадийность процесса хрупкого разрушения горных пород во многих случаях не позволяет достоверно оценивать степень удароопасности при помощи критериев учитывающих только количественную оценку и соотношения импульсов АЭ различной энергии. В случае перехода из стадии относительно стабильного накопления энергии в стадию прорастания “магистральной” трещины [15] между микроразрывами вероятность повышения степени удароопасности увеличивается даже при низком значении количественного показателя. Другими словами, при измерении категории удароопасности приконтурной части массива следует учитывать суммарный энергетический коэффициент зафиксированных импульсов АЭ в единицу времени.

Оперативность оценки категории удароопасности выработок при помощи локального прибора ограничивает возможность локализации импульсов естественной АЭ и значений их энергии по причине использования только одного первичного преобразователя. Таким образом, для расчета энергетической составляющей импульса АЭ требуется подход для расчета удаленности события до первичного преобразователя прибора.

**Объект исследований и проведение измерений.** На руднике “Николаевский” (гор. –420 м) осуществлен эксперимент, который предполагал имитацию эталонного импульса с заданными параметрами длительностью 1 мс и частотой 4 кГц. Частота импульса выбрана с учетом избежания затухания сигнала на малых расстояниях.

Схема проведения измерений параметров сгенерированных импульсов изображена на рис. 2. На разных расстояниях от датчика генерировался эталонный импульс и данные записывались на карту памяти в двух файлах — текстовый и звуковой. Измерения выполнялись в туфобрекчиях реолитов с включениями скарнов.

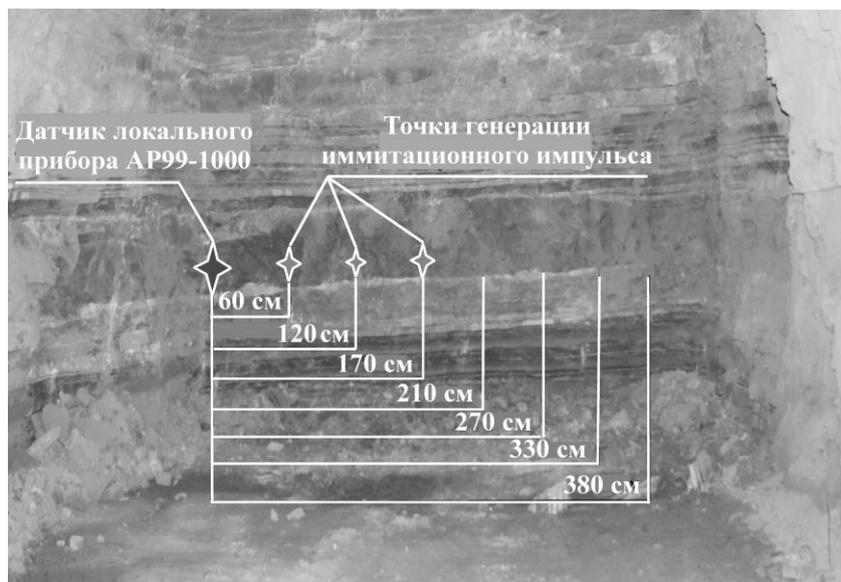


Рис. 2. Схема проведения измерений сгенерированных импульсов с заданными параметрами

Для генерации выбрана портативная акустическая система, конструкция которой позволяет использовать любую поверхность как диффузор. Генератор имеет плоскую амплитудно-частотную и высокие переходные и передаточные характеристики, частотный диапазон 20–20000 Гц.

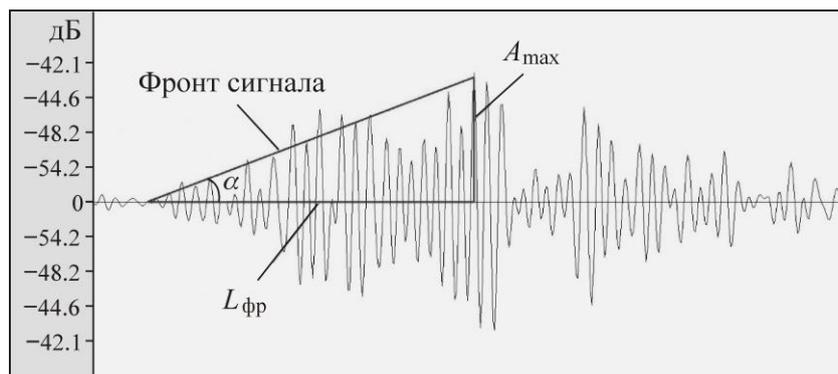


Рис. 3. Сигналограмма исследуемого имитационного импульса

Предметом исследования стал расчет параметров фронта импульса (рис. 3), в частности, отношение его максимальной амплитуды  $A_{\max}$  (Квант) к длительности фронта  $L_{\text{фр}}$  (мс), т. е. тангенса угла наклона  $\alpha$ :

$$\text{tg} \alpha = \frac{A_{\max}}{L_{\text{фр}}}, \quad (2)$$

Видно, что с увеличением расстояния наблюдается снижение амплитуды и одновременное увеличение длительности фронта. Это обусловлено затуханием импульса в неоднородной породной среде. Наличие включений и контактов между горными породами также влияет на скорость прохождения волны и в конечном счете на значение параметров зарегистрированных импульсов. По результатам исследований рассчитан тангенс импульсов, зарегистрированных на расстоянии до 5.5 м. Зависимость тангенса угла наклона фронта от удаления до датчика показана на рис. 4. Выполнена степенная аппроксимация, описанная функцией  $y = 3.3037x^{-1.856}$ .

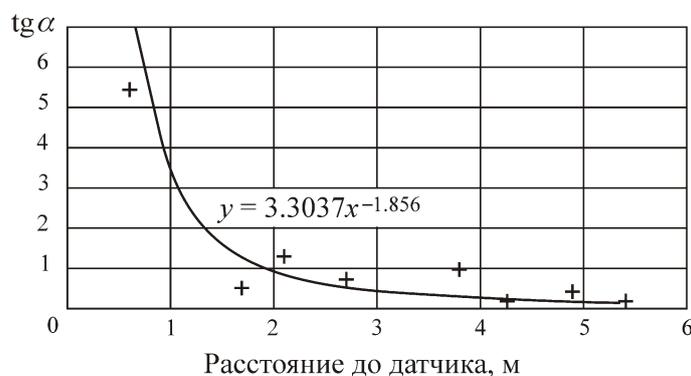


Рис. 4. Зависимость  $\text{tg} \alpha$  фронта импульса от его удаления относительно приемника

## ВЫВОДЫ

В натуральных условиях рудника “Николаевского” с помощью прибора “Prognoz-L” проведены экспериментальные исследования закономерностей распространения упругих волн в удароопасном массиве горных пород. Полученные результаты предлагается использовать для уточнения критериев удароопасности и повышения надежности прогноза опасных динамических проявлений горного давления. Установленная степенная зависимость отношения основных параметров импульса с вероятностью расчета его расстояния до датчика локального прибора, может помочь при расчете энергетической составляющей акустической эмиссии события и разработки дополнительного критерия для более достоверной оценки степени удароопасности локальных участков массива горных пород.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Federal Rules** and regulations on industrial safety: Safe Mining at Rockburst-Hazardous Deposits. Approved by Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision as of December 2, 2013, no. 576. [**Федеральные нормы** и правила в области промышленной безопасности “Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам”. – Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 2 декабря 2013 г., № 576).]
2. **Rasskazov I. Yu., Kursakin G. A., Potapchuk M. I., and Rasskazov M. I.** Geomechanical assessment of technological solutions in the design of mining operations in rockburst hazardous conditions, *Journal of Mining Institute*, 2012, no. 198. pp. 80–85. [**Рассказов И. Ю., Курсакин Г. А., Потапчук М. И., Рассказов М. И.** Геомеханическая оценка технологических решений при проектировании горных работ в удароопасных условиях // *Записки Горного института*. — 2012. — Т. 198. — С. 80–85.]
3. **Potapchuk M. I., Tereshkin A. A., and Rasskazov M. I.** Assessment of the geomechanical state of the rock mass during the development of complex ore bodies by a system of sublevel drifts with controlled roof collapse, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2015, no. 12, pp. 39–45. [**Потапчук М. И., Терешкин А. А., Рассказов М. И.** Оценка геомеханического состояния массива горных пород при отработке сложноструктурных рудных тел системой подэтажных штреков с управляемым обрушением кровли // *ГИАБ*. — 2015. — № 12. — С. 39–45.]
4. **Saksin B. G., Mirzekhanov G. S., Rasskazov M. I., Usikov V. I., and Tsoi D. I.** Engineering-geological assessment of the rock base of the lower Bureyskaya hydroelectric power station, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2015, no. S2, pp. 3–12. [**Саксин Б. Г., Мирзеханов Г. С., Рассказов М. И., Усиков В. И., Цой Д. И.** Инженерно-геологическая оценка скального основания Нижне-Бурейской ГЭС // *ГИАБ*. — 2015. — № S2. — С. 3–12.]
5. **Potapchuk M. I., Rasskazov I. Yu., Potapchuk G. M., Sidlyar A. V., and Rasskazov M. I.** Predictive assessment of geodynamic hazard during the development of deep horizons of the Nikolaevskoye field, *Problems of integrated development of georesources: materials of the IV All-Russian scientific conference with the participation of foreign scientists*, Khabarovsk, Institute of Mining, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, 2011, no. 1, pp. 110–117. [**Потапчук М. И., Рассказов И. Ю., Потапчук Г. М., Сидляр А. В., Рассказов М. И.** Прогнозная оценка геодинамической опасности при отработке глубоких горизонтов Николаевского месторождения // *Проблемы комплексного освоения георесурсов: материалы IV Всерос. науч.-конф. с участием иностранных ученых*. — Хабаровск: ИГД ДВО РАН, 2011. — Т. 1. — С. 110–117.]
6. **Guidelines** for seismic-acoustic and electromagnetic methods for obtaining criteria for the degree of impact hazard, Leningrad, VNIMI, 1986. [**Методические указания** по сейсмоакустическим и электромагнитным методам получения критериев степени удароопасности. — Л.: ВНИМИ, 1986.]
7. **Kulakov G. I. and Yakovitskaya G. E.** Acoustic emission and the stages of the process of break formation of rocks, *Journal of Mining Science*, 1993, no. 2, pp. 11–15. [**Кулаков Г. И., Яковицкая Г. Е.** Акустическая эмиссия и стадии процесса трещинообразования горных пород // *ФТПРПИ*. — 1993. — № 2. — С. 11–15.]
8. **Griffith A. A.** The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 1921, vol. 221, pp. 163–198. [**Гриффин А. А.** Явление разрыва и течения в твердых телах // *Философские труды Лондонского королевского общества. Сер. А*. — 1921. — Т. 221. — pp. 163–198.]
9. **Irwin G. R.** *Handbuch der Physik*. Springer Verlag, Berlin, 1958, vol. 6. [**Ирвин Г. Р.** *Справочник по физике*. — Берлин: Springer Verlag. — 1958. — Т. 6.]

10. **Rasskazov I. Yu., Lugovoy V. A., Kalinov G. A., Gladyr A. V., Anikin P. A., Rasskazov M. I., and Tsoj D. I.** Development of measuring complexes for the assessment and control of burst-hazard during mining, Proceedings of the VIII International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, 2013, pp. 121–124. [**Рассказов И. Ю., Луговой В. А., Калинов Г. А., Гладырь А. В., Аникин П. А., Рассказов М. И., Цой Д. И.** Разработка измерительных комплексов для оценки и контроля удароопасности при добыче полезных ископаемых // Материалы VIII Междунар. симпозиума по горным ударам и сейсмичности в шахтах. — 2013. — С. 121–124.]
11. **Gladyr A. V., Kursakin G. A., Rasskazov M. I., and Konstantinov A. V.** Development of the identification of hazardous areas in the rock mass according to seismoacoustic observations, Mining Information and Analytical Bulletin, 2019, no. 8, pp. 21–32. [**Гладырь А. В., Курсакин Г. А., Рассказов М. И., Константинов А. В.** Разработка метода выделения опасных участков в массиве горных пород по данным сейсмоакустических наблюдений // ГИАБ. — 2019. — № 8. — С. 21–32.]
12. **Chen X. J., Li L. Y., Wang, L, and Qi L. L.** The current situation and prevention and control countermeasures for typical dynamic disasters in kilometer-deep mines in China, Safety Science, 2019, vol. 115, pp. 229–236. [**Чен Х. Дж., Ли Л. Я., Ванг Л., Ци Л. Л.** Текущая ситуация, а также меры по предотвращению и контролю противодействия типичным динамическим катастрофам на шахтах глубиной в несколько километров в Китае // Наука о безопасности. — 2019. — Т. 115. — С. 229–236.]
13. **Tereshkin A. A., Migunov D. S., Anikin P. A., Gladyr A. V., and Rasskazov M. I.** Assessment of the geomechanical state of the rock burst hazardous massif according to the data of local geoacoustic control, Subsoil Use Problems, 2017, no. 1, pp. 72–80. [**Терешкин А. А., Мигунов Д. С., Аникин П. А., Гладырь А. В., Рассказов М. И.** Оценка геомеханического состояния удароопасного массива горных пород по данным локального геоакустического контроля // Проблемы недропользования. — 2017. — № 1. — С. 72–80.]
14. **Prokhorov K. V., Gladyr A. V., Rasskazov M. I.** Shared Use Center “Mineral Resources Research Center”, Mining Industry, 2020, no. 4, pp. 120–126. [**Прохоров К. В., Гладырь А. В., Рассказов М. И.** Центр коллективного пользования “Центр исследования минерального сырья” // Горная промышленность. — 2020. — № 4. — С. 120–126.]
15. **Rozanov A. O., Petrov D. N., Rozenbaum A. M., Ilinov M. D., and Tereshkin A. A.** Acoustic emission precursor criteria of rock damage, Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses, Collection, 2018, pp. 669–672. [**Розанов А. О., Петров В. Н., Розенбаум А. М., Ильинов М. Д., Терешкин А. А.** Критерии прогноза разрушения горных пород с помощью акустического метода // Геомеханика и геодинамика горных массивов: сборник. — 2018. — С. 669–672.]