

Лабораторно-измерительный комплекс для исследования процессов деформирования и разрушения горных пород

А.А. Терешкин¹✉, И.Ю. Рассказов², А.П. Грунин¹, Д.И. Цой¹, М.И. Рассказов¹

¹ Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российской Федерации

² Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук,
г. Хабаровск, Российской Федерации

✉ andrey.tereshkin@bk.ru

Резюме: Процесс разрушения горных пород под воздействием внешнего давления представляет значительный интерес для изучения механики разрушения геоматериалов. В ходе разрушения образец генерирует акустические сигналы, которые представляют собой упругие волны, возникающие вследствие образования и роста микротрещин. Эти сигналы, известные как акустическая эмиссия, играют ключевую роль в мониторинге и прогнозе процессов разрушения различного масштаба.

Сигналы акустической эмиссии характеризуются рядом параметров, таких как амплитуда, длительность, частота, энергия, которые позволяют анализировать динамику процесса разрушения. В зависимости от условий процесс может протекать с различной скоростью – от квазистатического до динамического режима разрушения. Анализ сигналов акустической эмиссии позволяет не только определить стадии разрушения, но и глубже понять механизмы трещинообразования. Разработанная в Институте горного дела ДВО РАН система регистрации импульсов акустической эмиссии включает в себя создание аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего высокочувствительное детектирование сигналов, и методов обработки и интерпретации данных с функциями фильтрации, анализа и выделения ключевых параметров импульсов, а также определение координат отдельных событий внутри исследуемого образца в лабораторных условиях с заданными параметрами.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, геодинамика, деформационные методы, акустические методы, регистрация волновых форм, первичный преобразователь, преобразование Фурье, методы локации акустической эмиссии

Для цитирования: Терешкин А.А., Рассказов И.Ю., Грунин А.П., Цой Д.И., Рассказов М.И. Лабораторно-измерительный комплекс для исследования процессов деформирования и разрушения горных пород. *Горная промышленность*. 2025;(4S):134–139. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-134-139>

Laboratory measurement complex for studying rock deformation and failure processes

А.А. Терешкин¹✉, И.Ю. Рассказов², А.П. Грунин¹, Д.И. Цой¹, М.И. Рассказов¹

¹ Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

² Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk,
Russian Federation

✉ andrey.tereshkin@bk.ru

Abstract: The process of rock failure under external pressure is of considerable interest for studying the geomaterial fracture mechanics. While failing, the sample generates acoustic signals, which are elastic waves caused by formation and growth of microcracks. These signals, known as acoustic emission, play a key role in monitoring and predicting the fracture processes of various scales.

Acoustic emission signals are characterized by a number of parameters, such as their amplitude, duration, frequency, energy, which allow analyzing the dynamics of the fracture process. Depending on the conditions, the process can proceed at different rates, i.e. from quasi-static to dynamic fracture modes. Analysis of the acoustic emission signals helps not only to determine the failure stages, but also to better understand the mechanics of crack formation.

The system for recording acoustic emission pulses developed at the Institute of Mining of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences includes a hardware and software complex that provides highly sensitive signal detection, along with

methods for processing and interpreting data, with the functionality of filtering, analyzing and identifying key pulse parameters, as well as determination of the individual event coordinates inside the sample being studied in laboratory conditions with specified parameters.

Keywords: acoustic emission, geodynamics, deformation methods, acoustic methods, waveform registration, primary converter, Fourier transform, methods of acoustic emission localization

For citation: Tereshkin A.A., Rasskazov I.Yu., Grunin A.P., Tsoy D.I., Rasskazov M.I. Laboratory measurement complex for studying rock deformation and failure processes. *Russian Mining Industry*. 2025;(4S):134–139. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-134-139>

Введение

На современном этапе изучения состояния массивов горных пород и решения проблем управления горным давлением одними из наиболее перспективных и информативных являются деформационный и геоакустический методы. Деформационный метод основан на совокупности методов, используемых для определения изменений формы, размеров и положения объектов, а также для выявления деформаций. Геоакустический метод основан на регистрации импульсов акустической эмиссии (АЭ) [1–3], сопровождающей процесс нагружения и разрушения горных пород.

В основе современных средств и систем динамического мониторинга массивов горных пород лежат методы регистрации и расчета значений основных деформационных и акустических показателей, использующие только массив натурных данных исследуемого объекта [4; 5]. Данный подход не всегда является полностью достоверным по причине многофакторности и неоднозначности процессов деформации и разрушения. Для более углубленного анализа динамики поведения горных пород, склонных к хрупкому разрушению, необходимы комплексные исследования их физико-механических, акустических и деформационных свойств, в том числе в лабораторных условиях с моделированием условий их природного залегания [6–8].

Основной задачей разрабатываемой лабораторной акустической системы регистрации и анализа АЭ событий является необходимость углубленного изучения многофакторности условий и причин динамических проявлений горного давления на месторождениях, отрабатываемых подземным способом, склонных к негативному влиянию повышенного горного давления, выявления предвестников и создания на этой основе эффективной методики комплексной оценки геомеханического состояния геосреды, что позволит повысить надежность прогноза опасных геодинамических явлений. Для обеспечения надежного и достоверного прогноза динамических проявлений горного давления необходим комплексный учет ряда установленных по данным натурного мониторинга, а также лабораторного исследования признаков изменения геомеханического состояния массива горных пород.

Описание разрабатываемой системы

При разработке системы регистрации АЭ [9; 10] было необходимо учитывать параметры сигналов, физические характеристики среды, а также особенности всех компонентов системы регистрации и обработки данных. Ключевые этапы проектирования включали:

1. Определение частотного диапазона работы системы в масштабах лабораторных образцов.

2. Выбор преобразователя акустической эмиссии, а также промежуточного усилительного оборудования.

3. Выбор устройства регистрации данных.

4. Определение состава модуля сбора и обработки данных.

5. Подбор оборудования, позволяющего интегрировать компоненты системы в уже имеющийся лабораторный комплекс АСИС СПЕЦ ГЕОТЕК, позволяющий проводить испытания образца в режиме осесимметричного сжатия $\sigma_2 = \sigma_3$ [11].

1. Определение частотного диапазона работы системы в масштабах лабораторных образцов. Частотный диапазон регистрации сигналов АЭ определяется физическими характеристиками источников акустической эмиссии и свойствами среды, в которой распространяются упругие волны. На основании анализа характеристик исследуемых образцов горных пород и предполагаемых условий эксперимента был выбран частотный диапазон 100–2000 кГц.

2. Выбор преобразователя акустической эмиссии. Для регистрации сигналов в указанном диапазоне выбран преобразователь типа 7С209ТА производства (г. Саров) «GT Lab», характеристики которого представлены в табл. 1.

Таблица 1
Технические характеристики
преобразователя 7С209ТА

Table 1
Technical specifications of the
7С209ТА converter

Параметр	Значение
Максимальное значение коэффициента электроакустического преобразования, В/м	$> 400 \cdot 10^6$
Резонансная частота, кГц	500
Диапазон рабочих частот, кГц	100...2 000
Электрическая емкость (с кабелем 0,5 м), пФ	120...200
Диапазон рабочих температур, °C	-70... +150
Диапазон рабочих температур поверхности объекта, °C	-194...+150
Диапазон рабочих давлений, МПа	≤ 700
Материал корпуса	Нержавеющая сталь
Масса (без кабеля), г	1,8

Частотный диапазон датчика (100–2000 кГц) соответствует требованиям исследования. Резонансная частота (500 кГц) позволяет эффективно регистрировать наиболее интенсивные сигналы. Высокая стойкость к температурным и механическим воздействиям делает преобразователь применимым в условиях высоких давлений и температур, характерных для экспериментов с горными породами.

Таблица 2
Технические характеристики
усилителя A421-04

Параметр	Значение
Диапазон входного сигнала, В	0,1
Коэффициент усиления, дБ	$20 \pm 0,5$
Диапазон рабочих частот, Гц	10 000...600 000
Максимальная амплитуда выходного напряжения, В	± 1
Уровень СКЗ собственных шумов, мкВ	< 5
Погрешность измерений, %	± 2
Диапазон рабочих температур, °C	-40...+85
Напряжение питания, В	12 ± 1
Масса, г	100 г
Особенности	Поддержка длинных линий связи, низкий уровень шумов

Таблица 3
Характеристика модуля АЦП
E20-10

Параметр	Значение
Разрядность АЦП, бит	14
Максимальная частота дискретизации, МГц	10
Количество каналов АЦП	4
Количество каналов ЦАП	2
Диапазон выходного напряжения ЦАП, В	± 5
Интерфейс подключения	USB 2.0
Внутренний FIFO-буфер, Мбайт	8
Частота работы ФНЧ	Оптимальная (третьего порядка)
Количество цифровых каналов ввода/вывода	16 (совместимость с TTL)
Возможность программирования межкадровой задержки	От 0 до 655353 периодов АЦП
Назначение	Системы сбора данных, управление и контроль внешних устройств

Для приема и усиления сигналов преобразователя выбран формирователь A421-04 «GT Lab», параметры которого приведены в табл. 2.

3. Выбор устройства регистрации данных. Для регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ) в системе был выбран высокоскоростной модуль АЦП E20-10 (табл. 3), который обеспечивает необходимые точность и быстродействие. Выбор обоснован следующими характеристиками и возможностями устройства:

Разрядность 14 бит обеспечивает достаточную точность при регистрации сигналов АЭ. Максимальная частота дискретизации 10 МГц позволяет детально регистрировать высокочастотные сигналы (до 5 МГц), сохраняя точность формы сигнала.

Наличие четырех каналов АЦП позволяет одновременно регистрировать сигналы с нескольких датчиков АЭ. Это критически важно при проведении экспериментов,

Table 2
Technical specifications
of the A421-04 amplifier

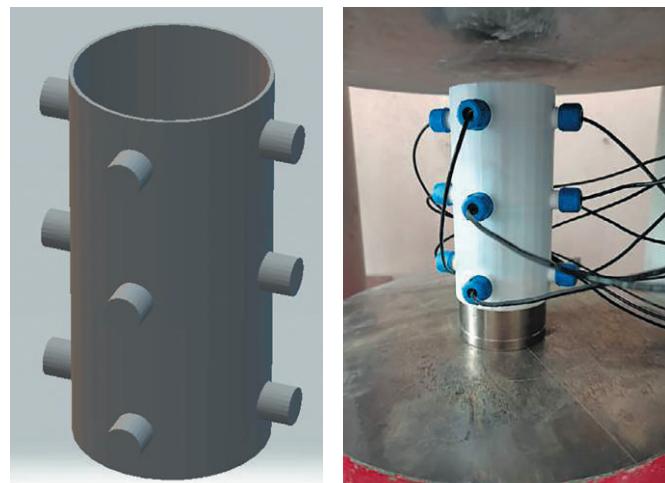


Рис. 1
Внешний вид 3D-модели
рукава фиксации датчиков

Fig. 1
A general view of the 3D
model of the sensor holder

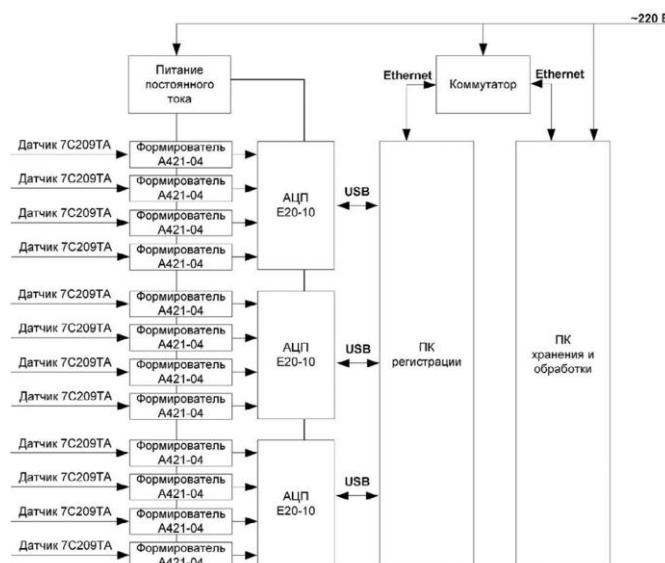


Рис. 2
Структурная схема системы
регистрации

Fig. 2
A structural diagram of the
recording system

где необходимо пространственное разделение источников сигналов.

Каждый канал оснащен фильтром низких частот (ФНЧ) третьего порядка с оптимальной частотой среза. Это улучшает соотношение «сигнал-шум» и повышает качество зарегистрированных данных, особенно при высокоскоростной дискретизации.

4. Определение состава модуля сбора и обработки данных. При выборе ПК для сбора и обработки данных в системе регистрации сигналов акустической эмиссии необходимо учитывать высокие требования к скорости передачи данных, объёму оперативной и дисковой памяти, а также особенности работы USB-интерфейса. Эти аспекты определяются характеристиками модуля АЦП E20-10, длительностью эксперимента, а также необходимостью последующей обработки и хранения данных.

5. Подбор оборудования для интеграции компонентов системы. Для обеспечения работы системы регистрации акустической эмиссии все элементы размещаются в мобильном коммуникационном шкафу. Шкаф выполняет



Рис. 3
Внешний вид собранной системы



Fig. 3
A general view of the assembled system

функцию центрального узла, где располагаются ПК для сбора данных, модули АЦП, линии передачи данных и синхронизации, а также монитор для визуального контроля за ходом эксперимента.

Для надежного размещения датчиков акустической эмиссии на цилиндрическом образце был разработан рукав, обеспечивающий плотное прилегание датчиков к поверхности. Фиксатор позволяет быстро и удобно закрепить измерительные элементы, упрощая подготовку к эксперименту и улучшая сбор данных. Модель фиксатора, подготовленная для 3D-печати, приведена на рис. 1. Структурная схема разработанной системы представлена на рис. 2.

Методы и средства сбора, обработки и интерпретации данных

Первичный сбор данных осуществляется с использованием программного обеспечения LGraph2, разработанного для устройств ввода-вывода производства ООО «Л Кард». Данное ПО предназначено для следующих задач:

- сбор и регистрация аналоговых сигналов в цифровом виде;
- просмотр данных в реальном времени или из записей;

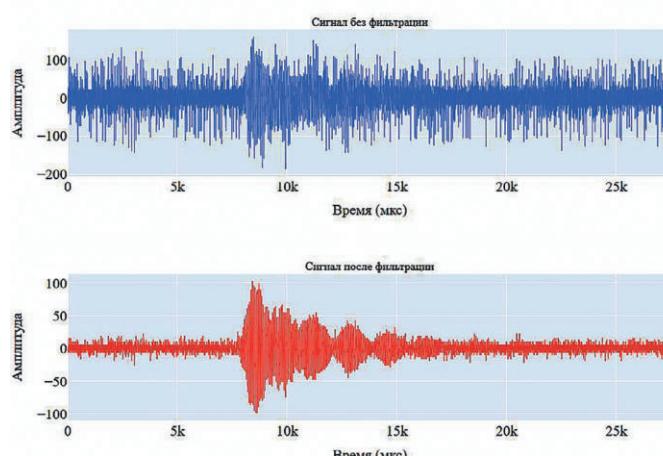


Рис. 4
Сравнение сигналов до и после фильтрации

Fig. 4
A comparison of signals before and after filtering

– экспорт данных для последующего анализа.

Для предварительной обработки сигнала используется метод фильтрации на основе спектра шума, реализованный через быстрое преобразование Фурье (FFT). Сначала из начального участка сигнала извлекается спектр шума, который используется как эталон для определения фонового уровня. Затем спектр каждого блока сигнала сравнивается с пороговым значением, пропор-

циональным спектру шума, и частоты, амплитуда которых ниже порога, подавляются. Преобразование обратно во временную область выполняется с использованием обратного FFT (IFFT). Данный подход позволяет эффективно устранять шумы, которые имеют постоянный спектральный профиль, например, гармонические или широкополосные шумы. Это особенно полезно при анализе акустических сигналов, где требуется выделить слабые импульсные события на фоне шума. На рис. 4 представлено сравнение сигналов до и после фильтрации.

Для обнаружения акустических событий применяется STA/LTA анализ, использующий экспоненциальное скользящее среднее. STA характеризует среднюю амплитуду сигнала в коротком временном окне, а LTA – в длинном. Отношение STA/LTA позволяет выделить моменты, когда кратковременная активность значительно превышает фоновую. Данный метод является одним из наиболее популярных в сейсмологии для обнаружения сейсмических событий. Применение экспоненциального скользящего среднего вместо традиционного скользящего окна позволяет вычислять STA и LTA более эффективно, так как не требует повторного расчета средних значений для каждого нового отсчета. Недостатком подхода является необходимость выбора длины окон и порогового значения, которые зависят от характеристик анализируемого сигнала. На рис. 5 представлены сигнал и принцип работы алгоритма STA/LTA при определении времени начала сигнала.

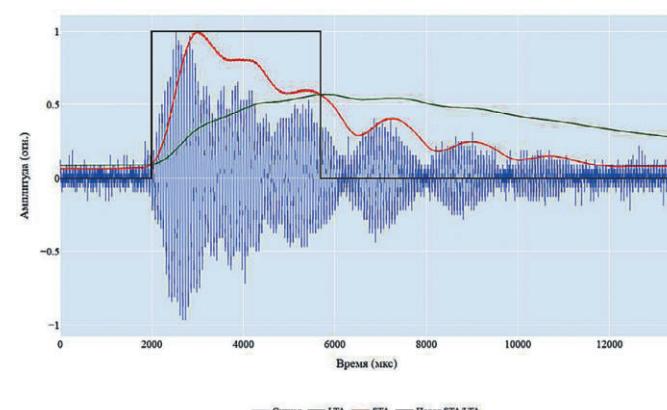


Рис. 5
Демонстрация работы STA/LTA алгоритма

Fig. 5
A demonstration of the STA/LTA algorithm

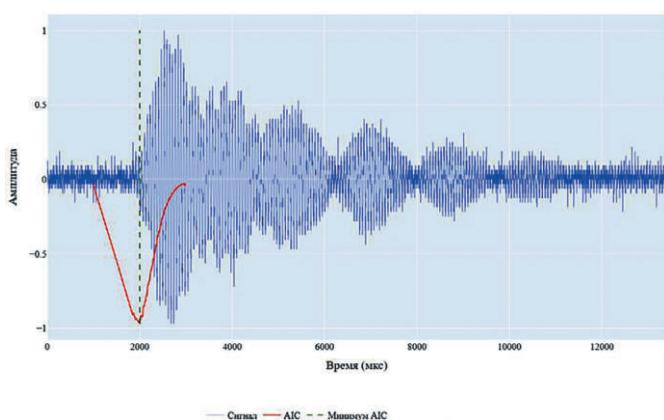


Рис. 6
Демонстрация работы
алгоритма AIC

Fig. 6
A demonstration of the AIC
algorithm

Для уточнения времени прихода событий, обнаруженных методом STA/LTA, используется информационный критерий Акаике (AIC). Этот метод основан на минимизации дисперсии в двух временных интервалах: до и после предполагаемого момента события. AIC рассчитывается в скользящем окне вокруг каждого обнаруженного по STA/LTA импульса, и минимальное значение критерия указывает на наиболее вероятное время прихода сигнала. Преимущество метода AIC заключается в его способности точно определять начало импульсов, что критически важно для временного анализа сигналов. На рис. 6 представлены сигнал и принцип работы алгоритма STA/LTA при определении времени начала сигнала.

Заключение

Разработанный комплекс технических, программных средств и алгоритмов, обеспечивающий автоматизированную обработку большого объема предварительных данных, позволяет производить сортировку данных с каждого преобразователя в отдельные звуковые файлы, их анализ для выявления временных отметок и характеристик импульсов даже в условиях значительных шумов. На основании полученной информации о зарегистрированных импульсах возможно применение алгоритмов, аналогичных применяемым в системах типа «Prognoz-ADS» [12], для формирования событий. На данном этапе ведутся тестовые испытания анализа регистрируемых событий, которые обрабатываются с использованием известных, адаптированных или вновь разработанных методов локации, основанных на расчете времени прихода события на каждый первичный преобразователь.

Предложенный подход позволит проводить исследования деформационных и акустических процессов разрушения образцов горных пород под воздействием внешнего давления с заданными параметрами на структурном уровне, учитывающие физико-механические свойства литотипов, склонных к хрупкому разрушению.

Список литературы / References

1. Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V. Ponomarev, A., Sidorin A. Chapter 1 Observations of quasistatic fault growth from acoustic emissions. *International Geophysics*. 1992;51:3–31. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(08\)62813-2](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(08)62813-2)
2. Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev A., Sidorin A. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite. *Nature*. 1991;350:39–42. <https://doi.org/10.1038/350039a0>
3. Kuksenko V., Tomilin N., Damaskinskaya E., Lockner D. A two-stage model of fracture of rocks. *Pure and Applied Geophysics*. 1996;146(2):253–263. <https://doi.org/10.1007/BF00876492>
4. Терешкин А.А., Мигунов Д.С., Аникин П.А., Гладырь А.В., Рассказов М.И. Оценка геомеханического состояния ударо-опасного массива горных пород по данным локального геоакустического контроля. *Проблемы недропользования*. 2017;(1):72–80. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.01.072>
Tereshkin A.A., Migunov D.S., Anikin P.A., Gladyr A.V., Rasskazov M.I. Evaluation geo-mechanical dangerous rock mass state according to local control geoacoustic data. *Problems of Subsoil Use*. 2017;(1):72–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.01.072>
5. Ломов М.А., Константинов А.В., Терешкин А.А. Перспективные методы оценки и контроля геомеханического состояния массивов пород Проблемы недропользования. 2019;(4):83–90. Режим доступа: <https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/449> (дата обращения: 07.06.2025).
Lomov M.A., Konstantinov A.V., Tereshkin A.A. Prospective methods of assessment and control of the geomechanical state of rock masses. *Problems of Subsoil Use*. 2019;(4):83–90. (In Russ.) Available at: <https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/449> (accessed: 07.06.2025).
6. van der Baan M., Chorney D. Insights from micromechanical modeling of intact rock failure: event characteristics, stress drops, and force networks. *JGR Solid Earth*. 2019;124(12):12955–12980. <https://doi.org/10.1029/2019JB018121>
7. Meng F., Song J., Yue Z., Zhou H., Wang X., Wang Z. Failure mechanisms and damage evolution of hard rock joints under high stress: Insights from PFC2D modeling. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2022;135:394–411. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2021.12.007>

8. Duan K., Li X., Kwok C.-Y., Zhang Q., Wang L. Modeling the orientation- and stress-dependent permeability of anisotropic rock with particle-based discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021;147:104884. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104884>
9. Boese C.M., Kwiatek G., Fischer T., Plenkers K., Starke J., Blümle F. et al. Seismic monitoring of the STIMTEC hydraulic stimulation experiment in anisotropic metamorphic gneiss. *Solid Earth*. 2022;13(2):323–346. <https://doi.org/10.5194/se-13-323-2022>
10. Патонин А.В., Шихова Н.М., Пономарев А.В., Смирнов В.Б. Модульная система непрерывной регистрации акустической эмиссии для лабораторных исследований разрушения горных пород. *Сейсмические приборы*. 2018;54(3):35–55. <https://doi.org/10.21455/si2018.3-3>
Patonin A.V., Shikhova N.M., Ponomarev A.V., Smirnov V.B. Module system of continuous acoustic emission registration for laboratory studies of the rocks destruction processes. *Seismic Instruments*. 2018;54(3):35–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.21455/si2018.3-3>
11. Паньков И.Л., Евсеев В.С. Результаты экспериментального и теоретического определения прочности известняка в условиях трехосного сжатия по схеме Бекера. *Горное эхо*. 2024;(2):19–22. <https://doi.org/10.7242/echo.2024.2.4>
Pankov I.L., Evseev V.S. Results of experimental and theoretical definition of limestone strength under triaxial compression using the Böker's method. *Gornoe Eko*. 2024;(2):19–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.7242/echo.2024.2.4>
12. Рассказов И.Ю., Федотова Ю.В., Аникин П.А., Сидляр А.В., Корчак П.А. Совершенствование автоматизированной системы геомеханического мониторинга и раннего предупреждения опасных геодинамических явлений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(12-1):106–121. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_106
Rasskazov I.Yu., Fedotova Yu.V., Anikin P.A., Sidlyar A.V., Korchak P.A. Improvement of the automated system of geomechanical monitoring and early prevention of dangerous geodynamic phenomena. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(12-1):106–121. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_106

Информация об авторах

Терёшкин Андрей Александрович – научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; e-mail: andrey.tereshkin@bk.ru

Рассказов Игорь Юрьевич – доктор технических наук, академик РАН, директор, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-2215-6642>; e-mail: adm@igd.khv.ru

Грунин Алексей Петрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; e-mail: lexx188@mail.ru

Цой Денис Игоревич – научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-4501-3724>; e-mail: denis.tsoi@mail.ru

Рассказов Максим Игоревич – научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-9130-8072>; e-mail: rasm.max@mail.ru

Information about the authos

Andrey A. Tereshkin – Researcher, Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation; e-mail: andrey.tereshkin@bk.ru

Igor Yu. Rasskazov – Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Sciences, Director, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-2215-6642>; e-mail: adm@igd.khv.ru

Aleksey P. Grunin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation; e-mail: lexx188@mail.ru

Denis I. Tsoy – Researcher, Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-4501-3724>; e-mail: denis.tsoi@mail.ru

Maxim I. Rasskazov – Researcher, Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9130-8072>; e-mail: rasm.max@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 22.06.2025

Поступила после рецензирования: 18.08.2025

Принята к публикации: 25.08.2025

Article info

Received: 22.06.2025

Revised: 18.08.2025

Accepted: 25.08.2025