

25. Sychev Yu. A., Kostin V. N., Serikov V. A., Aladin V. A. Nonsinusoidal modes in power-supply systems with nonlinear loads and capacitors in mining. *MIAB*. 2023. No. 1. pp. 159–179.
26. Liu H., Jie T., Li B., Youming D., Chunning Q. Study of the low-frequency dispersion of permittivity and resistivity in tight rocks. *Journal of Applied Geophysics*. 2017. Vol. 143. pp. 141–148.
27. Shestakov A. F. On the relation of the polarization characteristics of the medium in the frequency areas and their evaluation according to multi-frequency measurements. *Uralskiy geofizicheskiy vestnik*. 2022. No. 3(49). pp. 4–13.
28. Shestakov A. F. To estimation of polarization characteristics of the medium on the data of multi-frequency measurements in the method alternating current resistance. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2021. No. 1(61). pp. 102–108.
29. Levshin M. V. Influence of the frequency of the electric signal on the measured specific resistance in the electrophysical approach to estimate the properties of soils in the humid zone. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. 2020. No. 3(51). pp. 26–31.
30. Han Y., Wang Y., Tan C., Du L. Experimental study on influencing factors of soil complex resistivity. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. Vol. 2651. ID 012104.
31. Sternberg B. K., Levitskaya T. M. Electrical parameters of soils in the frequency range from 1 kHz to 1 GHz, using lumped-circuit methods. *Radio Science*. 2001. Vol. 36, No. 4. pp. 709–719.
32. Shakhnazarov K. Yu., Vologzhanina S. A., Khuznakhmetov R. M. A relationship between abnormal electrical properties in non-ferrous alloys and phase equilibrium diagrams. *Tsvetnye Metally*. 2024. No. 2. pp. 53–59.
33. Shklyarskiy Ya. E., Skamyin A. N., Shklyarskiy A. Ya. Effect of higher harmonics on electric power metering in a steel maker's power networks. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 10. pp. 64–69.
34. Mikhalev Yu. G., Zharinova N. Yu. Mass transfer regimes during polarization of liquid metal electrode in molten salts and current efficiency. *Tsvetnye Metally*. 2019. No. 9. pp. 32–36.
35. Buvakov S. Yu., Suvorov D. V., Gololobov G. P., Tarabrin D. Yu., Slivkin E. V. Study of frequency dependence of composite conductor electrical resistance. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017. Vol. 66, No. 1. pp. 147–158.
36. Senchina N. P., Mingaleva T. A. Multi-feature petrophysical classification of rocks as a basis for interpretation of geophysical data. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Nauki o Zemle*. 2022. Vol. 22, Iss. 3. pp. 208–218.
37. Zhamaletdinov A. A. The Earth crust conductance inside Russia and in adjacent countries. *Voprosy geofiziki*. 2006. No. 39. pp. 69–90.

УДК 622.83:620.179.17

## ГЕОМЕТРИЯ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СОБЫТИЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД ХИБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ



**В. В. ГЛАЗУНОВ**,  
проф., д-р техн. наук



**М. М. САЙТГАЛЕЕВ**,  
аспирант-исследователь,  
Saitgaleev\_MM@pers.spmi.ru



**Д. Н. ПЕТРОВ**,  
доцент, канд. техн. наук



**А. О. РОЗАНОВ**,  
старший научный сотрудник

Исследован процесс разрушения горных пород Хибинского месторождения в камере всестороннего давления с регистрацией событий акустической эмиссии. Рассчитаны координаты гипоцентров событий акустической эмиссии в процессе эксперимента, проанализирован процесс формирования образа катастрофического макроразрушения и определены сопутствующие напряжения. Установлено, что доминирующей геометрией хрупкого разрушения горных пород является диагональный макроразрыв. Определено, что процесс разрушения происходит не мгновенно, а с развитием очага разрушения во времени. Результаты исследований имеют важное практическое значение для своевременного обнаружения критической стадии развития очага разрушения.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, локация гипоцентров акустической эмиссии, механика хрупкого разрушения, геометрия хрупкого разрушения, Хибинский массив, трехосное сжатие, образ макроразрыва, массивные уртиты  
**DOI:** 10.17580/gzh.2024.09.07

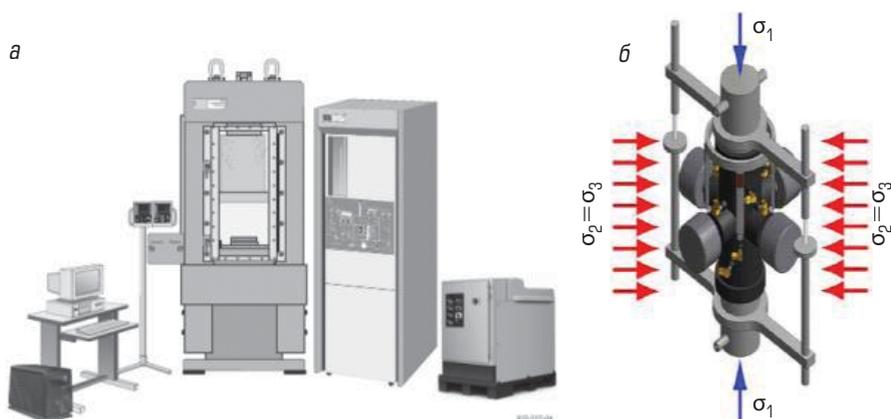
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург, Россия

### Введение

На месторождениях за весь период эксплуатации были зарегистрированы техногенные землетрясения, горно-тектонические удары, горные удары и микроудары. Под влиянием техногенных факторов и повышения темпов разработки

месторождений, а также под действием естественных факторов происходит изменение геомеханического и геодинамического состояния массива пород, что влечет за собой изменение сейсмической обстановки [1].

Активные тектонические нарушения, трещиноватость и другие структурные неоднородности являются одним из важных факторов геодинамической опасности, указанные явления могут быть причиной проявления удароопасности на рудниках, так как по ним может происходить относительное смещение блоков, мгновенные подвижки по границам



**Рис. 1. Испытательный комплекс, состоящий из прессовой системы, гидравлической насосной станции и регистрирующей системы (а) и принципиальная схема прессовой системы MTS 815 с осевым усилием до 4600 кН с обозначенными векторами главными напряжениями  $\sigma_1$ – $\sigma_3$  (б) [17]**

нарушения сплошности массива, а также прорастание крупных трещин, что обуславливает увеличение сейсмической активности [2, 3].

Тектонические структуры Хибинского массива представлены радиальными и коническими разломами, а также системами блоков [4].

Подвижки происходят по всем типам разрывных нарушений независимо от возраста и материала заполнения трещин [5].

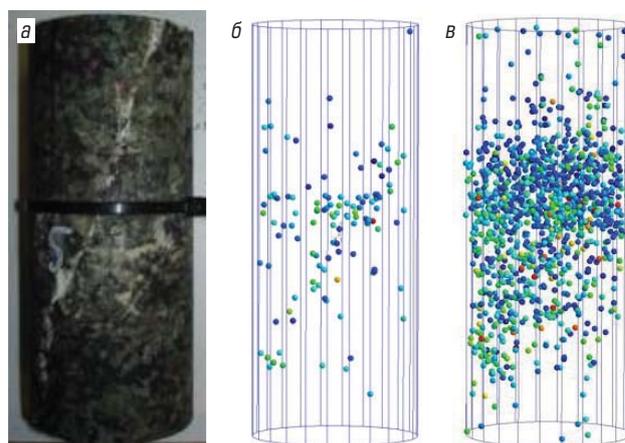
Условия добычи руды осложнены, с одной стороны, высоким тектоническим напряжением, с другой – сложным геологическим строением, что требует постоянного мониторинга комплексом методов, основанных на широком опыте изучения физических [6–8], геологических [9, 10] и геомеханических [11–13] свойств массива в целях развития подхода к прогнозированию динамических процессов и явлений [14–16]. Сочетание данных факторов сказывается на проявлении различных видов сейсмической активности, источниками которой служат зарождение и развитие трещин отрыва в ненарушенном массиве, формирование подвижек пород по плоскостям скольжения и геологическим трещинам.

Данные особенности требуют проведения исследований, нацеленных на изучение геометрии хрупкого разрушения горных пород на основе анализа событий акустической эмиссии (АЭ) на образцах пород Хибинского месторождения для дальнейшей оценки и прогноза состояния горного массива.

### Материалы и методы исследований

Для исследования хрупкого разрушения горных пород на основе распределения гипоцентров событий АЭ, полученных в ходе испытаний в режиме трехосного нагружения, были поставлены следующие задачи:

- рассчитать координаты гипоцентров событий АЭ в ходе всего эксперимента, проанализировать их распределение и выявить момент формирования образа катастрофического макроразрушения;
- определить напряжения, при которых происходит формирование образа разрушения;



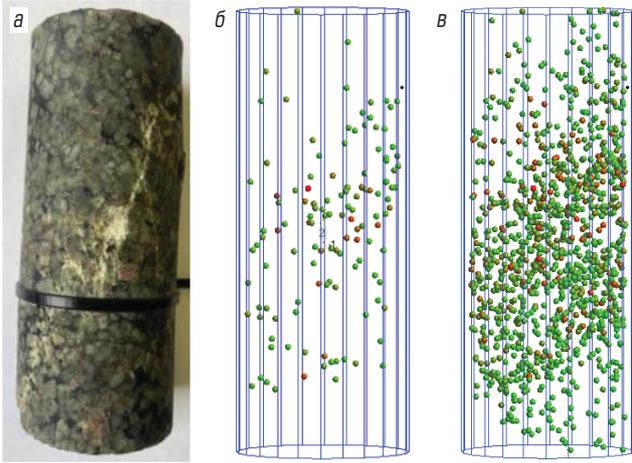
**Рис. 2. Фотография образца N1 после испытаний (а), начальная стадия формирования доминирующей геометрии хрупкого разрушения (б), интегральное отображение гипоцентров акустической эмиссии за все время эксперимента (в)**

- выявить доминирующую геометрию хрупкого разрушения.

Для реализации поставленных задач использовали испытательный комплекс MTS 815 с осевым усилием до 4600 кН, оборудованный сервогидравлическим приводом (рис. 1); также для регистрации и хранения сигналов АЭ использовали систему триггерного сбора данных Milne Trigger Acquisition System компании Applied Seismology Consulting Ltd. [17].

Образцы приготавливают из кернов, отобранных в подземных выработках. Диаметр кернов должен быть не менее 57 мм для перебуривания в лабораторных условиях на диаметр 50 мм. Данный размер объясняется размером манжеты, в которую помещают образец при проведении испытаний в камере всестороннего давления для изоляции образца от масла и для установки датчиков.

На конечном этапе сборки всю конструкцию помещали в камеру всестороннего сжатия, затем создавали давление



**Рис. 3.** Фотография образца N8 после испытаний (а), начальная стадия формирования доминирующей геометрии хрупкого разрушения (б), интегральное отображение гипоцентров акустической эмиссии за все время эксперимента (в)

**Основные свойства отобранных образцов и условия испытаний**

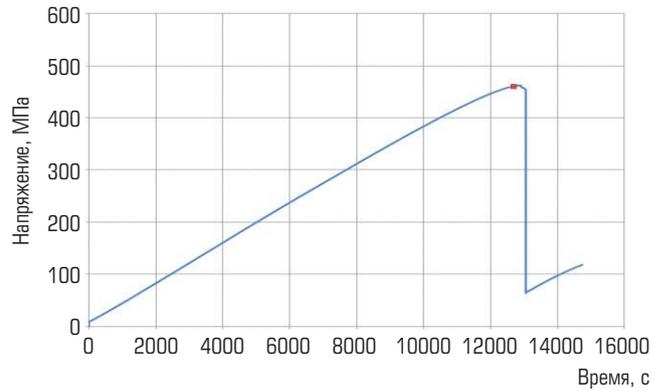
Образец	Литотип	Категория по прочности	Категория по устойчивости	Условия испытаний	
				Всестороннее давление, МПа	Скорость нагружения, мм/мин
N1'	Массивный уртит	II	2	40	0,01
N8	То же	II	2	40	0,01

и запускали действие осевой нагрузки. Для каждого лабораторного испытания рассчитывали координаты гипоцентров АЭ с помощью коммерческого программного обеспечения InSite Seismic Processor компании Itasca Consulting [17]. Алгоритм вычисления координат гипоцентров АЭ, встроенный в данную программу, успешно апробирован и применен для анализа геометрии разрушения образцов горных пород разных литотипов [18, 19].

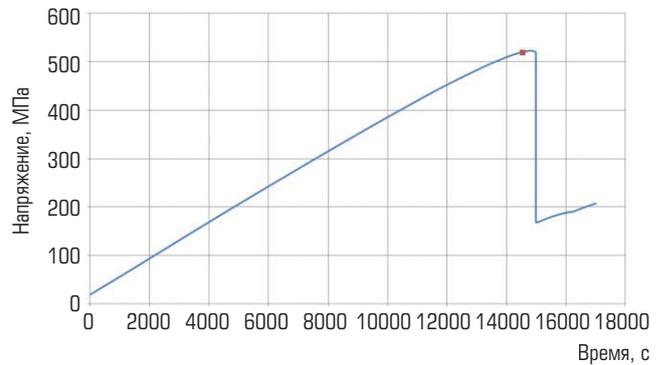
**Результаты исследований**

Для выявления доминирующей структуры макроразрушения были выбраны наиболее крепкие и однородные образцы массивного уррита (рис. 2, а, рис. 3, а), а также определены условия испытаний (см. таблицу).

В работах [20, 21] проводили исследования, нацеленные на изучение характера разрушения неоднородных материалов. Определено, что для таких материалов кривая нагружения имеет нелинейные участки, на которых происходит



**Рис. 4.** График нагружения образца N1' в камере всестороннего сжатия. Синим цветом обозначена кривая нагружения, красным маркером выделено начало стадии формирования будущего макроразлома



**Рис. 5.** График нагружения образца N8 в камере всестороннего сжатия. Синим цветом обозначена кривая нагружения, красным маркером выделено начало стадии формирования будущего макроразлома

формирование будущего макроразрушения. Для данных образцов кривые нагружения не имеют нелинейных участков (рис. 4, 5).

Образец N1' – предел прочности 462 МПа (см. рис. 2, а). Для выявления доминирующей геометрии разрушения осуществляли пок кадровый анализ с помощью встроенной в программу InSite Seismic Processor функции последовательного отображения гипоцентров событий АЭ во времени. В результате установлено, что доминирующей конфигурацией является диагональное направление (см. рис. 2, б), которое можно выделить на 99 % от предела прочности (см. рис. 4).

Образец N8 – предел прочности 522 МПа (см. рис. 3, а). Для данного образца доминирующая конфигурация проявляется не настолько отчетливо (см. рис. 3, б), как в первом случае. Однако, интегральное отображение гипоцентров (см. рис. 2в, рис. 3в) позволяют выделить диагональное направление.

## Выводы

В результате анализа распределения гипоцентров событий АЭ в образцах уртитов установлено, что доминирующей геометрией хрупкого разрушения является диагональный макро-разрыв, образование которого можно выделить при напряжении 99 % от предела прочности. Во многих работах зарубежных авторов [22–24] было выявлено, что процесс сдвига происходит по зонам, расположенным вдоль линии разлома.

Для дальнейшего изучения развития очага разрушения по стадиям на образцах горных пород в целях поиска

и сопоставления прогностических критериев формирования опасных геодинамических явлений в массиве горных пород необходимо улучшать качество регистрации событий АЭ, а также совершенствовать методы анализа распределения гипоцентров АЭ совместно с анализом гипоцентров сейсмических событий.

## Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2024, № 9, pp. 47–50  
DOI: 10.17580/gzh.2024.09.07

### Brittle failure geometry analysis based on acoustic emission locations in the Khibiny deposit rock samples

#### Information about authors

V. V. Glazunov<sup>1</sup>, Professor, Doctor of Engineering Sciences

M. M. Saitgaleev<sup>1</sup>, Post-Graduate Student–Researcher, Saitgaleev\_MM@pers.spmi.ru

D. N. Petrov<sup>1</sup>, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences

A. O. Rozanov<sup>1</sup>, Senior Researcher

<sup>1</sup>Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

#### Abstract

This study investigated the process of failure of the Khibiny deposit rocks in a hydrostatic pressure chamber with acoustic emission recording. In order to solve the tasks set, MTS 815 4600 kN testing complex was used, consisting of a press system, a hydraulic pump station and a recording system. The discussed method of analyzing hypocenters of acoustic emission events allowed studying fracture at the scale of microcrack formation and tracing the evolution of the process. The coordinates of the hypocenters of acoustic emission events were calculated throughout the experiment, the process of catastrophic macro-fracture image formation was analyzed and the accompanying stresses were determined. As a result of the study, it is found that the dominant geometry of brittle rock failure is a diagonal macro-fracture. It is also determined that failure occurs not instantly but evolves over time with the development of a fracture source. The failure process analysis through location of hypocenters of acoustic emission events shows that localization of a future macro-fracture begins at the stresses equal to 0.99 of the fracture strength. The study has a significant practical importance in terms of mining safety as it aims to timely detect a critical fracture stage. The results obtained can be used to describe the multi-stage process of rock failure to identify precursors of rock bursts. To further study the development of a fracture source by stages, it is necessary to improve the quality of recording acoustic emission events and refine methods for analyzing patterns of acoustic emission hypocenters.

**Keywords:** acoustic emission, location of acoustic emission hypocenters, brittle fracture mechanics, brittle fracture geometry, Khibiny Mountains, triaxial compression, macro-fracture pattern, massive urtites.

#### References

- Kozyrev A. A., Savchenko S. N., Panin V. I., Semenova I. E., Rybin V. V. et al. Geomechanical processes in the geological environment of geotechnical systems and geodynamic risk management. *Apatity* : KNTs RAN, 2019. 431 p.
- Shabarov A. N., Kuranov A. D., Kiselev V. A. Assessing the zones of tectonic fault influence on dynamic rock pressure manifestation at Khibiny deposits of apatite–nepheline ores. *Eurasian Mining*. 2021. No. 2. pp. 3–7.
- Tyupin V. N. Geomechanical behavior of jointed rock mass in the large-scale blast impact zone. *Eurasian Mining*. 2020. No. 2. pp. 11–14.
- Onokhin F. M. Structural Features of the Khibiny Massif and Apatite–Nepheline Deposits. Leningrad : Nauka, 1975. 106 p.
- Tryapitsyn V. M., Shabarov A. N. Recent Tectonics and Geodynamics of the Khibiny. *Kostroma* : AvantiTitul, 2007. 146 p.
- Gospodarikov A. P., Revin I. E., Morozov K. V. Composite model of seismic monitoring data analysis during mining operations on the example of the Kukisvumchorrskoye deposit of AO Apatit. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 262. pp. 571–580.

- Kotikov D. A., Tsirel S. V. Dependence of the distribution of seismic events on the location of geological faults. *Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development—Full Papers : Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering*. London : CRC Press, 2020. Vol. 6. pp. 1448–1455.
- Daniliev S., Danilieva N., Mulev S., Frid V. Integration of seismic refraction and fracture-induced electromagnetic radiation methods to assess the stability of the roof in mine-workings. *Minerals*. 2022. Vol. 12, Iss. 5. ID 609.
- Dashko R. E., Romanov I. S. Forecasting of mining and geological processes based on the analysis of the underground space of the Kupol deposit as a multicomponent system (Chukotka Autonomous Region, Anadyr district). *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 247. pp. 20–32.
- Kotikov D. A., Shabarov A. N., Tsirel S. V. Connecting seismic event distribution and tectonic structure of rock mass. *Gornyi Zhurnal*. 2020. No. 1. pp. 28–32.
- Morozov K. V., Demekhin D. N., Bakhtin E. V. Multicomponent strain gauges for assessing the stress–strain state of a rock mass. *MIAB*. 2022. No. 6–2. pp. 80–97.
- Protosenya A. G., Alekseev A. V., Verbilov P. E. Prediction of the stress–strain state and stability of the front of tunnel face at the intersection of disturbed zones of the soil mass. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 254. pp. 252–260.
- Karasev M. A., Petrushin V. V., Rysin A. I. The hybrid finite/discrete element method in description of macrostructural behavior of salt rocks. *MIAB*. 2023. No. 4. pp. 48–66.
- Shabarov A., Kuranov A., Popov A., Tsirel S. Geodynamic risks of mining in highly stressed rock mass. *Problems in Geomechanics of Highly Compressed Rock and Rock Masses : Proceedings of the 1st International Scientific Conference*. 2019. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 129. ID 01011.
- Trushko V. L., Protosenya A. G. Prospects of geomechanics development in the context of new technological paradigm. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 236. pp. 162–166.
- Shabarov A. N., Tsirel S. V., Morozov K. V., Rasskazov I. Yu. Concept of integrated geodynamic monitoring in underground mining. *Gornyi Zhurnal*. 2017. No. 9. pp. 59–64.
- Goodfellow S. D., Flynn J. W., Reyes-Montes J. M., Nasser M. H. B., Young R. P. Acquisition of complete acoustic emission amplitude records during rock fracture experiments. *Journal of Acoustic Emission*. 2014. Vol. 32.
- Rozanov A., Petrov D., Gladyr A., Tereshkin A., Samoilo V. N. et al. Acoustic emission method of rock burst risk assessment. *Proceedings of the 81st EAGE Conference and Exhibition 2019*. London, 2019. Vol. 2019. DOI: 10.3997/2214-4609.201901152
- Rozanov A., Petrov D., Gladyr A., Korchak P. Acoustic emission analysis of brittle and ductile behavior of rocks at critical stresses. *Proceedings of the 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition*. Amsterdam, 2021. Vol. 2021. DOI: 10.3997/2214-4609.202011927
- Damaskinskaya E. E., Gilyarov V. L., Nosov Yu. G., Podurets K. M., Kaloyan A. A. et al. Defect structure formation in quartz single crystal at the early stages of deformation. *Physics of the Solid State*. 2022. Vol. 64, No. 4. pp. 451–457.
- Gilyarov V. L., Damaskinskaya E. E. Modeling of fracture and acoustic emission in polycrystalline solids with the discrete elements method. *Physics of the Solid State*. 2022, Vol. 64, No. 6. pp. 664–669.
- Ben-Zion Y., Dresen G. A synthesis of fracture, friction and damage processes in earthquake rupture zones. *Pure and Applied Geophysics*. 2022. Vol. 179, Iss. 12. pp. 4323–4339.
- Davidsen J., Goebel T., Kwiatek G., Stanchits S., Baró J. et al. what controls the presence and characteristics of aftershocks in rock fracture in the lab? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2021. Vol. 126, Iss. 10. ID e2021JB022539.
- Dresen G., Kwiatek G., Goebel T., Ben-Zion Y. Seismic and aseismic preparatory processes before large stick–slip failure. *Pure and Applied Geophysics*. 2020. Vol. 177, Iss. 12. pp. 5741–5760.