

УДК 537.531:534.6:622.83

КОРРЕЛЯЦИОННО-РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ АКТИВНОСТИ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ И АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД ОКТЯБРЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ



С. М. ДАНИЛЬЕВ¹,
доцент, канд. геол.-
минерал. наук,

Danilev_sm@pers.spmi.ru



С. Н. МУЛЕВ²,
директор по науке



О. М. ШНЮКОВА¹,
аспирант

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

² АО «ВНИМИ», Санкт-Петербург, Россия

Введение

Северные залежи Октябрьского и Талнахского месторождений являются перспективными для добычи богатых полиметаллических руд и обрабатываются рудниками «Октябрьский», «Таймырский» и «Скалистый» [1]. Основу структуры блочного массива Октябрьского месторождения составляют крупные сбросы и взбросы: главный шов Норильско-Хараелахского разлома (НХР), система Западных сбросов, Горный сброс, Большой Горст, Центральный грабен и т. д. Горно-геологические условия данных месторождений таковы, что выемку руд в настоящее время ведут на следующих глубинах: рудник «Октябрьский» – от 500 до 1000 м; «Таймырский» – от 1100 до 1500 м; «Скалистый» – от 800 до 1000 м [2]. Развитие производственных мощностей обуславливает дальнейшее увеличение глубины ведения горных работ на Талнахском и Октябрьском месторождениях, рост объемов выработанных пространств и, как следствие, нарушение естественного равновесия блочного горного массива, что приводит к появлению на отдельных участках зон повышенных напряжений, склонных к проявлению геодинамических явлений [3–5]. В Правилах безопасности при ведении горных работ и переработке твердых промышленных ископаемых на Октябрьском месторождении критическая глубина по опасному проявлению горного давления указана 700 м [6–8]. Так как средняя глубина обработки уже превышает 700 м, важнейшей задачей при оценке удароопасности массива горных пород разрабатываемого

Описаны особенности локального прогноза состояния горного массива, контроля устойчивости подземных выработок на основе измерений акустической эмиссии и естественного электромагнитного излучения. Показано, что с помощью методов локального прогноза, основанных на изучении естественного электромагнитного излучения, возможно оценить перераспределение напряжений в горном массиве до достижения им критического состояния.

Ключевые слова: одноосное сжатие, естественная электромагнитная эмиссия, акустическая эмиссия, корреляционно-регрессионный анализ, локальный прогноз, Октябрьское месторождение

DOI: 10.17580/gzh.2024.09.08

месторождения является развитие технологий прогноза, как на региональном, так и на локальном уровне [9, 10]. Наряду со стандартными методиками изучения состояния горного массива и контроля устойчивости горных пород, базирующимися на регистрации сейсмических и акустических сигналов [11–13], перспективным направлением является регистрация естественного электромагнитного излучения (ЕЗМИ) [14–16]. Для определения взаимосвязи между трещинообразованием горных пород, акустическими сигналами и электромагнитным излучением [17–21] проведены лабораторные испытания на образцах горных пород с рудника «Скалистый» Октябрьского месторождения медно-никелевых руд. Данное месторождение находится в пределах Сибирской платформы и ассоциируется с трапповыми интрузиями триасового возраста. В состав платформы входит чехол, который составляют породы карбонатного состава рифейского возраста, и кристаллический фундамент. Сами интрузии непосредственно локализованы в осадочных породах.

Геологическая характеристика месторождения

Локализация Октябрьского месторождения медно-никелевых руд в геологической структуре Норильского рудного района определяется его расположением в южной части Хараелахской вулканотектонической мульды, которая является частью Талнахского рудного узла. Интрузив имеет сложную форму, которую можно определить как линзообразную. В центральной части интрузия представляет собой единое тело большой мощности, на флангах мощность уменьшается по сравнению с центром, и интрузив расщепляется на большое число апофиз [22].

В строении интрузива можно выделить следующие горизонты:

- габбро-долериты контактовые (GD-K), залегающие в основании интрузива; имеют массивную или пойкилоофитовую структуру, схожую по своему строению с габбро-долеритами оливиновыми (GD-O);
- габбро-долериты такситовые (GD-T) являются наиболее характерными породами для интрузива; представляют собой серую породу, содержат вкрапления руды;
- габбро-долериты пикритовые (GD-P) – мелко- и среднезернистая массивная порода темного цвета; содержат оливин (до 50 %) и имеют пойкилоофитовую структуру;
- габбро-долериты оливиновые GD-O – средне- и мелкозернистая порода серого цвета; содержит оливин, концентрация которого возрастает с глубиной;
- лейкогаббро – порода светло-серого цвета, имеет такситовую структуру.

Над ними залегают слои GD-T, которые содержат повышенную концентрацию платиноидов. Завершают разрез GD-K породы, которые по составу совпадают с нижними контактными габбро-долеритами [22] (рис. 1).

Методы исследований

Для определения физико-механических свойств горных пород, формирующих строение рудника «Скалистый», выполнены лабораторные испытания образцов горных пород на одноосное сжатие с одновременной регистрацией параметров ЭЗМИ и акустического сигнала и проведением корреляционно-регрессионного анализа полученных данных [23]. Для лабораторных исследований отобраны керны литотипов основных пород, представленных в руднике согласно [24]: богатые руды, габбро-долериты такситовые, габбро-долериты оливиновые и вмещающие породы – роговики. В рамках подготовки

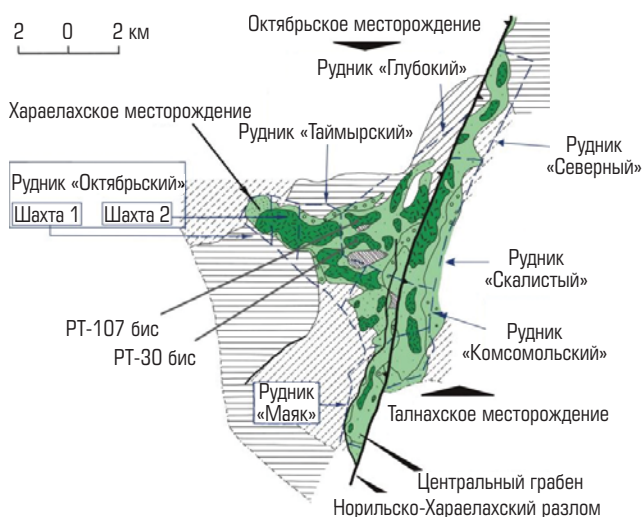


Рис. 1. План Норильского рудного узла [22]

РТ-107 бис, РТ-30 бис – названия скважин, которые вскрыли рудное тело

к лабораторным испытаниям из отобранного керна путем выпиливания изготовлены образцы правильной цилиндрической формы со средними значениями высоты 90 мм, диаметром 45 мм.

Перед лабораторными испытаниями на одноосное сжатие для всех изготовленных образцов на базе лаборатории разведочной геофизики Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II определены физические свойства: скорость распространения упругих волн, удельное электрическое сопротивление, плотность, поляризуемость и др. Средние значения показателей распределения физических свойств

Таблица 1. Средние значения физических свойств в исследуемых образцах

Литотип	Номер образцов	Средняя высота образца, см	Средний диаметр образца, см	Средняя плотность, кг/м ³	Средняя скорость продольных волн, м/с	Средняя скорость поперечных волн, м/с	Коэффициент поляризуемости, %
Сульфидная руда ORE	1.1; 1.2; 2.1; 2.2; 3.1; 3.2; 186; 212; 213; 224	9,201	4,51	3750	4100	2538	16,37
Габбро-долерит оливиновый GD-O	4.1; 4.2; 4.3; 5.1; 5.2; 6.1; 6.2; 6.3; 7.1; 7.2; 8.1; 8.2	9,12	4,61	2840	4724	2513	1,2
Габбро-долерит такситовый GD-T	12.1; 12.2; 13.1; 13.2; 14.1; 14.2; 15.1; 15.2; 207; 308	8,98	4,52	2880	4504	2450	9,53
Роговик R	9.1; 9.2; 9.3; 10.1; 10.2; 11.1; 11.2; 200; 202; 220	9,27	4,67	2610	4145	2404	0,18

в испытываемых образцах горных пород приведены для каждой из групп в **табл. 1**.

В **табл. 2** приведены результаты анализа содержания сульфидов в подготовленных образцах.

Далее на лабораторной базе Санкт-Петербургского филиала АО «ВНИМИ» осуществлены лабораторные испытания образцов на одноосное сжатие с нарастающим усилием до момента разрушения образца с одновременной регистрацией ЕЭМИ и акустического сигнала. Экспериментальная установка включала в себя систему нагружения: гидравлический пресс (ПГК1500Г200), создающий усилие до 150 тс; тензометрический датчик нагрузки; для измерений ЕЭМИ – ферритовую антенну и модуль комплекса Angel-M (Санкт-Петербург) [25, 26]; для измерений акустических сигналов – пьезоэлектрический акселерометр KD35 (Германия). Осуществляли синхронизацию с датчиком электромагнитного излучения и тензометрическим датчиком при помощи аппаратуры QMBOX (R-Technology).

В результате лабораторных испытаний для каждого из испытываемых образцов горных пород получены диаграммы нагружения, записи естественных электромагнитных и акустических сигналов (**рис. 2**).

Результаты исследований

Лабораторные испытания, проведенные на образцах горных пород, показали, что при увеличении амплитуды акустического сигнала наблюдается рост амплитуд электромагнитного поля. Для каждого из образцов рассчитан предел прочности на одноосное сжатие и измерены акустическая эмиссия (АЭ) и электромагнитная эмиссия (ЭМЭ). С целью выявления взаимосвязи активности АЭ и ЭМЭ выполнен регрессионный анализ данных для каждой группы образцов в пределах одного литотипа. Значения активности АЭ и ЭМЭ каждой группы образцов имеют

Таблица 2. Содержание сульфидов в образцах

Литотип	Состав	Номер образцов	Содержание сульфидов*
Сульфидная руда ORE	Богатая руда	1.1; 1.2; 2.1; 2.2; 3.1; 3.2; 186; 212; 213; 224	S~70–90, Cr-Po
Габбро-долерит оливиновый GD-O	Безрудная интрузия	4.1; 4.2; 4.3; 5.2	S~1–3
		6.1; 6.2; 6.3	S~7–10, Po-Cr
		8.2	S~3–5, Cr-Po
Габбро-долерит такситовый GD-T	Вкрапленная руда	13.1, 13.2	S~3–5, Cr-Po
		15.1, 15.2; 14.1; 14.2	S~5–10, Cr-Po
		207	S~7–10, Cr-Po
		308	S~10–15, Cr-Po
Роговик R	Вмещающая интрузию порода	200; 202; 11.2;	S~1–3, Cr-Po
		220; 9.1; 9.3	Без видимой рудной минерализации

* S – содержание сульфидов, %, Po – пирротин, Cr – халькопирит.

хорошую аппроксимацию линейной функции и высокий коэффициент детерминации (более 0,88), что демонстрирует высокую корреляционную связь. На **рис. 3** представлены зависимости активности АЭ и ЭМЭ для каждого образца, участвовавшего в эксперименте, во всем интервале нагружения до предельно разрушающей нагрузки.

Для образцов сульфидных руд характерны наименьшая прочность на одноосное сжатие и наибольшая активность АЭ и ЭМЭ. Образцы GD-O характеризуются максимальной прочностью, у образцов GD-T сигнал регистрируется задолго до достижения разрушающих напряжений. У более прочных

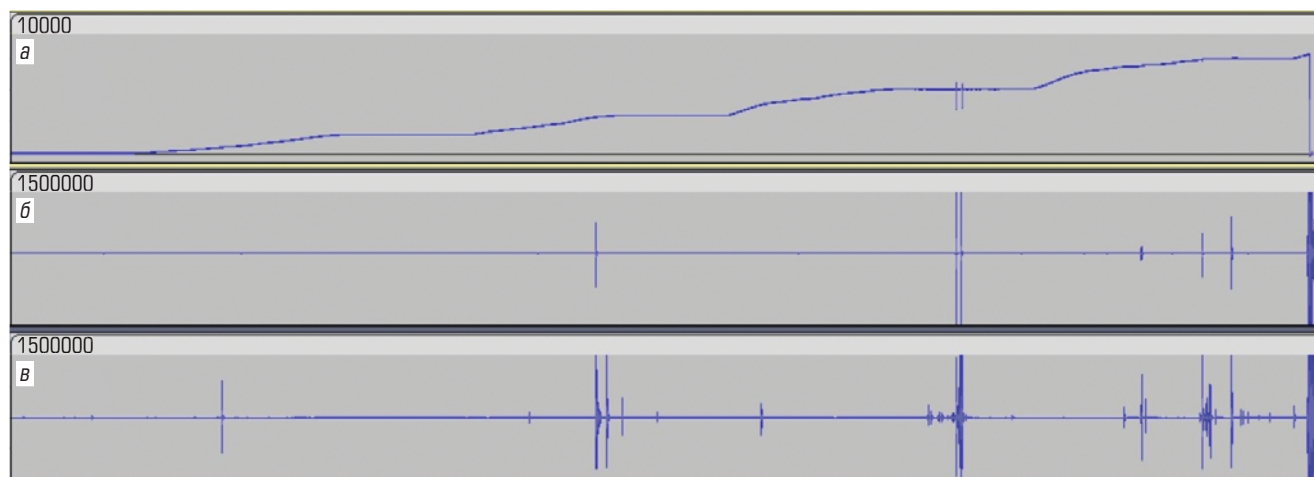


Рис. 2. Результаты испытаний для образца сульфидной руды ORE:

a – диаграмма нагружения; *b* – запись естественных электромагнитных сигналов; *в* – запись акустических сигналов.

10000, 1500000 – названия файлов, полученные при испытаниях образцов

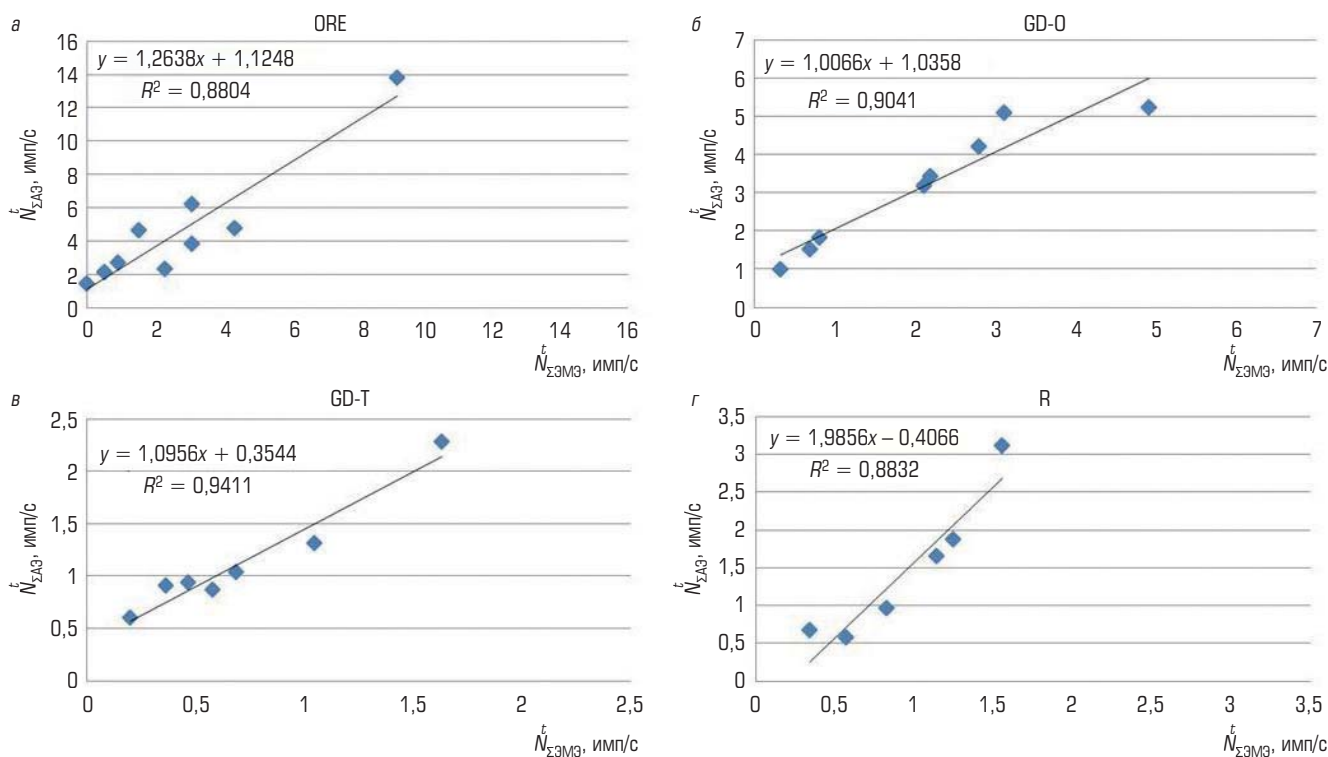


Рис. 3. Корреляционно-регрессионный анализ активности АЗ и ЭМЭ на всем интервале нагружения для литотипов ORE, GD-O, GD-T, R

Таблица 3. Средние значения активности электромагнитной и акустической эмиссии в испытываемых образцах горных пород

Литотип	Номер образцов	Средние значения активности электромагнитной $\dot{N}_{ЭМЭ}$ и акустической эмиссии $\dot{N}_{АЗ}$ для различных литотипов при разрушающих нагрузках, %							
		0–40		40–60		60–80		80–100	
		$\dot{N}_{ЭМЭ}$ имп/с	$\dot{N}_{АЗ}$ имп/с	$\dot{N}_{ЭМЭ}$ имп/с	$\dot{N}_{АЗ}$ имп/с	$\dot{N}_{ЭМЭ}$ имп/с	$\dot{N}_{АЗ}$ имп/с	$\dot{N}_{ЭМЭ}$ имп/с	$\dot{N}_{АЗ}$ имп/с
Сульфидная руда ORE	1.1; 1.2; 2.1; 2.2; 3.1; 3.2; 186; 212; 213	3,21	1,95	2,77	4,08	18,26	20,89	9	13,38
Габбро-долерит оливиновый GD-O	4.1; 4.2; 4.3; 5.1; 6.1; 6.2; 7.2; 8.1	1,07	2,16	5,15	3,51	5,29	4,76	3,61	3,24
Габбро-долерит такситовый GD-T	12.1; 13.1; 14.1; 14.2; 15.1; 15.2; 207	0,55	0,66	1,06	0,96	3,76	2,48	2,27	1,66
Роговик R	9.1; 9.3; 10.1; 11.2; 220; 202	0,33	0,4	3,93	2,79	5,94	5,37	2,12	3,39

образцов можно выделить этапы подготовки разрушения: уплотнение, формирование очага разрушения и собственно разрушение.

Заключение

В процессе обработки данных экспериментальных исследований установлено, что наибольшая активность электромагнитных сигналов до достижения критических разрушающих напряжений при испытании образцов появляется на 60–80 %


от максимальной нагрузки (табл. 3). Таким образом, при проведении режимных измерений рост активности ЭМЭ служит предвестником достижения опасного уровня напряжений. Отмечено, что чем больше в образцах неоднородностей, тем меньше предельная прочность на одноосное сжатие, но больше источников электромагнитного излучения.

Проведенные лабораторные исследования и корреляционно-регрессионный анализ активности акустической и естественной электромагнитной эмиссии показывают их

взаимосвязь, что позволяет обосновать применение технологии регистрации ЕЗМИ для локального прогноза состояния горных пород в режиме мониторинга. Фоновые значения естественного электромагнитного поля для пород разных литотипов рудника «Скалистый» достаточно сильно варьируются, поэтому критерии опасности при мониторинговых наблюдениях ЕЗМИ в разных геологических условиях различны. При

регистрации ЕЗМИ, последующей обработки данных появляется возможность оценить состояние массива горных пород и отслеживать локальные опасные геодинамические явления.

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2024, № 9, pp. 51–55
DOI: 10.17580/gzh.2024.09.08

Correlation and regression analysis of natural electromagnetic and acoustic emission activity in rock samples of the Oktyabrskiy deposit

Information about authors

S. M. Daniliev¹, Associate Professor, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Danilev_sm@pers.spmi.ru

S. N. Mulev², Director of Science

O. M. Shnyukova¹, Post-Graduate Student

¹Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

²VNIMI, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

This article is devoted to the development of approaches to local prediction of rock mass conditions and stability monitoring in underground workings using measurements of acoustic and natural electromagnetic emission to assess stress redistribution in rock mass before its critical state is reached.

Measurements of acoustic emission in underground workings are successfully used for the stress-strain behavior prediction in rocks and are included in working regulatory documents at some mines. However, acoustic emission measurement requires a stable contact between attachable or downhole (micro downhole) sensors and rock mass, which means additional associate work to be carried out and, as a result, increases the time of research and prediction.

Measurement of natural electromagnetic emission in mine workings is a promising direction in predictive research. Its undeniable advantage is the possibility of real-time observations over rock mass condition.

In order to find the relationship between the activity of acoustic and natural electromagnetic emission and the increase in stresses in rocks, laboratory tests of rock samples from the Oktyabrskiy deposit were performed.

The studies of acoustic and electromagnetic signal flows under uniaxial compression with synchronized registration were carried out on the prepared samples of the main rock types of the Oktyabrskiy deposit. The performed studies demonstrate the prospects of the technology based on the natural electromagnetic emission generated by rocks under critical stresses for the local prediction objectives.

Keywords: uniaxial compression, natural electromagnetic emission, acoustic emission, correlation and regression analysis, local prediction, Oktyabrskiy deposit.

References

- Kosukhin N. I., Sidorov D. V., Shabarov A. N. Stress-strain state assessment in ore body mining in small-amplitude faulting zones. *MIAB*. 2014. No. 12. pp. 142–148.
- Marysyuk V. P., Sabyanin G. V., Andreev A. A., Vasiliev D. A. Stress assessment in deep-level stoping in Talnakh mines. *Gornyi Zhurnal*. 2020. No. 6. pp. 17–22.
- 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.
- Karasev M. A., Buslova M. A., Vilner M. A., Nguyen T. T. Method for predicting the stress-strain state of the vertical shaft lining at the drift landing section in saliferous rocks. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 240. pp. 628–637.
- Meshkov A. A., Popov A. L., Popova Yu. V., Smolin A. V., Shabarov A. N. Prediction of hazardous phenomena within operating coal seam for the Yalovsky mine field. *MIAB*. 2020. No. 2. pp. 22–33.
- Gospodarikov A. P., Trofimov A. V., Kirkin A. P. Evaluation of deformation characteristics of brittle rocks beyond the limit of strength in the mode of uniaxial servohydraulic loading. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 256. pp. 539–548.
- Gospodarikov A. P., Kirkin A. P., Kovalevskiy V. N. On some local rock burst prevention methods. *Izvestiya Tluskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2021. No. 2. pp. 77–93.

- Shabarov A. N., Zvezdkin V. A., Anokhin A. G. Studies of the stress-strain state of intrusion in the process of joint mining of ore deposits of the Oktyabrskiy and Talnakhskiy deposits. *Journal of Mining Institute*. 2012. Vol. 198. pp. 161–165.
- 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.
- Protosenya A. G., Alekseev A. V., Verbilo 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.
- Gladyr A. V., Kursakin G. A., Rasskazov M. I., Konstantinov A. V. Method to detect hazardous areas in rock mass from seismoacoustic observations. *MIAB*. 2019. No. 8. pp. 21–32.
- Li Z., Lei Y., Wang E., Frid V., Li D. et al. Characteristics of electromagnetic radiation and the acoustic emission response of multi-scale rock-like material failure and their application. *Foundations*. 2022. Vol. 2, Iss. 3. pp. 763–780.
- Rasskazova I. Yu., Tsirel S. V., Rozanov A. O., Tereshkin A. A., Gladyr A. V. Application of acoustic measurement data to characterize initiation and development of disintegration focus in a rock mass. *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53, Iss. 2. pp. 224–231.
- Lin P., Wei P., Wang C., Kang S., Wang X. Effect of rock mechanical properties on electromagnetic radiation mechanism of rock fracturing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021. Vol. 13, Iss. 4. pp. 798–810.
- Wei M., Song D., He X., Lou Q., Qiu L. et al. Characteristics of electromagnetic vector field generated from rock fracturing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023. Vol. 15, Iss. 2. pp. 457–466.
- Bizyaev A. A., Voronkina N. M., Savchenko A. V., Tsupov M. N. Methodology for the non-contact determination of dangerously loaded zones in a mine array. *Ugol*. 2019. No. 11. pp. 27–31.
- Wei M., Song D., He X., Li Z., Qiu L. et al. Effect of rock properties on electromagnetic radiation characteristics generated by rock fracture during uniaxial compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020. Vol. 53. pp. 5223–5238.
- Maniak K., Mydlkowski R. Autonomous instrumentation for measuring electromagnetic radiation from rocks in mine conditions—A Functional analysis. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 2. ID 600.
- Trofimov A. V., Rummyantsev A. E., Gospodarikov A. P., Kirkin A. P. Non-destructive ultrasonic method of testing the strength of backfill concrete at deep Talnakh mines. *Tsvetnyye Metally*. 2020. No. 12. pp. 16–22.
- Trofimov A. V., Kirkin A. P., Rummyantsev A. E., Yavarov A. V. Use of numerical modelling to determine optimum overcoring parameters in rock stress-strain state analysis. *Tsvetnyye Metally*. 2020. No. 12. pp. 22–27.
- Trofimov A. V., Rummyantsev A. E., Gospodarikov A. P., Kirkin A. P. Non-destructive ultrasonic method of testing the strength of backfill concrete at deep Talnakh mines. *Tsvetnyye Metally*. 2020. No. 12. pp. 28–33.
- Nesterenko M. R. Structure and composition of picritic gabbro-dolerites of the Oktyabrskiy deposit central part. *Otechestvennaya geologiya*. 2020. No. 6. pp. 39–47.
- Shibaev I. A., Belov O. D., Sas I. E. Determination of dynamic and static elasticity modules of granite samples. *MIAB*. 2021. No. 4-1. pp. 5–15.
- Duryagina A. M., Talovina I. V., Lieberwirth H., Ilalova R. K. Morphometric parameters of sulphide ores as a basis for selective ore dressing. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 256. pp. 527–538.
- Mulev S. N., Starnikov V. N., Romanevich O. A. The current stage of development of the geophysical method for recording natural electromagnetic radiation (EEMI–NER). *Ugol*. 2019. No. 10. pp. 6–14.
- 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.