

Современные подходы контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород по данным сейсмических наблюдений на Таштагольском железорудном месторождении

А.Г. Гаврилов¹, В.А. Штирц¹, Г.Д. Рукавишников^{2, 3}✉¹ ЕВРАЗРУДА – филиал АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк, Российская Федерация² АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация³ Институт горного дела имени Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация✉ info@vnimi.ru

Резюме: В статье описан опыт использования современной системы сейсмического мониторинга для получения качественно нового типа данных – длительных непрерывных записей колебаний сейсмических датчиков. В отличие от классического метода использования систем сейсмического мониторинга, где полезной информацией являются короткие отрезки сигнала с записью группы упругих волн, новый подход предполагает анализ длительных временных отрезков, содержащих фоновые колебания сейсмических датчиков. Рассмотрен пример получения подобных записей датчиками системы сейсмического мониторинга «GITS», установленными в подземных выработках железорудного месторождения на большой глубине. Предлагается метод интерпретации таких данных путём специальной обработки полученных записей с опорой на теорию волн маятникового типа. Данный метод может быть использован как методологическая основа для оценки напряжённо-деформированного состояния массива горных пород.

Ключевые слова: сейсмическая активность, горные удары, напряжённо-деформированное состояние, сейсмические датчики, длительные записи, маятниковые волны, блочная среда

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-17-00148, <https://rscf.ru/project/23-17-00148/>

Для цитирования: Гаврилов А.Г., Штирц В.А., Рукавишников Г.Д. Современные подходы контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород по данным сейсмических наблюдений на Таштагольском железорудном месторождении. *Горная промышленность*. 2024;(3S):32–36. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-32-36>

Modern approaches to control stress-strain state of rock mass using seismic data at the Tashtagol iron mine

A.G. Gavrilov¹, V.A. Shtirts¹, G.D. Rukavishnikov^{2, 3}✉¹ EVRAZRUDA, Branch of EVRAZ West-Siberian Metal Plant (EVRAZ ZSMK) JSC, Novokuznetsk, Russian Federation² VNIMI JSC, St. Petersburg, Russian Federation³ N.A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation✉ info@vnimi.ru

Abstract: The paper aims to describe the experience of using a modern seismic monitoring system to obtain a game-changing type of data, i.e. long-term continuous records of seismic sensor oscillations. Unlike the classical method of using seismic monitoring systems, where short segments of signal with elastic P- and S-waves are considered as valuable information, the new approach involves analyzing long-time segments that contain background oscillations of seismic sensors. The paper considers an example of obtaining such records using sensors of the GITS seismic monitoring system installed in a deep iron mine. A method of interpreting such data by means of special processing of the obtained records based on the theory of pendulum-type waves is proposed. This method can be used as a methodological basis for assessing the stress-strain state of a rock mass.

Keywords: seismic activity, rock bump, stress-strain state, seismic sensors, continuous records, pendulum waves, block medium

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 23-17-00148, <https://rscf.ru/project/23-17-00148/>

For citation: Gavrilov A.G., Shtirts V.A., Rukavishnikov G.D. Modern approaches to control stress-strain state of rock mass using seismic data at the Tashtagol iron mine. *Russian Mining Industry*. 2024;(3S):32–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-32-36>

Введение

Организация сейсмического мониторинга при отработке твёрдых полезных ископаемых на больших глубинах стала неотъемлемой частью комплекса мер по прогнозу и предотвращению крупных динамических и газодинамических явлений [1; 2]. Классические представления о физике распространения сейсмических волн в породном массиве как в сплошной среде на долгое время определили направление развития систем сейсмического мониторинга глубоких шахт и рудников [3].

До сих пор главным образом внимание уделялось отрезкам записей сейсмических сигналов, содержащим продольные и поперечные волны. Именно эта часть данных позволяет получать информацию о локализации очагов сейсмических событий [4; 5]. Остальная часть данных о колебаниях сейсмических датчиков не попадает в память компьютера и практически не подвергается содержательному анализу. Развитие основ нелинейной сейсмологии и соответствующего программного обеспечения в последние годы позволило начать использовать системы сейсмического мониторинга качественно иначе – для получения длительных непрерывных записей колебаний сейсмических датчиков, в которых носителем важной содержательной информации становятся их «фоновые» колебания.

До сих пор не существует общепринятых методик обработки таких данных с целью получения вывода о напряжённом состоянии породного массива. Широкие возможности для интерпретации длительных записей возникают, если опираться на теоретические и экспериментальные результаты, полученные в нелинейной геомеханике, активно развивающейся в наши дни коллективом учёных и специалистов из России и Китая [6; 7].

В данной статье описан опыт получения и геомеханической интерпретации длительных сейсмических записей в условиях Таштагольского железорудного месторождения.

Сейсмические наблюдения на Таштагольском железорудном месторождении

Месторождение обрабатывается горнорудным филиалом АО «ЕВРАЗ Объединённый Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК»).

Глубина ведения горных работ и наличие пород, склонных к хрупкому разрушению, являются наиболее неблагоприятными факторами эксплуатации, связанными с повышенным горным давлением при отработке месторождения. За период эксплуатации Таштагольского месторождения зарегистрировано большое количество проявлений горного давления в динамической форме, выразившееся в форме горных, горно-тектонических ударов, микроударов, толчков и внешних признаков проявления горного давления. Геодинамические явления горного давления в форме стрельяния отмечаются с глубины 300 м, а с глубины 600 м имели место горные удары различной интенсивности.

В настоящее время горные работы на месторождении ведутся на глубинах от 400 до 1000 м от поверхности, очистные работы ведутся на глубинах от 500 до 800 м от поверхности.

Сейсмические наблюдения на Таштагольском железорудном месторождении ведутся с восьмидесятых годов прошлого века, с течением времени регистрирующая аппаратура совершенствовалась, но методы работы и цель наблюдений сохранились – рассчитать координаты

и оценить энергию зарегистрированных сейсмических событий, сформировать базу данных.

В 2022 г. на Таштагольской шахте была введена в режим промышленной эксплуатации ССМ «GITS» (разработанная и изготовленная в АО «ВНИМИ»). Новая система вместе с программным обеспечением является основной в системе сейсмических наблюдений на месторождении. В качестве дополнительных используются сейсморегистратор сети Алтае-Саянского филиала ЕГС РАН «Байкал 8.2» и аппаратура «РЕЛОС».

В условиях Таштагольского железорудного месторождения датчики системы установлены в специальных нишах на бетонных постаменты (рис. 1), сориентированы по сторонам света и настроены на регистрацию колебаний в трёх ортогональных осях в диапазоне 0,5–100 Гц.

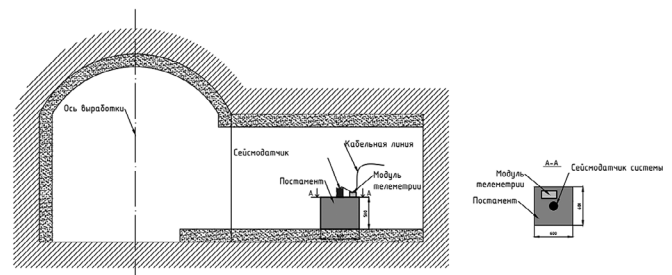


Рис. 1
Схема установки датчика

Fig. 1
Sensor installation scheme

Организация непрерывных длительных записей сейсмического сигнала

В режим непрерывной записи колебаний был переведён датчик №27, расположенный в горной выработке на глубине около 900 м.

Для первичного анализа сейсмических записей длительностью 24 ч удобно рассматривать не сам сигнал, а определённую функцию, отражающую изменения в спектре фоновых колебаний, например, сканирующую функцию K , значение которой рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{\sum_{f_1}^{f_2} A(f_i)}{\sum_{f_3}^{f_4} A(f_i)}, \tag{1}$$

где A – амплитуда частоты f_i в рассчитанном спектре сигнала; K – значение сканирующей функции; f_1-f_2 – сканируемый диапазон частот; f_3-f_4 – частотный диапазон всей полосы регистрации колебаний.

Таким образом, функция K принимает значения от 0 до 1 и отражает «вклад» сканируемого диапазона частот в полный спектр колебаний сейсмического датчика.

На рис. 2 представлена суточная запись колебаний датчика №27 и график сканирующей функции для диапазона

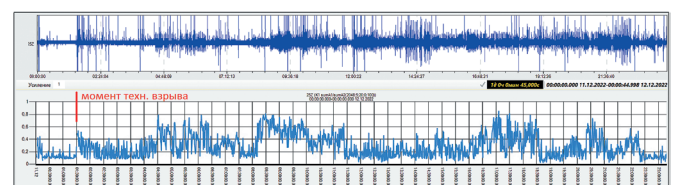


Рис. 2
Суточная непрерывная запись колебаний и график параметра K за 12.12.2022

Fig. 2
The daily continuous record of oscillations and a plot of the K parameter on 12.12.2022

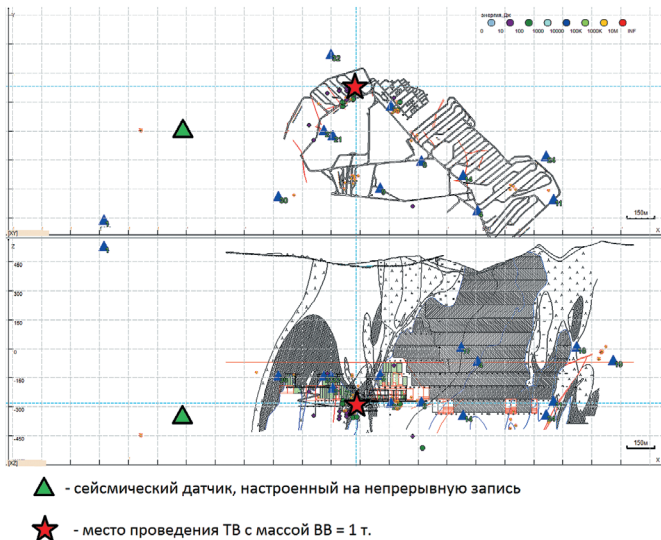


Рис. 3
План горных выработок горизонта –280 м Таштагольского железорудного месторождения с указанием места проведения технологического взрыва 11.05.2023 и места установки сейсмодатчика

Fig. 3
A plan of mine workings at –280 m level of the Tashtagolsky iron ore deposit with indication of the process blast location on 11.05.2023 and the location of the seismic sensor

на частот 5–20 Гц. Как видно, значение функции K постоянно в течение суток. Особый интерес представляет временной промежуток 0:00:00 – 1:30:00, когда горные работы останавливаются для проведения в 0:30:00 технологических взрывов и последующего проветривания шахты [8]. В это время датчик находится «в тишине», так как отсутствуют механические шумы от шахтного транспорта, процессов бурения и др.

Более детально поведение сканирующей функции K рассматривалось для датчика №27 во временном промежутке 0:25:00 – 0:40:00 (UTC ± 0) после проведения технологического взрыва 11.05.2023 с массой заряда порядка 1000 кг на расстоянии 950 м от места установки датчика.

На рис. 3 показан план горных выработок с указанием мест взрыва и расположения датчика.

Далее на рис. 4 приводятся графики сканирующей функции K , рассчитанные по непрерывной записи компоненты X датчика №27 во временном интервале 0:25:00 – 0:40:00 11.05.2023 (UTC ± 0) для различных диапазонов частот. На графиках красной линией отмечено время технологического взрыва.

Интерпретация данных

Объяснение наблюдаемого эффекта даёт сформированная в ИГД СО РАН теория волн маятникового типа, в которой горные породы представляются многоуровневой дискретной средой, а обычные сейсмические волны сопровождаются процессом распространения энергии упругой деформации посредством взаимодействия отдельных блоков, имеющих собственные колебательные степени свободы.

Феноменологические основы теории волн маятникового типа и экспериментальное доказательство отмеченных закономерностей подробно изложены в [9–12].

Коллективом учёных ИГД СО РАН был проведён ряд на-

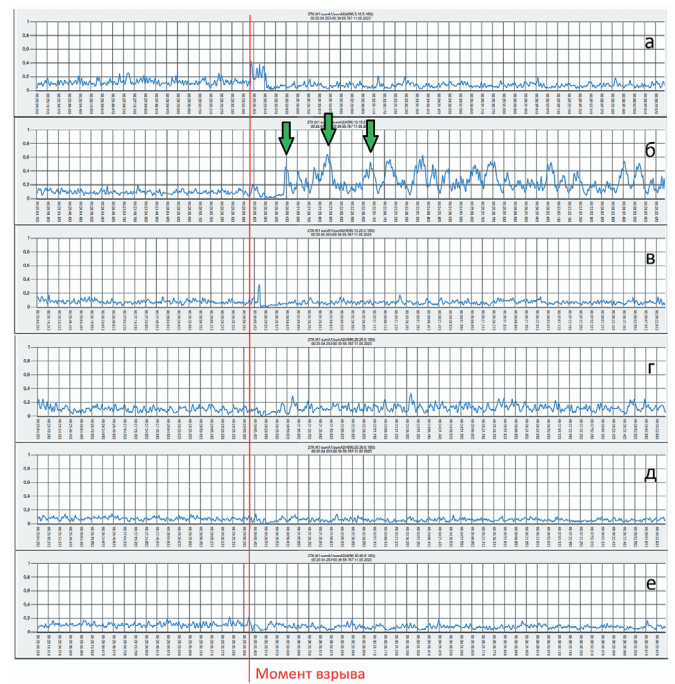


Рис. 4
Графики значений сканирующей функции K для диапазонов частот: а – 5–10 Гц; б – 10–15 Гц; в – 15–20 Гц; г – 20–25 Гц; д – 25–30 Гц; е – 30–40 Гц

Fig. 4
Plots of the scanning K function values for the following frequency ranges: а – 5–10 Hz; б – 10–15 Hz; в – 15–20 Hz; г – 20–25 Hz; д – 25–30 Hz; е – 30–40 Hz

турных и лабораторных экспериментов по распространению колебаний в блочно-устроенных средах. Была предложена формула скорости маятниковой волны, в простейшем одномерном случае имеющая следующий вид:

$$v_{\mu} = \frac{[1+\nu(\sigma)]v_p v_{\varepsilon}}{v_{\varepsilon} + \nu(\sigma)v_p}, \quad (2)$$

где $\nu(\sigma)$ – структурно-иерархический параметр, характеризующий меру подвижности геоблоков – носителей маятниковой волны, зависящий от величины раскрытия межблоковых трещин и значений действующих в массиве напряжений; v_p – скорость распространения продольной сейсмической волны внутри геоблоков – носителей маятниковой волны; v_{ε} – средняя (по модулю) скорость относительного трансляционного движения геоблоков при распространении маятниковой волны.

При этом основная несущая частота μ -волн отражает период собственных колебаний структурных элементов массива как «абсолютно» твёрдых тел и связана с линейным размером блоков породного массива следующим соотношением:

$$L = \frac{v_p}{2 * f_{\mu}}, \quad (3)$$

где L – линейный размер блока; v_p – скорость распространения продольных волн в блоке; f_{μ} – несущая частота.

Из приведённых выше формул следует, что динамико-кинематические характеристики волн маятникового типа напрямую связаны с напряжённо-деформированным состоянием массива горных пород, а также с его блочно-иерархическим строением.

Интерпретация данных, представленных на рис. 3, с опорой на теорию волн маятникового типа позволяет сделать следующие выводы:

Внезапный рост значений функции K для сканируемого (по формуле (1)) диапазона частот будет соответствовать возникновению квазирезонансов в соответствующих по размеру (по формуле (3)) геоблоках. По графикам на рис. 3 наблюдается возникновение квазирезонансов в диапазоне частот 10–15 Гц, следовательно, с учётом средней скорости продольных волн в горных породах месторождения линейный размер блока – носителя маятниковой волны составляет 200–300 м.

Временная задержка между моментом взрыва и возникновением квазирезонансов в сканируемом диапазоне частот позволяет рассчитать «кажущуюся» скорость распространения маятниковой волны для соответствующего размера геоблоков. В диапазоне частот 10–15 Гц первый всплеск значений параметра K наблюдается через 50 с. С учётом расстояния между местом установки датчика и местом взрыва 950 м скорость распространения маятниковой волны составила 19 м/с.

Заключение

В работе описан метод получения и обработки качественно нового типа данных о колебательных процессах, протекающих в породном массиве в процессе ведения горных работ на большой глубине.

Расчёт сканирующей функции по данным непрерывной записи колебаний позволил обнаружить изменение спектрального состава фоновых колебаний в течение длительного времени после взрывного воздействия на породный массив. Установлено, что после затухания группы упругих волн до уровня фоновых колебаний через определённый промежуток времени возникают квазирезонансы в определённых частотных диапазонах.

По временным задержкам возникновения таких квазирезонансов даны оценка линейных размеров «работающих» блоков-носителей и кажущаяся скорость распространения волн маятникового типа.

Систематические наблюдения за параметрами возникающих квазирезонансов позволяют производить оценку напряжённого состояния массива. Предстоит работа по накоплению статистики и взаимосвязи между оценкой напряженно-деформированного состояния классическими методами и данными непрерывных записей.

Наблюдаемые процессы существуют на разных масштабных уровнях структурной организации породного массива. Предложенный метод получения и анализа сейсмических данных также будет полезен в установлении связей между региональными землетрясениями и локальными геодинамическими и газодинамическими явлениями [13; 14] в пределах шахтных полей.

Список литературы / References

1. Мулев С.Н., Питаль М.Н., Панин С.Ф., Тюхрин В.Г. Современные технологии сейсмического мониторинга угольных шахт и рудников. *Горный журнал*. 2019;(9):68–72. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.09.08>
Mulev S.N., Pital M.N., Panin S.F., Tyukhrin V.G. Advanced seismic monitoring technologies for coal and ore mines. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(9):68–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.09.08>
2. Еременко А.А., Мулев С.Н., Штирц В.А. Мониторинг геодинамических явлений микросейсмическим методом при освоении удароопасных месторождений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(1):12–22. <https://doi.org/10.15372/FTPPI20220102>
Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A. Microseismic monitoring of geodynamic phenomena in rockburst-hazardous mining conditions. *Journal of Mining Science*. 2022;58(1):10–19.
3. Mendecki A.J., Lynch R.A., Malovichko D.A. *Routine micro-seismic monitoring in mines*. 2010. 33 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/268439633_Routine_Micro-Seismic_Monitoring_in_Mines (accessed: 28.05.2024).
4. Мулев С.Н., Рукавишников Г.Д., Мороз Д.И., Пашкова В.И., Мороз Н.Е. Мониторинг напряженного состояния сейсмическими и расчётными методами на шахтах АО «Воркутауголь». *Уголь*. 2022;(12):88–93. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-12-88-93>
Mulev S.N., Rukavishnikov G.D., Moroz D.I., Pashkova V.I., Moroz N.E. Monitoring of the stress state by seismic and numerical methods at the mines of JSC “Vorkutaugol”. *Ugol’*. 2022;(12):88–93. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-12-88-93>
5. Разумов Е.Е., Простов С.М., Мулёв С.Н., Рукавишников Г.Д. Алгоритмы обработки сейсмической информации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(2):17–29. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_17
Razumov E.E., Prostov S.M., Mulev S.N., Rukavishnikov G.D. Seismic information processing algorithms. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(2):17–29. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_17
6. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Востриков В.И., Усольцева О.М., Мулев С.Н., Юшкин В.Ф. и др. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Часть I: формулировка и обоснование задачи исследований. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(1):5–25. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-01-0-5-25>
Oparin V.N., Adushkin V.V., Vostrikov V.I., Usol'tseva O.M., Mulev S.N., Yushkin V.F. et al. An experimental and theoretical framework of nonlinear geotomography. Part I: Research problem statement and justification. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(1):5–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-01-0-5-25>

7. Wang K., Dou L., Pan Y., Kiryaeva T.A. Study of tunnel roof anti-impact and energy absorption effect on block overburden rock mass failure. *Zhongguo Kuangye Daxue Xuebao / Journal of China University of Mining and Technology*. 2017;46(6):1212–1217.
8. Штирц В.А., Колтышев В.Н. Отработка блоков и распределение толчков после массовых взрывов в условиях Таштагольского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(11):41–46.
Shtirts V.A., Koltyshev V.N. Development blocks and the distribution of aftershocks after massive explosions in the conditions of the Tashtagol deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(11):41–46. (In Russ.)
9. Курленя М.В., Опарин В.Н. О явлении знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 1990;(4):3–13.
Kurlenya M.V., Oparin V.N. On the phenomenon of skew symmetric response of rocks to dynamic impacts. *Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 1990;(4):3–13. (In Russ.)
10. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Vostrikov V.I. Anomalously low friction in block media. *Journal of Mining Science*. 1997;33(1): 1–11. <https://doi.org/10.1007/BF02765421>
11. Опарин В.Н., Танаёно А.С. *Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении*. Новосибирск: Наука; 2011.258 с.
12. Адушкин В.В., Опарин В.Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. III. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2014;(4):10–38.
Adushkin V.V., Oparin V.N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomedia. Part III. *Journal of Mining Science*. 2014;50(4):623–645. <https://doi.org/10.1134/S1062739114040024>
13. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Киряева Т.А., Потапов В.П., Черепов А.А., Тюхрин В.Г., Глумов А.В. О влиянии волн маятникового типа от землетрясений на газодинамическую активность угольных шахт Кузбасса. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2018;(1):3–15. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20180101>
Oparin V.N., Adushkin V.V., Kiryaeva T.A., Potapov V.P., Cherepov A.A., Tyukhrin V.G., Glumov A.V. Effect of pendulum waves from earthquakes on gas-dynamic behavior of coal seams in Kuzbass. *Journal of Mining Science*. 2018;54(1):3–12. <https://doi.org/10.1134/S1062739118013269>
14. Киряева Т.А., Рукавишников Г.Д. О влиянии землетрясений и мощных технологических взрывов на газодинамическую активность угольных шахт. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021;(2):385–395.
Kiryaeva T.A., Rukavishnikov G.D. On the influence of earthquakes and powerful technological explosions on the gasdynamic activity of coal mines. *Izvestiya Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2021;(2):385–395. (In Russ.)

Информация об авторах

Гаврилов Алексей Григорьевич – главный инженер, ЕВРАЗРУДА – филиал АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк, Российская Федерация; e-mail: aleksey.gavrilov@evraz.com

Штирц Владимир Александрович – кандидат технических наук, заместитель главного инженера по горным ударам, ЕВРАЗРУДА – филиал АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк, Российская Федерация; e-mail: Vladimir.shtirts@evraz.com

Рукавишников Георгий Дмитриевич – заведующий центром геодинамического мониторинга, АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; инженер отдела экспериментальной геомеханики, Институт горного дела имени Н. А. Чинакала Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; e-mail: info@vnimi.ru

Information about the authors

Aleksey G. Gavrilov – Chief Engineer, EVRAZRUDA, Branch of EVRAZ West-Siberian Metal Plant (EVRAZ ZSMK) JSC, Novokuznetsk, Russian Federation; e-mail: aleksey.gavrilov@evraz.com

Vladimir A. Shtirts – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Chief Engineer for Rock Bumps, EVRAZRUDA, Branch of EVRAZ West-Siberian Metal Plant (EVRAZ ZSMK) JSC, Novokuznetsk, Russian Federation; e-mail: Vladimir.shtirts@evraz.com

Georgy D. Rukavishnikov – Head of the Geodynamic Monitoring Centre, VNIMI JSC, St. Petersburg, Russian Federation; Engineer, Department of Experimental Geomechanics, N.A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; e-mail: info@vnimi.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 09.05.2024

Поступила после рецензирования: 18.06.2024

Принята к публикации: 28.06.2024

Article info

Received: 09.05.2024

Revised: 18.06.2024

Accepted: 28.06.2024