

Сейсмический мониторинг и оценка геодинамических процессов при ведении горных работ в условиях подземного рудника «Интернациональный»

А.А. Вьюнников¹, Н.В. Хоютанова¹, К.В. Романевич^{2,3}✉, С.Ф. Панин², Е.Е. Разумов²

¹ Мирнинский горно-обогатительный комбинат АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация

² АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ Институт горного дела имени Н. А. Чинакала Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

✉ info@vnimi.ru

Резюме: В статье рассматривается система сейсмического мониторинга GITS (разработка ВНИМИ), выполняющая непрерывный контроль сейсмоактивности и региональный прогноз удароопасности в пределах горного отвода подземного рудника «Интернациональный» с апреля 2022 г. в режиме промышленной эксплуатации. Представлена методика проведения наблюдений, даны результаты анализа получаемых данных в части энергетических и пространственных характеристик сейсмических событий.

Предложено решение задачи по определению скоростных характеристик вмещающего массива для верхней и нижней части рудника с использованием информации о параметрах сейсмособытий, получаемых системой GITS, дана предварительная оценка скоростных характеристик горного массива. Полученные на текущем этапе исследований данные для двух ограниченных областей могут быть применены для оценки состояния и поведения массива в долгосрочной перспективе. В дальнейшем для целей мониторинга такие наблюдения могут быть разделены по сети локального прогноза, настроенной на мелкие события, и региональной сети контроля сейсмоактивности по всему руднику, настроенной на регистрацию крупных (от 500 Дж) событий, включая региональные землетрясения.

Ключевые слова: сейсмический мониторинг, рудник Интернациональный, геодинамика, напряженно-деформированное состояние массива, энергия сейсмособытия, скоростная характеристика вмещающего массива

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

Для цитирования: Вьюнников А.А., Хоютанова Н.В., Романевич К.В., Панин С.Ф., Разумов Е.Е. Сейсмический мониторинг и оценка геодинамических процессов при ведении горных работ в условиях подземного рудника «Интернациональный». *Горная промышленность*. 2024;(3S):26–31. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-26-31>

Seismic monitoring and assessment of geodynamic processes during mining operations in conditions of the International underground mine

A.A. Vyunnikov¹, N.V. Khoютanova¹, K.V. Romanevich^{2,3}✉, S.F. Panin², E.E. Razumov²

¹ Mirny Mining and Processing Division, ALROSA, Mirny, Russian Federation

² VNIMI JSC, St. Petersburg, Russian Federation

³ N.A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

✉ info@vnimi.ru

Abstract: The article describes the GITS seismic monitoring system developed by VNIMI, which has been providing continuous monitoring of seismic activities and regional-level forecast of rock-bump hazards within the mining allotment of the International underground mine under commercial operation since April 2022. The methodology of observations is presented, as well as results of analysing the obtained data in terms of the energy and spatial characteristics of seismic events.

A solution is proposed to the problem of determining the velocity characteristics of the host rocks in the upper and lower parts of the mine using information on the seismic event parameters obtained from the GITS system, and a preliminary assessment is given of the velocity characteristics of the rock mass. The data obtained at the current stage of research for two limited areas can be applied to assess the long-term state and behaviour of the rock mass. For the further monitoring purposes, such observations can be divided into a local-level forecasting network customised for minor events and a regional-level mine-wide seismic activity monitoring network configured to record major (500 J and greater) events, including the regional-scale earthquakes.

Keywords: seismic monitoring, the International mine, geodynamics, stress-and-strain state of rock mass, seismic event energy, velocity characteristic of the host rock

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

For citation: Vyunnikov A.A., Khoiyutanova N.V., Romanevich K.V., Panin S.F., Razumov E.E. Seismic monitoring and assessment of geodynamic processes during mining operations in conditions of the International underground mine. *Russian Mining Industry*. 2024;(3S):26–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-26-31>

Введение

Сейсмический мониторинг является одним из основных направлений в комплексе исследований, способствующих повышению безопасности и эффективности подземных горных работ [1–4]. Наиболее востребован данный вид мониторинга на рудниках и угольных шахтах, ведущих горные работы на больших глубинах, в особо сложных геомеханических условиях, с повышенной степенью рисков по проявлению горных ударов и выбросов [5; 6].

Основываясь на регистрации сейсмических колебаний, возникающих в массиве горных пород в результате его хрупкого разрушения под действием повышенных напряжений от горного и (или) газового давления, сейсмический мониторинг позволяет контролировать динамику изменений прочностных характеристик в горном массиве. По результатам обработки регистрируемых сейсмических событий оцениваются кинематические и динамические показатели процессов разрушения: положение сейсмоактивных зон в пространстве, выделившаяся сейсмическая энергия, неупругая деформация в очаговой области. На основе анализа динамики сейсмического режима, формирующегося в границах горного отвода шахты или рудника, сейсмический мониторинг предоставляет достаточно полную объективную информацию о происходящих в горном массиве геомеханических процессах с возможностью их прогнозирования.

На подземном руднике «Интернациональный» (рис. 1) установлена система сейсмомониторинга GITS разработкой АО ВНИМИ.

В настоящее время рудник «Интернациональный» обрабатывает кимберлитовую трубку эллипсовидной формы размером 100×60 м и ведет проходческие работы на абс. отм. –940 м (глубина работ 1340 м от земной поверхности). Рудное тело вертикального расположения находится в толще доломитов с моноклинальным пологим залеганием с коэффициентом крепости по шкале М.М. Протоdjeяконова в пределах 5–6.

В последние несколько лет при переходе на глубины повышенной природной газообильности вмещающих пород на руднике «Интернациональный» при ведении горноподготовительных работ в породных массивах стали происходить динамические явления в виде внезапных и инициированных (буровзрывными работами) выбросов породы и газа [7]. Учитывая характер их проявлений (внезапность и большую интенсивность), они представляют серьезную опасность для работников рудника, нарушают установленную технологию ведения горных работ и зачастую приводят к изменению параметров проводимых горных выработок. Простои и ликвидация последствий выбросов породы и газа на руднике расходуют значительные экономические и материальные ресурсы.

Для контроля за динамическими явлениями, установления условий и факторов возникновения, характера их

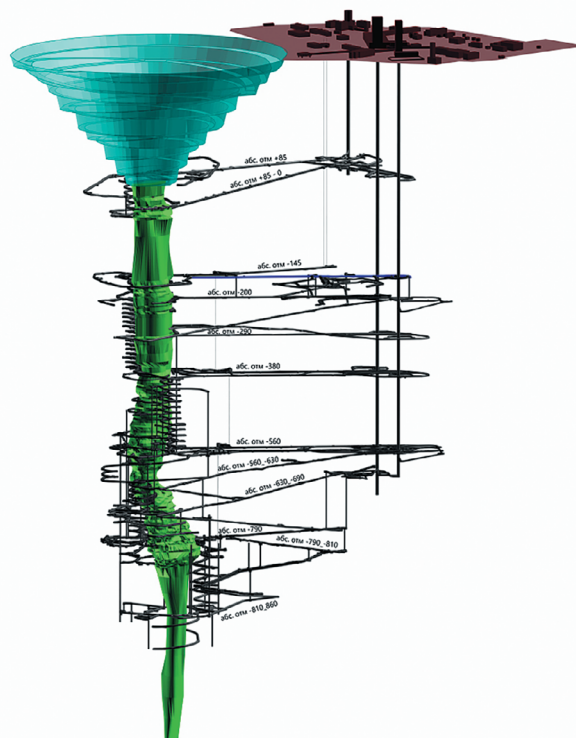


Рис. 1
 Каркасные модели руды и карьера с осевыми 3D-линиями подземных горных выработок рудника «Интернациональный», разведанные запасы до глубины 1650 м

Источник: 3D моделирование. Режим доступа: <https://ynalrosa.ru/projects/3d-modelirovanie/karkasnye-modeli-rudy-i-karera-s-osevymi-3d-liniyami-podzemnykh-gornykh-vyrobotok-rudnika-internatsi/> (дата обращения: 25.06.2024)

Fig. 1
 Wireframe models of the ore and the open pit with axial 3D lines of underground mine workings of the International mine, explored reserves down to the depth of 1650 metres

Source: 3D modelling. Available at: <https://ynalrosa.ru/projects/3d-modelirovanie/karkasnye-modeli-rudy-i-karera-s-osevymi-3d-liniyami-podzemnykh-gornykh-vyrobotok-rudnika-internatsi/> (accessed: 25.06.2024)

проявлений с учётом склонности горных пород рудника «Интернациональный» к выбросам и горным ударам с 2021 г. запущена в эксплуатацию система горного сейсмического мониторинга GITS (с апреля 2022 г. в режиме промышленной эксплуатации).

Система GITS предназначена для непрерывного сейсмического мониторинга породного массива и прогноза динамических явлений, связанных как с проводимыми горными работами, так и с возможными сдвигами тектонических блоков по геодинамически активным структурам. Не менее значимой целью является мониторинг и вспомогательный контроль устойчивости предохранительного целика (в дополнение к существующей системе геомеханического мониторинга) в районе подмерзлотного надсолевого метегероичерского водоносного комплекса (МИВК).

Методика проведения наблюдений

Система GITS организуется посредством размещения на горном отводе сети сейсмических павильонов, их функционирование обеспечивает непрерывные сейсмические наблюдения за динамикой сейсмической активности при изменении горно-геологической ситуации на территории горного отвода рудника и сопредельных территорий в результате ведения проходческих и добычных работ.

Расстановка станций организована таким образом, чтобы обеспечить трёхмерное окружение контролируемых участков, оценка устойчивости которых является приоритетной задачей. Для достижения этого сейсмоприемники размещаются как на верхних, так и на нижних горизонтах в скважинах глубиной до 5 м, пробуренных в бортах выработок. Расстояние между сейсмоприемниками составляет от 100 до 500 м, при этом наблюдениями охватывается объем пород с максимальным поперечным размером 2000 м. На рис. 2 показана конфигурация расстановки сейсмических павильонов сети сейсмомониторинга, развернутой на руднике «Интернациональный». Посредством принятой расстановки пунктов наблюдений обеспечивается высокая разрешающая способность регистрации сейсмических событий как в верхней части, так и на нижних горизонтах рудника.

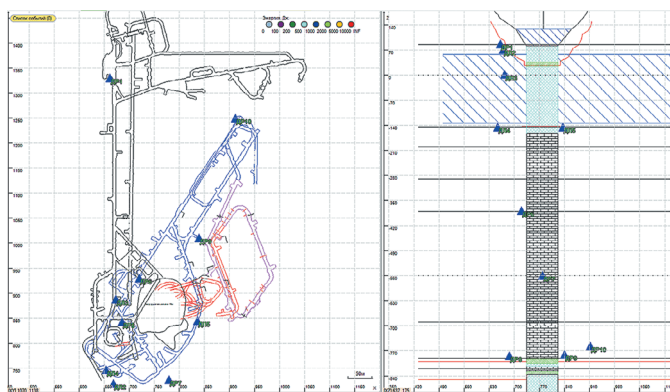


Рис. 2
План-схема расстановки сети сейсмических павильонов системы GITS на руднике «Интернациональный». Синими треугольниками обозначено местоположение сеймопавильонов. Окно программы GITS-2

Fig. 2
A layout map of the GITS seismic stations in the International mine. Blue triangles indicate the location of the seismic stations. Graphical user interface of the GITS-2 Software Suite

Функционирование системы GITS осуществляется непрерывно круглосуточно. Расчет и передача информации по сейсмическим событиям, их кинематические и динамические параметры, выполняются в режиме реального времени.

На основании расчетных показателей сейсмических событий проводится анализ сейсмической обстановки, формирующейся на руднике в течение месяца/квартала/года. На основе результатов анализа прогностических параметров (критериям) выявляются потенциально опасные зоны по геодинамической активности.

По данным наблюдений тектонические нарушения, разломы в пределах горного отвода не являются активными по динамическим подвижкам. В течение всего срока отработки не происходило динамических проявлений горного давления в выработках, попадающих в зону влияния

как разломов, так и отработанного пространства. Таким образом, сейчас осуществляется наработка прогностических параметров (при высокой сейсмической активности на это требуется до полугода, а при низкой сейсмической активности временной интервал, при котором могут быть определены достоверные прогностические параметры, может продлиться до 1,5–2 лет и более).

Система GITS в представленном на руднике «Интернациональный» конструктивном исполнении позволяет осуществлять следующие виды прогноза динамических явлений (ДЯ): региональный и локальный.

Региональный прогноз ДЯ проводится путем сбора информации со всех сейсмических станций, развернутых на территории рудника. По результатам регионального прогноза выявляются зоны активизации сейсмических процессов, формирующиеся в масштабе всего шахтного поля. С учетом поставляемой от технических служб рудника горно-геологической и горнотехнической информации формируется каталог сейсмических событий, на основании которого проводится дальнейшая интерпретация сейсмической активности, дается представление о динамике и характере ее миграции в связи с интенсивностью как технологических, так природных процессов.

Локальный прогноз ДЯ массива горных пород осуществляется системой GITS для уточнения степени рисков проявления ДЯ на участках с повышенной сейсмической активностью, выявленных по результатам регионального прогноза. Прогноз и оценка напряженно-деформированного состояния отдельных участков массива горных пород выполняются с помощью портативных приборов типа СБ-32М «Сапфир», ANGEL-M, Prognoz-L и их аналогов. Не исключается применение и традиционного метода оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород по дискованию керна [8]. На основе комплекса данных ВНИМИ разрабатываются новые методики прогнозирования динамических событий в условиях рудника [9].

Энергия сейсмических событий

Для оценки геодинамической ситуации в пределах горного отвода рудника выполняется анализ данных, полученных в ходе промышленной эксплуатации системы сейсмического мониторинга GITS. На рис. 3 приведены сейсмические события за период наблюдений 2 года.

За весь период наблюдений системой сейсмомонито-

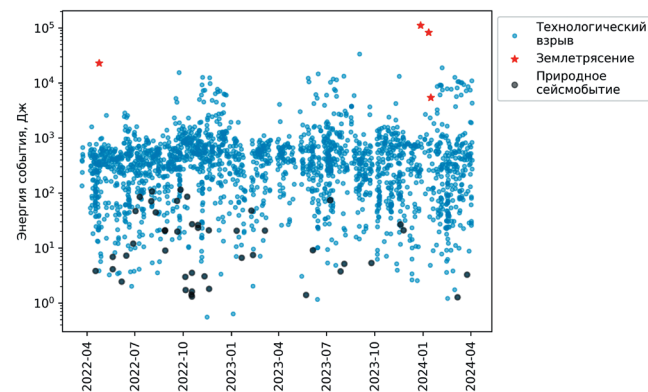


Рис. 3
Зарегистрированные сейсмические события за период 2 года в пределах горного отвода рудника

Fig. 3
Recorded seismic events for a period of 2 years within the mine's mining allotment

ду парами датчиков: ДР6-ДР7, ДР6-ДР8, ДР6-ДР9 и ДР6-ДР10, а от технологических взрывов в нижней части массива – между парами датчиков: ДР6-ДР1, ДР6-ДЛ2, ДР6-ДЛ3, ДР6-ДЛ4 и ДР6-ДЛ5. Для части взрывов невозможно было определить скорости продольных волн из-за отсутствия или неопределенности первых вступлений на соответствующих датчиках.

Пример визуализации полученных значений скорости продольных волн между парами датчиков системы GITS от технологических взрывов, произведенных в ограниченной области, показан на рис. 6.



Рис. 6
Графики скоростей продольных волн между парами датчиков системы GITS от технологических взрывов, произведенных в нижней ограниченной области

Fig. 6
Plots of the longitudinal wave velocities between pairs of the GITS system sensors due to the process blasts performed in the lower confined area

Основные статистические данные по скоростям продольных волн между парами датчиков GITS от технологических взрывов, произведенных в верхней и нижней ограниченной области, показаны ниже.

Для нижней ограниченной области: среднее значение скорости продольных волн равно 5148 м/с. Стандартное отклонение составляет 405 м/с, что указывает на относительно стабильность скорости волн в данной области. Медиана скорости продольных волн равна 5115 м/с.

Для верхней ограниченной области: среднее значение скорости продольных волн составляет 4368 м/с. Стандартное отклонение равно 695 м/с, что указывает на приемлемую изменчивость скорости волн относительно их среднего значения. Медиана скорости продольных волн равна 4482 м/с.

Параметры, полученные на данном этапе для верхней и нижней ограниченных областей, могут быть базовыми (исходными) значениями для проведения мониторинга скоростей продольных волн, проходящих через верхнюю и нижнюю часть массива (для оценки состояния и поведения массива в долгосрочной перспективе). Эти данные предоставляют информацию о типичных и возможных колебаниях скорости волн, что позволяет оценить изменения и выявить аномалии при последующих наблюдениях.

Выводы

В условиях подземного рудника «Интернациональный» система сейсмического мониторинга GITS успешно выполняет функцию непрерывной, автоматизированной регистрации сейсмических событий (природных и техногенных) в широком динамическом диапазоне. Оптимальная настройка основных рабочих параметров сейсмических каналов, а также локализация сейсмопавильонов вокруг контролируемых участков позволяют регистрировать в них самые слабые события, расчетное значение сейсмической энергии которых составляет не более 1,5 Дж.

Места установки сейсмоприемников выбраны таким образом, чтобы минимизировать уровень технологических шумов – представленная конфигурация сети позволила применять технические настройки, наиболее удобные для представительной регистрации сейсмических событий с минимальными пороговыми ограничениями по каждому сейсмическому каналу.

Благодаря незначительным геометрическим размерам шахтного поля расстановка сейсмической сети позволила создать контур из сейсмопавильонов вокруг наиболее проблемных участков, в том числе в зоне контроля предохранительного целика для мониторинга деформаций на ранних стадиях и в зоне ведения проходческих и очистных работ на нижних горизонтах рудника.

С использованием получаемой системой GITS информации о параметрах сейсмических событий (природных и техногенных в результате горных работ) выполняется решение задачи по определению скоростных характеристик вмещающего массива. Полученные на текущем этапе исследований данные для двух ограниченных областей могут быть применены для оценки состояния и поведения массива в долгосрочной перспективе. В дальнейшем для целей мониторинга такие наблюдения могут быть разделены по сети локального прогноза, настроенной на мелкие события, и региональной сети контроля сейсмической активности по всему руднику, настроенной на регистрацию крупных (от 500 Дж) событий, включая региональные землетрясения.

Список литературы / References

1. Рассказов И.Ю., Гладырь А.В., Кателла Е.А., Мирошников В.И. Разработка многоуровневой системы комплексного геодинамического мониторинга, удароопасного массива горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(9):113–120. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2014/09/19_113-120_Rasskazov.pdf (дата обращения: 12.06.2024).
Rasskazov I.Yu., Gladyr A.V., Katella E.A., Miroshnikov V.I. Development of the complex geodynamic multilevel system for burst-hazard rock mass monitoring. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;(9):113–120. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2014/09/19_113-120_Rasskazov.pdf (accessed: 12.06.2024).
2. Zhang M., Liu S., Chen S., Chen Y., Xu G., Qian D. Focus energy determination of mining microseisms using residual seismic wave attenuation in deep coal mining. *Shock and Vibration*. 2018:3854329. <https://doi.org/10.1155/2018/3854329>

3. 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
4. Разумов Е.Е., Рукавишников Г.Д., Мулёв С.Н., Простов С. М. Основные принципы построения систем сейсмического мониторинга при отработке удароопасных угольных пластов. *Горный журнал*. 2021;(1):8–12. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.02>
Razumov E.E., Rukavishnikov G.D., Mulev S.N., Prostov S.M. Basic principles for building seismic monitoring systems in rockburst-hazardous coal seam mining. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(1):8–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.02>
5. Разумов Е.Е., Рукавишников Г.Д., Мулёв С.Н., Простов С.М. Анализ сейсмической активности массива при ведении работ на шахте «Комсомольская» АО Воркутауголь. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(1):104–114. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_104
Razumov E.E., Rukavishnikov G.D., Mulev S.N., Prostov S.M. Seismic activity in rock mass during mining operations in Vorkutaugol's Komsomolskaya mine. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(1):104–114. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_104
6. Разумов Е.Е., Простов С.М., Петрова О.А. Экспериментально-аналитическое исследование динамики геомеханических процессов при отработке угольного пласта в районе тектонического нарушения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(3):102–118.
Razumov E.E., Prostov S.M., Petrova O.A. Experimental and analytical investigation of geomechanical dynamics of coal mining near tectonic faults. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(3):102–118.
7. Мороз Н.Е., Гендлер С.Г., Вьюников А.А. Газодинамические явления при проходке выработок во вмещающих породах кимберлитовой трубки «Интернациональная». *Горная промышленность*. 2023;(S1):96–102. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-96-102>
Moroz N.E., Gendler S.G., Vyunikov A.A. Gas-dynamic phenomena in tunnel driving through the host rocks of the 'International' kimberlite pipe. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):96–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-96-102>
8. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. *Основы механики горных пород*. 2-е изд. Л.: Недра; 1989. 488 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-osnovy-mehaniki-gornyh-porod.pdf> (дата обращения: 12.06.2024).
9. Романевич К.В., Мулев С.Н. Использование машинного обучения и нейронных сетей в задачах классификации геодинамических процессов по электромагнитному излучению горных пород и данным сейсмомониторинга. В кн.: *Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: материалы 16-й Междунар. науч. шк. молодых ученых и специалистов, г. Москва, 23–27 окт. 2023 г.* М.: ИПКОН РАН; 2023. С. 249–252.
10. Питаль М.Н., Мулев С.Н. Программный комплекс GITS2. *Руководство по эксплуатации*. СПб.: ВНИМИ; 2024. 117 с.

Информация об авторах

Вьюников Александр Анатольевич – заместитель главного инженера – руководитель службы прогноза и предотвращения динамических явлений рудника «Интернациональный», Мирнинский горно-обогатительный комбинат АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация; e-mail: vyunikovaa@alrosa.ru

Хоуганова Наталья Владимировна – геофизик службы прогноза и предотвращения динамических явлений рудника «Интернациональный», Мирнинский горно-обогатительный комбинат АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация; e-mail: popovanatv@alrosa.ru

Романевич Кирилл Викторович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; научный сотрудник, Институт горного дела имени Н. А. Чинакала Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; e-mail: info@vnimi.ru

Панин Сергей Федорович – заведующий кузбасским территориальным сектором, АО «ВНИМИ», г. Кемерово, Российская Федерация

Разумов Егор Евгеньевич – старший научный сотрудник, АО «ВНИМИ», г. Прокопьевск, Российская Федерация

Information about the authors

Aleksandr A. Vyunikov – Deputy Chief Engineer, Head of Forecasting and Dynamic Event Prevention Service of the International Mine, Mirny Mining and Processing Division, ALROSA, Mirnyi, Russian Federation; e-mail: vyunikovaa@alrosa.ru

Nataliya V. Khoyutanova – geophysicist, Forecasting and Dynamic Event Prevention Service of the International Mine, Mirny Mining and Processing Division, ALROSA, Mirnyi, Russian Federation; e-mail: popovanatv@alrosa.ru

Kirill V. Romanevich – Cand. Sci. (Eng.), Leading Research Associate, VNIMI JSC, St. Petersburg, Russian Federation; Research Associate, N.A. Chinalak Institute of Mining of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; e-mail: info@vnimi.ru

Sergey F. Panin – Head of the Kuzbass Territorial Branch, VNIMI JSC, Kemerovo, Russian Federation

Egor E. Razumov – Senior Research Associate, VNIMI JSC, Prokopyevsk, Russian Federation

Article info

Поступила в редакцию: 21.05.2024

Поступила после рецензирования: 18.06.2024

Принята к публикации: 28.06.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 21.05.2024

Поступила после рецензирования: 18.06.2024

Принята к публикации: 28.06.2024