ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(12-2):87–99
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.831 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_122_0_87

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОТРАБОТКИ НИЖНИХ ГОРИЗОНТОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЮЖНОЕ (ПРИМОРСКИЙ КРАЙ)

М. А. Ломов[1], А. В. Сидляр[1], А. В. Константинов[1], А. П. Грунин[1]

[1] Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, 680000, Россия
e-mail: adm@igd.khv.ru

Аннотация: Южное полиметаллическое месторождение расположено в Восточном Приморье России и с 1986 года отнесено к категории опасных по горным ударам. В последние годы на месторождении складывается сложная геомеханическая обстановка – регистрируется до 100 толчков в год. Для комплексного геомеханического мониторинга удароопасности был разработан и реализован проект установки многоканальной сейсмоакустической системы контроля горного давления «Prognoz-ADS», разработанной в ИГД ДВО РАН г. Хабаровска. Посредством визуальных наблюдений и инструментальных измерений параметров сейсмоакустической активности массива горных пород за период с декабря 2022 по февраль 2023 г. зарегистрировано 1080 сейсмоакустических событий, в том числе 12 толчков. По данным мониторинга было установлено превышение перед толчками среднесуточного количественного показателя АЭ-событий (акустико-эмиссионных) до 50% в сравнении с другими периодами. Наиболее удароопасным участком в районе действия сети геофонов признан блок №1 в границах между горизонтом +440 м и горизонтом +480 м, а также район пересечения горных выработок с лежачим боком зоны разломов Эльдорадо и разломом Рудный в районе блоков № 2 и № 3. По результатам исследования сформирован план расширения сети геофонов системы «Prognoz-ADS» на нижних горизонтах месторождения в западном направлении для повышения качества геомеханического мониторинга и получения более точной информации о причинах регистрируемых крупных локальных проявлений удароопасности. Установление причин удароопасности позволит в будущем разработать необходимый комплекс геомеханических мероприятий для повышения безопасности ведения горных работ на глубоких горизонтах.

Ключевые слова: геомеханика, горное давление, напряженно-деформированное состояние, горные удары, удароопасность, прогноз, сейсмоакустическая активность, контроль, 3d моделирование.

Благодарности: Исследования проводились с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных Дальневосточного отделения Российской академии наук», финансируемого Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № 075–15–2021–663.

Для цитирования: *Ломов М. А., Сидляр А. В., Константинов А. В., Грунин А. П.* Геомеханические проблемы отработки нижних горизонтов месторождения Южное (Приморский край) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12-2. – С. 87–99. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_122_0_87.

© М. А. Ломов, А. В. Сидляр, А. В. Константинов, А. П. Грунин. 2023

Geomechanical problems of mining the lower horizons of the Yuzhnoye deposit (Primorsky krai)

M. A. Lomov[1], A. V. Sidlyar[1], A. V. Konstantinov[1], A. P. Grunin[1]

[1] Mining Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, 680000, Russia e-mail adm@igd.khv.ru

Abstract: Yuzhnoye polymetallic deposit is located in the Eastern Primorye of Russia and since 1986 has been classified as dangerous by mountain impacts. In recent years, a complex geomechanical situation has been developing at the field – up to 100 tremors per year are recorded. For complex geomechanical monitoring of impact hazard, a project was developed and implemented to install a multi-channel geoacoustic system of the AMPMS "Prognoz-ADS", developed at the Mining Institute of the FEB RAS of Khabarovsk. By means of visual observations and instrumental measurements of the parameters of the seismic activity of the rock mass for the period from December 2022 to February 2023, 1080 seismic and acoustic events were recorded, including 12 aftershocks. According to the monitoring data, the excess of the average daily quantitative indicator of AE events before the shocks was found to be up to 50% in comparison with other periods. The block No. 1 in the interval between level +440m and level +480m, as well as the area of intersection of mine workings with the recumbent side of the El Dorado fault zone and the Rudny fault in the area of blocks No. 2 and No. 3, is recognized as the most impact-prone area in the area of the geophone network. Based on the results of the study, a plan was formed to expand the network of geophones of the Prognoz-ADS system on the lower horizons of the field in the western direction to improve the quality of geomechanical monitoring and obtain more accurate information about the causes of large local manifestations of impact hazard being recorded. Establishing the causes of the impact hazard will allow in the future to develop the necessary complex of geomechanical measures to improve the safety of mining operations at deep levels.

Key words: geomechanics, mountain pressure, stress-strain state, mountain impacts, impact hazard, forecast, seismoacoustic activity, control, 3d modeling.

Acknowledgements: The studies were carried out using the resources of the Center for Shared Use of Scientific Equipment "Center for Processing and Storage of Scientific Data of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences", funded by the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under project No. 075–15–2021–663.

For citation: Lomov M. A., Sidlyar A. V., Konstantinov A. V., Grunin A. P. Geomechanical problems of mining the lower horizons of the Yuzhnoye deposit (Primorsky krai). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12-1):87–99. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_122_0_87.

Введение

Разработка месторождений твердых полезных ископаемых в настоящее время проводится со значительным увеличением глубины добычи и непрерывным усложнением горно-геологических и геомеханических условий отрабатываемого горного массива [1, 2]. В процессе подземных горных работ наибольшую проблему несут динамические проявления горного давления, самыми опасными из которых являются разрушительные горные и горно-тектонические удары, а также техногенные землетрясения, в потенциале несущие катастрофические последствия для жизни рабочих и технического состояния оборудования и техники [3–5].

Трудность решения проблемы прогноза и профилактики случаев горных ударов и техногенных землетрясений, в том числе их последствий, при подземном освоении недр обусловлена многофакторностью условий и причин возникновения геодинамических событий, высокой неоднородностью свойств и состояния массивов горных пород, подвергающихся интенсивным техногенным воздействиям при их разработке, а также недостаточной пока изученностью геомеханических процессов, протекающих в предельно напряженных геосредах [6, 7].

Южное полиметаллическое месторождение, расположенное в Восточном Приморье России, с 1986 года отнесено к опасным по горным ударам, и длительное время эксплуатируется в удароопасных условиях. Сложная геомеханическая ситуация в последнее время складывается на месторождении, где регистрируется большое количество динамических проявлений горного давления, в том числе нередко сопровождающихся разрушениями подземных горных выработок.

Впервые горные удары с динамическими последствиями тяжелого характера произошли на отметках под земной поверхностью от 150 до 170 метров в 1986 и 1987 гг. На месторождении в период с 1986 по 2023 гг. зафиксировано 2182 различных проявлений горного давления.

Наиболее часто фиксируемой формой динамических проявлений являются локальные толчки, чаще всего регистрируемые в различного рода целиках. К ним относятся, прежде всего, межблоковые и межэтажные целики, а также остроугольные целики, расположенные на пересечении с разломами Рудный и Эльдорадо.

Всего за период с 1997 по 2021 гг. на месторождении было зарегистрировано 1254 толчка. В начале 2000-х гг. удароопасность горного массива Южного месторождения усилилась. В 2005 и 2013 гг. на месторождении зарегистрировано по 97 толчков (рис. 1).

Анализ геомеханической обстановки, складывающейся на Южном месторождении в последние годы, показал, что для снижения удароопасности и управления геодинамическим риском здесь необходимы более углубленные исследования массива горных

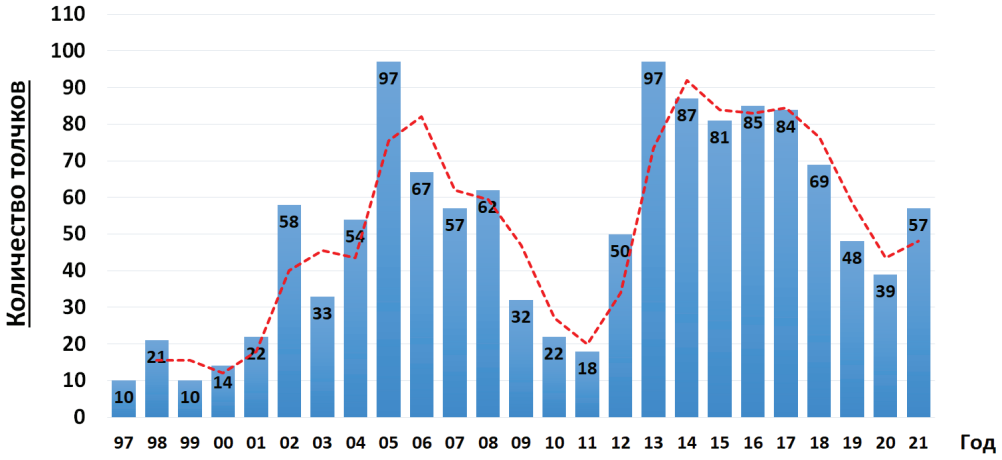

Рис. 1. Распределение по годам количества толчков на Южном месторождении
Fig.1. Distribution by years of the number of shocks at the Southern field

пород и его тектонической структуры, а также комплексная оценка формирующихся под влиянием горных работ природно-техногенных полей напряжений.

Практика горных работ показывает, что своевременно до возникновения аварийных ситуаций определить потенциально удароопасные участки в отрабатываемом горном массиве, а также разработать эффективные меры и рекомендации по управлению горным давлением возможно только комплексом региональных и локальных методов оценки и контроля геомеханического состояния горного массива [8–10].

Для выявления точных причин удароопасности на Южном месторождении в декабре 2022 г. была установлена сейсмоакустическая система контроля горного давления (АСКГД) «Prognoz-ADS», обеспечивающая более эффективное исследование горных ударов. Результаты исследований могут послужить основой для научного обоснования способов предотвращения горных ударов, оптимизации параметров разгрузочных мероприятий, а также охраны и поддержания горных выработок при отработке месторождений в удароопасных условиях[1] [11].

Методы и объект исследований

Основной задачей геомеханического мониторинга является изучение изменения напряженно-деформированного состояния горнотехнических систем и проявлений горного давления [12, 13] в виде горного удара, микроударов, толчков и стреляний [14–16].

Для контроля удароопасности Южного месторождения предложена сейсмоакустическая система геомеханического мониторинга «Prognoz-ADS», разработанная в Институте горного дела г. Хабаровска. Система обеспечивает эффективную регистрацию акустических сигналов в частотном диапазоне от 200 Гц до 12000 Гц и сейсмоакустических событий с энергией от $1{\cdot}10^1$ до $1{\cdot}10^6$Дж.

В 2022 году был разработан и реализован проект установки многоканальной АСКГД «Prognoz-ADS». Внедрение этой системы, во-первых, позволит выявить закономерности формирования удароопасности в массиве, необходимые в том числе для повышения точности прогнозных критериев с целью дальнейшего предотвращения аварий [17–19]. Во-вторых, установление причин удароопасности позволит разработать комплекс геомеханических мероприятий для дальнейшего повышения безопасности горных работ на нижележащих глубоких горизонтах [20–22].

На этапе проектирования системы был выполнен комплекс исследований по обоснованию оптимальной схемы размещения элементов АСКГД с учетом ее технических характеристик и горнотехнической ситуации на руднике.

Для эффективного проектирования сети геофонов системы «Prognoz-ADS» в первую очередь была создана 3D модель Южного месторождения в среде AutoCAD. В 3D модель были заложены горные выработки всех горизонтов, на которых ведутся горные работы, отработанные очистные блоки, разломы Рудный и Эльдорадо (рис. 2).

Система геомеханического мониторинга «Prognoz-ADS», установленная на Южном месторождении, состоит

---

[1] Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых. ФНП в области промышленной безопасности (Утверждены приказом Ростехнадзора 08.12.2020 № 505). Москва, 2020. 275 с.

Указания по безопасному ведению горных работ на месторождении Николаевском АО «ГМК «Дальполиметалл» опасном по горным ударам, руководитель работ чл.-корр. РАН Рассказов И. Ю., Хабаровск, 2022.

из подземной и поверхностной частей и включает в себя разнесенную в пространстве сеть из 16 геофонов (модель 1V421TA) и цифровых приемных преобразователей (ЦПП RADCi40), коммутационный узел в подземной аппаратной и поверхностный центр управления системой сбора и обработки информации (рис. 2).

Эффективность сейсмоакустического мониторинга и надежность прогнозных решений во многом зависит от погрешности расчета координат гипоцентров естественной акустической эмиссии (АЭ), что в условиях большого объема выработанных пространств требует применения специальных теоретических подходов.

Опыт установки геоакустической системы «Prognoz-ADS» на различных удароопасных месторождениях России показал, что разломные структуры могут оказывать значительное влияние на среднюю скорость прохождения акустических волн от источников трещинообразования до датчиков, что может увеличивать погрешность расчета координат регистрируемых событий в несколько раз. По этой причине было предложено установить 6 геофонов с восточной стороны от разлома Эльдорадо и по 5 геофонов с западной стороны от разлома Эльдорадо по разные стороны от разлома Рудный. Для повышения точности локации целесообразно не включать в события сигналы, которые пересекали разломы. Поэтому при расчете координат акустических событий для повышения точности локации используются только сигналы, зарегистрированные геофонами, расположенными только по одну сторону от разломов (т. е. в одном блоке). Погрешность локации в контролируемой зоне мониторинга составляет менее 10 метров.

Эффективное размещение геофонов также обосновывалось по результатам

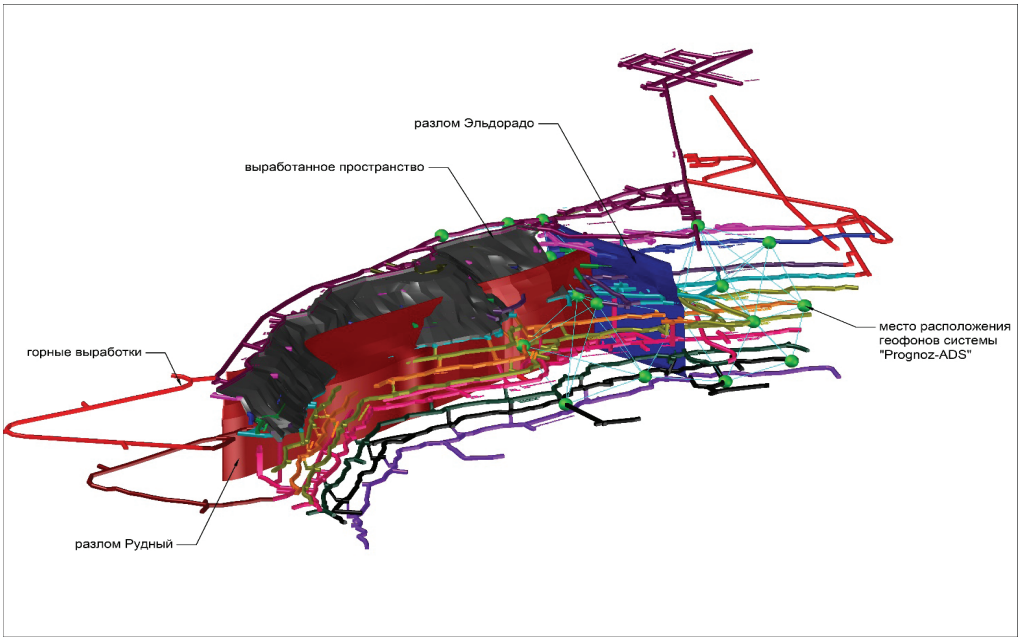

Рис. 2. Проектное решение конфигурации сети геофонов в 3D модели
Fig. 2. Design solution for the configuration of a network of geophones in a 3D model

моделирования погрешности локации АЭ-событий с применением специализированных программных средств и алгоритмов [23, 24].

По результатам моделирования были обоснованы число приемных преобразователей и конфигурация наблюдательной сети геофонов, позволяющих с точностью до 10 метров в пределах рассчитанной зоны контроля регистрировать акустические события с энергией от 25 до 50 Дж.

На рис. 3 представлен пример объемного распределения прогнозируемой ошибки локации для АЭ-событий с энергией 50 Дж. Расчетный объем контролируемой зоны мониторинга составил 5,73 млн м^3 (рис. 3).

Система «Prognoz-ADS» позволяет регистрировать сейсмоакустические события с энергией от 100 Дж и выше в зоне контроля большего объема вплоть до 200 метров с западной и 170 метров с восточной стороны от разлома Эльдорадо, рассекающего всю контролируемую зону мониторинга с северо-запада в юго-восточном направлении. Объем области высокоточной локации крупных АЭ-событий с высокой энергетикой составляет 11,28 млн м^3.

По итогам пуско-наладочных работ также были проведены тестовые испытания АСКГД в реальных условиях работы рудника. Основной целью испытаний являлись: проверка настройки программного обеспечения системы, проверка надежности работы всех узлов и элементов системы в режиме приема сигналов.

Для проведения тестовых калибровочных взрывов использовались заряды ВВ по 0,2 кг 6ЖВ в скважинах, пробуренных в бортах горных выработок на горизонтах 480, 471, 450, 440 и 403 м. Испытания проводились в процессе всех рабочих циклов рудника (буровые работы, передвижение горных машин, работа насосов и др.). Всего произведено 8 взрывов.

Перед испытанием маркшейдерской службой были сняты точные координаты забоев скважин. Тестовые сква-

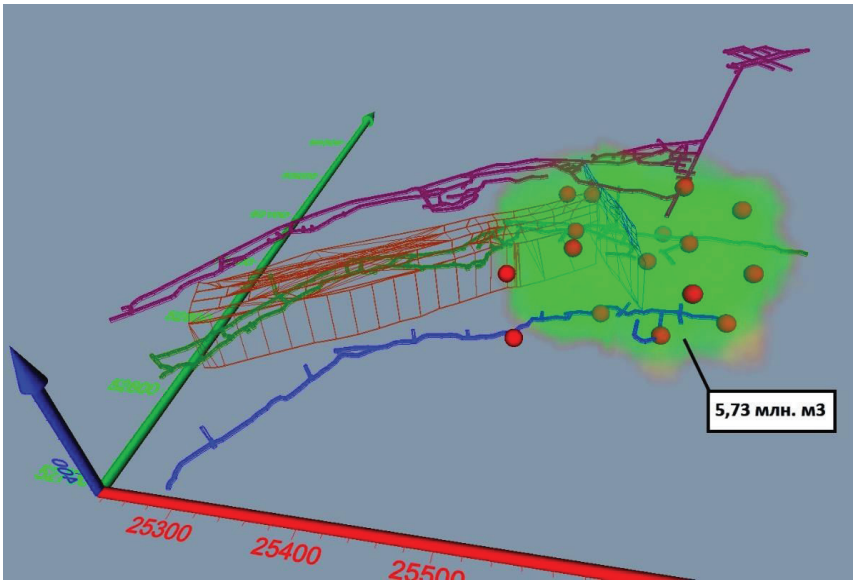

Рис. 3. Область высокоточной локации для АЭ-событий с энергией 50 Дж
Fig. 3. The area of high-precision location for AE events with an energy of 50 J

жины 4801 и 4802 расположены в западной части месторождения, в участке 7 блока (висячий борт по Полевому штреку, на расстоянии 450 м от центра зоны контроля системы). Имитация АЭ-событий из этого участка необходима для оценки чувствительности геофонов системы к слабым сигналам с западной стороны месторождения и возможности их локации в условиях действующего технологического цикла работы рудника. Скважины 4711 и 4712 расположены в верхней части зоны контроля, в висячем борте рудосодержащего разлома «Рудный». Скважина 4501 располагалась в центре зоны контроля, на горизонте 450 м, в лежачем борте. На горизонте 440 м с западной стороны в участке 3 блока скважина располагалась в висячем борте, на расстоянии 150 м от края зоны контроля (от датчика № 4401). Скважины 4031 и 4032 расположены на горизонте 403 м в западной части месторождения, на расстоянии 70 м от границы зоны контроля (от датчика 4271). Все тестовые сигналы были зарегистрированы АСКГД и рассчитаны в программе «GeoAcoustics-ADS».

Предварительные расчеты в программе «GeoAcoustics-ADS» по данным тестовых испытаний показали, что погрешность локации внутри зоны контроля по трем скважинам с восточной стороны от разлома Эльдорадо (4701, 4702 и 4501) изменяется в диапазоне от 2,01 до 3,54 м.

Погрешность локации скважин 4401, 4031 и 4032, расположенных с западной стороны от разлома Эльдорадо, составила от 9,48 до 19,0 м, что обусловлено удаленностью геофонов от контролируемой зоны уверенной локации.

Результаты исследований

Анализ базы данных системы мониторинга был произведен с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных Дальневосточного отделения Российской академии наук».

В период с начала декабря 2022 года по февраль 2023 года на месторождении Южное осуществлялись исследования удароопасности посредством визуальных наблюдений и инструментальных измерений параметров сейсмоакустической активности массива горных пород с применением автоматизированной системы геоакустического мониторинга «Prognoz-ADS». За данный период с помощью системы «Prognoz-ADS» было занесено в базу данных 1080 сейсмоакустических событий, в том числе 12 толчков. Распределение количества и суммарной энергии АЭ-событий, зарегистрированных системой «Prognoz-ADS», представлено на рис. 4. Красными ромбами на рис. 4 показаны зарегистрированные в массиве толчки.

22 и 23 декабря 2022 года наблюдалась наибольшая сейсмоакустическая активность массива горных пород за наблюдаемый период, также в это время зафиксирован пик выделения энергии АЭ-событий.

Всего в декабре было зарегистрировано 6 толчков — три толчка 13-го числа в 1:27 и три толчка 23-го числа в 5:18 с энергией 694, 1057 и 741 Дж (рис. 4). Разрушений горных выработок в дни регистрации толчков не наблюдалось.

В январе наблюдался спад акустической активности и был зарегистрирован только один толчок 23-го числа в 21:17 с энергией 1131 Дж (рис. 4).

В феврале удароопасность массива горных пород усилилась. Всего, как показано на рис. 4, в феврале было зарегистрировано пять толчков: 2-го числа (594 Дж), 5-го числа (664 Дж), 16-го

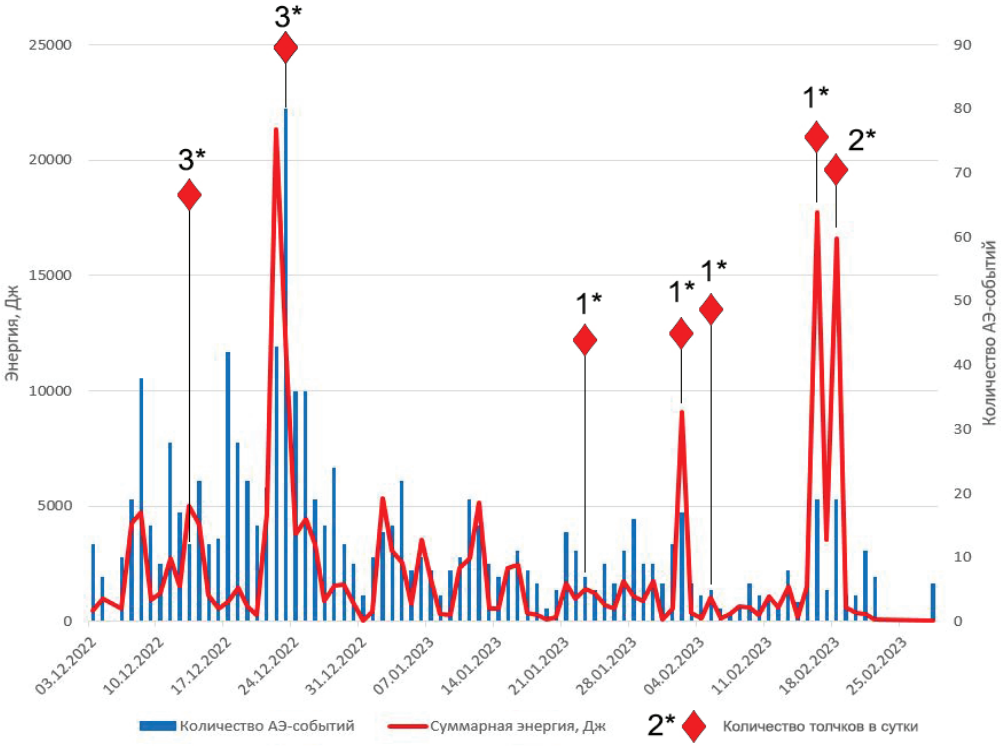

Рис. 4. График распределения суммарной энергии и количества сейсмоакустических событий и толчков, зарегистрированных в период с декабря 2022 по февраль 2023 года на месторождении Южное
Fig. 4. Graph of the distribution of total energy and the number of seismic and acoustic events and tremors recorded in the period from December 2022 to February 2023 at the Yuzhnoye field

(1201 Дж) и 18-го (2 толчка с энергией 6017 Дж и 2251 Дж).

Также по анализу графика, изображенного на рис. 4, видно превышение перед толчками среднесуточного количественного показателя АЭ-событий до 50% в сравнении с другими периодами, что свидетельствует о возможностях прогнозирования горных ударов.

На рис. 5 в качестве примера продемонстрировано распределение комплексного показателя удароопасности $K_{уд}$ перед толчком 23 января 2023 г. Показатель удароопасности $K_{уд}$ за 1,5 сут до регистрации толчка превысил предельно допустимое значение, равное 5, а за сутки до него достиг значения 27,6, что в пять раз больше нормы (рис. 5).

На рис. 6 в проекции на разрез, проходящий через рудное тело, показано распределение АЭ-событий и толчки, зарегистрированные за 3 месяца проведенного геофизического мониторинга на Южном месторождении. Наиболее удароопасным участком в районе действия сети геофонов на основе расчетов на цифровой модели горного массива признан блок №1 в границах между горизонтом +440м и горизонтом +480м, а также район пересечения горных выработок с лежачим боком зоны раз-

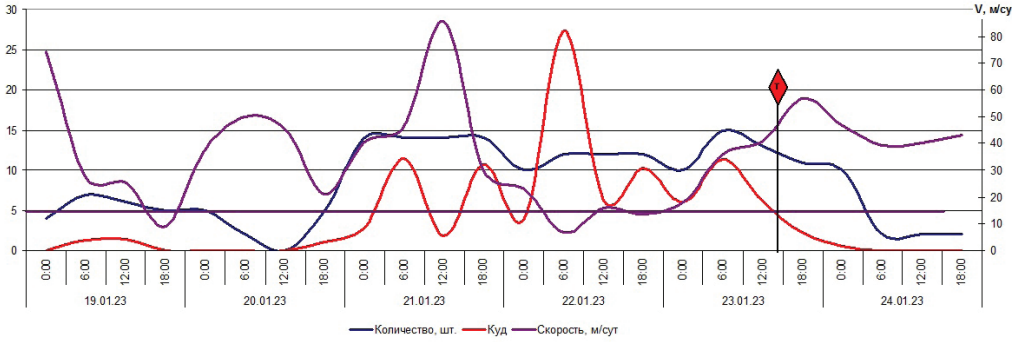

Рис. 5. Распределение показателя удароопасности $K_{уд}$ перед толчком 23 января 2023 г.
Fig. 5. Cih before the tremors of January 23rd at 21:17 with an energy of 1131 J.

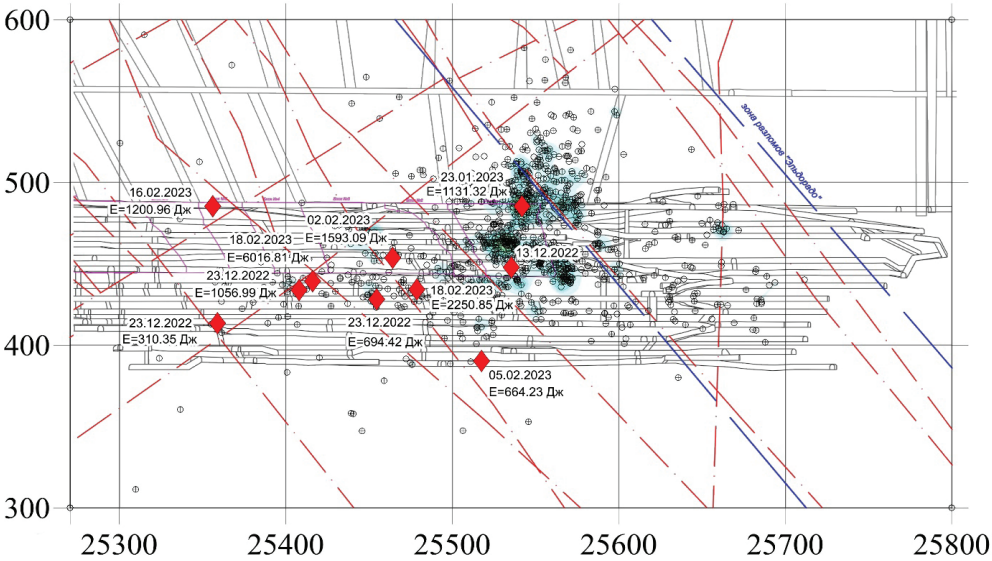

Рис. 6. Акустическая активность в массиве месторождения Южное в период декабрь 2022 — февраль 2023 гг. в проекции на плоскость XZ (единицы измерений осей — метры)
Fig. 6. Acoustic activity in the Yuzhnoye field massif in the period December 2022 — February 2023 in the projection on the XZ plane (axis units of measurement — meters)

ломов Эльдорадо и разломом Рудный в районе блоков № 2 и № 3.

Заключение

По данным мониторинга было установлено превышение перед толчками среднесуточного количественного показателя АЭ-событий до 50% в сравнении с другими периодами. Наиболее удароопасным участком в районе действия сети геофонов признан блок №1 в границах между горизонтом +440 м и горизонтом +480 м, а также район пересечения горных выработок с лежачим боком зоны разломов Эльдорадо и разломом Рудный в районе блоков № 2 и № 3.

По результатам исследования сформирован план расширения сети геофонов системы «Prognoz-ADS» на нижних горизонтах месторождения в западном направлении для

повышения качества геомеханического мониторинга и получения более точной информации о причинах регистрируемых крупных локальных проявлений удароопасности. Установление причин удароопасности позволит в будущем разработать необходимый комплекс геомеханических мероприятий для повышения безопасности ведения горных работ на нижележащих глубоких горизонтах Южного месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Foulger G. R.*, *Wilson V. P.*, *Gluyas J. G.*, *Julian B. R.*, *Davies R. J.* Global review of human-induced earthquakes, Earth Sci. Rev. 178 (2018) 438e514. DOI: 10.1016/j. earscirev.2017.07.008.

2. *Marcak Henryk, Mutke Grzegorz*. Seismic activation of tectonic stresses by mining // Journal Seismology. 2013, vol. 17, no. 4, pp. 1139–1148.

3. *Liu J.*-P, *Feng X.*-T, Van *Aswegen G.*, *Blake W.*, *Srinivasan C.*, *Rao M. V.* M. S., *Zembaty Z.* Case Histories of Rockbursts at Metal Mines // Rockburst. Mechanisms, Monitoring, Warning, and Mitigation. 2018. Pp. 47–92. DOI: 10.1016/B978–0-12–805054–5.00003–2.

4. *Manchao H.*, *Fuqiang R.*, *Dongqiao L.* Rockburst mechanism research and its control // International Journal of Mining Science and Technology, 2018, Vol. 28, Iss. 5, pp. 829–837.

5. *Адушкин А. А.* Развитие техногенно-тектонической сейсмичности в Кузбасе. Геология и геофизика. 2018. Т.59, №5 с.709–724, DOI: 10.15372/GiG20180510.

6. *Batugin A.*, *Kolikov K.*, *Ivannikov A.*, Ignatov Yu., *Krasnoshtanov D.* Transformation of the geodynamic hazard manifestation forms in mining areas, Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference SGEM-2019 19 (1.3) (2019) 717e724. DOI: 10.5593/sgem2019/1.3.

7. *Баранов С. В.*, *Моторин А. Ю.*, *Шебалин П. Н.* Пространственное распределение повторных толчков в условиях техногенной сейсмичности // Физика Земли. 2021. № 4. С. 91–100. DOI: 10.31857/S0002333721040025.

8. *Sidorov D. V.*, & *Ponomarenko T. V.* Estimation methodology for geodynamic behavior of nature-and-technology systems in implementation of mineral mining projects. Gornyi Zhurnal, 2020(1), 49–52. DOI:10.17580/gzh.2020.01.09/

9. *Potapchuk M. I.*, *Kursakin G. A.*, *Sidlyar A. V.* Improvement of safety of development of bump hazardous vein deposits of eastern primorye // Eurasian Mining. — 2014. — No. 1. — P. 18–22.

10. *Потапчук М. И.*, *Курсакин Г. А.*, *Сидляр А. В.* Повышение безопасности разработки удароопасных жильных месторождений Восточного Приморья // Горный журнал. — 2013. — № 10. — С. 30–34.

11. *Козырев А. А.*, *Каспарьян Э. В.*, *Федотова Ю. В.* Концепция единой системы комплексного геомеханического мониторинга при ведении горных работ в скальных массивах горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2016. — № 4. — С. 168–191. — EDN VPLZTN.

12. *Kozyrev A. A.*, *Panin V. I.*, *Semenova I. E.*, & *Zhuravleva O. G.* Geodynamic safety of mining operations under rockburst-hazardous conditions in the Khibiny apatite deposits. Journal of Mining Science, 2018, 54(5), 734–743. DOI:10.1134/S1062739118054832.

13. *Lovchikov A. V.* Review of the strongest rockbursts and mining-induced earthquakes in Russia. Journal of Mining Science, 2013, 49(4), 572–575. doi:10.1134/S1062739149040072.

14. *Zhou J.*, *Li X.*, & *Mitri H. S.* Classification of rockburst in underground projects: Comparison of ten supervised learning methods. Journal of Computing in Civil Engineering. 2016, 30(5) DOI:10.1061/(ASCE)CP.1943–5487.0000553.

15. *Sun F.*, *Fan J.*, *Guo J.*, *Shi X.*, *Liu X.*, *Zhu B.*, & *Zhang H.* (). Rockburst proneness criterion based on energy principle. Gaoya Wuli Xuebao / Chinese Journal of High Pressure Physics. 2021, 35(3) DOI:10.11858/gywlxb.20200650.

16. *He M.*, e *Sousa L. R.*, *Miranda T.*, & *Zhu G.* Rockburst laboratory tests database — application of data mining techniques. Engineering Geology. 2015, 185, 116–130. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.12.008.

17. *Lomov M.* 3D modeling system of seismoacoustic monitoring results at the Nikolaevskoye field. E3S Web of Conferences: 8, Khabarovsk, 08–10 сентября 2020 года. Khabarovsk, P. 04008. DOI 10.1051/e3sconf/202019204008.

18. *Ломов М. А.*, *Сидляр А. В.* Оценка факторов удароопасности Николаевского месторождения с помощью системы 3D моделирования результатов сейсмоакустического мониторинга // Проблемы недропользования. 2021. № 1(28), С. 64–72. DOI 10.25635/2313–1586.2021.01.064.

19. *Potapchuk M.*, *Kursakin G.*, *Kryukov V.*, *Lomov M.* Justification of safe and effective working conditions for pit reserves of "Pioner" gold deposit. Problems of Complex Development of Georesources: electronic resource, Khabarovsk, 25–27 сентября 2018 года. Khabarovsk: EDP Sciences, P. 02013. DOI 10.1051/e3sconf/20185602013.

20. *Раимжанов Б. Р.*, *Хасанов А. Р.*, *Фарманов О. Э.* Исследование геодинамического состояния массива горных пород с целью прогнозирования горных ударов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 10. — С. 29–41. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_29.

21. *Менгель Д. А.* Результаты инструментального прогноза удароопасности на шахте «Соколовская» методом акустической эмиссии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3–1. — С. 149–160. DOI: 10.25018/0236–1493–2020–31–0-149–160.

22. *Tereshkin A. A.*, *Rasskazov I.* Yu., *Anikin P. A.*, *Gladyr A. V.*, *Migunov D. S.* and *Rasskazov M. I.* Improvement of technology and procedures of local rockburst hazard control // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 773 (2021) 012062. DOI: 10.1088/1755–1315/773/1/012062.

23. *Ахметсафина Р. З.* Локация акустического источника в однородной среде // Робототехника и техническая кибернетика. — 2016. — № 2. — С. 52–55.

24. *Гладырь А. В.*, *Рассказов М. И.*, *Терешкин А. А.*, *Константинов А. В.* Опытное исследование точности локации автоматизированной системы геомеханического мониторинга в условиях анизотропии горных пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — № 1. — С.78–83. DOI: 10.15372/FPVGN2019060113. ГИАБ

REFERENCES

1. Foulger G. R., Wilson V. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes, Earth Sci. Rev. 178 (2018) 438e514. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.07.008.

2. Marcak Henryk, Mutke Grzegorz. Seismic activation of tectonic stresses by mining. Journal Seismology. 2013, vol. 17, no. 4, pp. 1139–1148.

3. Liu J.-P, Feng X.-T, Van Aswegen G., Blake W., Srinivasan C., Rao M. V. M. S., Zembaty Z. Case Histories of Rockbursts at Metal Mines. Rockburst. Mechanisms, Monitoring, Warning, and Mitigation. 2018. Pp. 47–92. DOI: 10.1016/B978–0-12–805054–5.00003–2.

4. Manchao H., Fuqiang R., Dongqiao L. Rockburst mechanism research and its control. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, Vol. 28, Iss. 5, pp. 829–837.

5. Adushkin V. V. Technogenic tectonic seismicity in Kuzbass, Russ. Geol. Geophys. 59 (5) (2018) 571e583. [in Russ.] DOI: 10.1016/j.rgg.2018.04.01.

6. Batugin A., Kolikov K., Ivannikov A., Ignatov Yu., Krasnoshtanov D. Transformation of the geodynamic hazard manifestation forms in mining areas, Proceedings of the 19th

International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference SGEM-2019 19 (1.3) (2019) 717e724. DOI: 10.5593/sgem2019/1.3.

7. Baranov S. V., Motorin A. Y., Shebalin P. N. Spatial distribution of triggered earthquakes in the conditions of mining-induced seismicity. Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2021. T. 57. No 4. 520–528. [in Russ.] DOI: 10.31857/S0002333721040025.

8. Sidorov D. V., & Ponomarenko T. V. Estimation methodology for geodynamic behavior of nature-and-technology systems in implementation of mineral mining projects. Gornyi Zhurnal, 2020(1), 49–52. DOI:10.17580/gzh.2020.01.09/

9. Potapchuk M. I., Kursakin G. A., Sidlyar A. V. Improvement of safety of development of bump hazardous vein deposits of eastern primorye. Eurasian Mining. 2014. No. 1. P. 18–22.

10. Potapchuk M. I., Kursakin G. A., and Sidlyar A. V. Improving the safety of the development of rockburst-prone residential areas in Eastern Primorye. Gornyi Zhurnal. 2013. No. 10. P. 30–34. [in Russ.].

11. Kozyrev A. A., Kaspar'yan E. V., Fedotova Yu. V. Concept of a unique complex geomechanical monitoring system when mining in hard rock massifs. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016. (4), 168–191. [in Russ.]

12. Kozyrev A. A., Panin V. I., Semenova I. E., & Zhuravleva O. G. Geodynamic safety of mining operations under rockburst-hazardous conditions in the Khibiny apatite deposits. Journal of Mining Science, 2018, 54(5), 734–743. DOI:10.1134/S1062739118054832.

13. Lovchikov A. V. Review of the strongest rockbursts and mining-induced earthquakes in Russia. Journal of Mining Science, 2013, 49(4), 572–575. doi:10.1134/S1062739149040072.

14. Zhou J., Li X., & Mitri H. S. Classification of rockburst in underground projects: Comparison of ten supervised learning methods. Journal of Computing in Civil Engineering. 2016, 30(5) DOI:10.1061/(ASCE)CP.1943–5487.0000553.

15. Sun F., Fan J., Guo J., Shi X., Liu X., Zhu B., & Zhang H. Rockburst proneness criterion based on energy principle. Gaoya Wuli Xuebao / Chinese Journal of High Pressure Physics. 2021, 35(3) DOI:10.11858/gywlxb.20200650.

16. He M., e Sousa L. R., Miranda T., & Zhu G. Rockburst laboratory tests database application of data mining techniques. Engineering Geology. 2015, 185, 116–130. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.12.008.

17. Lomov M. 3D modeling system of seismoacoustic monitoring results at the Nikolaevskoye field. E3S Web of Conferences: 8, Khabarovsk, 08–10 сентября 2020 года. Khabarovsk, P. 04008. DOI 10.1051/e3sconf/202019204008.

18. Lomov M. A., Sidlyar A. V. Estimation of rockburst hazard factors of the nikolaev deposit with the use of 3d modelling results of seismoacoustic monitoring. Problems of subsurface use. 2021, 1 (28), 64–72. [in Russ.]. DOI 10.25635/2313–1586.2021.01.064.

19. Potapchuk M., Kursakin G., Kryukov V., Lomov M. Justification of safe and effective working conditions for pit reserves of "Pioner" gold deposit. Problems of Complex Development of Georesources: electronic resource, Khabarovsk: EDP Sciences, P. 02013. DOI 10.1051/e3sconf/20185602013.

20. Raimjanov B. R., Khasanov A. R., Farmanov O. E. Analysis of geodynamic behavior of rock mass for the purpose of rock burst prediction. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021; (10): 29–41. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_29.

21. Mengel' D. A. The results of rock burst prediction on the sokolovskaya underground mining by the acoustic emission method. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3–1):149–160. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236–1493–2020–31–0-149–160.

22. Tereshkin A. A., Rasskazov I. Yu., Anikin P. A., Gladyr A. V., Migunov D. S. and Rasskazov M. I. Improvement of technology and procedures of local rockburst hazard control. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 773 (2021) 012062. DOI: 10.1088/1755–1315/773/1/012062.

23. Akhmetsafina R. Z. Location of an acoustic source in a homogeneous medium. Robotics and technical cybernetics. 2016, No. 2, p. 52–55. [in Russ.]

24. Gladyr A. V., Rasskazov M. I., Tereshkin A. A., Konstantinov A. V. Experimental research of the automated geomechanical monitoring system location accuracy in the rock mass anisotropy conditions. Fundamental and Applied Problems of Mining Sciences. 2019, no. 1, pp. 78–83. [in Russ.] DOI: 10.15372/FPVGN2019060113.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ломов Михаил Андреевич[1] — младший научный сотрудник лаборатории цифровых методов исследований природных и технических систем, e-mail: 9241515400@mail.ru, orcid.org/0000–0003–4346–7447;

Сидляр Александр Владимирович[1] — научный сотрудник лаборатории геомеханик, E-mail: alex-igd@mail.ru orcid.org/0000–0002–9619–4334;

Константинов Александр Викторович[1] — научный сотрудник лаборатории геомеханик, E-mail: alex-sdt@yandex.ru, orcid.org/0000–0001–6481–292X;

Грунин Алексей Петрович[1] — научный сотрудник лаборатории горной геофизики, e-mail: lexx188@mail.ru, orcid.org/0009–0002–2394–5608;

[1] Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института горного дела ДВО РАН — обособленного подразделения Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИГД ДВО РАН), 680000, Хабаровск, ул. Тургенева, 51, Россия.

Для контактов: *Ломов Михаил Андреевич*, e-mail: 9241515400@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lomov M. A., junior Researcher at the Laboratory of Digital Methods of Research of Natural and Technical Systems of the Federal State Budgetary Institution of Science, Institute of Mining, FEB RAS — a separate subdivision of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IGD FEB RAS), 680000, Khabarovsk, Turgenev str., 51, Russia, e-mail: 9241515400@mail.ru, orcid.org/0000–0003–4346–7447;

Sidlyar A. V., researcher Geomechanics Laboratory, Mining Institute KhFRC FEB RAS, 680000, Khabarovsk, Turgeneva st, 51, Russia, e-mail: alex-igd@mail.ru orcid.org/0000–0002–9619–4334;

Konstantinov A. V., researcher at the Geomechanics Laboratory of the Federal State Budgetary Institution of Science, Institute of Mining, FEB RAS — a separate subdivision of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IGD FEB RAS), 680000, Khabarovsk, Turgenev str., 51, Russia, e-mail: alex-sdt@yandex.ru, orcid.org /0000–0001–6481–292X;

Grunin A. P., researcher at the Laboratories of Mining Geophysics of the Federal State Budgetary Institution of Science, Institute of Mining, FEB RAS — a separate subdivision of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IGD FEB RAS), 680000, Khabarovsk, Turgenev str., 51, Russia, e-mail: lexx188@mail.ru, orcid.org/0009–0002–2394–5608.

Corresponding author: *Lomov Mikhail Andreevich*, e-mail: 9241515400@mail.ru.

Получена редакцией 05.10.2023; получена после рецензии 25.10.2023; принята к печати 10.11.2023.
Received by the editors 05.10.2023; received after the review 25.10.2023; accepted for printing 10.11.2023.