

Анализ результатов сейсмоакустического мониторинга массива Мало-Тулукуевского месторождения по данным автоматизированной системы контроля горного давления

М.А. Ломов✉, П.А. Аникин

Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация
✉ 9241515400@mail.ru

Резюме: Статья посвящена исследованию и мониторингу геомеханического состояния массива горных пород на примере уранового месторождения «Мало-Тулукуевское» в юго-восточной части Забайкалья с целью прогнозирования горных ударов и управления динамическими проявлениями горного давления. Взаимодействие горнотехнических и природных процессов в регионе рассматривается как синергетическое, при этом значительный вклад в геодинамическую обстановку вносят тектонические разломы, сейсмическая активность, а также рассматривается влияние сезонных климатических изменений. Для мониторинга горного давления на месторождении была внедрена автоматизированная система контроля горного давления «Prognoz-ADS» и организован сейсмоакустический мониторинг, охватывающий две ключевые зоны с повышенной активностью. Система позволяет регистрировать микросейсмические события и их параметры, такие как энергия и координаты, что способствует раннему выявлению предвестников динамических явлений и повышению безопасности горных работ. В результате проведенного мониторинга за период с 2022 по 2024 г. было зафиксировано 431 акустическое событие, что позволило выявить две зоны концентрации сейсмоакустической активности, приуроченные к пересечению активных геологических разломов с горными выработками. Эти данные подтверждают предыдущие исследования, указывающие на высокий риск горных ударов в нижней части месторождения, особенно в зонах с глубинами более 500 м. Также был проведен анализ влияния внешних факторов, таких как сейсмическая активность в регионе и климатические изменения, на интенсивность сейсмоакустических событий. Результаты показали, что в сезон летних осадков происходят задержки в реакции массива на климатические воздействия, что требует дальнейшего наблюдения. Предложены рекомендации по совершенствованию системы мониторинга, включая оптимизацию конфигурации геофонов для повышения точности локализации событий и увеличение охватываемой зоны контроля. Статья представляет собой важный вклад в изучение и управление рисками горных ударов, а также в развитие методов сейсмоакустического мониторинга в горнодобывающей отрасли.

Ключевые слова: геомеханика, горное давление, напряженное состояние, горные удары, геодинамические процессы

Для цитирования: Ломов М.А., Аникин П.А. Анализ результатов сейсмоакустического мониторинга массива Мало-Тулукуевского месторождения по данным автоматизированной системы контроля горного давления. *Горная промышленность*. 2025;(4S):40–44. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-40-44>

Analysis of the results of seismic and acoustic monitoring of the rock mass at the Malo-Tulukuyevsky deposit based on the data of the automated rock pressure monitoring system

M.A. Lomov✉, P.A. Anikin

Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation
✉ 9241515400@mail.ru

Abstract: The article discusses studies and monitoring of the geomechanical state of a rock mass using the case of the Malo-Tulukuyevskoye uranium deposit in the southeastern part of Transbaikalia in order to predict rock bursts and control dynamic manifestations of the rock pressure. The interaction of mining and natural processes in the region is considered as synergetic, while tectonic faults, seismic activity, and the influence of seasonal climatic changes make a significant contribution to the geodynamic situation. The Prognoz-ADS automated rock pressure monitoring system was implemented to monitor in-situ

rock pressure, and the seismic and acoustic monitoring was organized to cover two key areas with higher activity. The system enables registration of microseismic events and their parameters such as the energy and coordinates, which contributes to an early detection of dynamic phenomena precursors and improve the safety of mining operations. As a result of the monitoring conducted from 2022 to 2024, 431 acoustic events were recorded, which made it possible to identify two zones of stronger seismic activities associated with the intersection of the active geological faults with the mine workings. These data confirm previous studies indicating a high risk of rock bursts in the bottom part of the deposit, especially in the areas with the depths of more than 500 m. The impact of external factors, such as seismic activity in the region and climate change, on the intensity of seismic events was also analyzed. The results showed that during the summer precipitation season, delays occur in the rock mass response to climatic impact, which requires further monitoring. Recommendations for improving the monitoring system are proposed, including optimizing the configuration of geophones to enhance the accuracy of event localization and increase the coverage of the control area. The article is an important contribution to studies and risk management of the rock bursts, as well as to development of the seismic and acoustic monitoring methods in the mining industry.

Keywords: geomechanics, rock pressure, stress state, rock bursts, geodynamic processes

For citation: Lomov M.A., Anikin P.A. Analysis of the results of seismic and acoustic monitoring of the rock mass at the Malo-Tulukuyevsky deposit based on the data of the automated rock pressure monitoring system. *Russian Mining Industry*. 2025;(4S):40–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-40-44>

Введение

Взаимодействие горнотехнических и природных процессов имеет синергетический характер. Сами по себе углубление горных выработок, увеличение объёмов проходческих и добычных работ не обязательно приводят к нарастанию риска, однако сочетание множества факторов, в том числе влияние тектонически активных разломов, сейсмоактивность, сезонные гидрогеологические колебания и изменение климата – дают качественно иную динамическую природно-техногенную среду. Эффективное управление ею требует перехода от реактивных мер (устранение последствий) к проактивному управлению напряжённым состоянием массива: управляемым разгрузочным взрыванием, вариациями с графиком проведения очистных работ и т.п. [1–3].

Мировой опыт показывает: геодинамическая составляющая риска возникновения горного удара становится одним из ключевых ограничений для устойчивого развития отрасли. Интеграция высокочастотного мониторинга, формирование цифровых двойников объектов и пересмотр нормативного поля позволяют смещать акцент с декларируемой безопасности к её непрерывно верифицируемому состоянию, что является необходимым условием сохранения экономической эффективности и социальной приемлемости горнодобывающих проектов в XXI в. [4–6]. Одним из наиболее результативных инструментов управления горным давлением и прогноза опасных динамических явлений признан сейсмоакустический метод. Он позволяет фиксировать предвестники, зарождение и изменение поля напряжений по микросейсмическим сигналам в массиве горных пород, тем самым заблаговременно предоставляя информацию для принятия мер и предупреждения аварийных ситуаций и оптимизации технологических решений [7–9].

На подземных рудниках Юго-Восточного Забайкальского региона в последние годы замечается усложнение горнотехнической ситуации и увеличение геодинамического риска при ведении горных работ, обусловленном изменением сейсмической и геодинамической обстановки региона на границе активного Амурского геоблока и увеличением выработанных пространств с глубиной разработки полезных ископаемых. В подобных условиях наиболее эффективным методом исследования природных и техногенных процессов в массиве горных пород является организация комплексных режимных наблюдений [10; 11].

Глубокозалегающее урановое месторождение «Мало-

Тулукуевское» отрабатывается подземным способом с 1971 г. Месторождение располагается на западных склонах Аргунского хребта и отличается от соседних месторождений «Стрельцовского рудного поля» более расчленёнными рудосодержащими участками горных пород, не приуроченными к раздутьям разломных структур. Абсолютные отметки поверхности колеблются в пределах 760–900 м, относительные превышения составляют 150–250 м. Месторождение «Мало-Тулукуевское» относится к склонным к горным ударам. С 2020 г. нижняя часть месторождения «Мало-Тулукуевское» с глубины 500 м отнесена к категории опасных по горным ударам [10].

Для мониторинга геомеханического состояния массива горных пород месторождения «Мало-Тулукуевское» в этаже VII–IX гор. на подземном руднике №8 в 2020 г. создана первая очередь автоматизированной системы контроля горного давления «Prognoz-ADS» и организован сейсмоакустический мониторинг в двух зонах ведения горных работ (блока 8-901, 8-903, 8-908 и 8-906). Конечной целью организации непрерывного мониторинга сейсмоакустической активности в зонах влияния тектонически активных разломных структур являлась оценка риска динамических проявлений горного давления в массиве горных пород месторождения «Мало-Тулукуевское» (рис. 1).

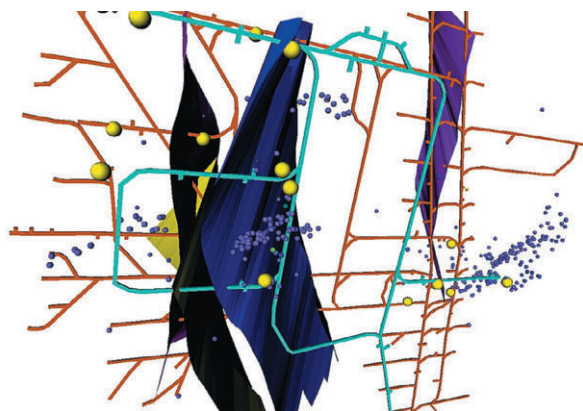


Рис. 1
3D-модель Мало-Тулукуевского месторождения с горизонтами VII и IX, действующей конфигурацией геофонов системы «Prognoz-ADS» и разломными структурами в контролируемой зоне мониторинга

Fig. 1
A 3D model of the Malo-Tulukuyevskoye field with Levels VII and IX, the current layout of the Prognoz-ADS geophones, and the fault structures in the controlled monitoring area

Автоматизированная система контроля горного давления «Prognoz-ADS» позволяет непрерывно регистрировать в массиве горных пород импульсы сейсмоакустической эмиссии (являющихся следствием упругого разрушения горных пород) в частотном диапазоне 0,2...12 кГц, определять их параметры (энергии, координат, спектральных и иных характеристик акустических событий). Специализированный программный комплекс системы позволяет выделять из потока данных первые импульсы АЭ – предвестники опасных динамических явлений, выделять, рассчитывать и контролировать параметры акустически-активных и потенциально удароопасных зон, проводить непрерывную оценку геомеханического состояния массива горных пород. Результаты мониторинга представляются в виде базы данных измерения, каталогов, карт, графиков с применением современных программных средств 3D-визуализации [12].

Для проверки точности результатов работы АСКГД были проведены расчеты математической погрешности локации САЭ-событий в зоне мониторинга. Результаты анализа установленной конфигурации сети геофонов Мало-Тулукеевского месторождения (при расчёте без учёта разломных структур) показывают, что из-за большого расстояния между горизонтами XII и IX (101 м) события с энергией 50 Дж затухают на дистанции 100 м и не регистрируются датчиками системы в достаточном количестве для локации (4 и более датчиков).

Результаты расчёта прогнозируемой ошибки локации для событий с энергией 100 Дж представлены на рис. 2. События с энергией 100 Дж эффективно (с погрешностью до 10 м) регистрируются только в участке между геофонами, внутри зоны контроля.

Таким образом, установленная на сегодняшний день конфигурация сети геофонов Мало-Тулукеевского месторождения может в полной мере эффективно регистрировать САЭ-события внутри зоны контроля с энергией от 100 Дж.

В дальнейшем целесообразно развивать и совершенствовать сеть системы мониторинга для решения научно-прак-

тической задачи по достижению высоких показателей точности локации в 10 и менее метров регистрируемых мелких сейсмоакустических событий с диапазоном энергий от 25 Дж, что позволит повысить надежность регистрации предвестников и прогноза опасных форм проявления горного давления.

Результаты и их обсуждение

По данным геомеханического мониторинга АСКГД «Prognoz-ADS» за период наблюдений 2022–2024 гг. зафиксировано 431 акустическое событие (САЭ), которые распределяются на две зоны концентрации АЭ-событий в рабочих блоках 8-901, 8-903, 8-908 и 8-906 (рис. 3).

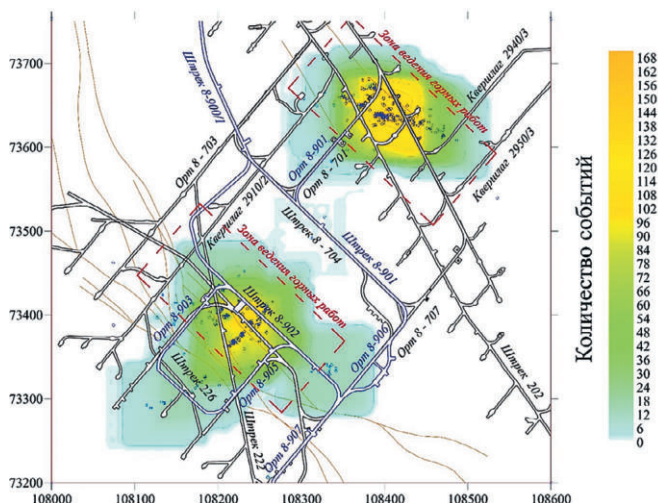


Рис. 3
Карта распределения сейсмоакустической активности в массиве месторождения Мало-Тулукеевское в период с 2022 по 2024 г. в проекции IX гор.

Fig. 3
A distribution map of seismic and acoustic activity in the Мало-Tulukuevskoye field rock mass in the period from 2022 to 2024 as projected to Level IX

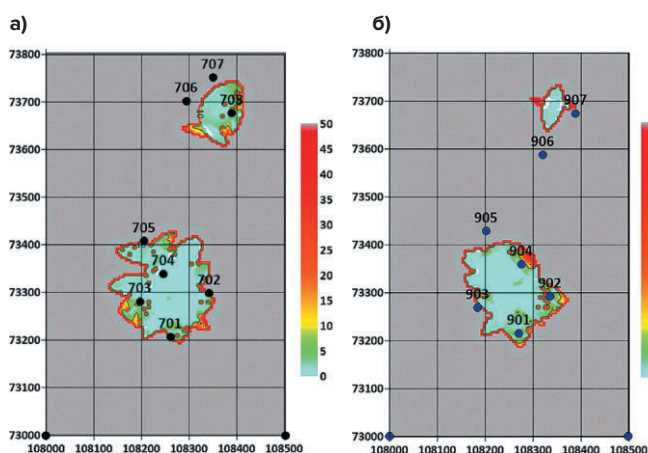


Рис. 2
Распределение прогнозируемой ошибки локации для событий с энергией 100 Дж в проекции на горизонты VII (а) и IX (б) фактической приемной конфигурации сети геофонов Мало-Тулукеевского месторождения

Fig. 2
Distribution of the predicted location error for events with the energy of 100 J as projected to Levels VII (a) and IX (b) of the actual layout of the receiving geophones at the Мало-Tulukuevskoye field

Первая зона концентрации САЭ распределяется в рабочих блоках 8-901, 8-903, приуроченных к участку горного массива в пересечении сети активных тектонических разломов (№10, №10а) с сетью горных выработок, что оказывает влияние на геомеханическое состояние и проявление горного давления. Вторая зона концентрации САЭ-событий распределяется в рабочих блоках 8-908 и 8-906, приуроченных к участку горного массива в пересечении тектонического разлома (№3, №9, №11) с сетью горных выработок, что также является определяющим фактором геомеханического состояния в участке.

Наибольшее количество событий зафиксировано в четвёртом квартале 2022 г., наименьшее в период январь–май 2022 г. Как видно из графика, на месторождении наблюдается периодическое, волнообразное изменение интенсивности проявления АЭ-событий.

Локальная концентрация САЭ-событий подтверждает результаты ранних исследований, определяющих влияние геолого-структурных особенностей месторождения и внешних факторов. Возможными внешними триггерами, способными влиять на напряженно-деформированное состояние горного массива месторождения (в частности, повышения количества АЭ-событий), традиционно рассматриваются изменения горнотехнических условий, геодинамической обстановки в регионе, сезонные клима-

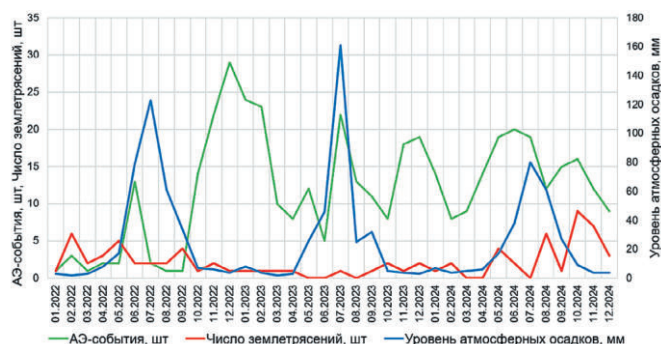


Рис. 4
Помесячное распределение количества АЭ-событий и количества осадков

Fig. 4
A monthly distribution of the number of AE events and the amount of precipitation

тические процессы (насыщение сети трещин атмосферными осадками).

В выборку землетрясений попали события магнитудой от 3 до 6, зарегистрированных в период с 2022 по 2024 г., по данным ФИЦ ЕГС РАН (за центр взят г. Краснокаменск, радиус 1000 км). Статистика по интенсивности сейсмических явлений напрямую влияет на геодинамическую обстановку на месторождении (рис. 4) [1; 13].

На основе проведенного анализа установлено следующее. Региональная сейсмичность, так же как и проявления САЭ-событий на месторождении, имеет волнообразный характер. В конце 2024 г. отмечается рост количества землетрясений, эпицентр наибольшего количества которых располагается в северной части региона (Муйский муниципальный округ, Республика Бурятия). На рис. 5 показано их пространственное распределение.

Одним из возможных внешних триггеров, способных влиять на напряженно-деформированное состояние горного массива (в частности, повышение количества АЭ-событий), рассматриваются сезонные климатические процессы (насыщение сети геологических нарушений атмосферными осадками, суточные и сезонные колебания и

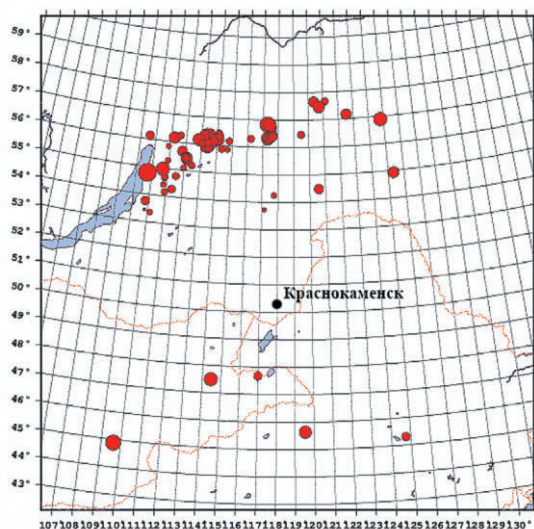


Рис. 5
Пространственное распределение землетрясений, зарегистрированных в период 2022–2024 гг. по территории юго-восточного Забайкалья, по данным ФИЦ ЕГС РАН

Fig. 5
Spatial distribution of the earthquakes recorded in the period 2022–2024 in the territory of southeastern Transbaikalia according to the data of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences

т.д.). Для этого проведен сравнительный анализ помесечного распределения данных АСКГД с количеством осадков в ближайшем городе Краснокаменске (рис. 4). Источник данных помесечного распределения уровня осадков в период 2022–2024 гг. взят из открытых архивов Росгидромет по пункту метеостанция №30758, г. Забайкальск (ближайшая метеостанция).

На основе проведенного анализа установлено, что распределение уровня осадков имеет резкое увеличение в летние месяцы и в момент по графику не оказывает влияния на интенсивность сейсмоакустических событий. Наблюдается задержка между пиками, вызванная временем просачивания через толщу пород в несколько месяцев. Интенсивность осадков оказывает двойное влияние на геомеханическое состояние массива горных пород. С одной стороны, увеличивается скорость скольжения бортов разрывных нарушений и контактов горных пород без интенсивных срывов. С другой стороны, возникают мосты и зацепы, где интенсивно формируются концентрации напряжений и при совпадении факторов могут возникать условия для проявления горного давления и техногенной сейсмичности.

Выводы

Созданная на месторождении Мало-Тулукуевское сеть стационарного автоматизированного сейсмоакустического мониторинга системой «Prognoz-ADS» позволила на первом этапе организовать необходимый контроль геомеханического состояния массива горных пород в основных участках ведения горных работ. Конфигурация сети геофонов месторождения может эффективно регистрировать САЭ-события с энергией от 100 Дж.

За период мониторинга 2022–2024 гг. с помощью АСКГД «Prognoz-ADS» на месторождении «Мало-Тулукуевское» выявлены две устойчивые зоны концентрации САЭ-событий в границах добычных блоков 8-901, 8-903, 8-908 и 8-906. Зоны концентрации САЭ-событий приурочены к участку пересечения активных геологических разломов с сетью горных выработок.

Анализ и обобщение полученных данных подтверждают ранние исследования удароопасности и основания считать нижнюю часть Мало-Тулукуевского месторождения (на глубинах ниже VII гор., отм. +290 м) опасной по динамическим проявлениям горного давления. Существует вероятность динамических проявлений при ведении горных работ в блоках 8-903 и 8-703, что необходимо учитывать при выборе способов охраны и поддержания выработок при проведении горных работ.

Для дальнейшего совершенствования и модернизации сети мониторинга целесообразно решение научно-практической задачи об установлении оптимального расстояния между датчиками, при котором будет контролироваться максимальный объем зоны контроля и возможно достижение высоких показателей точности локации в 10 и менее метров регистрируемых более ранних предвестников сейсмоакустических событий с диапазоном энергий от 25 до 100 Дж.

Проведен анализ влияния внешних триггеров на изменение количества САЭ-событий в массиве горных пород месторождения. Распределение количественных показателей сейсмичности и количества осадков имеет волнообразный характер, но данных для вывода недостаточно. Необходимо продолжить наблюдение и сформировать представительный объем статистической информации.

Список литературы / References

1. Wu M., Ye Y., Hu N., Wang Q., Tan W. Uncertainty prediction of mining safety production situation. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(43):64775–64791. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20276-0>
2. Wen Z., Song Z., Jiang Y., Zuo Y., Tao J. Temporal and spatial evolution mechanism of mining stress field. In: *Spatial-Temporal Evolution of Mining-Induced Rock Damage and Ground Control of Roadways*. Singapore: Springer; 2025, pp. 61–123. https://doi.org/10.1007/978-981-96-5439-0_3
3. Zhao C., Liu C., Zhao L., Guo Z. Time-space-energy data characteristics in mining area disasters via microseismic monitoring. *Journal of Physics: Conference Series*. 2025;3004:012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3004/1/012005>
4. Besimbayeva O.G., Khmyrova E.N., Tutanova M.S., Flindt N., Sharafutdinov R.R. Modern data analysis technologies used for geomechanical monitoring. Review. *Complex Use of Mineral Resources*. 2023;(3):5–15. <https://doi.org/10.31643/2023/6445.23>
5. Salinas J.P., Araujo J.J.M., Teatino M.A.C. Uncertainty in underground mining operations: a bibliometric and systematic literature review analysis. *World Journal of Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1108/WJE-07-2024-0388>
6. Castro L.A.M., Bewick R.P., Carter T.G. An overview of numerical modelling applied to deep mining. In: Ribeiro e Sousa R., Vargas Jr. E., Fernandes M.M., Azevedo R. (eds) *Innovative Numerical Modelling in Geomechanics*. London: CRC Press; 2012. Chapter 21.
7. Кобылкин С.С., Пугач А.С. Методика прогноза горных ударов и выбора безопасного направления фронта очистных работ. *Горные науки и технологии*. 2022;7(2):126–136. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-126-136>
Kobylkin S.S., Pugach A.S. Rock burst forecasting technique and selecting a safe coal face advance direction. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(2):126–136. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-126-136>
8. Анциферов А.В. Теоретические и методические аспекты прогноза горных ударов и газодинамических явлений при отработке угольных пластов. *Труды РАНИМИ*. 2023;(23):45–59. <https://doi.org/10.24412/1996-885X-2023-2338-45-59>
Antsyferov A.V. Theoretical and methodological aspects of the prediction of rock impacts and gas-dynamic phenomena in the mining of coal seams. *Transactions of RANIMI*. 2023;(23):45–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/1996-885X-2023-2338-45-59>
9. 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):29–41. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_10_0_29
Raimjanov B.R., Khasanov A.R., Farmanov O.E. Analysis of geodynamic behavior of rock mass for the purpose of rock burst prediction. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(10):29–41. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_10_0_29
10. Рассказов И.Ю., Петров В.А., Федотова Ю.В., Аникин П.А., Потапчук М.И., Усиков В.И. Геодинамика и геомеханические условия разработки Мало-Тулукуевского месторождения (Юго-Восточное Забайкалье). *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2021;(5):5–15. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210501>
Rasskazov I.Yu., Petrov V.A., Fedotova Yu.V., Anikin P.A., Potapchik M.I., Usikov V.I. Small Tulukui deposit in southeastern Transbaikalia: geomechanics and geodynamics. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2021;(5):5–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210501>
11. Рассказов И.Ю., Аникин П.А., Цициашвили Г.Ш. Прогноз динамических проявлений горного давления на месторождении «Антей» по данным геоакустического мониторинга. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(10):162–169.
Rasskazov I.Yu., Anikin P.A., Tsitsiashvili G.Sh. The prognosis of dynamic phenomena of rock pressure on “Antey” deposit according geoacoustic monitoring data. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2013;(10):162–169. (In Russ.)
12. Ломов М.А. Разработка цифровых моделей природно-технических систем для контроля удароопасности глубокозалегающих месторождений России. В кн.: Молодые ученые – Хабаровскому краю: материалы 24-го краевого конкурса молодых ученых, г. Хабаровск, 12–18 января 2022 г. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет; 2022. С. 103–108.
13. Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г., Петров В.А., Просекин Б.А. Геомеханические условия и особенности динамических проявлений горного давления на месторождении Антей. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012;(3):3–13.
Rasskazov I.Y., Saksin B.G., Petrov V.A., Prosekin B.A. Geomechanics and seismicity of the Antey deposit rock mass. *Journal of Mining Science*. 2012;48(3):405–412. <https://doi.org/10.1134/S106273914803001X>

Информация об авторах

Ломов Михаил Андреевич – младший научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; e-mail: 9241515400@mail.ru

Аникин Павел Александрович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-3694-6044>; e-mail: pav.anik@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 08.06.2025

Поступила после рецензирования: 07.08.2025

Принята к публикации: 18.08.2025

Information about the authors

Mikhail A. Lomov – Junior Researcher, Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation; e-mail: 9241515400@mail.ru

Pavel A. Anikin – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-3694-6044>; e-mail: pav.anik@mail.ru

Article info

Received: 08.06.2025

Revised: 07.08.2025

Accepted: 18.08.2025