

Оценка склонности к горным ударам нижней части месторождения «Красивое»

М.И. Потапчук ✉, А.В. Сидляр, А.А. Бурдинская, М.А. Ломов

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

Резюме: При разработке месторождений полезных ископаемых подземным способом с увеличением глубины возникают проблемы удароопасности горного массива. Практика отработки подобных месторождений свидетельствует о том, что при достижении горными работами «критических глубин» технологические процессы начинают сопровождаться внезапными разрушениями рудного и породного массивов в наиболее опасной динамической форме – стреляний пород, толчков, горных и горно-тектонических ударов. В данной работе представлены результаты оценки геомеханического состояния месторождения «Красивое» для обеспечения безопасного ведения горных работ и предупреждения динамических проявлений горного давления. Это золоторудное месторождение находится в северо-западной части Аяно-Майского административного района Хабаровского края и к настоящему времени запасы до горизонта 850 м (глубина 350 м) практически полностью отработаны. В ближайшей и среднесрочной перспективе планируется отработка запасов нижней части месторождения до отметки +615 м (глубина от поверхности 585 м). По совокупности факторов и полученных результатов комплексных исследований, а также данных натурных наблюдений и инструментальных измерений в горных выработках месторождение «Красивое» с глубины 350 м (ниже горизонта +850 м) должно быть отнесено к категории склонных к горным ударам.

Ключевые слова: геомеханика, удароопасность, проявления горного давления, тектоника, горный массив, напряженно-деформированное состояние, горнотехническая система, геодинамические процессы

Для цитирования: Потапчук М.И., Сидляр А.В., Бурдинская А.А., Ломов М.А. Оценка склонности к горным ударам нижней части месторождения «Красивое». *Горная промышленность*. 2025;(4S):116–121. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-116-121>

Assessment of the rock burst probability in the bottom part of the Krasivoye deposit

M.I. Potapchuk ✉, A.V. Sidlyar, A.A. Burdinskaya, M.A. Lomov

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

Abstract: When mineral deposits are mined using underground methods, rock burst hazards arise as the depth increases. The experience of developing such deposits shows that when mining operations reach ‘critical depths,’ technological processes begin to be accompanied by sudden failures of the ore and rock masses in the most dangerous dynamic forms, i.e. as the rock bursts and bumps as well as tectonic shocks. This paper presents the results of assessing the geomechanical condition of the Krasivoye deposit to ensure safe mining operations and prevent dynamic manifestations of the rock pressure. This gold deposit is located in the north-western part of the Ayano-Maisky administrative district of the Khabarovsk Territory, and its reserves are currently mined almost completely out to the level of +850 m (the depth of 350 m). In the near and medium term, it is planned to develop the reserves in the bottom part of the deposit to the level of +615 m (the depth of 585 m from the surface). Based on a combination of factors and the results of comprehensive studies, as well as data from field observations and instrumental measurements in the mine workings, the Krasivoye deposit needs to be classified as prone to rock bursts below the depth of 350 m (+850 m level).

Keywords: geomechanics, impact hazard, manifestations of rock pressure, tectonics, rock mass, stress-and-strain state, mining method, geodynamic processes

For citation: Potapchuk M.I., Sidlyar A.V., Burdinskaya A.A., Lomov M.A. Assessment of the rock burst probability in the bottom part of the Krasivoye deposit. *Russian Mining Industry*. 2025;(4S):116–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-116-121>

Введение

При разработке месторождений полезных ископаемых подземным способом с увеличением глубины, как правило, возникают проблемы удароопасности горного массива. Известно, что склонность массивов горных пород к горным ударам определяется упругими и прочностными параметрами горных пород, структурно-тектоническими особенностями района месторождения [1–10], а также величиной горного давления и напряжением, вызванным движением литосферных плит Земли [10]. Кроме того, при накоплении в процессе разработки выработанного пространства происходит перераспределение напряжений и их концентрация на отдельных участках горного массива в условиях применения различных технологических решений [11; 12].

Мировая практика отработки рудных месторождений свидетельствует о том, что при достижении горными работами «критических глубин», технологические процессы начинают сопровождаться внезапными разрушениями рудного и породного массивов в наиболее опасной динамической форме в форме стреляний пород, толчков, горных и горно-тектонических ударов¹.

Золоторудное месторождение «Красивое» находится в северо-западной части Аяно-Майского административного района Хабаровского края и к настоящему времени запасы до горизонта 850 м (глубина 350 м) практически полностью отработаны.

В ближайшей и среднесрочной перспективе планируется отработка запасов нижней части месторождения до отметки +615 м (глубина от поверхности 585 м). В работе была выполнена оценка склонности к горным ударам нижней части (ниже горизонта +850 м) месторождения «Красивое» для обеспечения безопасного ведения горных работ и предупреждения динамических проявлений горного давления.

Материалы и методы

Покровные отложения на месторождении и в его ближайших окрестностях представлены элювиально-делювиальными щебнисто-глыбовыми с дресвяно-суглинистым заполнителем образованиями мощностью в среднем 2,5 м. Рудные тела не имеют геологических границ, оконтуриваются только по данным опробования. Строение их сложное. Основой руд являются сульфидизированные кварцевые, альбит-кварцевые (с разным соотношением этих минералов) метасоматиты, окварцованные, альбитизированные, нередко с глинистыми минералами и серицитом, гранодиорит-порфиры. Распределение единственного ценного компонента (золота) в рудах крайне неравномерное.

Мощность рудных тел варьирует от долей метра до 30–40 м в интервале горизонтов от +700 м до 615 м. Изменение её по вертикали довольно существенное, до 2–2,5 раз на протяжении 5–12 м по восстающим выработкам. По простиранию изменение мощности происходит более плавно. Возможно, это объясняется тем, что расстояние между разведочными выработками по простиранию почти в 2 раза больше, чем между рассечками из восстающих. В рудном теле 1 между горизонтами 1100–950 м имеет место разрыв сплошности на протяжении 2–48 м.

Запасы месторождения вскрыты с поверхности следующими выработками: штольной №3 гор. +1100 м; штольной №1 гор. +1050 м; штольной №2 гор. +1000 м и штольной №5 гор. +950 м. Вскрытие запасов в отм. +950 м / +850 м и ниже

предусматривается наклонным (спиральным) съездом, оборудованным для движения самоходного горно-шахтного оборудования.

В соответствии с горно-геологическими и горнотехническими условиями отработку запасов месторождения «Красивое» в отм. +850 м / +615 м планируется вести этажами по 50 м и с использованием следующих систем разработки: основная – система разработки с подэтажной отбойкой из буровых штреков, вспомогательные, для отработки локальных участков месторождения, – система разработки с магазинированием руды и система разработки с подэтажной отбойкой из буровых ортов.

Для обоснования граничных условий при моделировании был выполнен комплексный морфоструктурный и линейamentный анализ рельефа земной поверхности в районе месторождения «Красивое», который показал, что в пределах рудного поля и сопредельных территорий нет четко выраженных в рельефе хребтов – впадин, но уверенно отображаются некоторые сбросы и долгоживущий региональный разлом северо-восточного простирания. В целом по совокупности признаков можно предположить, что рассматриваемое геопространство имеет довольно сложное поле напряжений, где выделяется север-северо-восточное направление наибольшего сжатия, параллельное разлому, секущему все структуры региона, в том числе надвиговый пояс.

Результаты инструментальных измерений методом щелевой разгрузки показали, что в массиве месторождения «Красивое» на глубине 350–400 м действует гравитационно-тектоническое поле напряжений, в котором горизонтальные напряжения в 2,4–1,9 раза превышают вертикальные от налегающей толщи пород. Поле напряжений имеет неоднородный характер, на отдельных участках величина напряжений сжатия превышает 45 МПа. С учетом данных о региональной геодинамике района месторождения установлено, что наибольшие сжимающие напряжения в его нижней части ориентированы в направлении от субмеридионального до север-северо-восточного (табл. 1).

Таблица 1
Параметры главных напряжений в массиве нижней части месторождения «Красивое»

Table 1
Parameters of the principal stresses in the bottom part of the Krasivoye deposit

Параметр	Главные нормальные напряжения		
	Наибольшее σ_1	Среднее σ_2	Наименьшее σ_3
Величина главных напряжений	$2,4\gamma H$	$1,9H$	γH
Азимут направления действия, град	0–30	180–210	Вертикальное

На разных участках профиля учитывались различия в физико-механических свойствах горных пород. Анализ геологической информации позволил установить, что больший объем горных пород занимают диориты, метасоматиты. По вещественному составу диориты схожи с двумя группами, выделенными в процессе изучения в лабораторных условиях, – гранодиорит-порфирами и диоритовыми порфиритами. В меньшей степени залегают алевролиты, гнейсы, амфиболиты и брекчии. С группой брекчий можно

¹ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых», утвержденных приказом Ростехнадзора 08.12.2020, № 505.

Таблица 2
Физико-механические свойства горных пород, принятые при моделировании

Table 2
Physical and mechanical properties of rocks used in modeling

Наименование пород	Плотность, кг/м³	Модуль деформации, ГПа	Коэффициент Пуассона	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на растяжение, МПа	Угол внутреннего трения, град	Сцепление, МПа
1. Диориты (гранодиорит-порфиры и диоритовые порфириты)	2668	49,8	0,22	168,0	8,27	45,8	20,4
2. Углеродистые метасоматиты	2699	53,82	0,24	119,57	6,61	44,7	17,0
3. Брекчии (флюидолиты и калишпатиты по бластопорфировым)	2689	55,1	0,22	145,0	6,45	46,2	18,0
4. Гнейсы (бластопорфировые диоритовые порфириты)	2650	54,28	0,25	194,4	7,7	45,7	21,9
5. Руда	2697	50,43	0,24	119,42	6,45	44,9	16,8

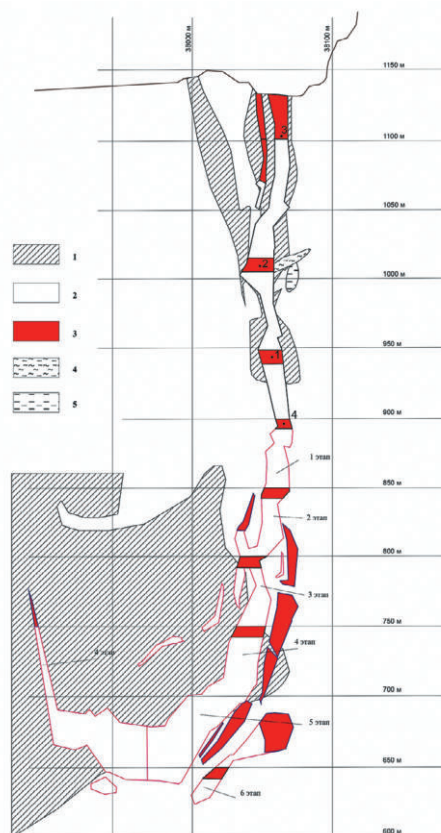


Рис. 1
Схема к исследованию напряженно-деформированного состояния массива при отработке рудных тел месторождения «Красивое» на поперечном разрезе РЛ-7: 1 – метасоматиты; 2 – диориты (гранодиорит-порфиры и диоритовые порфириты); 3 – рудный массив; 4 – амфиболиты; 5 – алевролиты; 1–4 – характерные точки для исследования НДС наиболее напряженных участков

Fig. 1
A schematic representation for studying the stress-and-strain state of the rock mass when mining ore bodies at the Krasivoye deposit along the RL-7 cross-section: 1 – metasomatites; 2 – diorites (granodiorite porphyries and diorite porphyrites); 3 – ore mass; 4 – amphibolites; 5 – siltstones; 1–4 – characteristic points for studying the stress-and-strain state of the most stressed areas

объединить флюидолиты и калишпатиты по бластопорфировым, гнейсы по вещественному составу схожи с бластопорфировыми диоритовыми порфиритами (табл. 2).

Для оценки склонности к горным ударам были выполнены специальные геомеханические исследования, включающие детальное изучение физико-механических свойств пород и руд, оценку их удароопасности, оценку природного и природно-техногенного напряженно-деформированного состояния массива горных пород, а также математическое моделирование напряженного состояния и прогнозная оценка величин напряжений на различных этапах отработки нижних горизонтов месторождения.

Математическое моделирование напряженного состояния выполнялось с применением метода конечных элементов [13]. Реализацию данного метода осуществляли с помощью программного комплекса FEM, состоящего из трех модулей: FEM1 (для объемной задачи – FEMV1), FEM2-3 (FEMV2-3), и FEM4 (FEMV4), и позволяющего решать задачи теории упругости и пластичности методом конечных элементов как в плоской, так и в объемной постановках [14; 15].

Для выявления наиболее напряженных участков горного массива были промоделированы последовательные этапы отработки балансовых рудных запасов в районе разрезов (РЛ-8 и РЛ-10), проходящих через центральную часть месторождения, характеризующихся наиболее сложными геологическими и горнотехническими условиями. Так как на участке между профильными линиями РЛ-8 и РЛ-10 основную нагрузку будет испытывать забалансовый целик на гор. 900 м, для уточнения истинных напряжений, возникающих в подкарьерном целике, было выполнено моделирование НДС массива в плоскости разреза РЛ-7 (рис. 1). Модели были выполнены в плоской упругой постановке задачи.

Результаты и их обсуждение

По результатам численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород установлено, что при выемке запасов нижней части месторождения основными концентраторами напряжений явля-

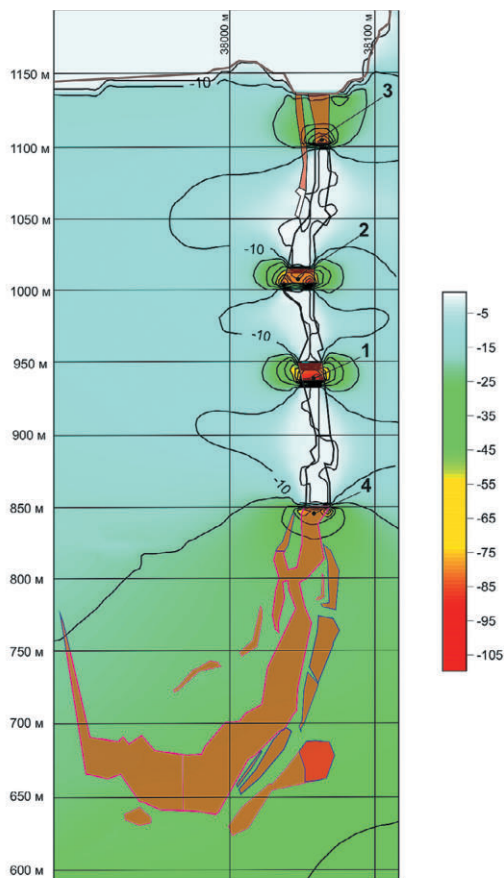


Рис. 2
Распределение максимальных сжимающих напряжений σ_1 после отработки рудных запасов в этаже 700–750 м (в проекции разреза РЛ-7): 1–4 – характерные точки в наиболее напряженных участках массива

Fig. 2
Distribution of maximum compressive stresses σ_1 after mining of ore reserves at the 700–750 m level (within the RL-7 cross-section): 1–4 – characteristic points in the most stressed areas of the rock mass

ются уменьшающиеся в процессе отработки межэтажные (потолочины) и междукамерные целики, а также подкарьерный и межэтажные охранные целики.

Напряжения на начальных этапах отработки до гор. 900 м в подкарьерном и на гор. 950 м целиках не превышают 73 МПа, в охранным целике на гор. 1000 м уже достигают достаточно высоких значений – до 88 МПа. С переходом отработки на гор. 850 м происходит довольно значительный рост напряжений в охранным целике на горизонте 950 м, в подкарьерном целике и на гор. 1000 м рост напряжений более плавный. В подкарьерном целике уровень максимальных сжимающих напряжений после погашения целика на гор. 900 м достигает 70 МПа, в нижележащих охранных целиках более 100 МПа (рис. 2).

После выемки запасов в этаже 800–850 м уровень максимальных сжимающих напряжений в нижней части подкарьерного целика возрастает до 73 МПа, в охранным целике на гор. 1000 м уровень сжимающих напряжений возрастает до 110 МПа, максимальный уровень напряжений наблюдается в охранным целике ниже гор. 950 м и составляет 119 МПа. После погашения межэтажного целика на гор. 850 м напряжения в подкарьерном целике достигают 77 МПа, в охранным на гор. 950 м – 139 МПа, на гор. 1000 м – 120 МПа.

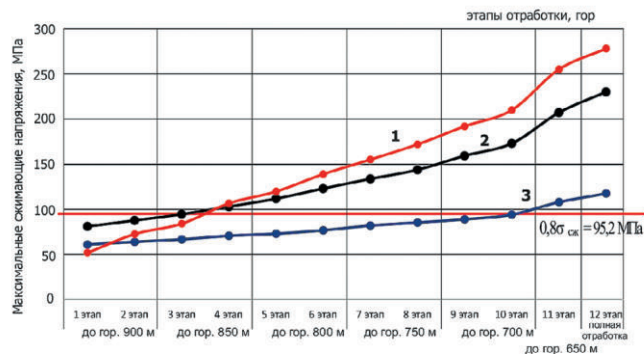


Рис. 3
Изменение максимальных сжимающих напряжений в целиках с увеличением глубины отработки: 1 – точка в охранным целике на гор. 950 м; 2 – точка в охранным целике на гор. 1000 м; 3 – точка в нижней части подкарьерного целика. Точки в целиках были взяты там, где наблюдаются максимальные значения напряжений

Fig. 3
Changes in the maximum compressive stresses in the pillars as a function of the mining depth: 1 – a point in the safety pillar at the +950 m Level; 2 – a point in the safety pillar at the +1000 m Level; 3 – a point in the bottom part of the penthouse. The points in the pillars were taken where the maximum stress values were observed

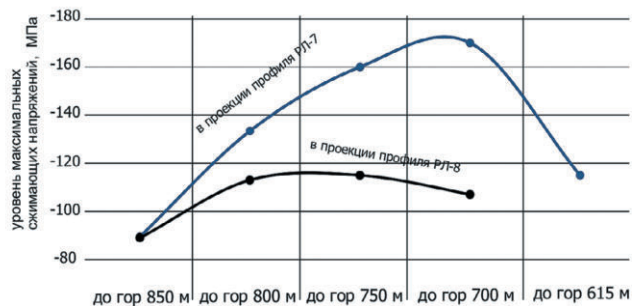


Рис. 4
Изменение максимальных сжимающих напряжений в межэтажных целиках по мере развития горных работ и перехода на нижележащие горизонты

Fig. 4
Changes in the maximum compressive stresses in the floor pillars as mining operations progress and transition to lower levels takes place

При переходе на гор. 750 м максимальные сжимающие напряжения в подкарьерном целике превышают 80 МПа, в охранных целиках более 130 МПа. Как видно из графика, зависимости величины максимальных сжимающих напряжений от глубины отработки и увеличения объемов выработанного пространства (рис. 3), дальнейшая отработка и переход на глубокие горизонты ниже гор. 700 м приведут к постепенному росту напряжений, и после полной отработки в охранным целике на гор. 950 м напряжения превышают предел прочности на сжатие руды более чем в 2 раза, в целике на гор. 1000 м – в 1,9 раз, в подкарьерном целике достигнут предельной величины.

Кроме охранных межэтажных целиков и подкарьерного целика, в область повышенных напряжений попадают межэтажные целики, которые погашаются в процессе перехода на нижележащие горизонты (рис. 4).

По результатам моделирования было установлено, что при переходе горных работ на гор. 850 м уровень напряжений в охранных целиках на гор. 950 и 1000 м превышает $0,8\sigma_{сж} = 95,2$ МПа, что говорит о склонности к горным ударам данных элементов горных конструкций. Кроме этого, на участке между профильными линиями РЛ-8 и РЛ-10 оставляется забалансовый целик выше гор. 900 м, который при переходе горных работ на гор. 800 м будет испытывать значительные нагрузки, уровень напряжений достигнет 117 МПа, приближаясь к пределу прочности руды на сжатие, что говорит о потенциальной удароопасности данного участка. В межэтажных целиках также будет наблюдаться высокий уровень напряжений при переходе на гор. 800 м – до 115 МПа в районе профиля РЛ-8 и до 135 МПа в районе профиля РЛ-7.

Исходя из того факта, что с переходом на горизонт 800 м охранные целики на гор. 950 м и 1000 м с высокой вероятностью разрушатся либо в статической, либо в динамиче-

ской форме, произойдет перераспределение напряжений, и основная нагрузка будет на подкарьерный целик, что приведет к потере устойчивости и, как следствие, к его разрушению.

Заключение

По совокупности факторов и полученных результатов комплексных исследований, а также данных натурных наблюдений и инструментальных измерений в горных выработках месторождение «Красивое» с глубины 350 м (ниже горизонта +850 м) должно быть отнесено к категории склонных к горным ударам.

Список литературы / References

- Аксенов А.А., Ожиганов И.А. Совершенствование практики отнесения месторождений к склонным по горным ударам. *Безопасность труда в промышленности*. 2018;(1):58–60. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-218-1-58-60>
Aksenov A.A., Ozhiganov I.A. Improving the Practice of Deposits Referring to Prone to Rock-Bumps. *Occupational Safety in Industry*. 2018;(1):58–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-218-1-58-60>
- Тюпин В.Н. Оценка критической глубины месторождений по условию удароопасности. *Записки Горного института*. 2019;236:167–171. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.2.167>
Tyupin V.N. Estimation of critical depth of deposits by rock bump hazard condition. *Journal of Mining Institute*. 2019;236:167–171. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.2.167>
- Фрейдин А.М., Неверов С.А., Неверов А.А., Конурин А.И. Геомеханическая оценка геотехнологий подземной добычи руд на стадии проектных решений. *Горный журнал*. 2016;(2):39–45. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.02.08>
Freidin A.M., Neverov S.A., Neverov A.A., Konurin A.I. Geomechanical assessment of geotechnology at a project stage of underground ore mining. *Gornyi Zhurnal*. 2016;(2):39–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.02.08>
- Куранов А.Д. Применение численного моделирования для выбора безопасных параметров систем разработки рудных месторождений в высоконапряженных массивах. *Записки Горного института*. 2013;206:60–64. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5437> (дата обращения: 05.05.2025).
Kuranov A.D. Application of numerical modeling for design of safety parameters of safety mining method in highly stressed masses. *Journal of Mining Institute*. 2013;206:60–64. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5437> (accessed: 05.05.2025).
- Braun L.G. *Seismic hazard evaluation using apparent stress ratio for mining-induced seismic events*. Ph. D. Thesis. Laurentian University; 2015. 257 p.
- Ingraham M.D., Issen K.A., Holcomb D.J. Use of acoustic emissions to investigate localization in high-porosity sandstone subjected to true triaxial stresses. *Acta Geotechnica*. 2013;8(6):645–663. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0275-y>
- Marcak H., Mutke G. Seismic activation of tectonic stresses by mining. *Journal of Seismology*. 2013;17(4):1139–1148. <https://doi.org/10.1007/s10950-013-9382-3>
- Snelling P.E., Godin L., McKinnon S.D. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013;58:166–179. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.10.005>
- Wang N., Wan B.H., Zhang P., Du X.L. Analysis on deformation development of open-pit slope under the influence of underground mining. In: Hu Z. (ed.) *Legislation, Technology and Practice of Mine Land Reclamation: Proceedings of the Beijing International Symposium on Land Reclamation and Ecological Restoration (LRER 2014), Beijing, China, 16–19 October 2014*. London: CRC Press; 2014. <https://doi.org/10.1201/b17500-11>
- Рассказов И.Ю. *Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона*. М.: Горная книга; 2008. 328 с.

11. Рассказов И.Ю., Потапчук М.И., Осадчий С.П., Потапчук Г.М. Геомеханическая оценка применяемых технологий разработки удароопасных месторождений ОАО «ГМК «Дальполиметалл». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010;(7):137–145.
Rasskazov I.Yu., Potapchuk M.I., Osadchii S.P., Potapchuk G.M. Geomechanical assessment of the technologies used in development of rock-burst hazardous deposits of MMC Dalpolymetal JSC. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2010;(7):137–145. (In Russ.)
12. Потапчук М.И., Терешкин А.А., Рассказов М.И. Оценка геомеханического состояния массива горных пород при отработке сложноструктурных рудных тел системой подэтажными штреками с управляемым обрушением кровли. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(12):39–45.
Potapchuk M.I., Tereshkin A.A., Rasskazov M.I. Assessment of geomechanical condition of rock massif in the process of development of difficult-structured ore bodies by the sublevel drifts system with the controlled roof caving. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(12):39–45. (In Russ.)
13. Фадеев А.Б. *Метод конечных элементов в геомеханике*. М.: Недра; 1987. 221 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/16260> (дата обращения: 05.05.2025).
14. Зотеев О.В. *Научные основы расчета конструктивных параметров систем подземной разработки руд с учетом структуры массива и порядка ведения горных работ* [дис. ... д-ра техн. наук]. Екатеринбург; 1999. 261 с.
15. Криницын Р.В. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород при отработке месторождений Урала. *Горная промышленность*. 2022;(5):79–82. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-79-82>
Krinitsyn R.V. Stress-and-strain state of the rock mass in mining deposits in the Urals. *Russian Mining Industry*. 2022;(5):79–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-79-82>

Информация об авторах

Потапчук Марина Игоревна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-3769-243X>; e-mail: potapchuk-igd@mail.ru

Сидляр Александр Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-9619-4334>; e-mail: sidlyar.alex@gmail.com

Бурдинская Алёна Ариандовна – аспирант, старший инженер, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0009-1466-7758>; e-mail: ms.miheewa03@gmail.com

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

Information about the authors

Marina I. Potapchuk – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-3769-243X>; e-mail: potapchuk-igd@mail.ru

Alexander V. Sidlyar – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9619-4334>; e-mail: sidlyar.alex@gmail.com

Alena A. Burdinskaya – Postgraduate Student, Senior Engineer, Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0009-1466-7758>; e-mail: ms.miheewa03@gmail.com

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

Article info

Received: 04.07.2025

Revised: 18.08.2025

Accepted: 25.08.2025

Информация о статье

Поступила в редакцию: 04.07.2025

Поступила после рецензирования: 18.08.2025

Принята к публикации: 25.08.2025