



Прогноз удароопасности перспективных участков отработки Хибинской апатитовой дуги

И.Э. Семенова✉, И.М. Аветисян

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
✉ i.semenova@ksc.ru

Резюме: Прогноз геомеханической ситуации при планировании горных работ на удароопасных месторождениях является необходимой составляющей в обеспечении безопасности и разработке мероприятий по снижению геодинамических рисков. В статье представлены результаты оценки и прогноза трансформации напряжённо-деформированного состояния (НДС) массива горных пород для одного из перспективных участков отработки запасов апатитовой дуги Хибин. Все расчеты проведены в упругой постановке для трехмерной конечно-элементной модели, учитывающей основные геологические, горнотехнические и геомеханические данные. Выделены потенциально опасные зоны по проявлениям горного давления в динамической форме и области с различным характером деформирования и обрушения подработанной толщи пород. Выявленные особенности НДС массива позволяют повысить уровень обоснованности технических решений по развитию горных работ и разработке профилактических мероприятий по обеспечению устойчивости элементов системы разработки.

Ключевые слова: тектонически напряженные массивы горных пород, напряженно-деформированное состояние, подземные горные работы, отработка прибортовых и подкарьерных запасов, численное моделирование, удароопасность

Для цитирования: Семенова И.Э., Аветисян И.М. Прогноз удароопасности перспективных участков отработки Хибинской апатитовой дуги. *Горная промышленность*. 2023;(S1):43–47. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-43-47>

Prediction of rockburst hazards in prospective mining areas of the Khibiny Apatite Arc

I.E. Semenova✉, I.M. Avetisyan

Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
✉ i.semenova@ksc.ru

Abstract: Forecasting of the geomechanical situation when planning mining operations at rockburst hazardous deposits is an essential component in ensuring safety and developing measures to reduce geodynamic risks. The paper presents the results of assessing and forecasting the transformation of the stress-and-strain state of the rock mass for one of the promising mining sites of the Khibiny Apatite Arc. All calculations were made using elastic approach to a three-dimensional finite-element model which incorporates basic geological, mining engineering and geomechanical data. Potentially hazardous zones in terms of dynamic rockburst manifestations were identified as well as areas with different deformation and collapse patterns in the undermined rock strata. The identified features of the stress-and-strain state of the rock mass make it possible to increase the justification level of technical solutions for the development of mining operations and designing preventive measures to ensure the stability of the mining system's elements.

Keywords: tectonically stressed rock masses, stress-and-strain state, underground operations, mining of near-edge and pit reserves, numerical modelling, rockburst hazard

For citation: Semenova I.E., Avetisyan I.M. Prediction of rockburst hazards in prospective mining areas of the Khibiny Apatite Arc. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):00–00. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-43-47>

Введение

Отработка запасов Хибинской апатитовой дуги ведется в сложных геомеханических условиях, которые предопределяются как параметрами гравитационно-тектонического поля напряжений, так и склонностью основных типов пород к хрупкому разрушению [1–3]. Кроме того, созданные

за период почти столетнего освоения месторождений открытые и подземные очистные пространства формируют техногенное НДС, которое является неоднородным как по уровню действующих напряжений, так и по их направлению [4]. Подобные условия характерны и для ряда других удароопасных месторождений [5–8].



Одним из перспективных участков выемки апатитовой руды является протяженная область месторождения, которое более 50 лет разрабатывалось открытым способом (работы в карьере завершены), и на одном из флангов ведется подземная выемка запасов. Планируются к отработке прибортовые и подкарьерные запасы.

Данное месторождение отнесено к склонным и опасным по горным ударам с глубины 300 м от дневной поверхности, тектоническая составляющая превышает собственный вес пород более чем в 2 раза. В данных условиях прогноз геомеханической ситуации с учетом геологических и геомеханических особенностей, а также сложной геометрии уже созданных и продолжающих развиваться очистных пространств, является важной частью комплексного обеспечения безопасности горных работ. Такой прогноз может быть выполнен на основе данных многовариантного численного моделирования НДС. На разных этапах планирования горных работ результаты моделирования могут быть определяющими как для выбора варианта системы разработки, так и для определения и корректировки ее параметров, а также разработки региональных и локальных мероприятий по обеспечению устойчивости [9–11].

Анализ геомеханических, геологических и горнотехнических факторов

Выбор граничных и начальных условий при генерации численной модели месторождения или его участков проводится на основе анализа геомеханических, геологических и горнотехнических факторов.

Результаты измерений параметров НДС прибортового массива пород, выполненные на исследуемом месторождении в 2003–2005 гг. ГоИ КНЦ РАН, показали уровень σ_{\max} 17–26 МПа на абсолютных высотных отметках +580– +595 м и незначительной глубине от начального рельефа (5–20 м). Полученные ранее измерения напряжений, выполненные в подземных горных выработках околоствольного двора на гор. +440 м (глубина от поверхности 600 м), засвидетельствовали величину $\sigma_{\max} = 78$ МПа при субгоризонтальной ориентации максимальной компоненты главных напряжений по простиранию рудного тела. Последние измерения напряжений на трех замерных станциях были проведены непосредственно в подготовительных выработках планируемого к отработке участка месторождения (ООО «Геотехническое бюро»). Результаты показали, что значения σ_{\max} варьируют в пределах 30–45 МПа, и подтвердили магистральное направление действия тектонических напряжений. Обобщенные данные о максимальных сжимающих напряжениях по результатам измерений на месторождении и их изменение с глубиной в руде и вмещающем массиве приведены в табл. 1.

Таким образом, имеет место гравитационно-тектонический тип напряженного состояния с субмагистральным действием максимальной компоненты главных напряжений и соотношением максимальной и промежуточной компонент $\sigma_{\text{пр}} = (0,6–0,7) \sigma_{\max}$. Минимальная компонента напряжений соответствует действию собственного веса пород γH и характеризуется существенной изменчивостью за счет больших перепадов естественного и техногенного рельефа дневной поверхности.

Анализ нарушенных зон и разломных структур позволил выделить те из них, которые могут оказать существенное влияние на НДС в окрестности планируемых горных работ и необходимы к учету при моделировании геомеханической ситуации. К ним относится дайка мончекитов – крупней-

Таблица 1
Обобщенные данные измерений НДС на месторождении

Table 1
Summarized data on measuring the stress-and-strain state at the deposit

Горизонт, м	Максимальные напряжения σ_{\max} (руда/порода), МПа	Азимут вектора σ_{\max} , град	Наклон вектора σ_{\max} к горизонту, град
+600	15–25 / 25–40	120 ± 30	0 ± 25
+530	20–30 / 30–50	120 ± 30	0 ± 25
+470	25–35 / 35–55	110 ± 30	0 ± 25
+450	25–35 / 35–55	110 ± 30	0 ± 25
+420	30–40 / 40–60	110 ± 30	0 ± 25
+310	35–50 / 50–70	110 ± 30	0 ± 25

Источник: Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения). Горный институт КНЦ РАН, Акционерное общество «Апатит». Апатиты; 2016. 112 с.

Source: Guidelines for safe mining operations at the deposits prone to and hazardous in terms of rockbursts (Khibiny apatite-nepheline deposits). Mining Institute of the Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatit JSC; Apatity; 2016. 112 p.

ший тектонический элемент восточной части изучаемого района, который имеет субвертикальное падение. Также присутствует зона с интенсивным проявлением трещиноватости, развитая в восточной части месторождения, выделенная ранее по инженерно-геологическим скважинам и характеризующаяся заметным снижением физико-механических показателей массива пород, а также уменьшением сцепления до 5–10 МПа по трещинам. Еще выделена ослабленная зона, которая геометризована в центральной части изучаемого района и имеет центриклинальное залегание, мощность зоны варьирует в пределах 3–6 м. Скальный массив представлен в основном крепкими горными породами, склонными к хрупкому разрушению.

Так как ранее месторождение обрабатывалось открытым способом, то достаточно сложный естественный рельеф поверхности дополняется техногенным. По сути, исходным напряженно-деформированным состоянием при отработке подземных запасов месторождения является НДС, сформировавшееся к настоящему времени, то есть после отработки запасов открытым способом. Соответственно, уровень действующих напряжений в подкарьерном пространстве будет выше, чем до формирования выемки, с зонами концентраций σ_{\max} и переориентировкой на определенных участках. В прибортовом массиве могут иметь место зоны разгрузки.

Еще одной сложностью является наличие двух безрудных участков. Рассматриваемый вариант отработки месторождения предполагает ведение добычи руды независимыми участками – Западным, Центральным и Восточным, для обеспечения максимальной производительности, что влечет за собой формирование целиков, которые по мере уменьшения их размеров станут дополнительными концентраторами напряжений.

Разработка объемной конечно-элементной модели

Для оценки и прогноза геомеханической ситуации при отработке прибортовых и подкарьерных запасов перспективных участков месторождения разработана численная 3D-модель и проведены расчеты НДС методом конечных элементов с использованием программного комплекса Sigma GT (разработка ГоИ КНЦ РАН).

При определении размеров модели опирались на линейные параметры участка отработки запасов, было учтено



необходимое удаление границ для минимизации их воздействия при имитации развития очистных выемок. Размеры конечно-элементной модели 4400 м × 2500 м × 1600 м. Высота модели соответствует максимальным отметкам рельефа выбранного участка +1100 м и уходит на глубину –500 м.

На рис. 1 приведен план разработанной модели с сечениями и зоной максимального сгущения сетки конечных элементов, выделенной красными линиями. В этой зоне сечения располагаются с пятиметровым шагом, что позволяет достаточно детально имитировать развитие подземных горных работ, включая области предполагаемых блоков-целиков.

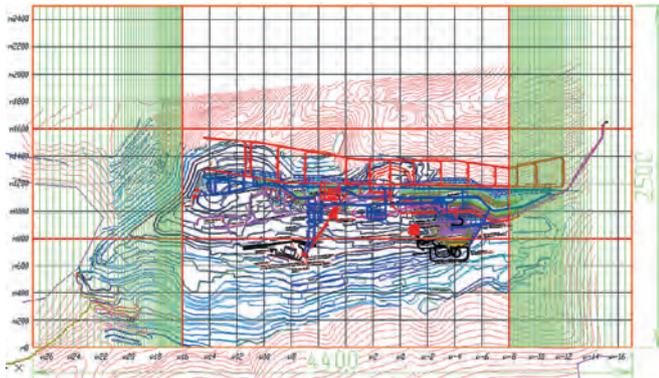


Рис. 1
Линейные параметры модели и зоны максимального сгущения элементов (выделены красными линиями)

Fig. 1
Linear model parameters and areas of maximum densification of elements (marked with red lines)

Таким образом, модель содержит 581 вертикальное сечение, в каждом из которых более 25 000 узлов. В целом размерность модели составила более 15 млн узлов и элементов. 3D-вид разработанной модели представлен на рис. 2.

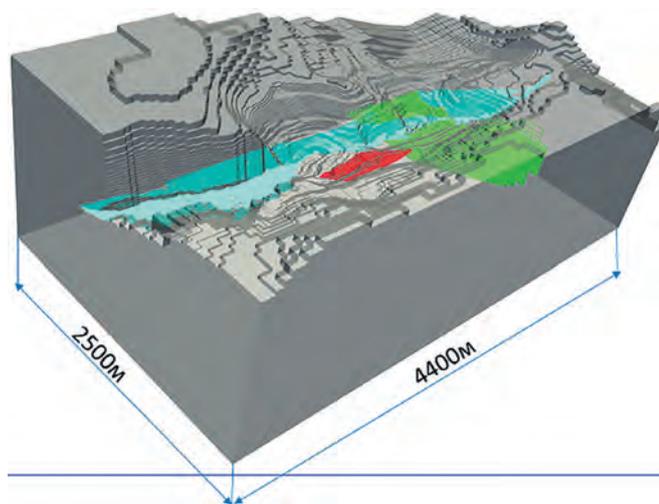


Рис. 2
3D вид модели месторождения

Fig. 2
A 3D view of the deposit model

Графики задания сил на границах модели и их изменение с глубиной представлены на рис. 3. Они построены на основе данных натурных измерений напряжений.

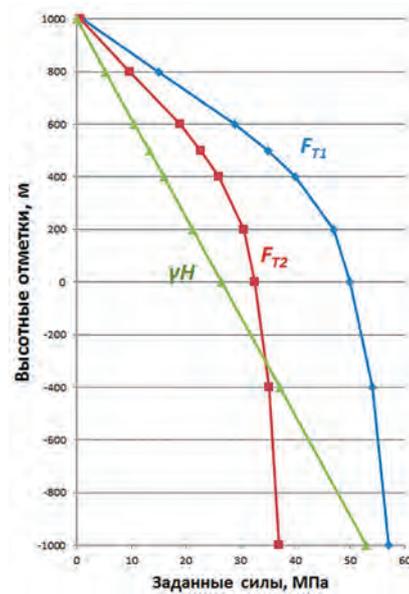


Рис. 3
Графики задания сил на границах исходной модели: F_{T1} и F_{T2} – тектонические (горизонтальные) силы; γH – действие гравитационных сил, определяемых собственным весом пород

Fig. 3
Plots of the forces set at the boundaries of the original model: F_{T1} and F_{T2} – tectonic (horizontal) forces; γH – action of the gravitational forces defined by the proper weight of the rocks

Анализ данных моделирования

Результаты приведенных выше данных измерений напряжений натурными методами использованы для верификации разработанной модели. Получена хорошая сходимость как по значениям главных напряжений, так и по направлению действия их векторов. Вид модели в разрезе с данными расчетов начального поля напряжений представлены на рис. 4.

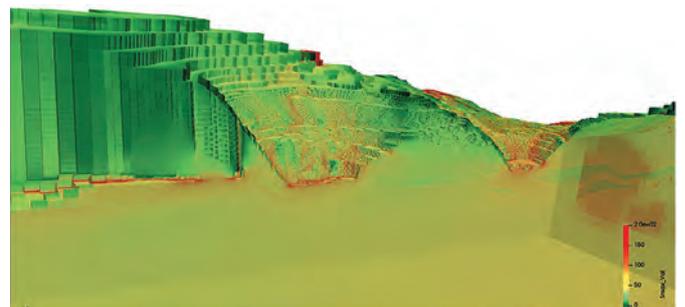


Рис. 4
3D-модель месторождения в разрезе по простиранию рудной залежи с распределением σ_{max} в окрестности фактических горных работ

Fig. 4
A cross-sectional 3D model of the deposit along the strike of the ore lode with the distribution of σ_{max} in the vicinity of the actual mining operations

Особенности в распределение напряжений вносит сложный естественный рельеф поверхности, который дополняется техногенным (карьер). В условиях действия тектонических напряжений зоны концентраций σ_{max} формируются под дном карьерной выемки с переориентировкой векторов на определенных участках.

Как показали расчеты, Восточный участок, где планируется отработка прибортовых запасов, характеризует-

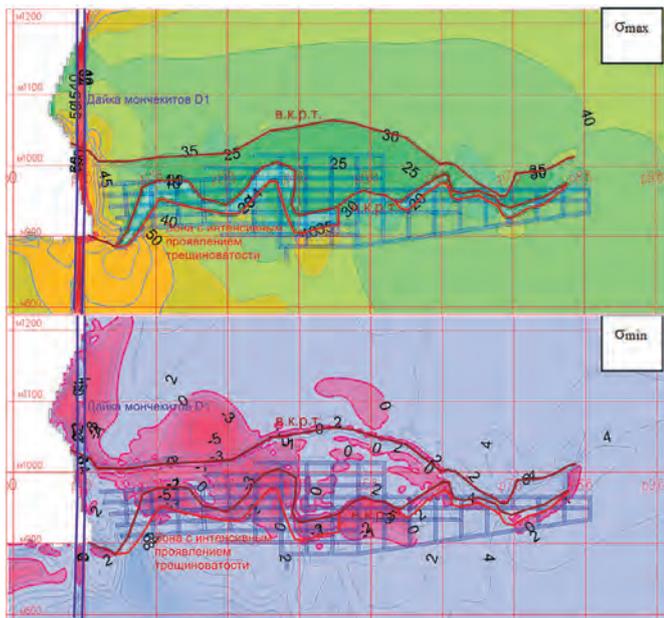


Рис. 5
Распределение главных напряжений на восточном участке месторождения в зоне отработки прибортовых запасов по одному из горизонтов

Fig. 5
Distribution of the principal stresses within the eastern block of the deposit in the zone of near-edge reserves mining in one of the levels

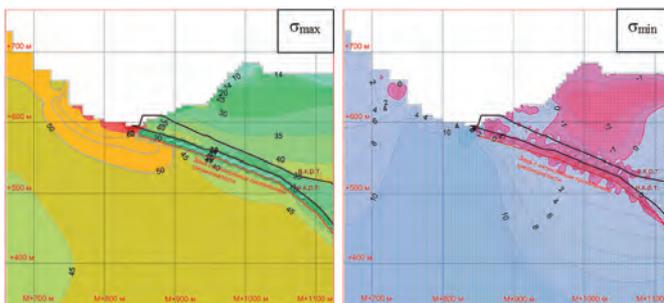


Рис. 6
Распределение главных напряжений на восточном участке по разрезу вкрест простирания рудной залежи

Fig. 6
Distribution of the principal stresses within the eastern block of the deposit across the strike of the ore lode

ся высокой анизотропией поля напряжений (рис. 5), т.е. существенным отличием компонент σ_{\max} , $\sigma_{\text{ср}}$, σ_{\min} друг от друга, что предопределяет создание классических для Хибинских месторождений условий разрушения выработок в зонах концентрации напряжений с формированием нарушенных зон в основном в кровле. Неоднородности поля напряжений по всем трем компонентам приурочены к борту карьерной выемки и промоделированным структурным неоднородностям как к ослабленным зонам, так и к мончегитовой дайке. Минимальная компонента на высотных отметках выше +500 м характеризуется выраженными зонами растягивающих напряжений, что объясняется их небольшой удаленностью от дневной поверхности и сви-

Список литературы

1. Shabarov A.N., Kuranov A.D., Kiselev V.A. Assessing the zones of tectonic fault influence on dynamic rock pressure manifestation at Khibiny deposits of apatite-nepheline ores. *Eurasian Mining*. 2021;36(2):3–7. <https://doi.org/10.17580/em.2021.02.01>
2. Турчанинов И.А., Марков Г.А., Иванов В.И., Козырев А.А. *Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок*. Л.: Наука; 1978. 256 с.

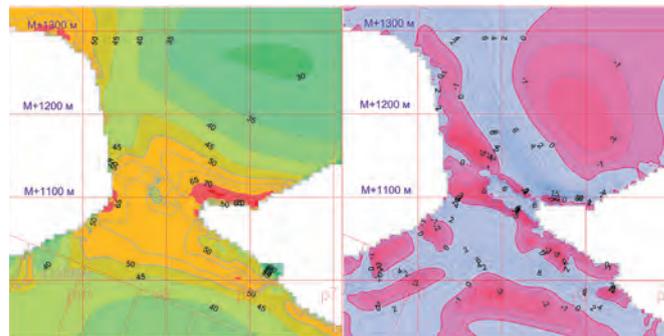


Рис. 7
Распределение главных напряжений в центральном районе месторождения между двумя чашами карьера

Fig. 7
Distribution of the principal stresses in the central part of the deposit between the two pit bowls

детельствует о создании условий планомерного обрушения подработанной толщи пород до дневной поверхности при развитии подземных горных работ (рис. 6).

Результаты, полученные для центрального участка, расположенного между двумя чашами карьера, свидетельствуют, что здесь работы будут вестись по сути в целике. То есть будут иметь место более сложные геомеханические условия с высоким фоновым уровнем сжимающих напряжений $\sigma_{\max} \approx 50$ МПа и концентрацией у бортов карьера, особенно у выступающей части борта восточной чаши, где σ_{\max} достигает 80 МПа и более (рис. 7).

Понятно, что в настоящее время в связи с небольшим количеством пройденных выработок параметры НДС существенной части моделируемого массива недостаточно изучены, однако выявленные особенности уже позволяют повысить уровень обоснованности технических решений по развитию горных работ и разработке профилактических мероприятий по обеспечению устойчивости элементов системы разработки.

Численная модель вместе с ПО установлена на компьютеры службы прогноза и предупреждения горных ударов рудника и используется при текущем и перспективном планировании горных работ. По мере получения новых геологических и геомеханических данных модель при необходимости может корректироваться.

Выводы

Таким образом, разработанная численная геомеханическая 3D-модель позволила провести оценку и прогноз НДС массива в окрестности перспективного участка отработки Хибинской апатитовой дуги. В результате выделены потенциально опасные зоны как по проявлениям горного давления в динамической форме, так и по возможным разрушениям нединамического характера в областях критических растягивающих напряжений и деформаций.

Горное предприятие обеспечено инструментом текущего и перспективного прогноза геомеханической ситуации, что является необходимой составляющей планирования горных работ на месторождениях склонных и опасных по горным ударам.



3. Каспарьян Э.В., Кузнецов Н.Н., Шоков А.Н., Пак А.К. Исследование условий динамических разрушений в массивах скальных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(4):69–84. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-4-0-69-84>
4. Айнбиндер И.И., Пацкевич П.Г., Красюкова Е.В., Аверин А.П. Обоснование стратегии поддержания устойчивости подземных горных выработок в условиях действующих повышенных анизотропных напряжений. *Горный журнал*. 2022;(1):34–40. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.01.06>
5. Xie H., Li C., Gao M., Zhang R., Gao F., Zhu J. (). Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao / Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2021;40(2):217–232. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2020.0317>
6. Galchenko Y.P., Eremenko V.A., Kosyreva M.A., Vysotin N.G. Features of secondary stress field formation under anthropogenic change in subsoil during underground mineral mining. *Eurasian Mining*. 2020;(1):9–13. <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.02>
7. Wojtecki Ł., Konicek P., Mendecki M.J., Gołda I., Zuberek W.M. Geophysical evaluation of effectiveness of blasting for roof caving during longwall mining of coal seam. *Pure and Applied Geophysics*, 2020;177(2):905–917. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02321-1>
8. Ерёмченко А.А., Конурин А.И., Штирц В.А., Приб В.В. Выявление зон повышенного горного давления на удароопасном железорудном месторождении. *Горный журнал*. 2020;(1):78–81. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.15>
9. Семенова И.Э., Аветисян И.М., Земцовский А.В. Геомеханическое обоснование отработки запасов глубокого горизонта в сложных горно-геологических и геодинамических условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(12):65–73. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-65-73>
10. Дарбинян Т.П., Муштекемов Т.С., Цымбалов А.А., Плешко М.С. Оценка напряженно-деформированного состояния породного массива и крепи сверхглубоких выработок рудника «Скалистый» с учетом технологического фактора. *Горный журнал*. 2023;(1):113–118. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.19>
11. Рыльникова М.В., Есина Е.Н., Овчаренко О.В. Геотехнологические и геомеханические особенности отработки междукамерных целиков на Коробковском месторождении железных руд. *Горный журнал*. 2020;(1):109–114. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.22>

References

1. Shabarov A.N., Kuranov A.D., Kiselev V.A. Assessing the zones of tectonic fault influence on dynamic rock pressure manifestation at Khibiny deposits of apatite-nepheline ores. *Eurasian Mining*. 2021;36(2):3–7. <https://doi.org/10.17580/em.2021.02.01>
2. Turchaninov I.A., Markov G.A., Ivanov V.I., Kozyrev A.A. *Tectonic stresses in the earth's crust and stability of mine workings*. Leningrad: Nauka; 1978. 256 p. (In Russ.)
3. Kasparyan E.E., Kuznetsov N.N., Shokov A.N., Pak A.K. Dynamic failure conditions in strong rock masses. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(4):69–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-4-0-69-84>
4. Aynbinder I.I., Patskevich P.G., Krasnyukova E.V., Averin A.P. Justification of stability strategy for underground mine openings under higher effective anisotropic stresses. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(1):34–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.01.06>
5. Xie H., Li C., Gao M., Zhang R., Gao F., Zhu J. (). Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao / Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2021;40(2):217–232. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2020.0317>
6. Galchenko Y.P., Eremenko V.A., Kosyreva M.A., Vysotin N.G. Features of secondary stress field formation under anthropogenic change in subsoil during underground mineral mining. *Eurasian Mining*. 2020;(1):9–13. <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.02>
7. Wojtecki Ł., Konicek P., Mendecki M.J., Gołda I., Zuberek W.M. Geophysical evaluation of effectiveness of blasting for roof caving during longwall mining of coal seam. *Pure and Applied Geophysics*, 2020;177(2):905–917. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02321-1>
8. Eremenko A.A., Konurin A.I., Shtirts V.A., Prib V.V. Identification of higher rock pressure zones in rockburst-hazardous iron ore deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):78–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.15>
9. Semenova I.E., Avetisyan I.M., Zemtovskiy A.V. Geomechanical modeling of deep-level mining under difficult geological and geodynamic conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(12):65–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-65-73>
10. Darbinyan T.P., Mushtekemov T.S., Tsymbalov A.A., Pleshko M.S. Stress–strain behavior assessment in rock mass and mine support systems on super deep levels in Skalisty Mine with regard to technology factor. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(1):113–118. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.19>
11. Rylnikova M.V., Esina E.N., Ovcharenko O.V. Geomechanical and geotechnical features of rib pillar extraction in the Korobkovo iron ore deposit. 2020;(1):109–114. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.22>

Информация об авторах

Семенова Инна Эриковна – кандидат технических наук, зав. лабораторией прогноза удароопасности рудных месторождений, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: i.semenova@ksc.ru

Аветисян Иван Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

Information about the authors

Inna E. Semenova – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Sector of Prediction of rockburst hazard of rock deposits, Mining Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: i.semenova@ksc.ru

Ivan M. Avetisyan – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Associate, Mining Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

Article info

Received: 21.02.2023

Revised: 15.03.2023

Accepted: 19.03.2023

Информация о статье

Поступила в редакцию: 21.02.2023

Поступила после рецензирования: 15.03.2023

Принята к публикации: 19.03.2023