



О механизмах разрушения массива горных пород и закономерностях формирования опасных зон в окрестности элементов горной технологии

И.Э. Семенова✉, О.Г. Журавлева, С.А. Жукова

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

Резюме: В статье представлено обобщение результатов многолетних исследований по проблеме формирования опасных зон при ведении горных работ для природно-технической системы Хибин. Определены основные механизмы разрушения массива горных пород и закономерности формирования трех типов опасных зон в окрестности элементов горной технологии с учетом параметров техногенного поля напряжений, структурных неоднородностей и свойств пород. Выявлены зоны высокой вероятности возникновения наиболее опасных геодинамических явлений, реализующихся вследствие активизации разломов и подвижек по ним структурных блоков; зоны, где динамические события, реализуются в непосредственной близости от фронта горных работ или в целиках на фоне концентрации сжимающих напряжений, уровень которых приближается или превышает предел прочности пород на сжатие; зоны, в которых происходят сейсмические события в подработанных породах, сопровождающие процессы формирования и развития трещин отрыва в консольных зависаниях. Предложены варианты прогноза и локализации каждого из типов зон повышенной геодинамической активности.

Ключевые слова: удароопасность, горный удар, техногенное землетрясение, индуцированная сейсмичность, мониторинг, Хибинский массив, напряженно-деформированное состояние, механизмы разрушения, горные работы

Для цитирования: Семенова И.Э., Журавлева О.Г., Жукова С.А. О механизмах разрушения массива горных пород и закономерностях формирования опасных зон в окрестности элементов горной технологии. *Горная промышленность*. 2023;(S1):69–74. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-69-74>

On rock mass fracture mechanisms and patterns of hazardous zone formation in vicinity of mining technology elements

I.E. Semenova✉, O.G. Zhuravleva, S.A. Zhukova

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

Abstract: The article presents a summary of perennial research results regarding the issue of hazardous zone formation during mining operations in the Khibiny natural and technological system. The fundamental mechanisms of rock mass failure and regularities of formation of three types of hazardous zones in vicinity of mining technology elements have been determined with consideration of the man-made stress field parameters, structural heterogeneities and rock properties. Zones of high occurrence probability of the most hazardous geodynamic phenomena are identified which develop as a result of fault activation and movements of structural blocks along these faults; zones where dynamic events occur in immediate proximity from the excavation front or inside the pillars in conditions of compressive stresses concentration, which level approaches or exceeds the limit of the rocks compressive strength; zones where seismic events occur in the undermined rocks accompanying formation and development of ruptures in the hang-ups. Options are proposed for prediction and localization of each type of high geodynamic activity zones.

Keywords: rockburst hazard, rockburst, man-made earthquake, induced seismicity, monitoring, Khibiny rock mass, stress-and-strain state, failure mechanisms, mining operations

For citation: Semenova I.E., Zhuravleva O.G., Zhukova S.A. On rock mass fracture mechanisms and patterns of hazardous zone formation in vicinity of mining technology elements. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):69–74. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-69-74>



Введение

Интенсивное ведение крупномасштабных горных работ на месторождениях с выраженным гравитационно-тектоническим типом напряженно-деформированного состояния (НДС) существенно трансформирует исходное поле напряжений массива горных пород и может приводить к реализации горных ударов. Эта проблема остается актуальной для многих рудников мира [1–5]. Не являются исключением и тектонически напряженные Хибинский и Ловозерский массивы, где ведение горных работ сопровождается проявлениями горного давления в динамической форме.

Закономерности формирования опасных зон в окрестности горных работ, проводимых в Кольском регионе, максимально изучены для Хибинского массива, где в течение нескольких десятилетий ведется исследование геологического строения, геодинамических особенностей, свойств горных пород и руд, параметров естественного и техногенного полей напряжений, а также миграции зон сейсмической активности. Определяющий вклад в исследование геомеханических условий и параметров поля напряжений на Хибинских апатитовых месторождениях внесли ученые Горного института КНЦ РАН [6; 7].

При изучении проблемы реализации опасных геодинамических явлений различного масштаба вследствие постоянного перераспределения напряжений в зоне ведения горных работ устоявшимся подходом стало рассмотрение массива горных пород как дискретной среды с внутренней структурой, обладающей блоковыми свойствами [8; 9]. Границы блоков в массиве определяются разломами, трещинами, ослабленными зонами. Потеря устойчивости блоком (или блоками) сопровождается значительным сейсмическим эффектом, масштаб которого пропорционален масштабу блока.

Из-за особенностей блочного строения, наличия высоких тектонических напряжений, прочных хрупких пород на Хибинских месторождениях с 1960-х–1970-х годов фиксируются динамические формы проявлений горного давления, что предопределило их отнесение к склонным и опасным по горным ударам. В результате многолетних техногенных воздействий при отработке апатит-нефелиновых месторождений к настоящему времени в пределах шахтных полей рудников произошло частичное разрушение горных пород в тектонических нарушениях глубокого заложения, пересекающих горные выработки. Также в последнее десятилетие увеличилась частота мощных сейсмических событий в глубине массива горных пород.

В связи с этим определение и изучение механизмов разрушения массива горных пород и закономерностей формирования опасных зон в окрестности элементов горной технологии для природно-технической системы апатитовой дуги Хибин является актуальной задачей.

Объект исследований

Хибинский массив расположен в центральной части Кольского полуострова. Наиболее крупные залежи апатит-нефелиновых руд сосредоточены в его юго-западной части и образуют единое тело. Общая длина залежи составляет 12 км, мощность от 10 до 215 м. В плане рудное тело имеет форму дуги [10; 11].

В тектоническом отношении Кольский полуостров является восточной, самой древней частью Балтийского щита. Природные землетрясения на Кольском полуострове связаны с современными движениями земной коры. В целом

сейсмический режим на территории региона оценивается как стабильно невысокий [12], при этом наибольшее число природных и природно-техногенных землетрясений происходит в районах с развитой горнодобывающей промышленностью.

Взаимное смещение и деформирование блоков определяют напряженное состояние массива горных пород. Естественное поле напряжений в области разрабатываемых месторождений полезного ископаемого – это результат взаимодействия всех элементов блочной структуры.

Геодинамический режим в зоне производственной деятельности апатитовых рудников определяют как природные факторы (действие в массиве тектонических напряжений), так и техногенные (подработка породного массива открытыми и подземными горными работами, изменение рельефа поверхности, образование насыпных отвалов с отходами обогатительного и горного производств, а также проведение взрывных работ, изменение гидрогеологического режима подземных вод и др.). Многолетние масштабные воздействия техногенных факторов привели к снижению устойчивости системы природных блоков и увеличению уровня сейсмичности на исследуемых месторождениях, и в том числе удароопасности подземных рудников.

К настоящему времени в отделе геомеханики ГоИ КНЦ РАН сложилось следующее представление о причинах и механизмах реализации проявлений горного давления в динамической форме: вследствие активизации существующих разломов и реализации подвижек по ним структурных блоков; в результате развития и лавинно-неустойчивого слияния техногенных трещин в новые крупные разрывы или разрушения барьеров между сближенными очистными пространствами или разломами, или между очистным пространством и разломом; в процессе формирования трещин отрыва в подработанном массиве пород всяческого бока. Анализ мощных сейсмических событий последних лет позволяет выделить опасные зоны, формирование которых происходит по одному из трех сценариев.

Геодинамические явления вследствие активизации разломов

К геодинамическим явлениям вследствие активизации существующих разломов и реализации подвижек по ним структурных блоков относятся наиболее опасные и трудно прогнозируемые сейсмические события, которые происходят с периодичностью 5–10 и более лет. В качестве примеров можно привести мощные геодинамические явления, произошедшие в Хибинском массиве в разные годы: техногенные землетрясения в апреле 1989 г. (магнитуда $M \approx 4.2$) [13], в октябре 2010 г. ($M = 3.5$) [14], а также горно-тектонический удар 09.01.2018 ($M = 3.3$) [15].

Гипоцентры этих событий находились на удалении от фронта горных работ в лежачем боку рудной залежи. Как правило, зоны сейсмической активности в случае реализации таких событий приурочены к геодинамически активным разломным структурам. В рассматриваемых случаях зоны сейсмической активности формировались:

– в 1989 г. – в районе разлома 5-го ранга, выполненного жилой эгирина мощностью 15–20 см; проявления отмечены на горизонтах +322 м, +252 м, +172 м;

– в 2010 г. – вблизи конического разлома; нарушения, зафиксированы отслоения бетонной и набрызг-бетонной крепи в выработках лежачего бока на горизонтах +250 м, 170 м, +90 м;



– в 2018 г. – в зоне, ограниченной разломами мощностью до 10 м, выполненными шпреуштейнизированными породами, трещины образованы в бетонном основании подошвы в выработках лежачего бока на горизонтах +530 м, +470 м, +450 м, +425 м протяженностью более 150 м.

Если уточнять механизм мощных сейсмических событий такого рода, то они реализуются в виде взброса по имеющимся структурным нарушениям в подстилающих породах лежачего бока за счет частичного снятия вертикальной нагрузки, роста величин касательных напряжений (τ_{max}) вплоть до критических и совпадения площадок действия τ_{max} с ориентацией в пространстве геодинамически активной разломной структуры.

Триггером мощного динамического явления на фоне достижения массивом горных пород предельно неустойчивого состояния может послужить массовый взрыв:

– в 1989 г. техногенное землетрясение произошло практически мгновенно после проведенного массового взрыва с величиной заряда около 200 т взрывчатых веществ, что являлось обычным для отбойки очередного блока руды при применяемой системе разработки [13];

– в 2010 г. взрывание вееров глубоких скважин при торцевом выпуске руды производилось 19 октября на двух участках за два дня до реализации техногенного землетрясения;

– в 2018 г. – на участке, близком к разлому, за несколько часов до реализации мощного события был проведен торцевой взрыв (зарегистрированная сейсмическая энергия также является обычной для регулярно проводимых торцевых взрывов) [15].

Очевидно, что при ведении горных работ взрывное воздействие на массив производится постоянно. И невозможно определить, будет ли очередной взрыв триггером для реализации сейсмического события по разломной структуре и если будет, то какого масштаба событие произойдет. Мы лишь можем констатировать неизбежность ослабления межблоковых связей массива в сочетании с нарушением устойчивости блоков в результате длительных горных работ.

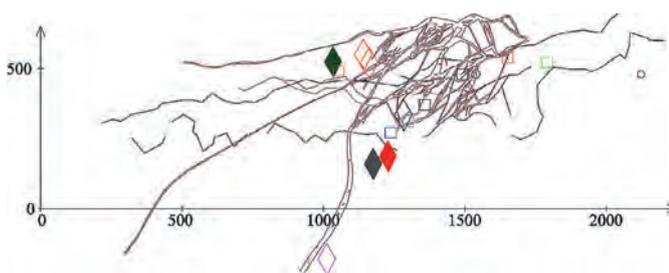


Рис. 1
Местоположение сильных геодинамических явлений на одном из месторождений:
Геодинамические явления:
◆ – горно-тектонический удар;
◇ – горный удар;
□ – микроудар; ○ – толчок;
— – контакты рудного тела;
— – разломные структуры;



Как показала практика ведения горных работ, события с подобным механизмом вызывают наиболее мощный сейс-

мический отклик массива и приводят к серьезным разрушениям горных объектов. Подготовка события данного типа занимает многие годы (не менее 3 лет). Причем интервал между событиями, относящимися к первому типу геодинамических явлений, в значительной мере зависит от интенсивности ведения горных работ и связанной с этим скоростью увеличения объемов очистного пространства. Поэтому при прогнозе зон первого типа на первый план выходят данные по геодинамическому районированию с выделением геодинамически активных разломных структур (рис. 1) и расположению фронта горных работ по отношению к ним.

Геодинамические явления при продвижении фронта горных работ

Ко второму типу геодинамических явлений относятся динамические события, реализующиеся в непосредственной близости от фронта горных работ или в целиках на фоне концентрации сжимающих напряжений, уровень которых приближается или превышает предел прочности пород на сжатие. Целики могут формироваться как между сближающимися фронтами горных работ (при ведении горных работ на уменьшающийся целик), так и при приближении фронта горных работ к разломной структуре. Параметры зон этого типа, в которых с большой вероятностью может произойти сейсмическое событие высокого энергетического уровня, достаточно успешно прогнозируются на основе комплексирования актуальных данных о местоположении структурных нарушений, прогнозных расчетов НДС и карт вероятностей возникновения сильно-го сейсмического события.

Для зон второго типа наиболее эффективной мерой являются региональные разгрузочные мероприятия, которые позволяют в целом снизить уровень действующих напряжений на опасном участке и сократить простои горных работ и дополнительные затраты на крепление и локальные разгрузочные мероприятия в выработках [16].

Примером зоны второго типа является опасный участок массива горных пород одного из месторождений Хибин, на котором было зарегистрировано сильное сейсмическое событие (энергия $\approx 10^6$ Дж). После основного толчка произошла серия афтершоковых сейсмических событий (максимальная энергия $\approx 4,3 \cdot 10^3$ Дж). Высокий уровень сейсмической активности наблюдался в районе продвигающегося фронта работ в подконсольной части покрывающих пород. Примерно за месяц до основного события непосредственно в этом блоке произошли два сильных форшока.

Как видно из рис. 2, рассматриваемый подконсольный участок в районе продвигающегося фронта работ является участком, потенциально опасным по возникновению сильных сейсмических событий. Значения комплексного критерия [17] на рассматриваемом участке достигают 0,6–0,7 (рис. 2, а). В центре выявленной сейсмически опасной области находится большинство событий, на основании которых проводился расчет. На отдельном небольшом участке вблизи геологических нарушений значение комплексного критерия достигает 0,8. Из данных рис. 2, б видно, что сильное сейсмическое событие произошло вблизи области максимальных значений комплексного критерия, рассчитанных за несколько часов до реализации события. Это соответствует известному в сейсмологии эффекту пространственной сепарации сейсмических событий по их энергии, или эффекту сепарации: наиболее значительные сейсмические события зачастую возникают не в центре облака



слабых событий, а располагаются в периферических частях. Такое явление наблюдается как в естественной сейсмичности, так и в техногенной [18].

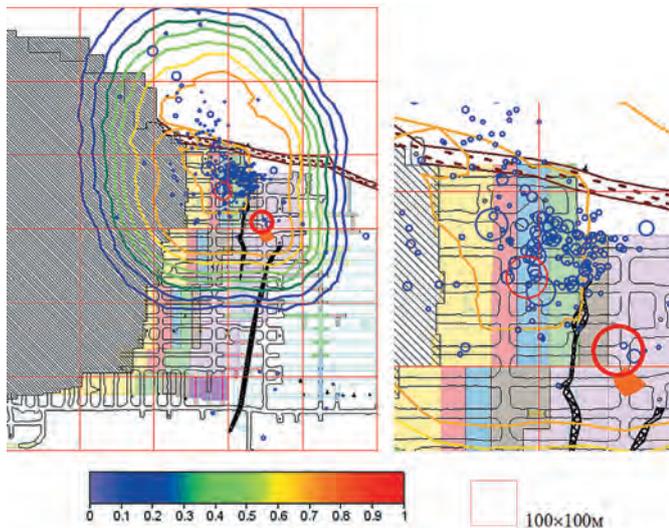


Рис. 2
Распределение значений комплексного критерия (изолинии), местоположение основного сейсмического события вблизи максимальных значений комплексного критерия
● – сейсмические события 10^3 – 10^5 Дж;
○ – сейсмические события от 10^6 Дж и выше.
// – разломные структуры;
■ – очистное пространство;
■ – область максимальных значений комплексного критерия

Fig. 2
Distribution of the complex criterion (isoline) values, location of the main seismic event near the maximum values of the complex criterion
● – seismic events of 10^3 – 10^5 J;
○ – seismic events of 10^6 J and above.
// – fault structures;
■ – stopping zone;
■ – zone of the maximum values of the complex criterion

Геодинамические явления в подработанной толще пород

К третьему типу относятся сейсмические события в подработанной толще пород, сопровождающие процессы формирования и развития трещин отрыва в консольных зависаниях. Соответствующие зоны динамической активности несут меньшую опасность для людей и оборудования в горных выработках при создании условий по обеспечению плановости обрушения подработанного массива. Предвестником повышенного уровня опасности в данных зонах может являться продолжительное затишье, которое свидетельствует о замедлении процессов трещинообразования в налегающем массиве и формировании значительных по объемам консольных зависаний. В дальнейшем это может привести к стремительному трещинообразованию и обрушению пород консоли.

В качестве негативного примера развития событий можно привести многолетнее ведение горных работ от двух разрезов с постепенным формированием блока-целика. В центральной части месторождения образовалось существенное консольное зависание (рис. 3), процессы разрушения которого резко активизировались при отработке блока-целика и стыковочной секции, соответственно, был зафиксирован существенный рост сейсмичности [19]. Сильные сейсмические события на этом участке при формировании обрушения консоли происходили практически

ежедневно, суммарное число событий, произошедших в этот период обрушения, стало максимальным за весь период наблюдений.

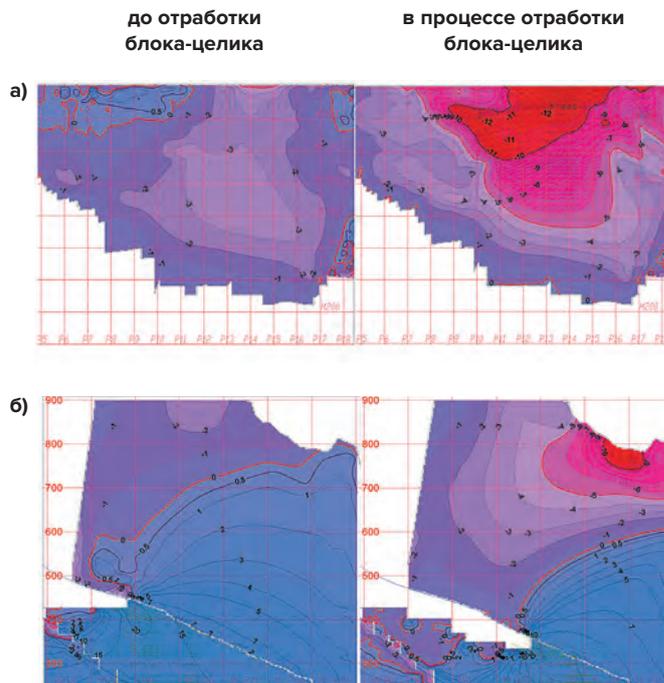


Рис. 3
Распределение σ_{\min} в подработанном массиве:
а – непосредственно под дневной поверхностью;
б – по разрезу вкострости рудной залежи

Fig. 3
Distribution of σ_{\min} with in the undermined rock mass:
а – immediately below the daytime surface;
б – along the section across the strike of the ore deposit

Прогноз местоположения зон третьего типа можно осуществлять на основе комплексирования картин распределения критических растягивающих напряжений σ_{\min} в подработанном массиве, текущих и прогнозных карт оценки уровня сейсмической активности, дополняя их характеристиками трещиноватости пород.

Заключение

Обобщение результатов многолетних исследований позволило выявить основные механизмы разрушения массива горных пород и закономерности образования трех типов опасных геодинамических явлений, которые формируются в различных зонах: в окрестности элементов горной технологии с учетом параметров техногенного поля напряжений, структурных неоднородностей и свойств пород. Установлены три основных типа таких зон для условий Хибинского массива:

1. Зоны высокой вероятности возникновения наиболее опасных геодинамических явлений, реализующихся вследствие активизации разломов и подвижек по ним структурных блоков.

2. Зоны, где динамические события реализуются в непосредственной близости от фронта горных работ или в целиках на фоне концентрации сжимающих напряжений, уровень которых приближается или превышает предел прочности пород на сжатие.



3. Зоны, в которых происходят сейсмические события в подработанных породах, сопровождающие процессы формирования и развития трещин отрыва в консольных зависаниях.

В основу оценки состояния массива горных пород может быть положено выявление комплекса факторов, влияющих на состояние массива, т.е. на динамику сейсмичности. В первом приближении варианты прогноза локализации каждого из типов зон повышенной геодинамической активности могут быть следующими:

1. Выявление особенностей геологического строения массива: детальное изучение разрывных структур с выделением сейсмически активных элементов.

2. Определение сейсмоопасных участков шахтного поля рудника (например, проведение расчета значений комплексного критерия и вероятности обнаружения сильного события).

3. Определение зон повышенной концентрации напряжений σ_{\max} (например, расчет значений НДС массива горных пород в программе Sigma GT, разработанной в ГоИ КНЦ РАН).

4. Анализ технологических взрывов, произведенных в районе сейсмоопасного участка, на основе данных о регистрации взрывов системами сейсмического мониторинга.

5. Сопоставление полученной информации, формулировка выводов и рекомендаций. В дальнейшем возможно выставление баллов для каждого из четырех вышеперечисленных факторов и определение итогового уровня опасности для конкретного участка массива.

Применение указанных подходов позволяет на практике провести оперативный сравнительный анализ влияния определенных факторов опасности – как по отдельности, так и в совокупности, а также подготовить рекомендации по ведению горных работ, в том числе по определению необходимых профилактических мероприятий.

Список литературы

1. Askaripour M., Saeidi A., Rouleau A., Mercier-Langevin P. Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods. *Underground Space*. 2022;7(4):577–607. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.11.008>
2. Mazaira A., Konicek P. Intense rockburst impacts in deep underground construction and their prevention. *Canadian Geotechnical Journal*. 2015;52(10):1426–1439. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0359>
3. Hudyma M., Brown L., Cortolezzis D. *Seismic risk in Canadian mines*. CIM MEMO; 2016. 14 p.
4. Gibowicz S., Lasocki S. Seismicity induced by mining: Ten years later. *Advances in Geophysics*. 2001;44:39–183. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(00\)80007-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(00)80007-2)
5. Kozłowska M., Orlecka-Sikora B., Dineva S., Rudzinski L., Boskovic M. What governs the spatial and temporal distribution of aftershocks in mining-induced seismicity: insight into the influence of coseismic static stress changes on seismicity in Kiruna Mine, Sweden. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2021;111(1):409–423. <https://doi.org/10.1785/0120200111>
6. Мельников Н.Н. (ред.) *Сейсмичность при горных работах*. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН; 2002. 325 с.
7. Козырев А.А., Панин В.И., Семенова И.Э., Журавлева О.Г. О геодинамической безопасности горных работ в удароопасных условиях на примере Хибинских апатитовых месторождений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2018;(5):33–44. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20180504>
8. Каспарьян Э.В., Федотова Ю.В., Кузнецов Н.Н. Развитие представлений о естественном напряженном состоянии массивов скальных пород. *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2019;(3):65–79. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.3.65-79>
9. Козырев А.А., Савченко С.Н., Панин В.И., Семенова И.Э., Рыбин В.В., Федотова Ю.В. и др. *Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками*. Апатиты: КНЦ РАН; 2019. 431 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.391.7>
10. Онохин Ф.М. *Особенности структур Хибинского массива и апатит-нефелиновых месторождений*. Л.: Наука; 1975. 105 с.
11. Зак С.И., Каменев Е.А., Минаков Ф.В. и др. *Хибинский щелочной массив*. Л.: Недра, 1972. 176 с.
12. Виноградов Ю.А., Асминг В.Э., Кременецкая Е.О., Жиров Д.В. Современная сейсмичность на территории Мурманской области и ее проявление в горнопромышленных зонах. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2016;(1):62–70.
13. Сырников Н.М., Тряпицын В.М. О механизме техногенного землетрясения в Хибинах. Доклады Академии наук СССР. 1990;314(4):830–833. Режим доступа: <https://www.mathnet.ru/links/60295dd4b2e15c8db3c78a40004057c2/dan48980.pdf>
14. Баранов С.В., Виноградов А.Н., Николаева С.Б., Петров С.И. Сейсмичность Кольского полуострова по инструментальным данным. В кн.: *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы 6-й Междунар. сейсмологической школы, г. Апатиты, 15–19 августа 2011 г.* Обнинск: Геофизическая служба РАН; 2011. С. 47–51.
15. Козырев А.А., Семенова И.Э., Журавлева О.Г., Пантелеев А.В. Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(12):74–83. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83>
16. Семенова И.Э., Журавлева О.Г., Жукова С.А. Сейсмичность как отражение изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород в процессе ведения горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(6):46–58. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_6_0_46
17. Козырев А.А., Онуприенко В.С., Жукова С.А., Журавлева О.Г. Развитие инструментального и методического обеспечения контроля наведенной сейсмичности на Хибинских апатит-нефелиновых месторождениях. *Горный журнал*. 2020;(9):19–26. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.02>
18. Виноградов С.Д., Пономарев В.С. Экспериментальное изучение сейсмического режима. *Природа*. 1999;(3):77–89.
19. Семенова И.Э., Жукова С.А., Журавлева О.Г. Развитие зон сейсмической активности в подработанной толще пород при комбинированной отработке месторождений Кировского рудника. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(6):104–111. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220611>



References

1. Askaripour M., Saeidi A., Rouleau A., Mercier-Langevin P. Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods. *Underground Space*. 2022;7(4):577–607. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.11.008>
2. Mazaira A., Konicek P. Intense rockburst impacts in deep underground construction and their prevention. *Canadian Geotechnical Journal*. 2015;52(10):1426–1439. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0359>
3. Hudyma M., Brown L., Cortolezzis D. Seismic risk in Canadian mines. CIM MEMO; 2016. 14 p.
4. Gibowicz S., Lasocki S. Seismicity induced by mining: Ten years later. *Advances in Geophysics*. 2001;44:39–183. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(00\)80007-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(00)80007-2)
5. Kozłowska M., Orlecka-Sikora B., Dineva S., Rudzinski L., Boskovic M. What governs the spatial and temporal distribution of aftershocks in mining-induced seismicity: insight into the influence of coseismic static stress changes on seismicity in Kiruna Mine, Sweden. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2021;111(1):409–423. <https://doi.org/10.1785/0120200111>
6. Melnikov N.N. (ed.) *Seismic activity during mining works*. Apatity: Kola Scientific Center of Russian Academy of Sciences; 2002. 325 p. (In Russ.)
7. 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. <https://doi.org/10.1134/S1062739118054832>
8. Kasparyan E.V., Fedotova I.V., Kuznetsov N.N. Development of conceptions about the natural stress state of hard rock massifs. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*. 2019;(3):65–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.3.65-79>
9. Kozyrev A.A., Savchenko S.N., Panin V.I., Semenova I.E., Rybin V.V., Fedotova Yu.V. et al. *Geomechanical processes in geological environment of mining systems and geodynamic risk management*. Apatity: Kola Scientific Center of Russian Academy of Sciences; 2019. 431 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.391.7>
10. Onokhin F.M. *Specific structural features of the Khibiny rock mass and apatite-nepheline deposits*. Leningrad: Nauka; 1975. 105 p. (In Russ.)
11. Zak S.I., Kamenev E.A., Minakov F.V. et al. *The Khibiny alkaline rock mass*. Leningrad: Nauka; 1972. 176 p. (In Russ.)
12. Vinogradov Y.A., Kremenetskaya E.O., Asming V.E., Zhirov D.V. Modern seismicity in mining areas in the Murmansk region. *Journal of Mining Science*. 2016;52(1):46–52. <https://doi.org/10.1134/S1062739116010113>
13. Syrnikov N.M., Tryapitsyn V.M. Regarding the mechanism of a mining-induced earthquake in the Khibiny. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1990;314(4):830–833. (In Russ.) Available at: <https://www.mathnet.ru/links/60295dd4b2e15c8db3c78a40004057c2/dan48980.pdf>
14. Baranov S.V., Vinogradov A.N., Nikolaeva S.B., Petrov S.I. Seismicity of Kola Peninsula according to instrumental data. In: *Modern methods of processing and interpretation of seismological data: Proceedings of the 6th International Seismological School, Apatity, August 15–19, 2011*. Obninsk: Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences; 2011, pp. 47–51. (In Russ.)
15. Kozyrev A.A., Semenova I.E., Zhuravleva O.G., Panteleev A.V. Hypothesis of strong seismic event origin in rasvumchorr mine on January 9, 2018. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(12):74–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83>
16. Semenova I.E., Zhuravleva O.G., Zhukova S.A. Seismicity as an echo of stress-strain behavior change in rock mass in the course of mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(6):46–58. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_6_0_46
17. Kozyrev A.A., Onuprienko V.S., Zhukova S.A., Zhuravleva O.G. Induced seismicity of rock mass: development of instrumental and methodological support to control seismicity at the Khibiny apatite-nepheline deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(9):19–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.02>
18. Vinogradov S.D., Ponomarev V.S. Experimental studies of seismic modes. *Priroda*. 1999;(3):77–89. (In Russ.)
19. Semenova I.E., Zhukova S.A., Zhuravleva O.G. Development of seismic activity zones in undermined rock mass in hybrid opencast/underground mining in Kirov mine. *Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2022;(6):104–111. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRP120220611>

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

Журавлева Ольга Геннадьевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории прогноза удароопасности рудных месторождений, отдел геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: o.zhuravleva@ksc.ru

Жукова Светлана Александровна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории прогноза удароопасности рудных месторождений, отдел геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: svetlana.zhukowa@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 28.02.2023

Поступила после рецензирования: 15.03.2023

Принята к публикации: 21.03.2023

Information about the authors

Inna E. Semenova – Cand. Sci. (Eng.), Chief of Laboratory 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

Olga G. Zhuravleva – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Prediction of Rockburst Hazard of Rock Deposits, Rock Mechanics Department, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: o.zhuravleva@ksc.ru

Svetlana A. Zhukova – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Prediction of Rockburst Hazard of Rock Deposits, Rock Mechanics Department, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: svetlana.zhukowa@yandex.ru

Article info

Received: 28.02.2023

Revised: 15.03.2023

Accepted: 21.03.2023