

Выявление периодов неустойчивости при формировании обрушений подработанной толщи пород в тектонически напряженном Хибинском массиве

О.Г. Журавлева✉, С.А. Жукова

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

Резюме: Статья посвящена исследованию состояния массива горных пород на основе оценки количественных параметров сейсмического процесса в подработанной толще пород. На примере апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива показано, что динамика параметров энергетического индекса и кумулятивного кажущегося объема отражает процессы изменения напряжений в массиве горных пород (в том числе после взрывного воздействия). Определены границы области исследования консольной части массива горных пород на Кукисвумчоррском и Юкспорском месторождениях для исключения данных о сейсмичности, соответствующих районам активного ведения горных работ. Выявлены периоды, характеризующие устойчивое состояние массива, при котором обрушение пород консоли не происходило в периоды, когда активно начинался процесс трещинообразования и обрушения пород консоли. Установлено, что временные вариации кажущегося объема и энергетического индекса могут применяться для оценки состояния массива и потенциальной опасности разрушения его участков. Динамика этих параметров для определенного объема горных пород отражает фазы нагружения и разупрочнения. Результаты исследования получены в самом общем виде и для больших по объему участков массива горных пород, несмотря на это они хорошо коррелируют с данными о фактических обрушениях подработанной толщи пород.

Ключевые слова: сейсмический мониторинг, наведенная сейсмичность, подземные горные работы, процессы обрушения подработанных пород, энергетический индекс, кумулятивный кажущийся объем, апатит-нефелиновые месторождения, Хибинский массив

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №22-17-00248). Авторы выражают огромную благодарность главному инженеру Кировского филиала АО «Апатит» и специалистам службы прогноза и предотвращения горных ударов Кировского филиала АО «Апатит» за предоставление данных сейсмического мониторинга.

Для цитирования: Журавлева О.Г., Жукова С.А. Выявление периодов неустойчивости при формировании обрушений подработанной толщи пород в тектонически напряженном Хибинском массиве. *Горная промышленность*. 2023;(5S):100–106. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-100-106>

Identification of instability periods during formation of undermined rock cavings in the tectonically stressed Khibiny massif

O.G. Zhuravleva✉, S.A. Zhukova

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

Abstract: The article focuses on studying the state of the rock mass based on assessment of quantitative parameters of seismic process in the undermined rock strata. Using the apatite-nepheline deposits of the Khibiny massif as an example, it is demonstrated that the dynamics of the energy index and cumulative apparent volume parameters reflects the processes of stress changes in the rock mass, including the time after the blast impact. Boundaries of the study area in the rock mass overhang at the Kukisvumchorr and Yukspor fields were determined to exclude seismicity data corresponding to the areas of active mining operations. Periods were identified that characterize the stable state of the rock mass, when the overhang rocks do not cave, as well as the periods when the process of fracturing and caving of the overhang rocks starts actively. It was found that temporal variations in the apparent volume and energy index can be used to assess the state of the rock mass and the potential fragmentation danger of its parts. The dynamics of these parameters for a certain volume of rocks reflects the phases of loading and strength degradation. The survey results were obtained in the most general form and for large volume sections of the rock mass, despite the fact that they correlate well with the data on actual caving of the undermined rock strata.

Keywords: seismic monitoring, mining-induced seismicity, underground mining operations, caving of underworked rocks, energy index, cumulative apparent volume, apatite-nepheline deposits, the Khibiny massif

Acknowledgments: This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No.22-17-00248). The authors express their gratitude to the Chief Engineer of the Kirovsk Branch of Apatit JSC and specialists of the Service for Rock Burst Prediction and Prevention of the Kirovsk Branch of Apatit JSC for providing seismic monitoring data.

For citation: Zhuravleva O.G., Zhukova S.A. Identification of instability periods during formation of undermined rock cavings in the tectonically stressed Khibiny massif. *Russian Mining Industry*. 2023;(5S):100–106. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-100-106>

Введение

На сегодняшний день цифровые технологии являются неотъемлемой составляющей при физико-техническом контроле и мониторинге состояния массива горных пород и процессов горного производства [1–4]. Современные программные комплексы сбора, обработки и анализа сейсмических данных позволяют достаточно полно исследовать процессы, происходящие в массиве горных пород из-за постоянного изменения геодинамического режима при ведении горных работ. На повышение сейсмической активности на руднике, как известно [5], влияет множество факторов: ведение крупномасштабных, долговременных горных работ в тектонически напряженном блочном массиве, увеличение объемов добычи полезного ископаемого, переход горных работ на глубокие горизонты и т.д. Сейсмическое воздействие на массив горных пород может приводить к разрушениям выработок и целиков.

Ранее обобщенный анализ данных сейсмического мониторинга на подземных рудниках Хибинского массива сводился к оценке их ограниченного набора параметров. Такими параметрами были: гипоцентр сейсмособытия, т.е. расположение очага в шахтном поле рудника (x, y, z), время его регистрации t и мощность (сейсмическая энергия E). Однако развитие инструментального и методического обеспечения контроля наведенной сейсмичности на Хибинских апатит-нефелиновых месторождениях способствовало увеличению списка определяемых параметров сейсмособытий. С 2012 г. к существующим сейсмоданным добавились: сейсмический момент события, размер и механизм очага, динамический и статический сброс напряжения в очаге, магнитуда, сейсмический момент, рассчитанный по P и S волнам и др. [6], что позволяет более детально проводить анализ сейсмической информации.

Сейсмологический мониторинг на рудниках позволяет получить данные для количественной оценки сейсмической активности и попытаться оценить уровень сейсмической опасности. Целью многих исследований является поиск индикаторов для выявления периодов неустойчивого состояния массива горных пород, т.е. выявление аномалий в пространственно-временном поведении сейсмических параметров, отражающих существенное изменение состояния массива. Цель настоящего исследования – оценка возможности применения критериев энергетического индекса и кумулятивного кажущегося объема для выявления периодов неустойчивости подработанной толщи пород Хибинского массива при формировании ее обрушения на основе данных об очаговых процессах.

Методы исследований

На сегодняшний день существует широкий ряд параметров, которые могут применяться как индикаторы повышенной сейсмической опасности. Широкое применение на рудниках ЮАР [7; 8], а позднее и на ряде рудников мира [9–12] получили параметры энергетический индекс (EI) и кумулятивный кажущийся объем (CAV) [13–15].

Энергетический индекс события (Energy Index, EI) представляет собой отношение наблюдаемой излучаемой сейсмической энергии этого события E к средней энергии E_{av} излучаемой событиями, имеющими такой же сейсмический момент M_0 , и характеризует неоднородность действующих напряжений в массиве горных пород:

$$EI = \frac{E}{E_{av}(M_0)}. \quad (1)$$

Чем выше EI , тем выше напряжение, действующее в источнике события во время его возникновения. Значение $EI > 1$ показывает, что при сейсмическом событии выделяется больше энергии, чем ожидалось, и указывает на увеличение напряжений в массиве горных пород. Значение $EI < 1$ показывает, что при сейсмическом событии высвобождается меньше энергии, чем ожидалось, и можно говорить о релаксации напряжений. Предполагается [15–16], что энергетический индекс события EI уменьшается в периоды неустойчивого состояния массива горных пород.

Кумулятивный кажущийся объем (Cumulative Apparent Volume, CAV) применяется для оценки произошедшей деформации в очаговой области. Определяется как сумма кажущихся объемов V_A для очагов сейсмических событий, расположенных в определенной области массива:

$$V_A = \frac{M_0^2}{2\mu E}, \quad (2)$$

где M_0 – сейсмический момент; E – сейсмическая энергия события; μ – модуль сдвига [13]. Является скалярной величиной, которая измеряет объем породы с косейсмической неупругой деформацией. Высокие значения CAV указывают на ускорение деформационных процессов на участке массива горных пород. Может применяться для оценки сейсмического отклика на проводимые горные работы.

Временные вариации этих параметров отражают физические процессы, а их аномалии указывают на области неустойчивости массива горных пород [16]. Изменения кажущегося объема CAV и энергетического индекса EI могут применяться для выявления периодов неустойчивости массива горных пород и оценки потенциальной опасности

разрушения. Динамика параметров *EI* и *CAV* для определенного объема горных пород отражает фазы нагружения и разупрочнения [8]. Фаза нагружения характеризуется возрастанием *EI* при обычной скорости роста *CAV*. Фаза разупрочнения характеризуется падением *EI* и одновременным ускоряющимся возрастанием *CAV*.

Применение *EI* и *CAV* для оценки состояния массива было предметом значительного числа исследований. Так, например, в работе [9] показано применение параметра *EI* для оценки состояния массива в периоды проведения взрывных работ: изучалась динамика пространственного распределения значений *EI*, которая отражает постепенную концентрацию напряжений вокруг выработанного пространства и увеличение протяженности области высокой концентрации напряжений по мере развития горных работ. В работе [10] представлена оценка прогностических возможностей этих параметров на основе обратного анализа краткосрочных индикаторов сейсмической опасности. Также эти параметры применяются при интерпретации данных сейсмического мониторинга не только в горнодобывающей промышленности, но и в других сферах, например, при эксплуатации гидроэлектростанций [17]. Таким образом, модель поведения этих параметров может иметь хороший потенциал и для применения на Хибинских апатитовых рудниках, в частности, для исследования процессов обрушения подработанных пород.

Объект исследований

Исследуемые Кукисвумчоррское и Юкспорское месторождения апатит-нефелиновых руд расположены в Хибинском массиве, который находится в центре Кольского полуострова. Это один из крупнейших в мире щелочной комплекс нефелиновых сиенитов площадью 1327 км². Для Хибинского массива характерна высокая тектоническая напряженность (горизонтальные напряжения превышают вертикальные, особенно во вмещающих породах лежачего бока – до 10 раз). В геологическом строении месторождения осложнены системой тектонических разломов разного ранга, по которым могут происходить подвижки блоков в массиве из-за перераспределения напряжений при ведении горных работ.

Кировский рудник с начала прошлого века разрабатывает единую апатит-нефелиновую залежь, разделённую на два месторождения подземным способом. На Кукисвумчоррском месторождении горные работы проводятся на более глубоких горизонтах, чем на Юкспорском. На рис. 1 схематично показаны продольный разрез исследуемых месторождений и состояние горных работ в настоящее время.

По мере отработки запасов горизонтов происходит подработка пород висячего бока, которая способствует появлению зон растяжения в одной части массива и зон сжатия в другой. Это вызывает обрушение налегающих пород консольной части массива и приводит к стабилизации напряжений в верхней части района влияния горных работ. Как показано в работе [18], на Кукисвумчоррском месторождении шаг обрушения составляет до 100 м, на Юкспорском месторождении – до 150 м. Причина такой разницы в том, что исследуемые месторождения отличаются системой отработки рудного тела: на Кукисвумчоррском месторождении горные работы ведутся от центра шахтного поля к его флангам, а на Юкспорском месторождении – встречными фронтами (до 2018 г.). Вследствие этого на Юкспорском месторождении под налегающей толщей пород сформиро-

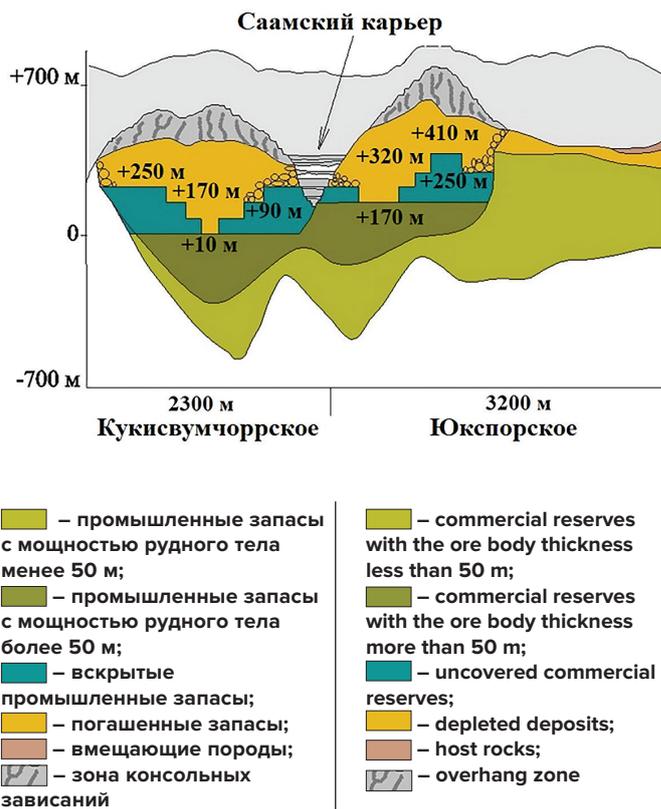


Рис. 1
Схема продольного разреза исследуемых апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива

Fig. 1
Schematic view of the longitudinal section of the investigated apatite-nepheline deposits of the Khibiny massif

вался целик и для того, чтобы происходило периодическое самообрушение налегающих пород консольной части массива, на руднике проводились специальные технологические взрывы, которые способствовали развитию процессов трещинообразования в поверхностной толще массива [19]. В дальнейшем на Юкспорском месторождении горные работы стали проводиться от единой разрезки (немалую роль в переходе на выемку запасов от единой разрезки сыграли рекомендации и регламент, разработанные специалистами Горного института КНЦ РАН) [20].

Предыдущими исследованиями [18] на рассматриваемых месторождениях были определены области различного деформирования массива и земной поверхности. Кукисвумчоррское месторождение разделено на следующие участки: по координате *X* от 400 до 1550 м (над зоной подземных горных работ) и по *X* от 1550 до 1800 м (над зоной стыковки с Саамским карьером); Юкспорское месторождение: по *X* от 2420 до 3500 м (над зоной подземных горных работ) по *X* от 2240 до 2420 м (над зоной стыковки с Саамским карьером). В настоящей работе проведено исследование временных вариаций параметров *EI* и *CAV* только для участков, расположенных над зоной подземных горных работ. Рассматривались данные сейсмических наблюдений за 2013–2018 гг. Границей консольной части массива горных пород на Кукисвумчоррском месторождении принята высотная отметка + 300 м, на Юкспорском – высотная отметка + 400 м, т.е. исключены данные о сейсмичности на высотах, соответствующих районам активного ведения горных работ.

Результаты и их обсуждение

Для рассматриваемых участков Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений (число событий 11748 и 41953 соответственно) построены графики изменения параметров EI и CAV за шестилетний период (2013–2018 гг.).

Для выявления тенденций изменения EI значения этого параметра усреднялись по скользящему временному интервалу. Проведено тестирование для различных временных окон, чтобы определить наиболее информативное. Результаты зависят от количества данных, доступных для интересующего участка, в тот или иной период времени. В тех случаях, где точки данных сильно разнесены во времени, применение короткого интервала дает сильно изменчивую линию тренда, на которую влияют только отдельные события. Учет такой изменчивой линии тренда может привести к неточной оценке тенденций изменения напряжений в данной области и неточному выявлению периодов неустойчивости при формировании обрушений подработанной толщи пород. И, наоборот, применение слишком длинного временного интервала дает такую линию тренда, при которой выявление каких-либо особенностей становится неэффективным.

На Кукисвумчоррском месторождении по графику изменений параметров EI ($\log EI$) и CAV , рис. 2, выявлены несколько периодов при формировании обрушений подработанной толщи пород в массиве:

- 1) октябрь 2013 г. – апрель 2014 г. – увеличение EI при обычной скорости роста CAV ;
- 2) апрель 2014 г. – июль 2015 г. – тенденция постепенного уменьшения EI , ускоряющееся возрастание CAV – было зафиксировано обрушение горной массы;
- 3) июль 2015 г. – февраль 2017 г. – постепенное увеличение EI , обычная скорость роста CAV ;
- 4) февраль 2017 г. – падение EI , ускоряющееся возрастание CAV (со второй половины апреля 2017 г.) – формирование магистральной трещины и обрушение пород консольной части массива;
- 5) июль 2017 г. – декабрь 2018 г. – устойчивые значения EI и устойчивая скорость роста CAV .

Периоды 1 и 3 характеризуют устойчивое состояние массива, при котором обрушение пород консоли не про-

а)



б)

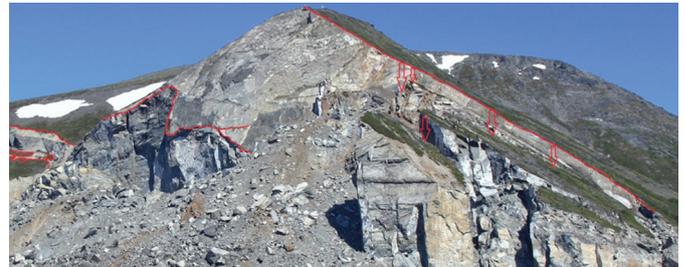


Рис. 3
Кукисвумчоррское месторождение, обрушение подработанной толщи пород:
а – 9 октября 2013 г.;
б – 4 июля 2014 г.

Fig. 3
The Kukisvumchorr field, caving of the undermined rock mass:
а – October 9, 2013;
б – July 4, 2014

исходило, при этом наблюдается рост значений EI . После чего начинался процесс обрушения консоли (т.е. периоды 2 и 4 – неустойчивое состояние массива), зафиксировано падение EI и ускоряющееся возрастание CAV . На рис. 3 представлены фотографии конфигурации поверхностной толщи пород на Кукисвумчоррском месторождении в октябре 2013 г. (рис. 3, а) и июле 2014 г. (рис. 3, б), которые иллюстрируют развитие обрушения в этот период времени. Обрушение 2017 г. (период 4) было более масштабным (что видно и в скорости роста параметра CAV), сформировался магистральный разрыв (космоснимок поверхностной части месторождения, на котором отмечено место разрыва и распределение эпицентров сейсмических событий, представлен в работе [21]).

Для Юкспорского месторождения построен аналогичный график изменений параметров EI ($\log EI$) и CAV (рис. 4). Дополнительно на графике черными вертикальными линиями отмечено время проведения массовых взрывов.



Рис. 4
Юкспорское месторождение, динамика параметров энергетического индекса ($\log EI$) и кумулятивного кажущегося объема (CAV) в консольной части массива

Fig. 4
The Yukspor field, dynamics of the energy index ($\log EI$) and cumulative apparent volume (CAV) parameters in the overhang of the rock mass

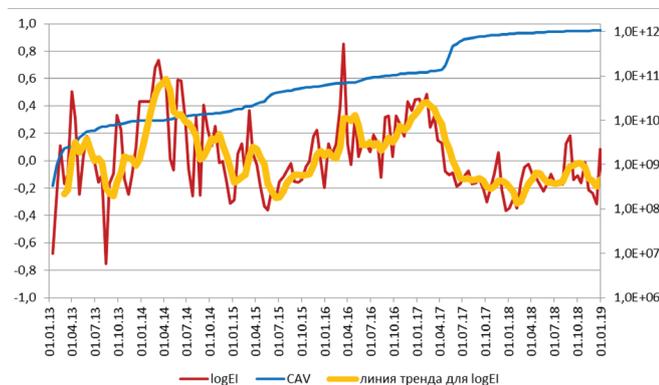


Рис. 2
Кукисвумчоррское месторождение, динамика параметров энергетического индекса ($\log EI$) и кумулятивного кажущегося объема (CAV) в консольной части массива

Fig. 2
The Kukisvumchorr field, dynamics of the energy index ($\log EI$) and cumulative apparent volume (CAV) parameters in the overhang of the rock mass

Ранее [19] было показано, что самообрушение пород консоли части массива на Юкспорском месторождении происходило постепенно: сначала произошел значительный рост числа слабых сейсмических событий, примерно через полгода их количество резко снизилось, а число сильных событий значительно возросло и оставалось на высоком уровне в течение года (от 30 до 60 сильных сейсмических событий в месяц зарегистрировано в период с октября 2016 г. по май 2017 г. включительно), т.е. происходило постепенное слияние образующихся трещин в единый разрыв. Причем все массовые взрывы сопровождались длительной афтершоковой серией событий и обрушением пород консоли, т.е. их проведение способствовало процессам трещинообразования и своевременному самообрушению пород консоли части массива горных пород, что отразилось в постепенном снижении сейсмической активности (уменьшении числа событий и их энергии). Этот вывод подтверждают и настоящие исследования.

До 2015 г. консолидная часть массива горных пород находилась в устойчивом состоянии, что отражает график изменения EI : до января 2015 г. – $\log EI$ менее 0, что может свидетельствовать о релаксации напряжений в массиве горных пород. Активизация сейсмичности в 2015 г. связана с формированием блока-целика, что привело к увеличению концентрации напряжений в массиве горных пород. Это отражается и в динамике параметров EI : на графике можно видеть существенный рост значений в начале 2015 г. при обычном росте CAV (фаза нагружения). Далее происходили процессы интенсивного разрушения массива горных пород в консолидной части в районе блока целика, значение EI снижается, рост CAV несколько ускоряется по сравнению с предыдущим периодом, т.е. наблюдается фаза разупрочнения. После массового взрыва стыковочной секции в сентябре 2015 г. EI продолжает некоторое время уменьшаться, а рост CAV ускоряется, но затем в начале 2016 г. наблюдается рост EI , что может свидетельствовать об увеличении концентрации напряжений в связи с сближением фронтов горных работ на нижележащей отметке. После очередного массового взрыва (март 2016 г.) значения EI идут на спад, CAV ускоряется, т.е. наблюдается фаза раз-

упрочнения. В июле 2016 г. возрастание CAV заметно замедляется, происходят колебания EI , но с тенденцией к росту. Этот период характеризуется большим числом сильных сейсмических событий, т.к. разрушение консоли перешло в стадию формирования крупных трещин. Очередной пик значений EI наблюдался весной 2018 г. перед четвертым (последним) массовым взрывом, после которого на графике явно виден спад EI и замедление CAV , т.е. произошла релаксация напряжений.

Заключение

Результаты проведенного исследования показывают, что количественные характеристики сейсмического процесса (энергетический индекс, кумулятивный кажущийся объем) имеют хороший потенциал для оценки изменений состояния массива горных пород и выявления периодов неустойчивости подработанной толщи пород Хибинского массива при формировании ее обрушения.

Меняющееся во времени значение энергетического индекса в определенной степени отражает характер изменения поля напряжений. Совместное рассмотрение динамики критериев энергетического индекса и кумулятивного кажущегося объема позволяет определить различные стадии состояния массива: периоды нагружения и разупрочнения.

Полученные в настоящей работе результаты хорошо коррелируют с фактическими данными об обрушениях пород подработанной толщи массива.

Тем не менее, отметим, что эти результаты получены в первом приближении и для достаточно больших по объему участков массива горных пород. Мы предполагаем, что дальнейшие исследования будут направлены на оценку динамики этих параметров для менее крупных участков массива горных пород, что позволит с помощью обратного анализа выявить периоды нагружения и разупрочнения локальных участков массива горных пород. Кроме того планируется проведение детального анализа динамики сейсмичности подработанной толщи пород Юкспорского месторождения после изменения порядка ведения горных работ в 2018 г.

Список литературы

1. Абрашитов А.Ю., Шабаров А.Н., Корчак П.А., Куранов А.Д. Опыт взаимодействия с горным предприятием при решении проблемы геодинамической безопасности. *Горный журнал*. 2023;(5):40–48. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.06>
2. Рассказов И.Ю., Федотова Ю.В., Аникин П.А., Сидляр А.В., Корчак П.А. Совершенствование автоматизированной системы геомеханического мониторинга и раннего предупреждения опасных геодинамических явлений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(12-1):106–121. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_106
3. Рукавишников Г.Д., Мулёв С.Н., Гаврилов А.Г. Опыт применения и перспективы развития системы сейсмического мониторинга ГИТС на Таштагольском железорудном месторождении. *Горная промышленность*. 2023;(S1):90–95. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-90-95>
4. Верхоланцев А.В., Дягилев Р.А., Шулаков Д.Ю., Шкурко А.В. Мониторинг сейсмического воздействия взрывов на карьере «Шахтау». *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2019;(2):59–69. <https://doi.org/10.15372/FTPPI20190207>
5. Козырев А.А., Семенова И.Э., Жукова С.А., Журавлева О.Г. Факторы изменения сейсмического режима и локализации опасных зон при крупномасштабном техногенном воздействии. *Горная промышленность*. 2022;(6):95–102. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-95-102>
6. 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>

7. van Aswegen G. Routine seismic hazard assessment in some South African mines. In: Potvin Y., Hudyma M. (eds) *RaSiM6: Proceedings of the Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines Proceedings*. Australian Centre for Geomechanics, Perth; 2005, pp. 437–444. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/574_45
8. Мельников Н.Н. (ред.) *Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов*. Новосибирск: СО РАН; 2010. Т. 2. 261 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/21804>
9. Liu J.-p., Xu S.-d., Li Y.-h., Lei G. Analysis of rock mass stability based on mining-induced seismicity: A case study at the Hongtoushan copper mine in China. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019;52(1):265–276. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1541-y>
10. Nordström E., Dineva S., Nordlund E. Back analysis of short-term seismic hazard indicators of larger seismic events in deep underground mines (LKAB, Kiirunavaara Mine, Sweden). *Pure and Applied Geophysics*. 2020;177:763–785. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02352-8>
11. Dehn K.K., Butler T., Weston B. Using the energy index method to evaluate seismic hazards in an underground narrow-vein metal mine. In: *Paper presented at the 52nd U.S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, Seattle, Washington, June 2018*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/329628956>
12. Li Y., Hongwei D., Lei W., Qin Y., Xu X. Method for identifying and forecasting mining-induced earthquakes based on spatiotemporal characteristics of microseismic activities in Fankou lead/zinc mine. *Minerals* 2022;12(3):318. <https://doi.org/10.3390/min12030318>
13. Mendecki A.J. Real time quantitative seismology in mines: Keynote address. In: *Rockburst and Seismicity in Mines-RaSiM2: Proceedings of the 3rd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, Kingston, Ontario, Canada*. Rotterdam: Balkema; 1993, pp. 287–295. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/259741668>
14. Mendecki A.J. *Seismic monitoring in mines*. London: Chapman and Hall; 1997. 262 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1539-8>
15. van Aswegen G., Butler A. Applications of quantitative seismology in South African gold mines. In: *Rockburst and Seismicity in Mines-RaSiM2: Proceedings of the 3rd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, Kingston, Ontario, Canada*. Rotterdam: Balkema; 1993, pp. 261–266. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/259741923>
16. Rebuli D.B., van Aswegen G. Short term seismic hazard assessment in S.A. gold mines. In: 8th International Symposium of Rockburst and Seismicity in Mines (RaSiM 8). September 2013, pp. 323–331. <https://doi.org/10.13140/2.1.1176.3847>
17. Xue R., Liang Z., Xu N., Dong L. Rockburst prediction and stability analysis of the access tunnel in the main powerhouse of a hydropower station based on microseismic monitoring. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020;126:104174. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmm.2019.104174>
18. 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/FTPRP120220611>
19. Журавлева О.Г., Жукова С.А., Аветисян И.М., Дмитриев С.В. Исследование сейсмической активности при отработке месторождения встречными фронтами. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(12-1):143–154. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_143
20. 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>
21. Жукова С.А., Журавлева О.Г., Онуприенко В.С., Стрешнев А.А. Особенности сейсмического режима массива горных пород при отработке удароопасных месторождений Хибинского массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(7):5–17. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_7_0_5

References

1. Abrashitov A.Yu., Shabarov A.N., Korchak P.A., Kuranov A.D. Dealing with geodynamic safety challenges in cooperation with a mining company: A case-study. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(5):40–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.06>
2. Rasskazov I.Yu., Fedotova Yu.V., Anikin P.A., Sidlyar A.V., Korchak P.A. Improvement of the automated system of geomechanical monitoring and early prevention of dangerous geodynamic phenomena. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(12-1):106–121. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_106
3. Rukavishnikov G.D., Mulev S.N., A. Gavrilov G. Experience of application and prospects for the development of the GITS seismic monitoring system at the Tashtagolsky iron ore deposit. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):90–95. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-90-95>
4. Verkholtantsev A.V., Dyagilev R.A., Shulakov D.Y., Shkurko A.V. Monitoring of earthquake loads from blasting in the Shakhtau open pit mine. *Journal of Mining Science*. 2019;55(2):229–238. <https://doi.org/10.1134/S1062739119025503>
5. Kozyrev A.A., Semenova I.E., Zhukova S.A., Zhuravleva O.G. Factors of seismic behavior change and localization of hazardous zones under a large-scale mining-induced impact. *Russian Mining Industry*. 2022;(6):95–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-95-102>
6. 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>
7. van Aswegen G. Routine seismic hazard assessment in some South African mines. In: Potvin Y., Hudyma M. (eds) *RaSiM6: Proceedings of the Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines Proceedings*. Australian Centre for Geomechanics, Perth; 2005, pp. 437–444. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/574_45
8. Melnikov N.N. (ed.) *Methods and instruments for seismic-and-deformation monitoring of technogenic earthquakes and rock-bursts*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2010. Vol. 2. 261 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/21804>
9. Liu J.-p., Xu S.-d., Li Y.-h., Lei G. Analysis of rock mass stability based on mining-induced seismicity: A case study at the Hongtoushan copper mine in China. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019;52(1):265–276. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1541-y>
10. Nordström E., Dineva S., Nordlund E. Back analysis of short-term seismic hazard indicators of larger seismic events in deep underground mines (LKAB, Kiirunavaara Mine, Sweden). *Pure and Applied Geophysics*. 2020;177:763–785. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02352-8>

11. Dehn K.K., Butler T., Weston B. Using the energy index method to evaluate seismic hazards in an underground narrow-vein metal mine. In: *Paper presented at the 52nd U.S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, Seattle, Washington, June 2018*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/329628956>
12. Li Y., Hongwei D., Lei W., Qin Y., Xu X. Method for identifying and forecasting mining-induced earthquakes based on spatiotemporal characteristics of microseismic activities in Fankou lead/zinc mine. *Minerals* 2022;12(3):318. <https://doi.org/10.3390/min12030318>
13. Mendecki A.J. Real time quantitative seismology in mines: Keynote address. In: *Rockburst and Seismicity in Mines-RaSiM2: Proceedings of the 3rd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, Kingston, Ontario, Canada*. Rotterdam: Balkema; 1993, pp. 287–295. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/259741668>
14. Mendecki A.J. *Seismic monitoring in mines*. London: Chapman and Hall; 1997. 262 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1539-8>
15. van Aswegen G., Butler A. Applications of quantitative seismology in South African gold mines. In: *Rockburst and Seismicity in Mines-RaSiM2: Proceedings of the 3rd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, Kingston, Ontario, Canada*. Rotterdam: Balkema; 1993. pp. 261–266. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/259741923>
16. Rebuli D.B., van Aswegen G. Short term seismic hazard assessment in S.A. gold mines. In: 8th International Symposium of Rockburst and Seismicity in Mines (RaSiM 8). September 2013, pp. 323–331. <https://doi.org/10.13140/2.1.1176.3847>
17. Xue R., Liang Z., Xu N., Dong L. Rockburst prediction and stability analysis of the access tunnel in the main powerhouse of a hydropower station based on microseismic monitoring. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020;126:104174. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104174>
18. Semenova I.E., Zhukova S.A., Zhuravleva O.G. Development of seismic activity zones in undermined rock mass in hybrid opencast/underground mining in Kirovsk mine. *Journal of Mining Science*. 2022;58(6):966–972. <https://doi.org/10.1134/S1062739122060114>
19. Zhuravleva O.G., Zhukova S.A., Avetisyan I.M., Dmitriev S.V. Study of seismic activity during mining of a rockburst hazardous deposit with counter fronts. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(12-1):143–154. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_143
20. Semenova I.E., Avetisyan I.M., Zemtsovskiy 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>
21. Zhukova S.A., Zhuravleva O.G., Onuprienko V.S., Streshnev A.A. Seismic behavior of rock mass in mining rockburst-hazardous deposits in the Khibiny massif. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(7):5–17. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_7_0_5

Информация об авторах

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; <https://orcid.org/0000-0002-8986-9559>; 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; <https://orcid.org/0000-0003-0769-6584>; e-mail: svetlana.zhukowa@yandex.ru

Information about the authors

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; <https://orcid.org/0000-0002-8986-9559>; 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; <https://orcid.org/0000-0003-0769-6584>; e-mail: svetlana.zhukowa@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 07.10.2023

Поступила после рецензирования: 22.11.2023

Принята к публикации: 03.12.2023

Article info

Received: 07.10.2023

Revised: 22.11.2023

Accepted: 03.12.2023