

# Исследование пространственно-временных закономерностей развития сейсмичности в подработанной толще массива на Расвумчоррском руднике

О.Г. Журавлева ✉, С.А. Жукова

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

**Резюме:** Проведено исследование пространственно-временных закономерностей развития сейсмичности в подработанной толще массива на Расвумчоррском руднике. Выявлен основной кластер, связанный с формированием обрушения пород в консоли. Установлено, что обрушение развивалось постепенно из глубины массива к поверхности. Приведены результаты оценки количественных параметров сейсмического процесса в подработанной толще пород: энергетического индекса и кумулятивного кажущегося объема, которые отражают изменения напряжений в массиве горных пород. Определены периоды устойчивого состояния массива, при которых обрушение пород консоли не происходило, и периоды активного трещинообразования и обрушения пород консоли. Изменение этих параметров для рассматриваемого участка месторождения отражает этапы нагружения и разупрочнения горных пород массива. Результаты исследования хорошо коррелируют с данными о фактических обрушениях подработанной толщи пород. Настоящая работа является продолжением исследований авторов по проблеме выявления пространственно-временных закономерностей при формировании обрушений подработанной толщи пород в тектонически напряженном Хибинском массиве.

**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 искреннюю благодарность главному инженеру Кировского филиала АО «Апатит» В.С. Онуприенко и начальнику службы прогноза и предотвращения горных ударов Кировского филиала АО «Апатит» А.А. Стрешневу за многолетнее плодотворное сотрудничество, предоставление данных сейсмического мониторинга и обсуждение результатов исследования.

**Для цитирования:** Журавлева О.Г., Жукова С.А. Исследование пространственно-временных закономерностей развития сейсмичности в подработанной толще массива на Расвумчоррском руднике. *Горная промышленность*. 2024;(3):105–111. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-105-111>

## Studies of the spatial and temporal patterns of seismic activity development in the undermined rock mass at the Rasvumchorr Mine

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:** Studies of the spatial and temporal patterns of seismic activity development in the undermined rock mass have been performed at the Rasvumchorr Mine. The main cluster associated with generation of rock caving in the overhang part has been identified. It is established that caving was developing gradually from the depth of the rock mass towards the surface. The results are presented of estimating the quantitative parameters of the seismic process in the undermined rock stratum, i.e. the energy index and the cumulative apparent volume, which reflect the stress changes in the rock mass. Ranges of the stable state of the rock mass, when the overhang rocks do not cave, as well as the ranges of active fracturing and caving of the overhang rocks have been identified. Changes in these parameters for the studied area of the deposit reflect the loading and strength degradation stages in the rock mass. The results of this study correlate well with the data on actual caving of the undermined rock strata. This work is a continuation of the authors' research into the problem of identifying spatial and temporal patterns in the development of undermined rock strata cavings in the tectonically stressed Khibiny massif.

**Keywords:** seismic monitoring, mining-induced seismicity, underground mining operations, undermined rock caving processes, energy index, cumulative apparent volume, apatite-nepheline deposits, the Khibiny massif

**Acknowledgements:** This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No.22-17-00248). The authors express their sincere gratitude to V.S. Onuprienko, Chief Engineer of the Kirovsk Branch of Apatit JSC, and A.A. Streshnev, Head of the Service for Rock Burst Prediction and Prevention, Kirovsk Branch of Apatit JSC, for many years of fruitful co-operation, provision of seismic monitoring data and discussion of the study results.

**For citation:** Zhuravleva O.G., Zhukova S.A. Studies of the spatial and temporal patterns of seismic activity development in the undermined rock mass at the Rasvumchorr Mine. *Russian Mining Industry*. 2024;(3):105–111. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-105-111>

## Введение

Одним из важных направлений геомеханического мониторинга при ведении горных работ является исследование параметров обрушения покрывающих пород. Разработку Хибинских апатитовых месторождений подземным способом ведут с применением системы подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды и с принудительным обрушением вышележащей толщи пород [1]. Возможность успешного применения данной системы зависит от ряда горно-геологических факторов. В связи с этим актуальной задачей является оценка, прогноз и управление процессами частичного и полного обрушения покрывающих пород [2–4].

На рудниках Хибинского массива крупномасштабные работы ведутся более 90 лет. Интенсификация и неизбежное углубление горных работ сопровождаются трансформацией напряженно-деформированного состояния массива горных пород как в окрестности продвигающихся фронтов горных работ, так и в подработанной толще. Процессы трещинообразования и формирования трещин отрыва в подработанной толще массива горных пород также регистрируются системами сейсмического мониторинга. Как известно, современные программные комплексы сбора, обработки и анализа сейсмических данных позволяют достаточно полно исследовать процессы, происходящие в массиве горных пород, в том числе выявить тенденции и закономерности развития обрушения на разных масштабных уровнях [1; 5–7].

Настоящая статья является продолжением исследований авторов по проблеме выявления пространственно-временных закономерностей сейсмичности при формировании обрушений подработанной толщи пород в тектонически напряженном Хибинском массиве.

## Объект исследований.

### Особенности сейсмического процесса

Расвумчоррский рудник основан в 1954 г. и ведет разработку месторождений Апатитовый Цирк и подкарьерных запасов Плато Расвумчорр (подземная добыча в настоящее время). Месторождение Апатитовый Цирк является составной частью юго-западного рудного поля Хибинского щелочного массива.

Рудное тело пластообразной формы и малой мощности (от 40 до 150 м), наблюдается уменьшение мощности с глубиной. Падение залежи – северо-восточное, угол падения колеблется от 15° до 50°. Общая длина рудного тела месторождения Апатитовый Цирк составляет 2350 м. На месторождении выявлена система радиальных и концентрических разломов III ранга, разделяющих массив на блоки. Часто разломы характеризуются наличием в них зон изменения пород (шпреуштейнизации) различной интенсивности. Мощность таких зон составляет от нескольких сантиметров до первых десятков метров.

Максимальные сжимающие напряжения во вмещающих породах составляют 25–70 МПа и 15–50 МПа в рудах,

являются горизонтальными, ориентированы примерно по простиранию рудного тела. Высокая тектоническая напряженность массива пород – один из основных геомеханических факторов, который определяет устойчивость выработок и конструктивных элементов систем разработки [8].

Мониторинг сейсмичности на подземном руднике осуществляется автоматизированной системой контроля состояния массива (АСКСМ), способной регистрировать сейсмособытия в энергетическом диапазоне  $10^3$ – $10^9$  Дж и точностью несколько метров. На Расвумчоррском руднике АСКСМ контролируется район ведения горных работ и зона стыковки с карьером Центральный.

С начала эксплуатации месторождения добыто более 250 млн т руды. С увеличением площади отработки месторождения, а также отвалов и увеличением объемов добычи руды в районе ведения горных работ зарегистрированы не только горные, но и горно-тектонические удары, которые по интенсивности проявления, по механизму и разрушительным последствиям можно сопоставить с техногенными землетрясениями. Так, по результатам проведения сейсмического мониторинга с 2014 по 2022 г. задокументировано 4 геодинамических явления, ощущаемых на земной поверхности. Самое мощное событие произошло в январе 2018 г., магнитуда которого составила 3,3 (по данным КоФ ФИЦ ЕГС РАН) [9].

В районе сейсмомониторинга за период с 2014–2022 гг. произошло более 23 тыс. событий с энергией от  $10^3$  Дж, из них 129 сильных сейсмических событий – с энергией порядка  $10^6$ – $10^8$  Дж. Большая часть событий приурочена к району горных работ, в том числе при переходе горных работ на глубокие горизонты, что связано с перераспределением напряжений в массиве.

На Расвумчоррском руднике зона уверенной регистрации сейсмической сети по высотным отметкам охватывает участок массива от +100 до +900 м. Для проведения первичного анализа сейсмических данных район сейсмомониторинга был условно разделен по высотной отметке +600 м на район ведения горных работ и консольную часть массива горных пород. Именно горизонты +600 м и ниже являются опасными по горным ударам, выше этой отметки находится зона раздробленных горных пород поверхностной части массива (консоли налегающих пород), где могут действовать как растягивающие напряжения, так и сжимающие, за счет которых отдельные участки консоли долгое время могут сохранять свою устойчивость.

На рис. 1 представлены фотографии поверхностной части горного массива, которые иллюстрируют развитие обрушения в разные периоды времени: а – в сентябре 2001 г., б – в августе 2018 г. и в – в октябре 2023 г. Отчетливо видно изменение конфигурации бровки обрушения вследствие раскрытия новых трещин на поверхности массива горных пород (красным цветом выделены зоны отрыва на месторождении Апатитовый Цирк).

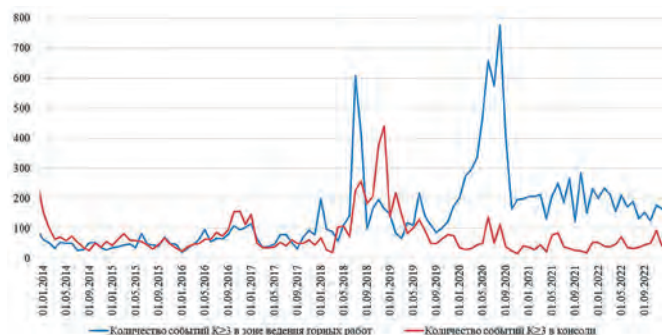


**Рис. 1**  
Изменение конфигурации  
поверхностной части массива  
горных пород месторождения  
Апатитовый Цирк: а – сентябрь  
2001 г., б – август 2018 г.,  
в – октябрь 2023 г.

**Fig. 1**  
Changes in the configuration  
of the surface part of the rock  
massif at the Apatite Circus  
deposit: а) September 2001,  
б) August 2018,  
в) October 2023

Анализ распределения сейсмических событий за период 2014–2022 гг. показал, что на месторождении Апатитовый Цирк в зоне ведения горных работ было зарегистрировано больше сейсмических событий, чем в консольной части массива: в зоне ведения горных работ около 20,2 тыс., суммарная выделившаяся сейсмическая энергия событий равна  $1,8 \cdot 10^9$  Дж; в консоли – около 1,7 тыс., суммарная выделившаяся сейсмическая энергия событий –  $3,5 \cdot 10^7$  Дж. Такая существенная разница суммарного энерговыделения в консольной части массива по сравнению с зоной ведения горных работ может объясняться, во-первых, тем, что зона ведения горных работ содержит большое количество искусственно созданных полостей (выработки, выработанное пространство), а консольная часть представляет собой нетронутый массив; во-вторых, в зоне ведения горных работ от периодического воздействия взрывов, когда энергия взрыва добавляется к существующей накопленной энергии массива происходит перераспределение напряжений, их концентрация на локальных участках и реализация сейсмических событий, а консольная часть под действием собственного веса и давления налегающих пород начинает растрескиваться и затем самообрушаться и сейсмические события вызваны образованием трещин скола.

Сейсмический режим в районе мониторинга имеет неравномерный характер. На рис. 2 представлена динамика сейсмичности на месторождении Апатитовый Цирк. В районе ведения горных работ наибольший рост числа сейсмических событий наблюдается в 2018 и 2020 гг. (как было показано в работе [10], такой рост связан с развитием работ на добычных горизонтах, в том числе



**Рис. 2**  
Динамика сейсмичности  
в районе контроля

**Fig. 2**  
Dynamics of seismic events  
in the monitored area

началом очистных работ на отм. +400 м). В подработанной толще некоторый рост сейсмической активности наблюдался в сентябре-декабре 2016 г., а в 2018–2019 гг. была более существенная активизация процесса обрушения.

Как было установлено ранее [10], сейсмическая активность массива горных пород возрастает после взрывов в пределах шахтного поля и в районе, прилегающем к отбитой секции, и в зонах тектонических нарушений; наибольшее количество мощных сейсмических событий приурочено к тектоническим нарушениям или зонам их влияния. Также именно на Расвумчоррском руднике в связи с высокой изрезанностью массива наблюдается наибольшая активизация сейсмической активности в периоды повышенной сезонной обводненности.

### Методы

Для исследования сейсмической активности применяются статистические методы, проводится анализ пространственно-временных вариаций сейсмичности и сопоставление с фактическими данными о ходе горных работ и состоянии подработанной толщи.

При проведении исследований предполагается, что сейсмические события – это локальные разрушения в подработанной толще массива горных пород, которые являются результатом действия комплекса природных и природно-техногенных факторов: естественное поле напряжений и перераспределение напряжений при ведении горных работ; геологическое строение массива, его структурная неоднородность; специфика ведения горных работ и их постепенное продвижение на глубокие горизонты; сезонный фактор – повышение водопритоков.

На рудниках Хибинского массива наблюдается пространственная кластеризация сейсмических событий, и на примере Расвумчоррского рудника ранее было показано, что существуют различные по динамике сейсмичности участки [10]. Для исследования сейсмичности применяются различные методы кластерного анализа [11–16]. Применение таких методов позволяет определить связанные и несвязанные события (или зависимые и независимые события). В настоящей работе для кластеризации техногенной сейсмичности применяется метод, предложенный В.И. Германом [16], и модифицированный нами с целью учета фактора времени, что позволяет исследовать особенности развития сейсмического процесса в условиях постоянного динамического воздействия на массив горных пород [17].

С помощью этого метода для каждой пары сейсмических событий  $i$  и  $j$  определяется параметр сближения:

$$k_{ij} = \frac{d_{ij}}{(L_i + L_j)/2},$$

где  $d_{ij}$  – расстояние между гипоцентрами сейсмических событий;  $L$  – длина разрыва (дефекта) в очаге.

Второй параметр – временной интервал  $t_{ij}$  между событиями.

Если значение параметра сближения  $k_{ij}$  и временного интервала  $t_{ij}$  меньше заданных пороговых значений, то сейсмические события считаются связанными.

Для выявления периодов неустойчивого состояния массива применяются критерии: энергетический индекс  $EI$  и кумулятивный кажущийся объем  $CAV$  [18–20]. В практике техногенной сейсмичности эти параметры нашли широкое применение на рудниках ЮАР [21; 22], а позднее и на других рудниках мира [23–26].

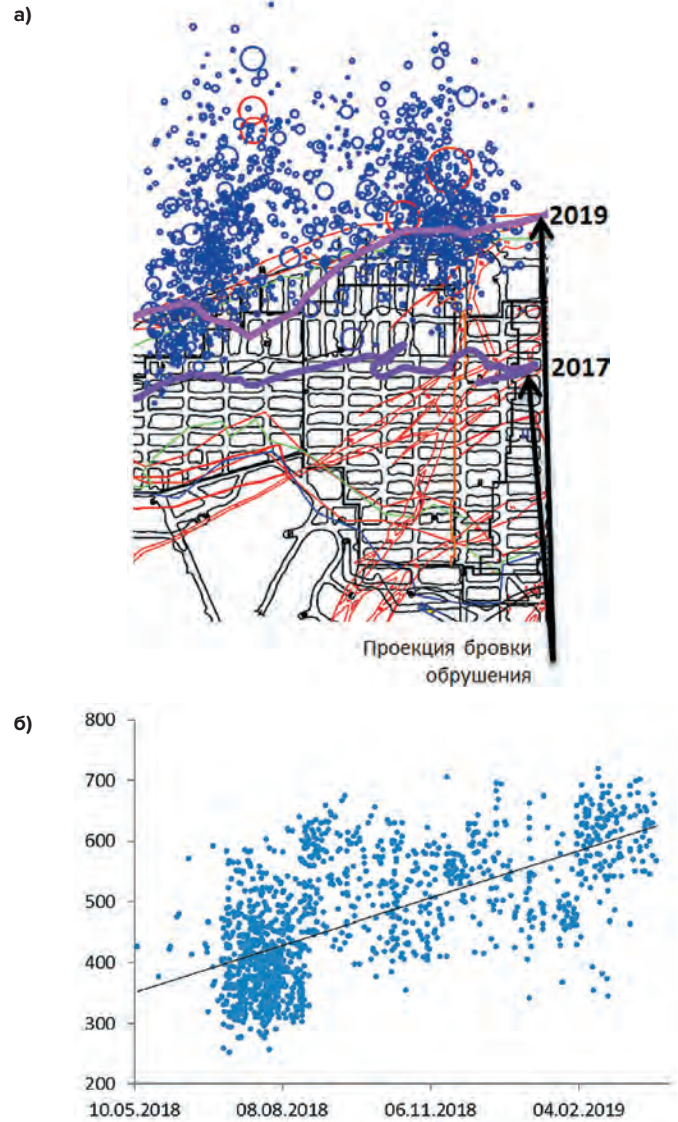
Для определения значений этих параметров применяются параметры сейсмической энергии и сейсмического момента, а также корреляционные связи между ними. В практике сейсмологического мониторинга на рудниках показано, что отклонения корреляционных зависимостей могут достигать двух порядков, и многие исследования посвящены именно таким отклонениям, как одним из источников информации о состоянии массива горных пород. Параметр энергетического индекса  $EI$  характеризует отклонение сейсмической энергии события с сейсмическим моментом  $M_0$  от средней энергии событий, имеющих такой же сейсмический момент. А сумма кажущихся объемов  $CAV$  дает интегральную оценку происходящей в определенной области деформации. По динамике этих параметров могут быть определены фазы нагружения (рост  $EI$  при обычной скорости роста  $CAV$ ) и разупрочнения (падение  $EI$  и одновременное ускоряющееся возрастание  $CAV$ ) [22]. Подобные модели поведения параметров ранее нами были выявлены при исследовании сейсмичности в подработанной толще Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений [27].

**Сейсмическая активность в подработанной толще**

Для того чтобы разделить сейсмособытия в зоне обрушения от сейсмособытий, непосредственно связанных с горными работами, применялся метод пространственно-временной кластеризации на основе модифицированного концентрационного критерия [16; 17]. Выявлен основной кластер, связанный с формированием обрушения в консоли (рис. 3, а), причем обрушение развивалось постепенно из глубины массива к поверхности, т.е. сначала происходило трещинообразование в основании консольного зависания (рис. 3, б). Из данных, представленных на рис. 3, а, можно видеть миграцию кромки обрушения. Наибольший шаг обрушения совпадает с областями наибольшей концентрации сейсмических событий.

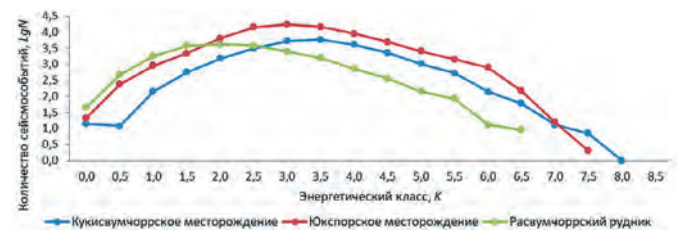
В целом, формирование обрушения пород консольной части массива на Расвумчоррском руднике происходило менее интенсивно по сравнению с Кировским рудником (Кукисвумчоррское и Юкспорское месторождения). На Расвумчоррском руднике в подработанной толще массива не зарегистрировано ни одного сейсмического события энергетического класса  $K = 7$  и выше, тогда как, например, на Кукисвумчоррском месторождении максимальный энергетический класс зарегистрированных событий в консоли  $K = 8$  (рис. 4). Такое различие может быть обусловлено несколькими причинами:

- 1) Направлением действующих тектонических напряжений в массиве горных пород:
  - на Кукисвумчоррском месторождении максимальные напряжения ориентированы в направлении, близ-



**Рис. 3** Основной кластер сейсмических событий, связанный с формированием обрушения пород подработанной толще: а – проекция сейсмических событий на план горных работ и проекция кромки обрушения (на 2017 и 2019 гг.); б – динамика проявления сейсмических событий (по высотной отметке)

**Fig. 3** The main seismic event cluster associated with generation of caving in the overhang part of the rock mass: а) projection of seismic events on the mining plan and projection of the caving edge (for 2017 and 2019); б) dynamics of seismic events manifestation (by altitude)



**Рис. 4** Зависимость частоты возникновения сейсмических событий от энергии

**Fig. 4** Dependence of seismic event frequency on the energy

ком вкрест простирания рудного тела или с небольшим отклонением до 20° к западу;

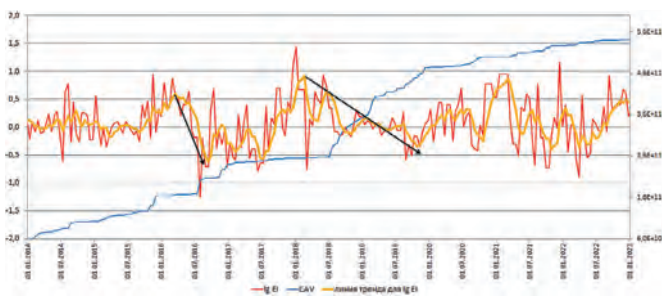
– на Юкспорском месторождении – под углом 30–45° к простиранию рудного тела;

– на месторождении Апатитовый Цирк – субпараллельно простиранию рудного тела; кроме того, уже горизонт +600 м относится к глубинным и поэтому параметры поля напряжений здесь, по сравнению с другими рудниками, наиболее стабильные по площади и глубине;

2) Технология ведения горных работ без образования целика: на Юкспорском месторождении интенсивное разрушение пород консоли происходило в связи с ведением горных работ встречными фронтами с формированием целика и зависанием необрушенной консольной части массива;

3) Большая изрезанность массива горных пород разрывными нарушениями. Рудная залежь пересекается поперечными (на месторождении Апатитовый Цирк) и продольными (на месторождении Плато Расвумчорр) крутопадающими зонами шпреуштейнизации мощностью от 3–5 до 10–20 м.

Для исследования процесса формирования обрушения на месторождении Апатитовый Цирк также применялись количественные параметры сейсмического процесса – энергетический индекс ( $EI$ ) и кажущийся объем ( $CAV$ ). Построены графики изменения параметров  $EI$  и  $CAV$  за период 2014–2022 гг. (рис. 5).



**Рис. 5**  
Изменение конфигурации  
поверхностной части массива  
горных пород месторождения  
Апатитовый Цирк

**Fig. 5**  
Changes in the configuration  
of the surface part of the rock  
massif at the Apatite  
deposit

Период исследования разделен по изменениям значений  $EI$  ( $Ig EI$ ) и  $CAV$  на определенные этапы, характеризующие состояние массива: устойчивое и неустойчивое (т.е. формирования обрушений подработанной толщи пород):

1) январь 2014 г. – сентябрь 2015 г. – колебания  $EI$  при обычной скорости роста  $CAV$  без значительных ускорений или замедлений;

2) октябрь 2015 г. – март 2016 г. – тенденция постепенного роста  $EI$ , кратковременное ускорение роста  $CAV$  в течение примерно 1,5 мес, сменившееся обычной скоростью роста (фаза нагружения);

3) апрель – июль 2016 г. – падение  $EI$ , обычная скорость роста  $CAV$ ;

4) август – декабрь 2016 г. – падение  $EI$  и ускоряющееся возрастание  $CAV$  – фаза разупрочнения, неустойчивое состояние массива, трещинообразование в консоли;

5) январь–июнь 2017 г. – колебания  $EI$ , устойчивый рост;

6) июль 2017 – февраль 2018 г. – рост  $EI$ , устойчивый рост  $CAV$  (фаза нагружения);

7) март–июнь 2018 г. – спад  $EI$ , устойчивый рост  $CAV$ ;

8) июль 2018 – начало декабря 2019 г. – значительное ускорение  $CAV$  и спада  $EI$  – фаза разупрочнения, неустойчивое состояние массива, интенсивное трещинообразование в подработанной толще горных пород.

В дальнейшем зафиксирован спад сейсмической активности и до конца 2022 г. существенных изменений не наблюдалось: по графику можно видеть колебания  $EI$  и устойчивый рост  $CAV$ , затухающий в конце 2022 г.

Выявленные периоды неустойчивого состояния массива соответствуют периодам повышения сейсмической активности, представленным на рис. 2. Однако по сравнению с анализом временных рядов (количество сейсмических событий, выделяющаяся сейсмическая энергия и т.п.) применение критериев энергетического индекса и кумулятивного кажущегося объема позволяет получить больше информации. Например, выявление фазы разупрочнения с точки зрения горнодобывающего предприятия может быть крайне полезной информацией о возможном начале формирования нового обрушения подработанной толщи, что является важным фактором для снижения геомеханических и геодинамических рисков при отработке запасов, поскольку обрушение подработанной толщи приводит к снижению концентрации сжимающих напряжений в зонах опорного давления.

## Заключение

По данным о сейсмичности на примере месторождения Апатитовый Цирк тектонически напряженного Хибинского массива показано, что наблюдается меньшая интенсивность сейсмических процессов в консольной части массива на Расвумчоррском руднике, чем на месторождениях, отрабатываемых Кировским рудником. В связи с высокой изрезанностью массива разрушение подработанной толщи на Расвумчоррском руднике происходит в основном по имеющимся естественным трещинам, а на месторождениях Кировского рудника – в большей мере формируются трещины отрыва в ненарушенном скальном массиве, что приводит к существенному росту как числа событий, так и их энергии. Это может быть также связано с различным влиянием таких природно-техногенных факторов, как направление действующих напряжений в массиве горных пород относительно простирания рудного тела, технология ведения горных работ от центра рудной залежи к флангам, без образования целиков. Полученные результаты позволяют сделать предположение, что и в дальнейшем формирование обрушения подработанной толщи массива на месторождении Апатитовый Цирк будет происходить менее интенсивно, чем на соседних месторождениях.

Результаты оценки периодов неустойчивого состояния массива хорошо коррелируют с фактическими данными об обрушении пород подработанной толщи массива. Предполагается, что модель поведения параметров энергетический индекс и кумулятивный кажущийся объем, позволяющая выявить периоды неустойчивого состояния подработанной толщи, может быть использована горнодобывающим предприятием для оценки геомеханических и геодинамических рисков, связанных с повышенной концентрацией напряжений в зоне опорного давления.

## Список литературы / References

1. Абрашитов А.Ю., Шабаров А.Н., Корчак П.А., Куранов А.Д. Опыт взаимодействия с горным предприятием при решении проблем геодинамической безопасности. *Горный журнал*. 2023;(5):40–48. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.06>  
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. Семенова И.Э., Розанов И.Ю., Кулькова М.С. Комплексное исследование параметров обрушения подработанной толщи пород Ждановского месторождения. *Горный журнал*. 2023;(12):49–54. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.08>  
Semenova I.E., Rozanov I.Yu., Kulkova M.S. Integrated research of undermined rock mass failure parameters in Zhdanovskoe ore field. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(12):49–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.08>
3. Семенова И.Э., Аветисян И.М., Журавлева О.Г., Белгородцев О.В. Актуальные вопросы процессов обрушения подработанных пород на Хибинских апатитовых рудниках. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(6):133–140. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220614>  
Semenova I.E., Avetisyan I.M., Zhuravleva O.G., Belogorodtsev O.V. Undermined rock failure in apatite mines in Khibiny: topical problems. *Journal of Mining Science*. 2022;58(6):1010–1015. <https://doi.org/10.1134/S1062739122060151>
4. Волченко Г.Н., Сeryakov В.М., Фрянов В.Н. Геомеханическое обоснование ресурсосберегающих вариантов разработки рудных месторождений системой этажного принудительного обрушения. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012;(4):144–154.  
Volchenko G.N., Fryanov V.N., Seryakov V.M. Geomechanical substantiation of the resource-saving alternatives of the induced block caving method. *Journal of Mining Science*. 2012;48(4):709–716. <https://doi.org/10.1134/S1062739148040168>
5. 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](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_106)  
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](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_106)
6. 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>  
Rukavishnikov G.D., Mulev S.N., Gavrillov 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>
7. 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/FTPRPI20190207>  
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>
8. 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>  
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.):43–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-43-47>
9. 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>  
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>
10. Жукова С.А., Журавлева О.Г., Онуприенко В.С., Стрешнев А.А. Изменение потока сейсмической энергии при переходе на глубокие горизонты (месторождение Апатитовый Цирк, Хибинский массив). *Горная промышленность*. 2023;(4):110–116. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-110-116>  
Zhukova S.A., Zhuravleva O.G., Onuprienko V.S., Streshnev A.A. Changes in the seismic energy flow when mining deep levels (the Apatite Circus deposit, Khibiny Massif). *Russian Mining Industry*. 2023;(4):110–116. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-110-116>
11. Баранов С.В., Шебалин П.Н. О прогнозировании афтершоковой активности. 3. Динамический закон Бота. *Физика Земли*. 2018;(6):129–136. <https://doi.org/10.1134/S0002333718060029>  
Baranov S.V., Shebalin P.N. Forecasting aftershock activity: 3. Bâth's dynamic law. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2018;54(6):926–932. <https://doi.org/10.1134/S1069351318060022>
12. Benali A., Peresan A., Varini E., Talbi A. Modelling background seismicity components identified by nearest neighbour and stochastic declustering approaches: the case of Northeastern Italy. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2020;34(6):775–791. <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01798-w>
13. Zaliapin I., Gabriellov A., Keilis-Borok V., Wong H. Clustering analysis of seismicity and aftershock identification. *Physical Review Letters*. 2008;101(1):018501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.018501>
14. Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013;118(6):2847–2864. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50179>
15. Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in southern California II: Classification and relation to physical properties of the crust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013;118(6):2865–2877. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50178>

16. Герман В.И. Прогноз обрушений на рудниках по данным сейсмического мониторинга. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2014;(2):99–109. Режим доступа: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/c95/c952a987606b0b8b645e720a8648cd10.pdf> (дата обращения: 01.04.2024).  
German V.I. Rock failure prediction in mines by seismic monitoring data. *Journal of Mining Science*. 2014;50(2):288–297. <https://doi.org/10.1134/S1062739114020124>
17. Козырев А.А., Журавлева О.Г., Жукова С.А. Пространственно-временные вариации сейсмичности в районе Саамского разлома (Хибинский массив, Кольский полуостров). *Горный журнал*. 2023;(1):79–84. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.13>  
Kozyrev A.A., Zhuravleva O.G., Zhukova S.A. Seismicity variations in space and time in the area of the Saamy fault, Khibiny Massif, Kola Peninsula. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(1):79–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.13>
18. Mendecki A.J. Real time quantitative seismology in mines: Keynote address. In: *Rockburst and Seismicity in Mines-RaSiM2: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> 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> (accessed: 02.04.2024).
19. Mendecki A.J. (ed.) *Seismic monitoring in mines*. London: Chapman and Hall; 1997. 262 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1539-8>
20. van Aswegen G., Butler A. Applications of quantitative seismology in South African gold mines. In: *Rockburst and Seismicity in Mines-RaSiM2: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> 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> (accessed: 02.04.2024).
21. 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](https://doi.org/10.36487/ACG_repo/574_45)
22. Мельников Н.Н. (ред.) *Методы и системы сейсмодетекционного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов*. Новосибирск: СО РАН; 2010. Т. 2. 261 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/21804> (дата обращения: 01.04.2024).
23. 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>
24. 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(2):763–785. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02352-8>
25. 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 52<sup>nd</sup> U.S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, Seattle, Washington, June 2018*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/329628956> (accessed: 02.04.2024).
26. 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>
27. 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>

#### 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: 20.03.2024

Поступила после рецензирования: 06.05.2024

Принята к публикации: 11.05.2024

#### Article info

Received: 20.03.2024

Revised: 06.05.2024

Accepted: 11.05.2024