

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПРИ ОТРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВСТРЕЧНЫМИ ФРОНТАМИ

О.Г. Журавлева¹, С.А. Жукова¹, И.М. Аветисян¹, С.В. Дмитриев¹

¹ Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия,
e-mail: o.zhuravleva@ksc.ru

Аннотация: Представлены результаты исследования особенностей разрушения массива горных пород при отработке удароопасного месторождения встречными фронтами на примере одного из Хибинских месторождений. Для выявления особенностей развития сейсмического процесса на различных этапах отработки месторождения проведен анализ изменений сейсмической активности и поля напряжений. Исследование сейсмического процесса проведено на основе многостадийной модели разрушения твердых тел и модифицированного концентрационного критерия (или параметра сближения сейсмических событий). Проведена кластеризация сейсмических событий на основе этого критерия. Применяемый авторами подход учитывает характеристики сейсмических событий в пространстве время-координаты-энергия, что позволяет определить особенности взаимодействия событий различного масштабного уровня. Проведено сопоставление сейсмических данных с расчетными характеристиками действующего поля напряжений в периоды между проведением массовых взрывов в стыковочных секциях двух фронтов горных работ. Актуальность исследований обусловлена тем, что применяемый подход позволяет изучить особенности энергообмена в массиве горных пород на основе данных о выделившейся сейсмической энергии и данных о перераспределении напряжений на примере отдельного участка массива пород.

Ключевые слова: мониторинг, сейсмичность, удароопасные месторождения, поле напряжений, напряженно-деформированное состояние, Хибинский массив, численное моделирование, подземные горные работы, удароопасность.

Для цитирования: 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. – С. 143–154. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_143.

Study of seismic activity during mining of a rockburst hazardous deposit with counter fronts

O.G. Zhuravleva¹, S.A. Zhukova¹, I.M. Avetisian¹, S.V. Dmitriev¹

¹ Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia,
e-mail: o.zhuravleva@ksc.ru

Abstract: The article presents the results of a study of peculiarities of rock mass failure during the development of a rockburst hazardous deposit by counter fronts on the example of one of the Khibiny deposits. In order to identify the peculiarities of the seismic process development

at different stages of the deposit development, changes in seismic activity and stress field have been analysed. The seismic process has been studied on the basis of a multistage model of solid fracture and a modified concentration criterion (or the parameter of convergence of seismic events), based on which seismic events have been clustered. The approach applied takes into account the characteristics of seismic events in the time-coordinate-energy space, which makes it possible to determine the peculiarities of interaction between different-scale events. The seismic data have been compared with the calculated characteristics of the active stress field during the periods between bulk blasts in the junction sections of the two mining fronts. The relevance of the research is due to the fact that the approach used allows studying the features of energy exchange in the rock mass on the basis of data on the released seismic energy and data on the redistribution of stresses on the example of a separate section of the rock mass.

Key words: monitoring, seismicity, rockburst hazardous deposits, stress field, stress-strain state, the Khibiny rock massif, numerical simulation, underground mining, rockburst hazard.

For citation: Zhuravleva O. G., Zhukova S. A., Avetisian I. M., Dmitriev S. V. Study of seismic activity during mining of a rockburst hazardous deposit with counter fronts. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-1):143-154. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_143.

Введение

При отработке удароопасных месторождений России и мира по-прежнему актуальной остается проблема возникновения опасных геодинамических явлений различного масштаба от горных ударов до землетрясений [1–4]. В основе процессов подготовки и реализации таких явлений лежат изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород. Основными факторами, приводящими к росту уровня напряжений на обрабатываемых горизонтах и к увеличению зон их концентрации, являются углубление и интенсификация горных работ, а также направление отработки месторождений встречными фронтами.

В окрестности сближающихся фронтов горных работ происходит увеличение зон повышенной концентрации напряжений как по площади, так и по абсолютным значениям. В определенный момент времени поле напряжений в стыковочной секции формируется в результате взаимного влияния фронтов горных работ, что может привести к существен-

ному росту сейсмической активности. В ряде случаев это может приводить к возникновению опасных ситуаций, связанных с угрозой потери устойчивости массива горных пород вблизи горных выработок.

В связи с этим актуальной задачей является ретроспективный анализ процесса разрушения массива горных пород на основе данных сейсмических наблюдений и результатов моделирования НДС массива с учетом различных горно-геологических факторов, влияющих на процесс разрушения, а именно в периоды между проведением массовых взрывов в стыковочных секциях.

Методы исследований

Выявление закономерностей проявления горных ударов и особенностей удароопасности при ведении горных работ является предметом изучения многих исследователей [1–4]. При ведении горных работ происходит постоянное изменение поля напряжений. Отражением процесса изменения поля напряжений является сейсмичность массива горных

пород: каждое сейсмическое событие (или взрыв) приводит к изменению поля напряжений (причем такое изменение возможно и в сторону уменьшения, и в сторону увеличения значений действующих напряжений). Это подтверждает практика многолетних сейсмических наблюдений как на рудниках Хибинского массива [5–7], так и на многих месторождениях России [8–11] и мира [12–15].

При отработке удароопасных месторождений Хибин основными участками, где происходит разрушение массива, являются участки вблизи проводимых горных работ и консольная часть, где может происходить интенсивное трещинообразование. На участках вблизи проводимых горных работ формируются зоны повышенной концентрации сжимающих напряжений, а разрушение консоли необрушенных пород висячего бока рудной залежи происходит под действием растягивающих напряжений.

При изучении сейсмического процесса на рудниках в качестве модели разрушения многими исследователями применяется многостадийная модель разрушения твердых тел, основанная на кинетической концепции прочности и концентрационном критерии разрушения. В соответствии с этой моделью каждое разрушение (разрыв) готовится более мелкими разрывами, а процесс разрушения на разных масштабных уровнях является самоподобным.

Актуальной задачей при изучении сейсмичности на рудниках является выявление взаимодействующих друг с другом сейсмических событий, например, в работе [16] применяется метод ближайшего соседа, основанный на использовании функции близости по пространству–времени–магнитуде. В работе [17] для анализа каталогов сейсмических событий предложен модифицированный концентрационный критерий разруше-

ния (или параметра сближения сейсмических событий), значение которого определяется для каждой пары сейсмических событий (i и j) по формуле:

$$k_{ij} = \frac{d_{ij}}{(L_i + L_j)/2}, \quad (1)$$

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

Если значение k_{ij} меньше заданного порогового значения, то сейсмические события считаются связанными. Этот параметр учитывает только пространственное расположение событий и их энергию. В настоящей работе авторами дополнительно учитывается фактор времени, для которого также задается пороговое значение (t_{ij}), при превышении которого события не будут считаться связанными (т.е. рассматривается близость событий по пространству–времени–энергии).

Для изучения особенностей энергообмена в массиве горных пород учитываются данные о сейсмичности и о перераспределении напряжений. Подобный комплексный подход в настоящее время применяется многими исследователями [18–20]. При отработке стыковочных секций и при сближении фронтов горных работ возникают участки повышенной концентрации напряжений. После отбойки стыковочных секций концентрация напряжений значительно снижается.

Расчеты НДС массива, а также визуализация результатов (сопоставление данных распределения НДС массива и сейсмичности) выполнены в разработанном в Горном институте КНЦ РАН программном комплексе Sigma GT, позволяющем проводить моделирование поля напряжений и деформаций с учетом основных геологических и горнотехнических факторов на нескольких масштабных уровнях.

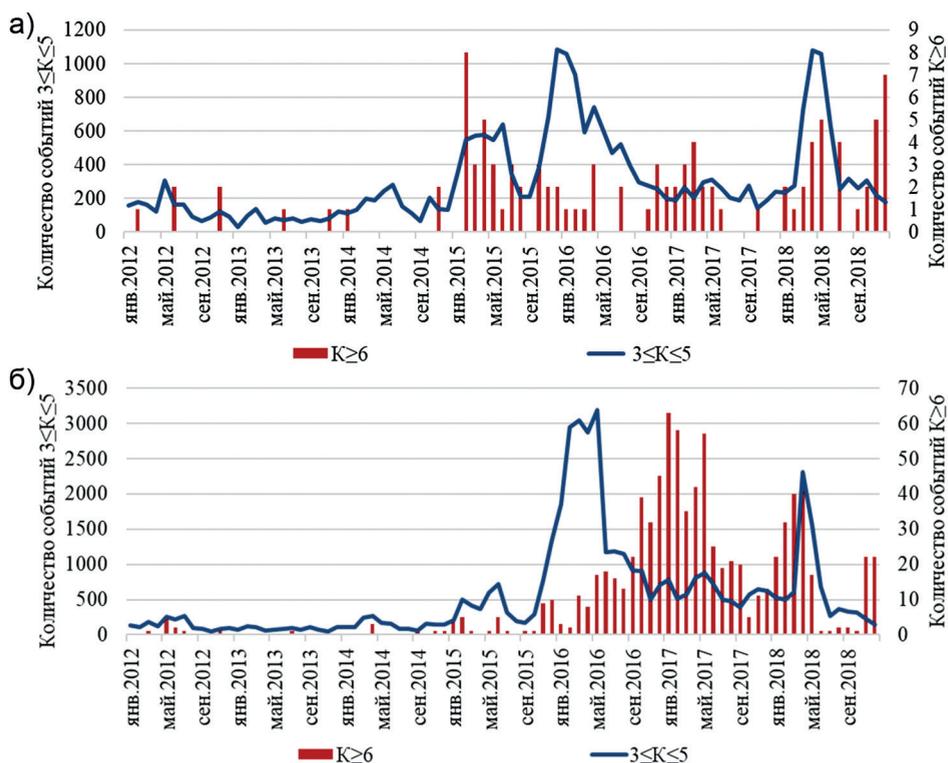


Рис. 1. Ежемесячное распределение сейсмособытий на месторождении: район ведения горных работ (а); консольная часть (б)

Fig. 1. Monthly distribution of seismic events in a deposit: a mining area (a); console part (b)

Результаты

Наибольшее накопление упругой энергии в скальном массиве происходит в зонах концентрации сжимающих напряжений, поэтому для исследования процессов концентрации и диссипации энергии выбран характерный высоконапряженный участок массива одного из удароопасных месторождений Хибин, отработка которого проводилась встречными фронтами. Исследуемая область массива не пересекается крупными разломными структурами, находится в зоне влияния растягивающих напряжений, которые действуют в консоли подработанных пород.

Для выявления особенностей развития сейсмического процесса проведен статистический анализ данных сейсмических наблюдений. Рассмотрены пе-

риоды времени, когда одновременно происходило обрушение консоли висячего бока рудной залежи и проводилась отработка стыковочной секции встречными фронтами горных работ.

Анализ сейсмических данных проведен за период мониторинга 01.01.2012 – 31.12.2018, детальный анализ и кластеризация – за период 01.01.2015 – 31.12.2018. На графиках (рис. 1) показано ежемесячное распределение сейсмических событий различного энергетического уровня. Слабыми событиями считаются события энергетического класса $K = 3 - 5$, сильными – энергетического класса $K \geq 6$ и выше. При построении графиков, представленных на рис. 1 – 2, разделение на консольную часть массива и зону ведения горных работ проведено условно (по отм. +400 м).

Из представленных на рис. 1 графиков видно, что процессы, происходящие в массиве горных пород в исследуемый период времени, сопровождались большим количеством сейсмических событий различной энергии. И если для слабых сейсмических событий наблюдается некоторое сходство (пиковые значения совпадают по времени), то для сильных событий различия существенны. В зоне ведения горных работ не происходит существенного роста числа сильных сейсмических событий (за период мониторинга максимально зарегистрировано 8 событий в феврале 2015 г. с суммарной выделившейся энергией — $2,6 \cdot 10^7$ Дж). В консоли отчетливо виден переход разрушения на новый масштабный уровень: начиная с октября 2015 г. наблюдался 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 событий в месяц зарегистрировано в период с октября 2016 г. по май 2017 г.

включительно). После слияния образующихся трещин в единый разрыв произошло самообрушение консольной части массива.

Активизация сейсмичности в 2015 г. связана с формированием блока-целика на отм. +396 ÷ +402 м, а в сентябре 2015 г., апреле 2016 г., январе 2017 г., мае 2018 г. были произведены взрывы стыковочных секций на отм. +402 м, +374 м, +358 м, +337 м соответственно. Все взрывы сопровождались длительной афтершоковой серией и обрушением пород консоли. Таким образом, процессам трещинообразования и своевременному самообрушению пород консольной части способствует проведение массовых взрывов: происходит разгрузка массива горных пород, что отражается в постепенном снижении сейсмической активности.

Далее на примере данных за период времени 01.08.2015 – 01.03.2016 показано применение представленного подхода: результаты кластерного анализа и сопоставление с данными НДС массива горных пород.

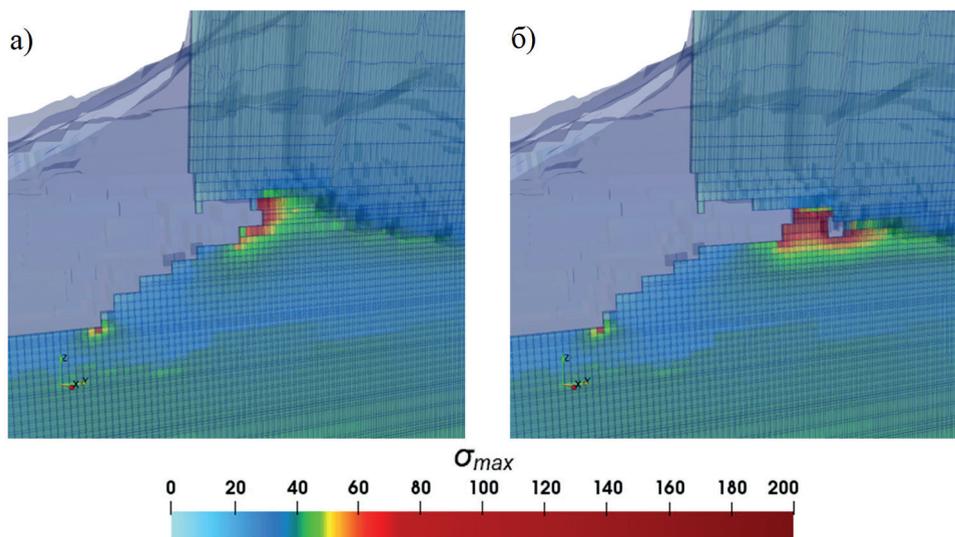


Рис. 2. Распределение σ_{max} в разрезе по простиранию рудного тела, МПа: на 01.08.2015 (а); на 01.03.2016 (б)

Fig. 2. Distribution σ_{max} in the section along the strike of the ore body, MPa: 01.08.2015 (a); 01.03.2016 (b)

На рис. 2, а представлено распределение максимальной компоненты главных напряжений σ_{\max} в разрезе по простиранию рудного тела на 01.08.2015, т.е. на момент времени, когда влияние встречных фронтов горных работ не было существенным. Видно, что зона концентрации σ_{\max} приурочена к фронту горных работ, значения σ_{\max} достигают 77 МПа.

После произведенного массового взрыва (27.09.2015) в стыковочной секции на отм. +402 м и выше за сутки было зарегистрировано 86 событий с энергий от 100 Дж ($E_{\text{сред}} = 1,5 \cdot 10^4$ Дж, $E_{\text{сум}} = 1,3 \cdot 10^6$ Дж). Среднестатистический эффект этого взрыва не смог должным образом способствовать самообрушению консольной части массива и привел только к пылеобразованию на поверхности за счет незначительного просыпания раздробленных пород. Сейсмичность в данном районе продолжала расти и до конца 2015 г. было зарегистрировано еще 1669 событий ($E_{\text{сред}} = 3,6 \cdot 10^4$ Дж, $E_{\text{сум}} =$

$= 6 \cdot 10^6$ Дж). На рис. 2, б представлено распределение σ_{\max} в разрезе по простиранию рудного тела на 01.03.2016, когда взаимное влияние двух фронтов горных работ привело к образованию зоны концентрации сжимающих напряжений со значениями до 130 МПа.

Таким образом, за рассматриваемый период времени развитие горных работ привело к увеличению зоны концентрации напряжений σ_{\max} как по площади, так и по абсолютным значениям. Ранее многолетними исследованиями установлено и утверждено в действующих нормативных документах АО «Апатит», что на Хибинских апатитовых рудниках проявления горного давления в динамической форме возможны при достижении действующих напряжений значений $0,5\sigma_{\text{сж}}$.

Для апатитовых руд $\sigma_{\text{сж}} = 120 - 140$ МПа, следовательно, в зонах концентраций σ_{\max} высока вероятность динамических проявлений горного давления.

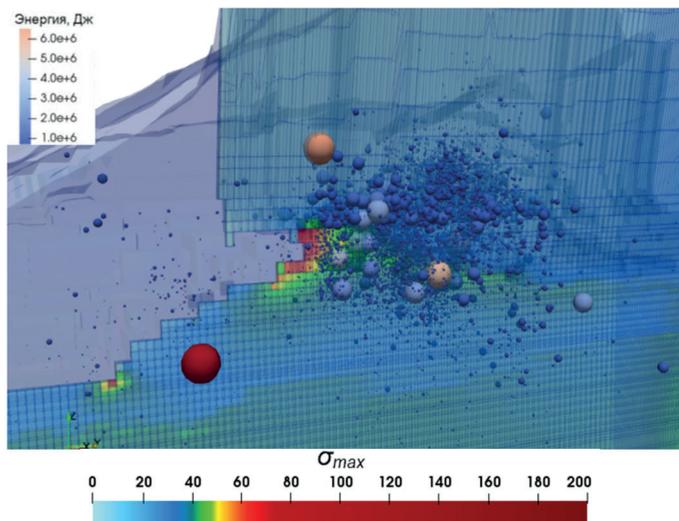


Рис. 3. Сейсмические события в проекции на распределение σ_{\max} в разрезе по простиранию рудного тела за период с 01.08.2015 по 01.03.2016 гг. (цвет и размер сферы соответствует зарегистрированной энергии сейсмического события)

Fig. 3. Seismic events in the projection on the distribution of σ_{\max} in the section along the strike of the ore body for 01.08.2015 – 01.03.2016 period (the color and size of the sphere fit the seismic energy)

Сейсмичность рассматриваемого участка отражает и процесс разрушения массива при развитии горных работ, и формирование трещин в основании консольного зависания. Однако если рассматривать сейсмичность в целом, то какие-либо особенности развития процесса разрушения выявить трудно, что видно из данных, представленных на рис. 3.

Видно, что сейсмические события распределены неравномерно, бóльшая часть сейсмических событий зарегистрирована в консольной части массива, а также вблизи фронтов горных работ. Для более детального исследования необходимо рассматривать отдельные участки, на которых события могли находиться в зоне наиболее существенного взаимного влияния. Определить такие участки позволяет кластерный анализ. Для выявления цепочек связанных сейсмических событий проводились многовариантные расчеты при различных критических значениях параметра сближенности сейсмособытий k_{ij} и при различных временных диапазонах t_{ij} , при

которых два события считаются связанными. Варьирование критических (пороговых) значений этих параметров позволяет детально исследовать особенности развития сейсмического процесса при влиянии различных факторов. Кроме того, немаловажным является исключение из рассмотрения одиночных событий, благодаря чему в некоторой степени упрощается процесс интерпретации данных.

Рассматривались критические значения параметра сближенности сейсмических событий в диапазоне 3–5, т.к. такой диапазон значений концентрационного критерия считается критическим, при котором процесс разрушения может завершиться формированием наиболее крупной трещины.

В условиях Хибинских апатитовых рудников опасными считаются сейсмособытия энергетического класса $K = 6$ и более. Необходимо учитывать, что массив горных пород находится в условиях постоянной техногенной нагрузки, в результате которой увеличивается скорость деформирования пород по сравнению с

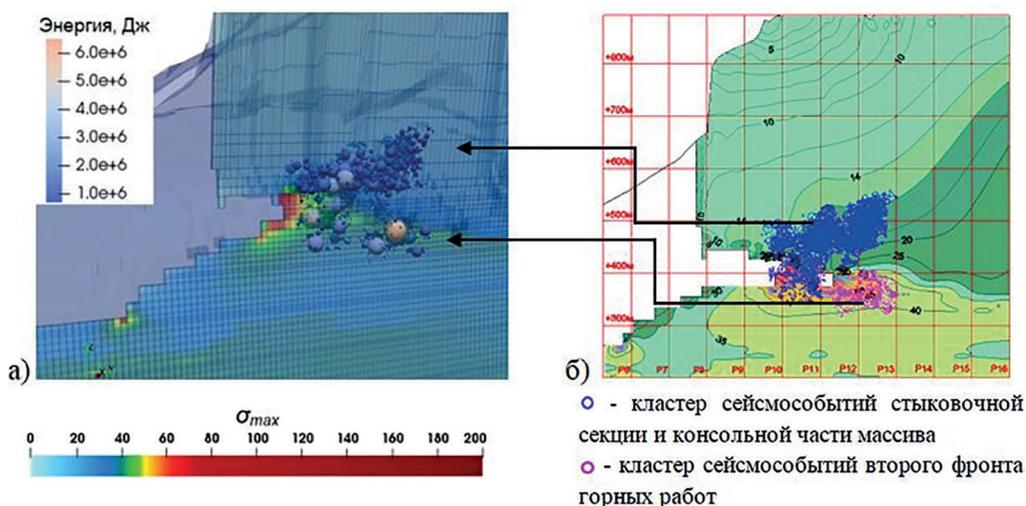


Рис. 4. Кластеры сейсмических событий: 3D-представление (а); 2D-представление (размер сферы (окружности) пропорционален зарегистрированной энергии сейсмического события) (б)

Fig. 4. Clusters of seismic events: 3D-view (a); 2D-view (color and size of sphere (or circle) fit the seismic energy) (b)

естественной, а также накладываются динамические воздействия от взрывов. Все это приводит к нарушению процесса формирования очага (времени реализации) сильного сейсмического события. В настоящей работе для временного параметра рассматривались различные вариации (± 30 дней).

В результате расчетов выявлены два наиболее крупных кластера сейсмических событий (рис. 4). На рис. 4, а показано 3D-распределение сейсмических событий за исключением событий, не попавших ни в один из кластеров. На рис. 4, б показана проекция сейсмических событий двух кластеров на разрез по магистрали М-50. Здесь более наглядно видно, что один из кластеров приурочен к стыковочной секции и консоли (на рис. 4, б — показан синим цветом), второй — приурочен к правому фронту работ (на рис. 4, б — справа — розовым цветом).

На рис. 5 представлена динамика числа сейсмических событий для двух выявленных кластеров. Видно, что в кластере в районе стыковочной секции и консоли наблюдается постепенное на-

растание сейсмичности: первое сейсмическое событие в кластере произошло 27.09.2015, в тот же день, когда был произведен взрыв стыковочной секции (т.е. проведена запланированная сбойка двух фронтов горных работ). В дальнейшем сейсмическая активность увеличивалась, что отражает процесс перераспределения напряжений при сближении фронтов горных работ и формировании трещины в консоли необрушенных пород.

Развитие сейсмического процесса во втором кластере, по-видимому, отражает отклик массива горных пород именно на проводимые горные работы вблизи только одного фронта, т.е. за пределами зоны влияния второго фронта работ. Здесь уровень сейсмичности не является критичным для условий месторождения. По мере удаления фронта горных работ, как правило, сейсмичность на таких участках затухает, что и произошло на данном участке массива в начале 2016 г.

Следует отметить, что в процессе анализа было выявлено интересное пространственное распределение сейсмических событий в кластере, приурочен-

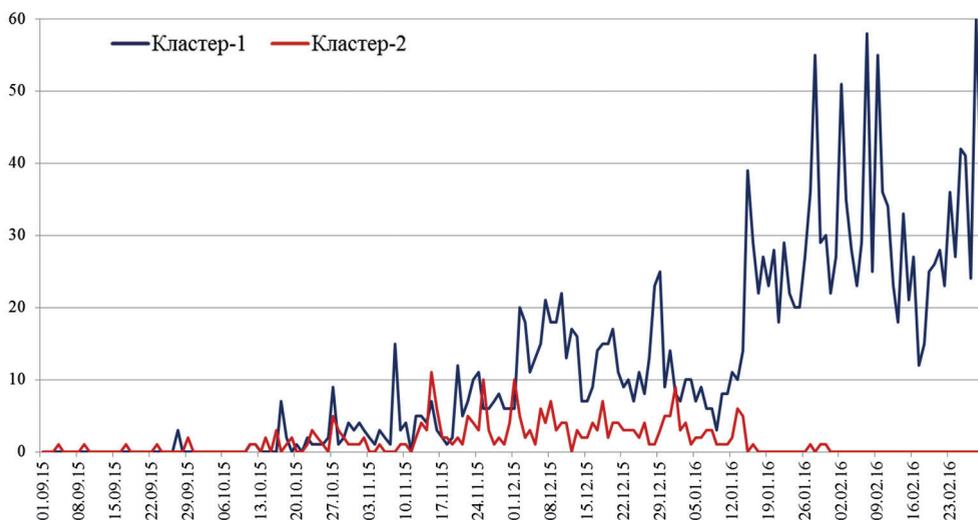


Рис. 5. Динамика числа сейсмических событий для двух выявленных кластеров

Fig. 5. Dynamics of the number of seismic events for the two identified clusters

ному к стыковочной секции и консоли (кластер-1): очаги наиболее сильных событий расположены практически вдоль вертикальной линии. По-видимому, происходило формирование субвертикальной трещины, по которой впоследствии могло произойти обрушение пород консольной части, развитию такого процесса способствуют повышенные растягивающие напряжения в этой области.

Заключение

Таким образом, опробован подход к выявлению особенностей сейсмического процесса на основе многостадийной модели разрушения твердых тел и модифицированного концентрационного критерия (или параметра сближения сейсмических событий), отличающийся учетом фактора времени при выявлении кластеров сейсмических событий, образующихся под влиянием различных природно-техногенных факторов. Такой подход позволяет учитывать пространственно-временные характеристики сейсмичности и определять особенности взаимодействия событий различного масштабного уровня. Исключение из рас-

смотрения одиночных событий позволяет упростить задачу исследования сложного сейсмического процесса при ведении горных работ.

В работе показано, что сейсмические события образуют кластеры как в непосредственной близости фронта работ, так и в консольной части массива. Авторы считают, что представленный подход применим для изучения особенности энергообмена в массиве горных пород на основе данных о выделившейся сейсмической энергии и данных о перераспределении напряжений в массиве горных пород.

Применение кластеризации позволяет из внешне хаотичного облака сейсмических событий выявить связанные цепочки событий с учетом их пространственного местоположения, времени реализации и энергии. Варьирование пороговых значений при кластеризации позволяет детально исследовать пространственно-временную структуру, идентифицировать различные пространственно-временные области возникновения сейсмических событий и выявить их связь с горно-геологическими факторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батугин А. С. Общие закономерности проявления сильных горных ударов и индуцированных землетрясений на участках с предельно напряженным состоянием земной коры // Горный журнал. — 2021. — № 1. — С. 22–27. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.04.

2. Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г., Усиков В. И., Потапчук М. И. Геодинамическое состояние массива пород Николаевского полиметаллического месторождения и особенности проявления удароопасности при его освоении // Горный журнал. — 2016. — № 12. — С. 13–19. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.03.

3. Dineva S., Boskovic M. Evolution of seismicity at Kiruna Mine / Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining Perth. Australian Centre for Geomechanics, 2017, pp. 125–140.

4. Mendecki A. J. Mine seismology reference book: seismic hazard. Institute of Mine Seismology, 2016, 88 p.

5. 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. — С. 74–83. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83.

6. Козырев А. А., Жукова С. А., Журавлева О. Г., Онуприенко В. С. Развитие инструментального и методического обеспечения контроля наведенной сейсмичности на Хи-

бинских апатит-нефелиновых месторождениях // Горный журнал. — 2020. — № 9. — С. 19–26. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.02.

7. 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. — С. 5–17. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_5.

8. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Шевкунова Е. В., Подкорытова В. Г., Курприш О. В. Наведенная сейсмичность в угольных и железорудных районах Кузбасса // Российский сейсмологический журнал. — 2020. — Т. 2. — № 3. — С. 88–96. DOI: 10.35540/2686-7907.2020.3.08.

9. Еременко А. А., Машуков И. В., Еременко В. А. Геодинамические и сейсмические явления при обрушении блоков на удароопасных месторождениях Горной Шории // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2017. — № 1. — С. 70–76. DOI: 10.1134/S1062739117011859.

10. Злобина Т. В., Дягилев Р. А. Совершенствование модели влияния техногенных факторов для прогноза сейсмической активности на руднике СКРУ-2 // Геофизика. — 2019. — № 5. — С. 37–42.

11. Яковлев Д. В., Цирель С. В., Мулев С. Н. Закономерности развития и методика оперативной оценки техногенной сейсмической активности на горных предприятиях и в горнодобывающих регионах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2016. — № 2. — С. 34–47. DOI: 10.1134/S1062739116020369.

12. Lasocki S., Orlecka-Sikora B., Mutke G., Pytel W., Rudzinski L., Markowski P., Piasecki P. A catastrophic event in Rudna copper-ore mine in Poland on 29 November, 2016: What, how and why / 9th International symposium on rockbursts and seismicity in mines. Santiago, Chile, 2017, pp. 316–324.

13. Liu J.-P., Feng X.-T., Van Aswegen G., Blake W., Srinivasan C., Rao M. V. M. S., Zembaty Z. Case histories of rockbursts at metal mines // Rockburst. Mechanisms, Monitoring, Warning, and Mitigation. Chapter 3, 2018, pp. 47–92. DOI: 10.1016/B978-0-12-805054-5.00003-2.

14. Simser B. P. Rock burst management in Canadian hard rock mines // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019, vol. 11, no. 5, pp. 1036–1043. DOI: 10.1016/j.jrmge.2019.07.005.

15. Foulger G. R., Wilson M. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes // Earth-Science Reviews. 2018, vol. 178, pp. 438–514. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.07.008.

16. Баранов С. В., Жукова С. А., Корчак П. А., Шебалин П. Н. Продуктивность техногенной сейсмичности // Физика Земли. — 2020. — № 3. — С. 40–51. DOI: 10.1134/S1069351320030015.

17. Герман В. И. Прогноз обрушений на рудниках по данным сейсмического мониторинга // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — № 2. — С. 99–109. DOI: 10.1134/S1062739114020124.

18. De Santis F., Renaud V., Gunzburger Y., Kinscher J., Bernard P., Contrucci I. In situ monitoring and 3D geomechanical numerical modelling to evaluate seismic and aseismic rock deformation in response to deep mining // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2020, vol. 129, article 104273. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104273.

19. Chlebowski D., Burtan Z. Mining-induced seismicity during development works in coalbeds in the context of forecasts of geomechanical conditions // Energies. 2021, vol. 14, no. 20, article 6675. DOI: 10.3390/en14206675.

20. Das Jennifer P., Porchelvan P., Naik S. R. Numerical modelling of mining induced seismicity in deep closed mines: A case study / Proceedings of Geotechnical Challenges in Mining, Tunneling and Underground Infrastructures. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 437–455. DOI: 10.1007/978-981-16-9770-8_28. 

REFERENCES

1. Batugin A. S. General features of strong rock bursts and induced earthquakes in critical-stress areas of the Earth's crust. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 1, pp. 22–27. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.04.
2. Rasskazov I. Yu, Saksin B. G., Usikov V. I., Potapchuk M. I. Rock mass geodynamics and mining-induced rockbursting at Nikolaev complex deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2016, no. 12, pp. 13–19. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.03.
3. Dineva S., Boskovic M. Evolution of seismicity at Kiruna Mine. *Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining Perth*. Australasian Centre for Geomechanics, 2017, pp. 125–140.
4. Mendecki A. J. *Mine seismology reference book: seismic hazard*. Institute of Mine Seismology, 2016, 88 p.
5. 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. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 12, pp. 74–83. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83.
6. Kozyrev A. A., Zhukova S. A., Zhuravleva O. G., Onuprienko V. S. Induced seismicity of rock mass: Development of instrumental and methodological support to control seismicity at the khibiny apatite-nepheline deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 9, pp. 19–26. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.02.
7. 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. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 7, pp. 5–17. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_5.
8. Emanov A. A., Fateyev A. V., Shevkunova E. V., Podkorytova V. G., Kuprish O. V., Induced seismicity in coal and iron ore areas of Kuzbass. *Russian Journal of Seismology*. 2020, vol. 2, no. 3, pp. 88–96. [In Russ]. DOI: 10.35540/2686-7907.2020.3.08.
9. Eremenko A. A., Mashukov I. V., Eremenko V. A. Geodynamic and seismic events under rockburst-hazardous block caving in Gornaya Shoria. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2017, no. 1, pp. 70–76. DOI: 10.1134/S1062739117011859.
10. Zlobina T. V., Dyagilev R. A. Improvement of the model of influence of mining-induced factors for seismic activity prediction at the SKRU-2 mine. *Geophysics*. 2019, no. 5, pp. 37–42. [In Russ].
11. Yakovlev D. V., Tsirel S. V., Mulev S. N. Laws of spreading and operational evaluation procedure for induced seismicity in mines and in mining areas. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2016, no. 2, pp. 34–47. [In Russ]. DOI: 10.1134/S1062739116020369.
12. Lasocki S., Orlecka-Sikora B., Mutke G., Pytel W., Rudzinski L., Markowski P., Piasecki P. A catastrophic event in Rudna copper-ore mine in Poland on 29 November, 2016: What, how and why. *9th International symposium on rockbursts and seismicity in mines*. Santiago, Chile, 2017, pp. 316–324.
13. Liu J.-P, Feng X.-T, Van Aswegen G., Blake W., Srinivasan C., Rao M. V. M. S., Zembaty Z. Case histories of rockbursts at metal mines. *Rockburst. Mechanisms, Monitoring, Warning, and Mitigation*. Chapter 3, 2018, pp. 47–92. DOI: 10.1016/B978-0-12-805054-5.00003-2.
14. Simser B. P. Rock burst management in Canadian hard rock mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019, vol. 11, no. 5, pp. 1036–1043. DOI: 10.1016/j.jrmge.2019.07.005.
15. Foulger G. R., Wilson M. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*. 2018, vol. 178, pp. 438–514. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.07.008.
16. Baranov S. V., Zhukova S. A., Korchak P. A., Shebalin P. N. Productivity of mining-induced seismicity. *Fizika Zemli*. 2020, no. 3, pp. 40–51. [In Russ]. DOI: 10.1134/S1069351320030015.

17. German V. I. Rock failure prediction in mines by seismic monitoring data. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2014, no. 2, pp. 99–109. [In Russ]. DOI: 10.1134/S1062739114020124.

18. De Santis F., Renaud V., Gunzburger Y., Kinscher J., Bernard P., Contrucci I. In situ monitoring and 3D geomechanical numerical modelling to evaluate seismic and aseismic rock deformation in response to deep mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020, vol. 129, article 104273. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2020.104273.

19. Chlebowski D., Burtan Z. Mining-induced seismicity during development works in coalbeds in the context of forecasts of geomechanical conditions. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 20, article 6675. DOI: 10.3390/en14206675.

20. Das Jennifer P., Porchelvan P., Naik S. R. Numerical modelling of mining induced seismicity in deep closed mines: A case study. *Proceedings of Geotechnical Challenges in Mining, Tunneling and Underground Infrastructures*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 437–455. DOI: 10.1007/978-981-16-9770-8_28.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Журавлева Ольга Геннадьевна¹ – канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: o.zhuravleva@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8986-9559,

Жукова Светлана Александровна¹ – канд. техн. наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: svetlana.zhukowa@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0769-6584,

Аветисян Иван Михайлович¹ – канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: i.avetisian@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0002-4569-9594,

Дмитриев Сергей Владимирович¹ – научный сотрудник,
e-mail: s.dmitriev@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0422-5699,

¹ Горный институт Кольского научного центра РАН.

Для контактов: Журавлева О.Г., e-mail: o.zhuravleva@ksc.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

O.G. Zhuravleva¹, Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher, e-mail: o.zhuravleva@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8986-9559,

S.A. Zhukova¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e-mail: svetlana.zhukowa@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0769-6584,

I.M. Avetisian¹, Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher, e-mail: i.avetisian@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0002-4569-9594,

S.V. Dmitriev¹, Researcher, e-mail: s.dmitriev@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0422-5699,

¹ Mining Institute, Kola Scientific Centre
of Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia.

Corresponding author: O.G. Zhuravleva, e-mail: o.zhuravleva@ksc.ru.

Получена редакцией 25.03.2022; получена после рецензии 11.08.2022; принята к печати 10.11.2022.

Received by the editors 25.03.2022; received after the review 11.08.2022; accepted for printing 10.11.2022.