

Изменение потока сейсмической энергии при переходе на глубокие горизонты (месторождение Апатитовый Цирк, Хибинский массив)

С.А. Жукова¹✉, О.Г. Журавлева¹, В.С. Онуприенко², А.А. Стрешнев²

¹ Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

² Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Российская Федерация

✉ svetlana.zhukowa@yandex.ru

Резюме: Исследование посвящено оценке изменений потока сейсмической энергии при продвижении горных работ на глубокие горизонты на примере апатит-нефелинового месторождения Апатитовый Цирк (Хибинский массив), разработка подземных запасов которого осложняется наличием рядом месторождения Плато Расвумчорр, обрабатываемого открытым способом. В зоне стыковки находятся выработки подземного рудника, борта карьера. В этом районе обнажено большое количество трещин и тектонических нарушений, которые в период снеготаяния обводняются. Вследствие чего происходит изменение напряженно-деформированного состояния отдельных участков массива (преимущественно зон тектонических нарушений), что в целом отражается на сейсмическом режиме месторождений. Вместе с переходом горных работ на глубину отмечается и рост числа сейсмических событий, их энергии на нижних горизонтах рудника. Также в активизации сейсмичности отразились процессы трещинообразования в консольной части массива горных пород. В работе представлены карты площадного распределения потока сейсмической энергии событий по шахтному полю рудника по мере продвижения горных работ на глубину. Установлены участки повышенного уровня распределения потока сейсмической энергии, соответствующие зонам деформаций сжатия (два нижних слоя, где ведутся интенсивные горные работы) и зонам деформаций растяжения в консольной части массива горных пород (верхний третий слой), где происходит постепенное обрушение пород приповерхностной области массива.

Ключевые слова: удароопасные месторождения, геодинамическая безопасность, сейсмический мониторинг, наведенная сейсмичность, поток сейсмической энергии, подземные горные работы, Хибинский массив, месторождение Апатитовый Цирк, месторождение Плато Расвумчорр

Для цитирования: 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>

Changes in the seismic energy flow when mining deep levels (the Apatite Circus deposit, Khibiny Massif)

S.A. Zhukova¹✉, O.G. Zhuravleva¹, V.S. Onuprienko², A.A. Streshnev²

¹ Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

² Kirovsk branch JSC «Apatit», Kirovsk, Russian Federation

✉ svetlana.zhukowa@yandex.ru

Abstract: The study is aimed at assessing the changes in seismic energy flow as mining operations advance to deep levels as exemplified by the Apatite Circus apatite-nepheline deposit (Khibiny Massif), which underground reserves are difficult to develop due to the presence of the nearby Rasvumchorr Plateau deposit, which is mined using the open-pit method. Underground mine workings and open-pit walls are located in the bordering area. A large number of fractures and tectonic faults are exposed in this area, which become waterlogged when the snow thaws. As a result, the stress-and-strain state of certain rock mass sections (mainly the tectonic fault zones) changes, which generally affects the seismic settings of the deposits. Along with transition of the mining operations to greater depth, an increase is observed in the number of seismic events and their energy in the lower levels of the mine. Also the fracturing processes in the overhand part of the rock mass are reflected in seismicity activation. The paper presents maps showing the spatial distribution of the seismic energy flows of various events across the mine field as mining progresses to greater depth. It has been established that there exist areas of increased level of seismic energy flow distribution,

corresponding to the compressive strain zones (two lower levels, where intensive mining is in progress) and tensile strain zones in the overhand part of the rock mass (the top third layer), where a gradual collapse of the near-surface area of the mass occurs.

Keywords: rock-bump hazardous deposits, geodynamic safety, seismic monitoring, induced seismicity, seismic energy flow, underground mining, Khibiny Massif, Apatite Circus deposit, Rasvumchorr Plateau deposit

For citation: 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. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-110-116>

Введение

Условия ведения горных работ на месторождениях, склонных и опасных по проявлению горных ударов, определяются геомеханическими особенностями месторождений. При интенсивном освоении месторождений полезных ископаемых происходят непрерывные процессы трансформации исходного поля напряжений массива горных пород, что может приводить к увеличению сейсмической активности и реализации опасных геодинамических явлений [1–8]. При достижении критических значений действующих напряжений возможны проявления динамических форм горного давления – от стреляния до горных ударов. По многолетнему опыту ведения горных работ на Хибинских месторождениях опасность динамических проявлений горного давления возникает при величине напряжений в нетронутым массиве 30–40 МПа для большинства типов пород.

Известно, что сейсмическая активность является реакцией массива горных пород на проводимые горные работы, т.е. на изменение поля напряжений при техногенном воздействии. Целью исследований является выявление особенностей параметров сейсмического процесса при продвижении горных работ на глубокие горизонты на примере апатит-нефелинового месторождения Апатитовый Цирк. В качестве информативного параметра сейсмического процесса рассматривается распределение потока сейсмической энергии на определенных участках месторождения, что позволит установить картину формирования и перераспределения поля напряжений в массиве горных пород.

Объект исследований

Расвумчоррский рудник с 1954 г. ведет добычу апатит-нефелиновых руд подземным способом на месторождении Апатитовый Цирк, которое в восточной части граничит с месторождением Плато Расвумчорр, разрабатываемым карьером Центральный с 1964 г. Подземная выемка запасов северо-западного фланга месторождения Плато Расвумчорр осуществляется Расвумчоррским рудником с 1997 г. Месторождения считаются опасными по проявлению горных ударов с отметки +600 м. В настоящее время горные работы уже ведутся на глубоких горизонтах, нижняя высотная отметка – отм. +310 м.

Месторождение Апатитовый Цирк является частью крупной апатит-нефелиновой залежи юго-западного рудного поля Хибинского массива. На северо-западном фланге месторождения Апатитовый Цирк граничит с Юкспорским месторождением, на восточном – с Плато Расвумчорр (рис. 1).

Массив горных пород в пределах месторождения Апатитовый Цирк состоит из блоков разного ранга и осложнен тектоническими нарушениями и геологическими вклю-

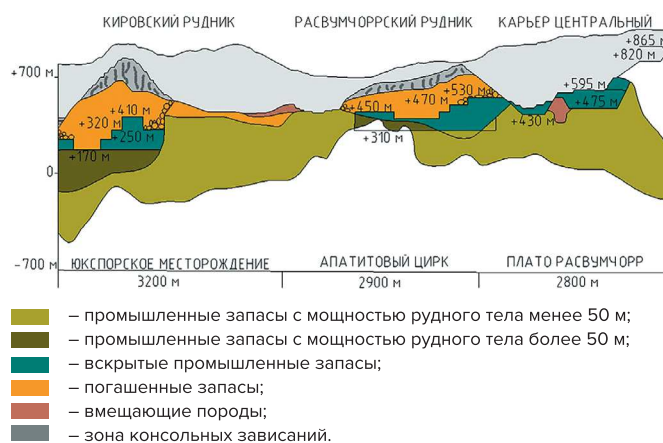


Рис. 1
Схема продольного разреза месторождений Хибинского массива, граничащих с Апатитовым Цирком

Fig. 1
Schematic longitudinal cross-section of deposits in the Khibiny Massif that border on the Apatite Circus deposit

чениями (дайки, жилы и т.д.), что существенно влияет на геодинамический режим месторождения при ведении горных работ, особенно при их интенсификации и переходе на большие глубины.

За многолетний мониторинг района производственной деятельности месторождения Апатитовый Цирк и северо-западной части месторождения Плато Расвумчорр были выделены следующие геомеханические условия и особенности их отработки [9–10]:

1. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород на месторождении является гравитационно-тектоническим со значительным преобладанием горизонтальной составляющей (в 2–3 раза) [9]. Причем в породах лежачего бока такое превышение может быть ещё более существенным (до 10 раз).
2. По деформационным и прочностным свойствам породы и руды исследуемых месторождений имеют высокие показатели прочности и упругости. Предел прочности при сжатии руд составляет 80–150 МПа, пород – 120–250 МПа; при растяжении – 3–10 МПа и 5–20 МПа соответственно.
3. Разработку подземных запасов Расвумчоррского рудника осложняет наличие карьера на месторождении Плато Расвумчорр. В зоне стыковки находятся выработки подземного рудника и борта карьера, кроме того, отвалы карьера на поверхности расположены над подземными выработками. Наличие подобного «соседства» оказывает значительное влияние на распределение естественных напряжений в массиве горных пород.

Методы исследований

Отработка запасов апатит-нефелинового месторождения Апатитовый Цирк ведется на нескольких горизонтах: +530 м, +470 м, +450 м, +310 м. Сейсмический мониторинг на этом участке Хибинского массива осуществляется с 2001 г. В настоящее время сеть датчиков охватывает объем массива размером 2000 м x 1000 м x 350 м. Для выявления особенностей развития сейсмического процесса шахтное поле рудника было разделено на три слоя по высоте: 1) от отм. +300 м до отм. +400 м; 2) от отм. +401 м до отм. +500 м; 3) от отм. +501 м до отм. +600 м.

Для оценки сейсмической активности использовалась база данных сейсмических событий за период 2018–2022 гг. В зоне контроля исследуемого месторождения за это время всего произошло более 15 тыс. событий с энергией от 10³ Дж, из которых 77 сейсмособытий – с энергией порядка 10⁶–10⁸ Дж. Из них большая часть событий (67) с энергией порядка 10⁶ Дж, 9 событий – 10⁷ Дж и одно событие – 10⁸ Дж.

При изучении временных особенностей проявления сейсмической активности использовался статистический анализ данных о динамике параметров сейсмичности и взрывного воздействия на массив горных пород.

Для выявления пространственных аномалий сейсмичности (или их отсутствия) использовался параметр количества выделившейся энергии. Построение карт распределения значений сейсмического энерговыделения находит широкое применение при исследовании природной и техногенной сейсмичности [11–12]. В настоящей работе применялся следующий подход. Для трех выбранных вертикальных слоев территория шахтного поля, охватываемая сетью мониторинга, была разбита на пространственные ячейки размером 50x50 м. Для каждой ячейки проведено определение потока сейсмической энергии ($\Sigma ES_{\text{яч}}$ – соотношение суммарной выделившейся сейсмической энергии к площади пространственной ячейки). Далее проводилось сопоставление ежегодных карт распределений потока сейсмической энергии по слоям с фактическим продвижением горных работ, информацией о взрывном воздействии на массив горных пород с данными о развитии обрушения консоли, геологическим строением массива.

Результаты исследования и их обсуждение
Временной ход сейсмичности

На рис. 2 представлено ежемесячное распределение числа сейсмических событий. Видно, что существенное увеличение числа сейсмических событий отмечается в 2018 г.: май – сентябрь; в 2020 г.: февраль – август, причем увеличение по отдельным горизонтам неравномерное.

В мае 2018 г. наблюдается некоторый рост числа событий на верхних горизонтах (+530 м, +470 м), связанный с интенсивным снеготаянием. На нижнем горизонте (+310 м) увеличения числа событий не зафиксировано. Возможно, именно в этот период начался процесс трещинообразования в консоли, который после некоторого затишья в июне перешел в более интенсивную фазу в июле-августе 2018 г., причем сначала происходило формирование трещин в основании консольного зависания (из графика видно, что максимальное число событий приурочено к нижнему горизонту, минимальное – к верхнему). Затем после спада сейсмической активности на всех горизонтах (сентябрь 2018 г.) в октябре начался рост сейсмоактивности на двух верхних горизонтах, по-видимому, связанный с обледенением обводненных трещин и расклиниванием их в приповерхностной толще массива.

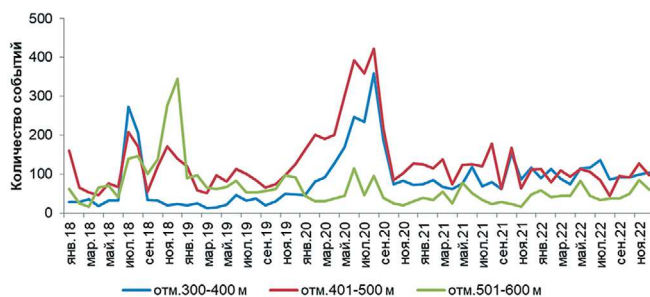


Рис. 2 Ежемесячное изменение числа сейсмических событий

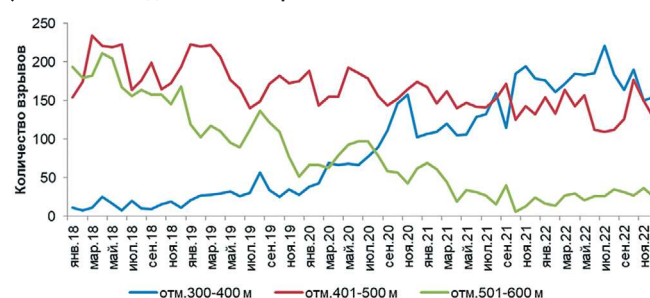
Fig. 2 Monthly variation in the number of seismic events

В 2020 г. наблюдается длительная активизация сейсмичности на добычных горизонтах ниже отм. +500 м в связи с развитием горных работ на этих горизонтах.

На представленном графике (рис. 2) видны сезонные повышения числа сейсмических событий в периоды обводненности, влияние которой особенно заметно в зоне стыковки Расвумчоррского рудника и карьера Центральный. Многолетние наблюдения за сейсмичностью и обводненностью массива показали для этого участка ежегодную сезонную активизацию весной, когда происходит интенсивное снеготаяние, и осенью, в период продолжительных дождей. Причем сейсмический режим в карьере изменяется в сторону роста в периоды повышенной обводненности массива с мая по июнь и в сентябре [10; 13], затем через несколько дней наблюдается проявление сейсмичности на подземном руднике [4].

Помимо обводненности отдельных участков массива горных пород в сезонный период на сейсмическую активность влияет интенсивное ведение горных работ. Общее изменение уровня сейсмической активности на Расвумчоррском руднике, вероятно, обусловлено повышением взрывного воздействия на массив горных пород при добыче полезного ископаемого на нижних горизонтах.

а) Количество добычных взрывов



б) Суммарная зарегистрированная энергия взрывов

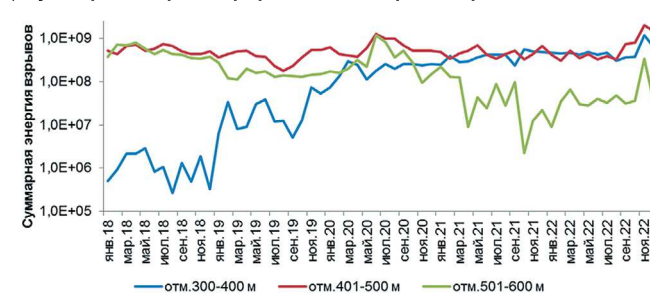


Рис. 3 Ежемесячное изменение взрывного воздействия на массив горных пород

Fig. 3 Monthly variation of the blast impact on the rock mass

На графиках (рис. 3) хорошо заметен рост числа взрывов (рис. 3, а) и их энергии (рис. 3, б) с 2019 г. на отм. +300 м–+400 м и отм. +401 м–+500 м, а также постепенное уменьшение взрывной деятельности на верхнем горизонте (т.е. дальнейшее проявлений сейсмособытий на верхнем горизонте будет связано в большей степени с формированием трещин отрыва и скола в консольной части массива горных пород).

Таким образом, временные графики показывают неравномерность развития сейсмического процесса на различных высотных отметках.

Изменение потока сейсмической энергии

Горизонт +310 м в эксплуатацию введен относительно недавно (очистные работы на отм. +400 м начались в 2019 г.). На этом горизонте максимальные напряжения в руде составляют 35–50 МПа, в породе – 50–70 МПа. В 2018 г. в основном проводились работы по проходке выработок, и область повышенных значений потока сейсмической энергии тяготеет к основанию консольного зависания.

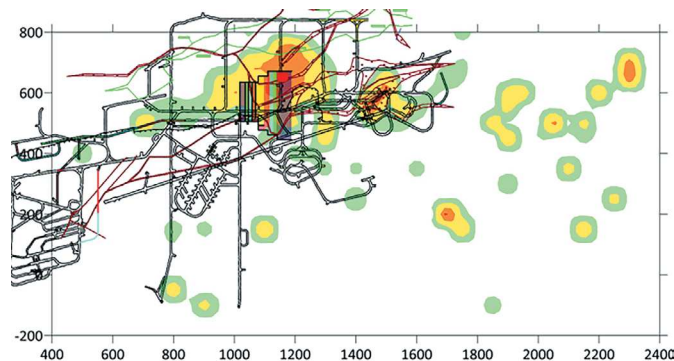
На рис. 4 показано площадное распределение потока сейсмической энергии по годам в проекции на план отработки горизонта +310 м с 2019 по 2022 г. Именно в этот период наиболее выражена миграция сейсмоактивных зон, связанная с развитием горных работ, что отражается в динамике потока сейсмической энергии.

В 2019 г. (рис. 4, а) на отм. +310 м проводились интенсивные горные работы на участке размером примерно 250х250 м (добычные работы велись преимущественно на выс. отм. +400 м). Вблизи этого участка оконтурена сейсмически активная область, на которой значения потока сейсмической энергии достигают значений, соответствующих сейсмическим событиям энергетических классов $K = 5-6$. Максимальные значения тяготеют к месту интенсивного ведения горных работ со стороны висячего бока рудной залежи, этот участок осложнен наличием геологических разломов.

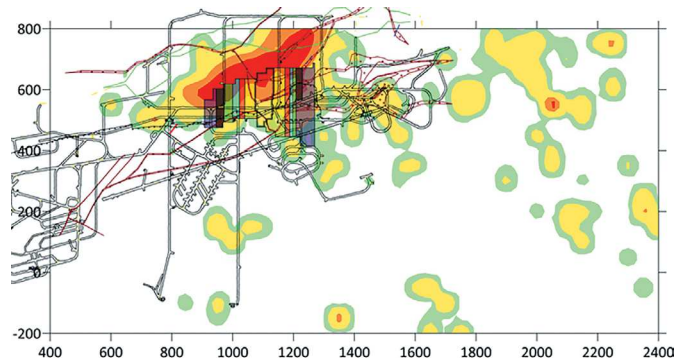
В 2020 г. (рис. 4, б) на отм. +310 м горные работы развивались от центра к флангам шахтного поля рудника. Торцевые взрывы проводились на отм. +400 м и большая часть – на отм. +375 м. Область максимальных значений потока сейсмической энергии расположена со стороны висячего бока рудной залежи вдоль границ очистного пространства, причем эта область растянута вдоль геологических разломов. Максимальные значения соответствуют сейсмическим событиям энергетического класса $K = 6$.

К 2021 г. (рис. 4, в) на отм. +310 м сформировался большой объем очистного пространства. Несмотря на увеличение интенсивности взрывного воздействия и продвижение работ на глубину (торцевые взрывы производились преимущественно на отм. +375 м, а также на отм. +400 м и отм. +350 м), уровень сейсмической активности на участке вблизи границ очистного пространства снизился. Энергия событий преимущественно $K < 6$, за исключением локального участка в зоне влияния тектонических нарушений. Отдельные зоны незначительного повышения сейсмической активности, как в предыдущие годы, по всей видимости, связаны с наличием геологических разломов, которые не отмечены на плане, однако они прослеживаются на вышележащих горизонтах.

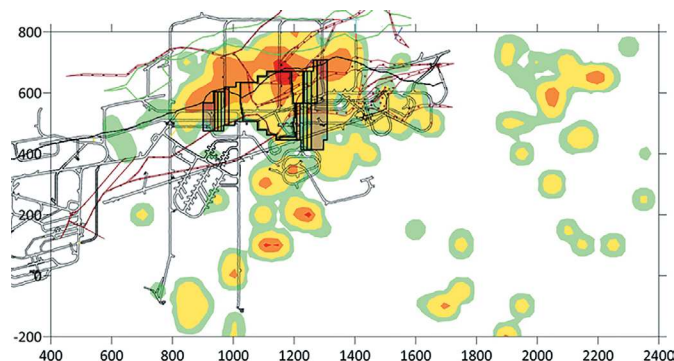
а) 2019 г.



б) 2020 г.



в) 2021 г.



г) 2022 г.

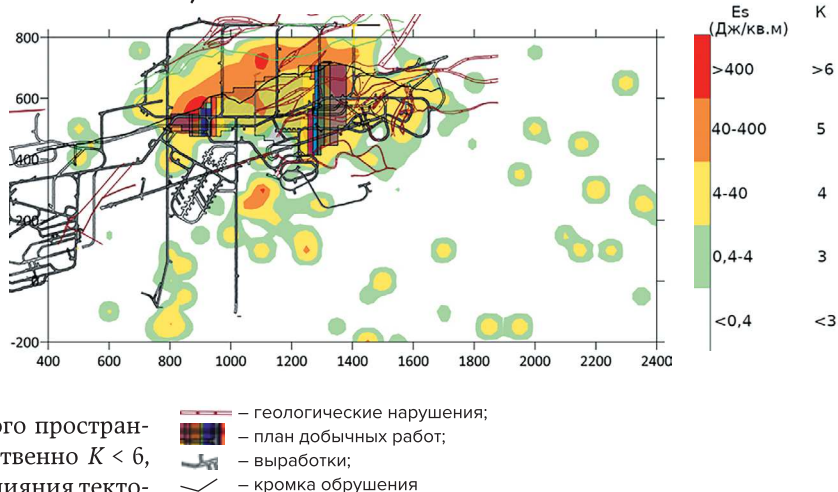


Рис. 4
Распределение потока сейсмической энергии (выс. отм. от +300 до +400 м), проекция на отм. +310 м

Fig. 4
Distribution of the seismic energy flow (elevations from +300 m to +400 m), projection at +310 m elevation

В 2022 г. (рис. 4, г) на отм. +310 м продолжалось развитие горных работ: торцевые взрывы проводились преимущественно на отм. +375 м, +350 м, меньшее число – на отм. +400 м и отм. +325 м. Высокие значения потока сейсмической энергии по-прежнему остаются висячем боку рудной залежи вдоль границы очистного пространства. Также наблюдается большое количество локальных участков, сейсмическую активность которых можно считать фоновой.

Представленный пример показывает миграцию сейсмоактивных зон при изменении геомеханического пространства на наиболее глубоком горизонте. На выс. отм. +300 м – +500 м, а именно на участках с повышенными значениями потока сейсмической энергии, по-видимому, происходило формирование зон деформаций сжатия. А в верхнем слое (выс. отм. +501 м – +600 м), где отработка уже завершается, области с повышенными значениями потока сейсмической энергии являются зонами деформаций растяжения: консольная часть массива горных пород, где происходит своевременное постепенное самообрушение раздробленных пород поверхностной толщи массива.

Таким образом, карты распределения потока сейсмической энергии в пределах исследуемого района показывают неоднородность действующих напряжений, а интенсивность сейсмических проявлений отражает процессы трещинообразования, происходящие в массиве горных пород.

Реакция массива горных пород на взрывное воздействие

При разработке месторождений проводятся добычные и проходческие взрывы. Проведена оценка отклика массива горных пород на различные виды взрывного воздействия. Выявлены наиболее характерные для Расвумчоррского рудника примеры.

На рис. 5 представлены фрагменты карт распределения потока сейсмической энергии и местоположение технологических добычных взрывов. Видно, что отклик массива может быть различным. На рис. 5, а представлен пример отработки двух небольших участков, где проводилось взрывное воздействие, отклик массива сопоставим с фоновыми значениями, практически не представляющими опасность: энергетический класс событий $K = 3-4$.

На рис. 5, б показан участок, в котором выявлена аномалия, значения потока сейсмической энергии соответствует реализации сильных сейсмических событий энергетического класса $K = 6$. Причем аномальный участок расположен в прилегающем массиве.

На рис. 5, в показан фрагмент карты, включающий различные типы отклика массива горных пород: от минимального до возникновения аномалий в прилегающем массиве горных пород.

Таким образом, показано, что наибольшие значения потока сейсмической энергии в основном наблюдаются в массиве горных пород, прилегающем к границам участков интенсивного ведения горных работ, а не в центре этих участков. То есть при активном ведении взрывных работ происходит перераспределение напряжений в массиве таким образом, что часть массива разгружается вследствие взрывов и формирования трещиноватости, а в прилегающих частях массива могут происходить сильные сейсмические события. Местоположение таких аномальных зон характеризует отклик массива на взрывное воздействие и зависит от поля напряжений, которое формируют раз-

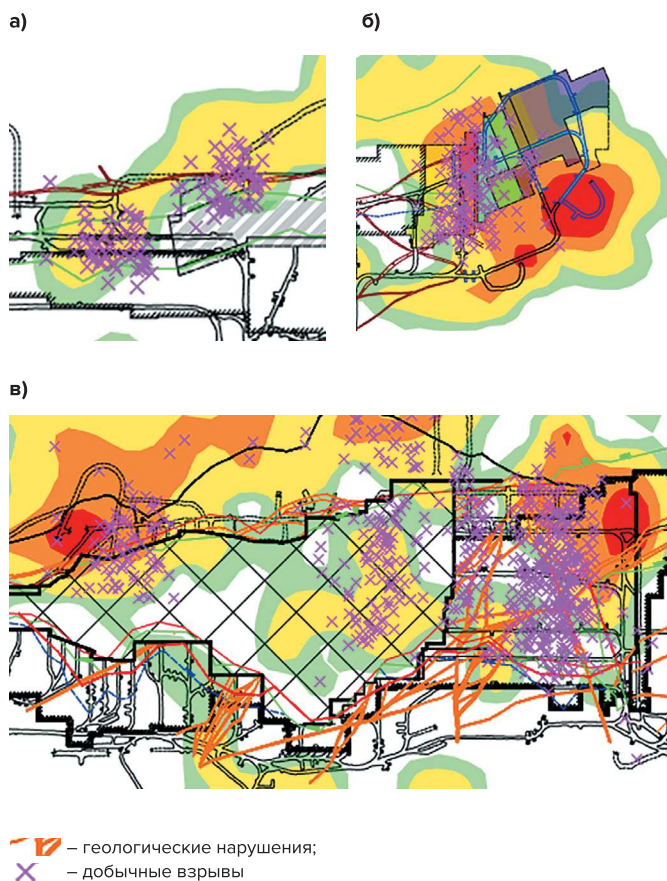


Рис. 5 Фрагменты карт распределения потока сейсмической энергии и местоположение добычных взрывов

Fig. 5 Details of the maps that show the seismic energy flow distribution and the locations of the production blasts

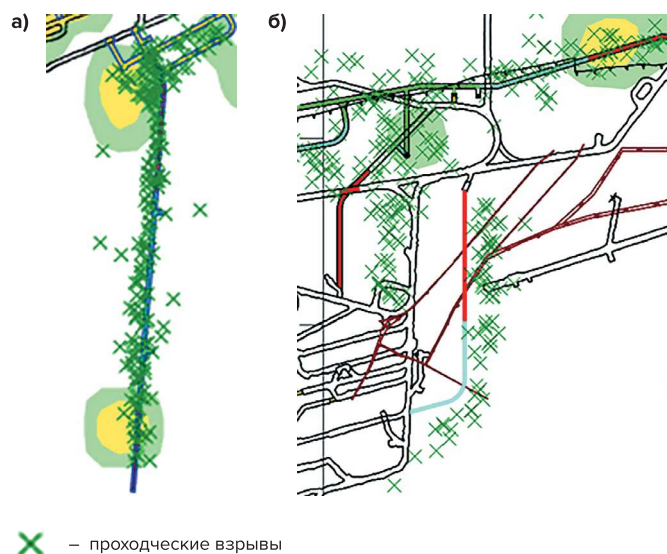


Рис. 6 Фрагменты карт распределения потока сейсмической энергии и местоположение проходческих взрывов

Fig. 6 Details of the maps that show the seismic energy flow distribution and the locations of the development blasts

личные природно-техногенные факторы (тектонические напряжения, геологическое строение массива, конфигурация очистного пространства и выработок и др.).

На рис. 6 показаны фрагменты карт распределения потока сейсмической энергии и местоположение проходческих взрывов. Как правило, на отдельных участках шахтного поля Расвумчоррского рудника, где осуществляется проходка выработок и не проводятся добычные работы, рост сейсмической активности происходит в пределах фоновых значений для условий рудника $K = 3-4$.

Заключение

В работе представлен анализ динамики потока сейсмической энергии при переходе горных работ на глубокие горизонты. Результаты анализа сейсмических данных позволили установить участки, где происходило изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород вследствие продвижения горных работ на глубокие горизонты за период 2018–2022 гг.

По данным сейсмического мониторинга при отработке месторождения все чаще отмечается проявление сильных сейсмических событий (энергетический класс $K \geq 6$). Большая часть таких событий происходит вблизи границ очистных работ и в зоне влияния консоли налегающих пород, а также в зоне стыковки подземного Расвумчоррского рудника и карьера Центральный. Часть сейсмиче-

ских событий провоцируется технологическими взрывами при подэтажной отбойке руды. Другой причиной является повышенная сезонная обводненность участков массива горных пород. Эти факторы выполняют роль триггер-эффекта. При этом интенсивность наведенной взрывами сейсмичности и ее последующий спад характеризуют напряженное состояние прилегающего участка массива.

Рост сейсмической активности на месторождениях также может быть связан с процессами образования трещин отрыва и скола в консоли налегающих пород и частичным обрушением пород консоли, вызванным перераспределением напряжений в висячем боку рудного тела при ведении очистных работ.

Сопоставление карт потока сейсмической энергии событий позволило выделить участки повышенного уровня распределения потока энергии по шахтному полю рудника по мере продвижения горных работ на глубину, а также их миграцию и динамику в течение рассматриваемого периода. Определены зоны деформаций сжатия – два нижних слоя, где ведутся интенсивные очистные работы, и зоны деформаций растяжения – третий, верхний слой: консольная часть массива горных пород, где происходит постепенное обрушение раздробленных пород приповерхностной области массива.

Список литературы

1. Батугин А.С. Общие закономерности проявления сильных горных ударов и индуцированных землетрясений на участках предельно напряженным состоянием земной коры. *Горный журнал*. 2021;(1):22–27. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.04>
2. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г., Куприш О.В. Наведенная сейсмичность в угольных и железорудных районах Кузбасса. *Российский сейсмологический журнал*. 2020;2(3):88–96. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.08>
3. Еременко А.А., Мулев С.Н., Штирц В.А. Мониторинг геодинамических явлений микросейсмическим методом при освоении удароопасных месторождений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(1):12–22. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220102>
4. 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
5. 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;178:438–514. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008>
6. Keneti A., Sainsbury B. Review of published rockburst events and their contributing factors. *Engineering Geology*. 2018;246:361–373. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.005>
7. 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. In: Feng X.-T. (ed.) *Rockburst. Mechanisms, Monitoring, Warning, and Mitigation*. Elsevier Inc.; 2018, chapter 2, pp. 47–92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805054-5.00003-2>
8. Simser B.P. Rockburst management in Canadian hard rock mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019;11(5):1036–1043. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.005>
9. Мельников Н.Н. (ред.) *Сейсмичность при горных работах*. Апатиты: КНЦ РАН; 2002. 325 с.
10. Козырев А.А., Батугин А.С., Жукова С.А. О влиянии обводненности массива на его сейсмическую активность при разработке апатитовых месторождений Хибин. *Горный журнал*. 2021;(1):31–36. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.06>
11. Злобина Т.В., Дягилев Р.А. Апробация метода прогноза сейсмической активности для Верхнекамского месторождения калийных солей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(4):56–66. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_4_0_56
12. Гусева Т.В., Крупенникова И.С., Мокрова А.Н., Передерин В.П. Геодезический спутниковый мониторинг и сейсмическая активность северо-запада России. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016;13(5):133–141. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-5-133-141>
13. Kozyrev A., Batugin A., Zuo J., Zhukova S. The impact of surface water seepage on seismicity and rockbursting in mines. *Sustainability*. 2022;14(22):15414. <https://doi.org/10.3390/su142215414>

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;(1):22–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.04>
2. Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Shevkunova E.V., Podkorytova V.G., Kuprish O.V. Induced seismicity in coal and iron ore regions of Kuzbass. *Russian Journal of Seismology*. 2020;2(3):88–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.08>
3. Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A. Microseismic monitoring of geodynamic phenomena in rockburst-hazardous mining conditions. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2022;(1):12–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPR-PI20220102>
4. 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_14_93_2022_7_0_5
5. 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;178:438–514. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008>
6. Keneti A., Sainsbury B. Review of published rockburst events and their contributing factors. *Engineering Geology*. 2018;246:361–373. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.005>
7. 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. In: Feng X.-T. (ed.) *Rockburst. Mechanisms, Monitoring, Warning, and Mitigation*. Elsevier Inc.; 2018, chapter 2, pp. 47–92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805054-5.00003-2>
8. Simser B.P. Rockburst management in Canadian hard rock mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019;11(5):1036–1043. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.005>
9. Melnikov N.N. (ed.) *Seismicity in mining*. Apatity: Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 2002. 325 p. (In Russ.)
10. Kozyrev A.A., Batugin A.S., Zhukova S.A. Influence of water content on seismic activity of rocks mass in apatite mining in Khibiny. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(1):31–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.06>
11. Zlobina T.V., Dyagilev R.A. Testing of seismic activity prediction method at the Upper Kama potash deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(4):56–66. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_4_0_56
12. Guseva T.V., Krupennikova I.S., Mokrova A.N., Perederin V.P. Geophysical satellite monitoring and seismic activity of the North-West of Russia. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016;13(5):133–141. (In Russ.) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-5-133-141>
13. Kozyrev A., Batugin A., Zuo J., Zhukova S. The impact of surface water seepage on seismicity and rockbursting in mines. *Sustainability*. 2022;14(22):15414. <https://doi.org/10.3390/su142215414>

Информация об авторах

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

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

Онуприенко Вячеслав Сергеевич – главный инженер, Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Российская Федерация; e-mail: VOnuprienko@phosagro.ru

Стрешнев Анатолий Александрович – начальник службы прогноза и предотвращения горных ударов, Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Российская Федерация; e-mail: astreshnev@phosagro.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 25.05.2023

Поступила после рецензирования: 29.06.2023

Принята к публикации: 01.07.2023

Information about the authors

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

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

Vyacheslav S. Onuprienko – Chief Engineer, Kirovsk branch JSC “Apatit”, Kirovsk, Russian Federation; e-mail: VOnuprienko@phosagro.ru

Anatoly A. Streshnev – Department of Rockburst Forecasting and Prevention, Kirovsk branch JSC “Apatit”, Kirovsk, Russian Federation; e-mail: astreshnev@phosagro.ru

Article info

Received: 25.05.2023

Revised: 29.06.2023

Accepted: 01.07.2023