

Оценка уровня сейсмичности по распределению потока сейсмической энергии на глубоких горизонтах Кукисвумчоррского месторождения

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: В статье представлены результаты исследования сейсмичности при продвижении горных работ на глубокие горизонты на примере Кукисвумчоррского апатит-нефелинового месторождения (Хибинский массив). Разработку подземных запасов исследуемого месторождения осложняет наличие Саамского карьера и смежного с ним Юкспорского месторождения. Исследование посвящено оценке площадного распределения потока сейсмической энергии событий по мере продвижения горных работ на глубокие горизонты. Выявлены зоны повышенных значений плотности потока сейсмической энергии на нижних горизонтах рудника при переходе горных работ на глубину и их развитии в сторону Саамского карьера. Результаты представлены в виде карт изолиний, с помощью которых были установлены участки различного уровня распределения потока сейсмической энергии. Предложена классификация уровней сейсмичности по параметру потока сейсмической энергии для условий подземных рудников КФ АО «Апатит»: фоновый, фоновый повышенный, высокий, экстремально высокий уровень сейсмичности.

Ключевые слова: удароопасность, геодинамическая безопасность, сейсмический мониторинг, наведенная сейсмичность, поток сейсмической энергии, подземные горные работы, Хибинский массив, Кукисвумчоррское месторождение, Саамский разлом

Для цитирования: Жукова С.А., Журавлева О.Г., Онуприенко В.С., Стрешнев А.А. Оценка уровня сейсмичности по распределению потока сейсмической энергии на глубоких горизонтах Кукисвумчоррского месторождения. *Горная промышленность*. 2024;(5):108–114. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-108-114>

Assessment of seismicity level based on seismic energy flow distribution at deep levels of the Kukisvumchorr deposit

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 article presents the results of studying seismicity during the advancement of mining operations to deep horizons using the case of the Kukisvumchorr apatite-nepheline deposit (the Khibiny massif). Mining of underground reserves of the investigated deposit is complicated by the presence of the Saamsky open pit and the adjacent Yukspor deposit. The study focuses on assessing the area distribution of the seismic event energy flow as the mining operations progress to deep mine levels. Zones of higher values of seismic energy flow density at the lower mine levels were identified as mining operations progressed to deeper levels and developed towards the Saamsky open pit. The results are presented as isoline maps, which helped to identify areas of different levels of seismic energy flow distribution. A classification of seismicity levels according to the seismic energy flow parameter was proposed for the conditions of underground mines of the Kirovsk Branch of Apatit JSC, i.e. the background, background elevated, high, and extremely high seismicity levels.

Keywords: rockburst hazard, geodynamic safety, seismic monitoring, induced seismicity, seismic energy flow, underground mining, Khibiny massif, Kukisvumchorr deposit, Saamsky fault

For citation: Zhukova S.A., Zhuravleva O.G., Onuprienko V.S., Streshnev A.A. Assessment of seismicity level based on seismic energy flow distribution at deep levels of the Kukisvumchorr deposit. *Russian Mining Industry*. 2024;(5):108–114. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-108-114>

Введение

В связи со значительным разнообразием геологических, геомеханических и горнотехнических условий ведение интенсивных горных работ на месторождениях запускает непрерывные процессы изменения естественного поля напряжений массива горных пород, что может приводить к активизации сейсмичности и реализации опасных геодинамических явлений [1–7]. Одним из основных геомеханических факторов, определяющих устойчивость выработок и конструктивных элементов систем разработки, является высокая тектоническая напряженность массива пород, в том числе и на апатитовых рудниках Хибинского массива [1; 7; 8].

В последние годы на Кировском руднике КФ АО «Апатит» геодинамические явления стали происходить не только в зонах влияния очистных работ и тектонических нарушений в массиве горных пород, но и в зонах стыковки подземного рудника с Саамским карьером и даже в рабочей зоне геомеханического пространства карьера.

Проводимые горные работы оказывают непосредственное влияние на сейсмический режим массива горных пород, поэтому важнейшее значение приобретает совершенствование способов сейсмического анализа, прогноза и предотвращения динамических проявлений горного давления на рудниках.

Целью исследования является поиск особенностей и закономерностей динамики потока сейсмичности при развитии горных работ на глубокие горизонты на Кукисвумчоррском апатит-нефелиновом месторождении (по данным автоматизированной системы контроля сейсмичности массива [9]). В качестве количественного параметра изменения потока сейсмичности рассматривалась сейсмическая энергия. Для контроля областей повышенного энерговыделения проводилось картирование по плотности потока сейсмической энергии.

Объект исследований

Кировский рудник ведет отработку Кукисвумчоррского месторождения с 1929 г. Именно здесь было положено начало отработки апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива и в настоящее время работы ведутся на максимальной глубине по сравнению с другими месторождениями. Исследуемое месторождение представляет собой пластолинзообразную залежь, образующую рудное тело, которое имеет северо-западное простирание, падение на северо-восток с углами падения от 15 до 50°.

Разработку подземных запасов месторождения осложняет наличие Саамского карьера и смежного с ним Юкспорского месторождения. В зону стыковки попадают пройденные выработки подземного рудника и борт карьера. Карьером вскрыт мощный разлом, заполненный шпреуштейнизированными породами, в поверхностной части массива обнажено большое количество трещин, которые в период снеготаяния и дождей обводняются, что оказывает значительное влияние на повышение сейсмичности из-за изменения напряженно-деформированного состояния отдельных участков массива (преимущественно зон тектонических нарушений).

Отработка запасов Кукисвумчоррского месторождения в период с 2018 по 2022 г. проводилась на нескольких горизонтах: +250 м, +170 м, +90 м. На гор. +10 м очистные работы не проводились, осуществлялась проходка выработок. Глубина горизонта +10 м от поверхности составляет ≈720–750 м (рис. 1).

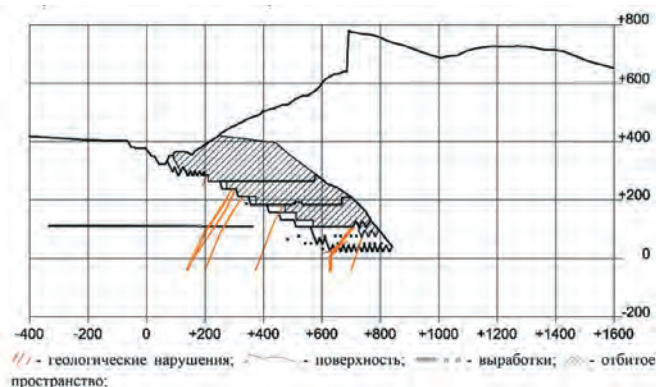


Рис. 1
Поперечный разрез (по P13)
Кукисвумчоррского
месторождения

Fig. 1
A cross section (along P13)
of the Kukisvumchorr
deposit

Из общих закономерностей формирования напряженного состояния массива пород на различных рудниках Хибинского массива можно отметить рост напряжений с глубиной на всех месторождениях, а именно: на Кукисвумчоррском месторождении в лежащем боку максимальные напряжения на горизонте +320 м составляют ≈30 МПа, на горизонте +250 м ≈40 МПа, на горизонте +170 м и +90 м – соответственно ≈50 МПа и ≈60 МПа. В соответствии с «Указаниями по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения)» исследуемое месторождение считается опасным по проявлению горных ударов с высотой отметки +322 м. Все отрабатываемые горизонты относятся к глубоким. В данной статье оценивается изменение сейсмической активности по распределению потока сейсмической энергии при переходе горных работ на глубокие горизонты +170 м и +90 м.

Массив горных пород в пределах Кукисвумчоррского месторождения сложен из блоков разного ранга. Наибольшую потенциальную геодинамическую опасность представляют тектонические нарушения и геологические включения (дайки, жилы и т.д.), сохранившие и/или возобновившие сейсмодинамическую активность в современное время. Несмотря на то что окисленные и раздробленные трещинами породы разгружены от тектонических напряжений, они являются причиной концентрации напряжений в приконтактных с ними участках массива. При ведении горных работ, при их интенсификации и переходе на глубокие горизонты данный фактор оказывает значительное влияние на геодинамическое состояние месторождения.

Прогноз удароопасности на подземных рудниках КФ АО «Апатит» осуществляется с целью выявления потенциально опасных участков по проявлению горных ударов или иных динамических форм горного давления. За многолетний геофизический мониторинг по характеру выявленных внешних признаков проявления горного давления на Кукисвумчоррском месторождении выделяются две зоны:

- вмещающие породы: при отсутствии влияния очистных работ наибольшее значение имеет природное поле напряжений, внешние признаки проявления горного давления в динамической форме на верхних горизонтах были приурочены к выработкам в основном штрекового

направления, но с увеличением глубин отработки прослеживается закономерность увеличения участков с проявлениями в выработках ортогового направления;

– висячий бок рудной залежи: на геомеханическую обстановку существенное влияние оказывает зона опорного давления от очистных работ и бровка обрушения покрывающих пород, где разрушения контура выработки происходит как в выработках ортогового, так и штрекового направлений.

Все перечисленные факторы влияют на сейсмические процессы, являющиеся откликом массива горных пород на проводимые горные работы. Поскольку углубление горных работ неизбежно, то при планировании горных работ и для развития сейсмической сети необходима ретроспективная оценка динамики параметров сейсмичности.

Методы исследований

Для проведения исследования выбран участок шахтного поля рудника размером 1750 м x 2000 м x 340 м. Учитывая технические характеристики сети сейсмического мониторинга, для выявления особенностей развития сейсмического процесса и картирования в плане этот участок был разделен по откаточным горизонтам +90 м, +170 м, +250 м на непересекающиеся слои: от отметки +40 м до +140 м; от +140 м до +220 м; от +220 м до +300 м; от +300 м и выше (включает консольную часть массива, входящую в зону регистрации сейсмической сети). Также проведено картирование по разрезам: по простиранию рудного тела (слой от М400 до М500) и вкрест простирания (P12-P15, вырезной блок).

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 21 тыс. сейсмических событий с энергией от 10³ Дж, из которых 251 – с энергией порядка 10⁶–10⁸ Дж (224 – с энергией порядка 10⁶ Дж; 24–10⁷ Дж и 3–10⁸ Дж). Отметим, что, если событие такого масштаба происходит в консольной части массива, – это не считается опасным, т.к. планомерное обрушение покрывающих пород приводит к уменьшению консоли и устойчивость выработок на этом участке увеличивается. Если же событие такого масштаба происходит вблизи горных выработок, оно может представлять опасность. В таком случае, как правило, горные работы на участке, где произошло событие, останавливаются и возобновляются после обследования выработок и проведения специальных мероприятий по приведению выработок в неудароопасное состояние (при необходимости).

Для выявления пространственных, а также временных аномалий сейсмической активности (или ее отсутствия) оценивается параметр количества выделившейся сейсмической энергии. Для изучения аномалий сейсмичности применяется статистический анализ данных об изменении сейсмических параметров и взрывного воздействия на массив горных пород.

В настоящей работе применялся следующий подход. Для всех выбранных слоев участок шахтного поля, охватываемый сетью мониторинга, разбивается на пространственные ячейки размером 50x50 м. Для каждой ячейки рассчитывается поток сейсмической энергии ($\Sigma E / S_{яч}$ – соотношение суммарной выделившейся сейсмической энергии к площади пространственной ячейки). Далее строятся карты распределения значений сейсмического

энерговыведения (такой подход находит широкое применение при исследовании природной и техногенной сейсмичности [10; 11] и ранее был опробован нами для исследования сейсмичности на месторождении Апатитовый Цирк [12]). После чего проводится 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 пород поверхностной части, геологическим строением массива.

Для описания уровня сейсмичности по параметру потока сейсмической энергии для условий подземных рудников КФ АО «Апатит» предлагается следующая классификация (табл. 1):

– фоновый уровень (соответствует событиям энергетического класса $K = 3$, которые не представляют опасности для технологического процесса; на картах обозначается зеленым цветом);

– фоновый повышенный уровень (соответствует событиям энергетического класса $K = 4$; по многолетней практике ведения горных работ и сейсмического мониторинга такие события не приводили к катастрофическим разрушениям на руднике; на картах обозначается желтым цветом);

– высокий уровень (соответствует событиям энергетического класса $K = 5$; событие этого энергетического класса вблизи контура выработки может приводить к разрушениям ее стенок или кровли; зачастую реализация серии таких событий требует визуального обследования участка и при необходимости – проведения профилактических мероприятий по снижению удароопасности; на картах обозначается оранжевым цветом);

– экстремально высокий (соответствует событиям энергетического класса $K = 6$ и выше; при регистрации такого события горные работы останавливаются немедленно для проведения комплекса мероприятий, направленных на снижение горного давления в пределах опасного участка массива; на картах обозначается красным цветом).

Таблица 1
Классификация уровней сейсмичности по потоку сейсмической энергии

Table 1
Classification of seismicity levels by the seismic energy flow

Цвет на карте	Поток энергии E_{ss} , Дж/м ²	Энергетический класс K	Уровень сейсмичности
	0,4–4	3	Фоновый
	4–40	4	Фоновый повышенный
	40–400	5	Высокий
	>400	≥6	Экстремально высокий

Предложенный подход позволяет перейти от количественных параметров сейсмического процесса к качественному описанию уровня сейсмичности, удобному для применения на практике.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены графики поквартального изменения числа сейсмических событий и взрывов при ведении добычных работ на трех горизонтах.

Как известно, на динамику сейсмической активности влияют и природные, и техногенные факторы. И одной из

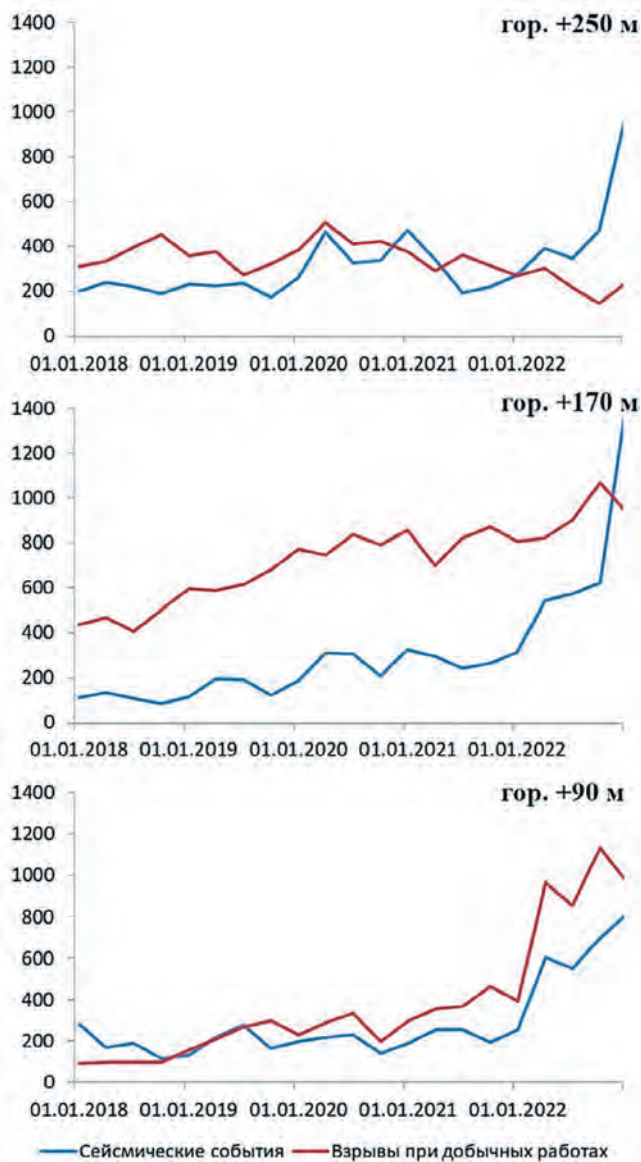


Рис. 2
Поквартальное изменение числа сейсмических событий и взрывов при ведении добычных работ на горизонтах +250 м, +170 м и +90 м

Fig. 2
A quarterly change in the number of seismic events and blasts during mining operations at the levels of +250 m, +170 m and +90 m

целей работы является исследование отклика массива на увеличение взрывного воздействия на массив горных пород при переходе на нижние горизонты.

Из графиков виден тренд на снижение взрывного воздействия на горизонте +250 м, на горизонте +170 м наблюдается постепенное увеличение взрывного воздействия, а на горизонте +90 м – резкое увеличение числа добычных взрывов в 2022 г. При этом на горизонте +250 м практически до конца 2022 г. количество сейсмических событий колеблется в диапазоне 200–400 событий в квартал. На горизонте +170 м наблюдается тенденция постепенного увеличения числа сейсмических событий, а на горизонте +90 м число сейсмических событий резко возросло в начале 2022 г. одновременно с ростом взрывного воздействия.

Отдельно отметим четвертый квартал 2022 г. В этот период на горизонтах +250 м и +170 м наблюдается резкий рост числа сейсмических событий, связанный с трещинообразованием в консольной части массива.

Таким образом, временные ряды сейсмических данных иллюстрируют неравномерность развития сейсмического процесса на различных высотных отметках и его связь со взрывным воздействием. Поскольку технология отработки апатитовых месторождений предполагает регулярное проведение взрывных работ, то сейсмичность носит поствзрывной афтершоковый характер. На примере горизонта +250 м видно, что после завершения отработки горизонта и перехода на нижние горизонты происходит формирование обрушения консольной части массива.

Представленные выше временные ряды являются хорошей иллюстрацией отклика массива горных пород на проводимые горные работы, но недостаточной. Важным моментом для прогноза сейсмических проявлений является пространственное расположение сейсмически активных участков с учетом границ очистного пространства, направления горных работ, разломных структур и других влияющих факторов.

Для прогнозирования отклика массива горных пород на постоянное техногенное воздействие при ведении горных работ на глубоких горизонтах (ниже отметки +90 м) проанализировано изменение сейсмической активности за пятилетний период. В течение этого времени на горизонтах +90 м и +170 м проводилась проходка выработок, а также были начаты добычные работы. В 2018 г. началось развитие горных работ на новом откаточном горизонте +10 м: разрезка осуществлялась от краевых участков вырезного блока размером 192 м к флангам месторождения (аналогично и на горизонте +90 м). На горизонте +250 м к 2019 г. проходка выработок была завершена. В 2022 г. уже проводилась отбойка на отметке +75 м (горизонте +10 м) в вырезном блоке.

На рис. 3 представлены карты распределения потока сейсмической энергии для горизонтов +90 м и +170 м за 2018 и 2021 гг.

В 2018 г. на горизонте +90 м вблизи Саамского карьера наблюдаются зоны повышенной концентрации потока сейсмической энергии, соответствующие сейсмическим событиям энергетических классов ($K > 6$), причем часть этих зон находится под дном карьера в области влияния Саамского разлома (рис. 3, а). На горизонте +170 м также прослеживаются контуры этих зон меньшей площади, причем уровень потока сейсмической энергии ниже. В это время проводились интенсивные проходческие работы, которые пересекли тело разлома, что могло стать причиной активизации сейсмичности.

Ещё один участок с повышенным уровнем сейсмической активности на горизонте +170 м расположен вблизи Саамского карьера (между зоной ведения добычных работ и карьером), осложнен геологическими нарушениями (рис. 3, б). В 2020–2021 гг. наибольшую площадь занимает сейсмически активный участок в этом же районе на горизонте +90 м (рис. 3, в) и на горизонте +170 м (рис. 3, г).

Висячем боку рудной залежи вблизи проводимых добычных работ отмечается участок с повышенными значениями потока сейсмической энергии, наибольшие значения также на горизонте +90 м, а контуры участка меньшей площади прослеживаются и на гор. +170 м. По-видимому, на начальном этапе добычных работ на горизонте +90 м в связи с подработкой налегающей толщи происходит процесс трещинообразования в основании консольного зависания, сопровождающийся реализацией сильных сейсмических событий.

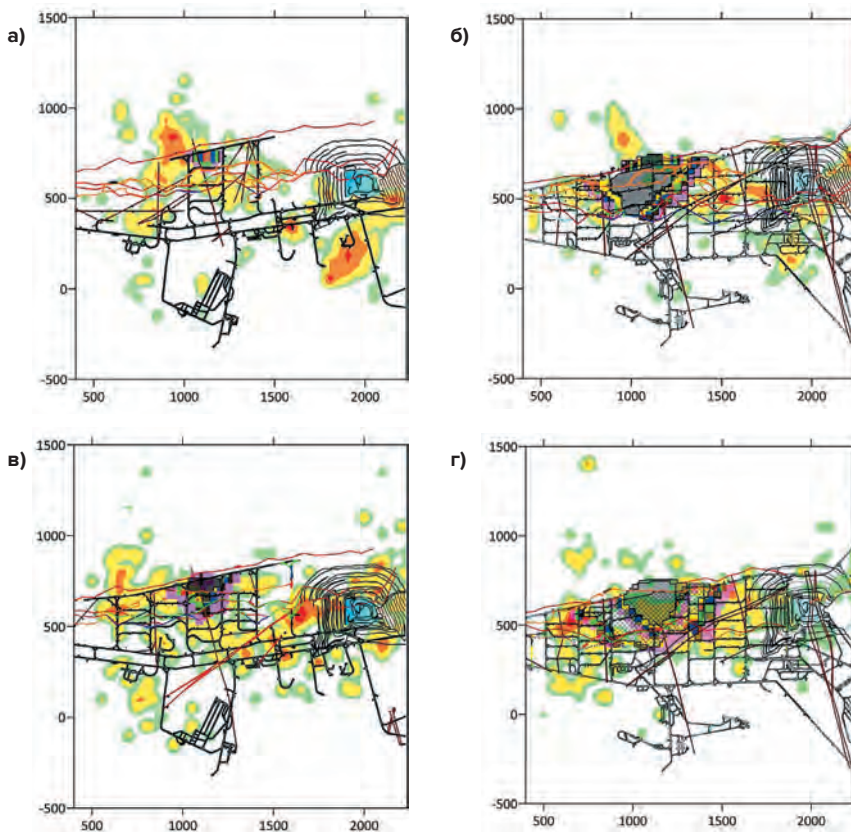


Рис. 3
Распределение потока сейсмической энергии E_s ; проекция 2018 г. на горизонтах +90 м (а) и +170 м (б); проекция 2021 г. на горизонтах +90 м (в) и +170 м (г)

Fig. 3
Distribution of the seismic energy flow (E_s), projection onto the +90 m level in 2018 (а) and in 2021 (б); and onto the +170 m level in 2018 (в) and in 2021 (г)

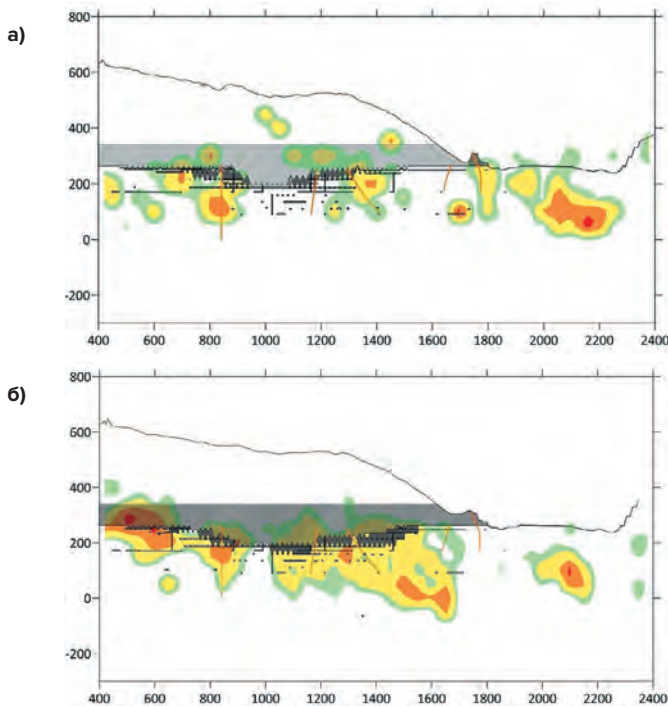


Рис. 4
Распределение потока сейсмической энергии, проекция на разрез по М450 м: а – 2018 г., б – 2021 г.

Fig. 4
Distribution of the seismic energy flow, projection onto the M450 m cross section: а – 2018, б – 2021

На примере горизонта +170 м видно, что продвижение горных работ к флангам сопровождается увеличением сейсмической активности. Причем сейсмоактивные зоны мигрируют по мере продвижения фронта работ. В 2021 г. сформировались участки повышенных значений потока сейсмической энергии, расположенные ближе к висячему боку рудной залежи в связи с особенностями развития горных работ (с опережением по висячему боку) (рис. 3, з).

В 2022 г. на горизонте +170 м выявлено большое количество областей с высоким и экстремально высоким уровнем сейсмичности, которые в основном приурочены к висячему боку рудной залежи и к границам выработанного пространства (к зоне ведения добычных работ), а также к борту Саамского карьера. Видимо, вследствие образования большого объема выработанного пространства на этом и на вышележащих горизонтах происходит постепенное разрушение налегающей толщи.

Отметим, что на горизонте +250 м с 2018–2022 гг. также продолжалось развитие горных работ. Области с высоким

и экстремально высоким уровнем сейсмичности потока сейсмической энергии наблюдались в висячем боку рудного тела вдоль границы выработанного пространства.

Следует отметить наличие небольших локальных участков с фоновым и/или с фоновым повышенным уровнем сейсмичности.

На рис. 4 представлено распределение потока сейсмической энергии для участка, расположенного между магистральями М400–М500 (в проекции на продольный разрез по М450 м на 2018 и 2021 гг). Видно несколько характерных тенденций, которые следует ожидать и при ведении добычных работ на горизонте +10 м.

Развитие работ от центра к флангам сопровождается изменением сейсмической активности в виде двух кластеров, приуроченных к двум фронтам горных работ, которые изменяются в размерах и мигрируют вслед за продвижением горных работ. Эта тенденция прослеживается в разные периоды времени и отмечается на разных горизонтах.

В 2021 г. участок с высоким и экстремально высоким уровнем сейсмичности ($K = 5-6$) наблюдается в висячем боку рудной залежи (прослеживается и на рис. 3, з, и на рис. 4, б). Сейсмическая активность связана с интенсивным развитием горных работ на этом участке и перераспределением напряжений, в том числе в консольной части массива.

В 2018 г. отмечается участок с экстремально высоким уровнем сейсмичности под дном Саамского карьера. В 2021 г. площадь этого участка уменьшилась в связи с завершением активной стадии проходческих работ.

Следующей характерной особенностью является развитие сейсмической активности вблизи геологических нарушений. Так, например, на рис. 4, а можно видеть три сейсмоактивных участка вблизи геологических неоднородностей, два из которых не только сохраняются и в 2021 г., но и наблюдается увеличение их площади.

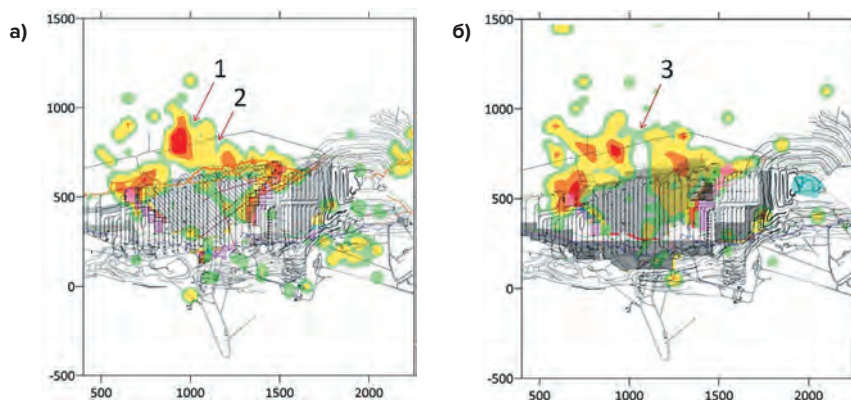


Рис. 5
Распределение потока сейсмической энергии, проекция на горизонте +250 м: а – 2018 г., б – 2019 г.

Fig. 5
Distribution of the seismic energy flow, projection onto the +250 m level: а – 2018, б – 2019

На этих участках и в 2018, и в 2021 г. значения потока сейсмической энергии превышают фоновые.

Изменение геомеханического пространства на глубоких горизонтах (горизонты +170 м и +90 м) влияет на сейсмический режим месторождения в целом. Так, например, изменение контуров сейсмоактивных зон на горизонте +250 м обусловлено развитием горных работ на нижележащих горизонтах. На рис. 5 стрелками показано, как происходило изменение сейсмической активности висячем боку рудной залежи на участках, расположенных непосредственно над врезным блоком и вытянутых в глубину нетронутого массива: 1 – место разрезки на горизонте +90 м; 2 – место разрезки на горизонте +170 м; 3 – место разрезки на горизонте +90 м. Из представленных данных на рис. 5 видно, что формирование сейсмической активности в виде двух кластеров наблюдается не только на горизонтах, где активно ведутся горные работы, но и в подработанной толще. На рис. 5, б отчетливо видно отсутствие сейсмоактивности над врезным блоком (то же самое иллюстрирует и рис. 4, б, где на всех высотных отметках в районе $X \approx 1000 \pm 30$ отсутствует сейсмическая активность).

Карты распределения потока сейсмической энергии в пределах исследуемого участка месторождения показывают неоднородность потока сейсмической энергии, а интенсивность сейсмических проявлений отражает процессы трещинообразования, происходящие в массиве горных пород. Таким образом, изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород отражает даже незначительная миграция зон с повышенными и максимальными значениями потока выделившейся сейсмической энергии.

Список литературы / References

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):22–27. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.04>
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. 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>
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>

Заключение

Для оценки и качественного описания сейсмической активности при переходе горных работ на глубокие горизонты для условий подземных рудников КФ АО «Апатит» предложена классификация уровней сейсмичности по параметру потока сейсмической энергии: фоновый, фоновый повышенный, высокий и экстремально высокий.

Неоднородность распределения потока сейсмической энергии на Кукисвумчоррском месторождении Кировского рудника отражает изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород вследствие продвижения горных работ на глубокие горизонты за период 2018–2022 гг. Постепенное развитие горных работ от

центра к флангам месторождения способствует перераспределению напряжений в массиве, что характеризуется в том числе и миграцией сейсмоактивных зон.

В пределах района исследования установлены основные участки, где наблюдался высокий и экстремально высокий уровень сейсмичности:

- участки, где активно ведутся проходческие работы;
- подработанная толща пород и основание консольно-го зависания;
- висячий бок рудной залежи;
- границы выработанного пространства (к зоне ведения добычных работ);
- борт и дно Саамского карьера.

Также определено значительное количество небольших локальных участков со значениями потока сейсмической энергии, соответствующими событиям энергетических классов 3 и ниже, на которых сейсмичность в исследуемый период можно считать фоновой для данного месторождения.

Выявленные тенденции формирования сейсмоактивных зон могут быть характерны в дальнейшем и для более глубоких горизонтов (горизонт +10 м). Применение предложенной классификации для прогнозирования участков с высоким и экстремально высоким уровнем сейсмичности по ретроспективным данным позволит своевременно проводить профилактические мероприятия, направленные на снижение горного давления в пределах части массива или отдельных выработок до уровня, соответствующего категории «Неопасно» для рудника.

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/FTPRI20220102>
Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A. Microseismic monitoring of geodynamic phenomena in rockburst-hazardous mining conditions. *Journal of Mining Science*. 2022;58(1):10–19. <https://doi.org/10.1134/s1062739122010021>
4. 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>
5. Liu J.-P., Feng X.-T. Case Histories of Rockbursts at Metal Mines. In: Feng X.-T. (ed.) *Rockburst: Mechanisms, monitoring, warning, and mitigation*. Elsevier Inc.; 2018. Chapter 3, pp. 47–92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805054-5.00003-2>
6. 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>
7. Мельников Н.Н. (ред.) *Сейсмичность при горных работах*. Апатиты: КНЦ РАН; 2002. 325 с.
8. Козырев А.А., Семенова И.Э., Жукова С.А., Журавлева О.Г. Факторы изменения сейсмического режима и локализации опасных зон при крупномасштабном техногенном воздействии. *Горная промышленность*. 2022;(6):95–102. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-95-102>
Kozyrev A.A., Semenova I.E., Zhukova S.A., Zhuravleva O.G. Factors of seismic behavior change and localization of hazardous zones under a large-scale mining-induced impact. *Russian Mining Industry*. 2022;(6):95–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-95-102>
9. Абрашитов А.Ю., Онуприенко В.С., Корчак П.А. Трехуровневая система сейсмического мониторинга массива горных пород Хибинских месторождений апатит-нефелиновых руд. *Горная промышленность*. 2023;(S1):36–42. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-36-42>
Abrashitov A.Yu., Onuprienko V.S., Korchak P.A. A three-tier system of seismic rock mass monitoring in the Khibiny apatite-nepheline ore deposits. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):36–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-36-42>
10. 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
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
11. Гусева Т.В., Крупенникова И.С., Мокрова А.Н., Передерин В.П. Геофизический 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>
Guseva T.V., Krupennikova I.S., Mokrova A.N., Perederin V.P. Geophysical satellite monitoring and seismic activity of the North-West of Russia. *Sovremennyye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2016;13(5):133–141. (In Russ.) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-5-133-141>
12. 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>

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: 07.07.2024

Поступила после рецензирования: 27.08.2024

Принята к публикации: 17.09.2024

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: 07.07.2024

Revised: 27.08.2024

Accepted: 17.09.2024