Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-265-271

Исследование сейсмического режима и удароопасности Кукисвумчоррского месторождения на глубоком горизонте +10 м

С.А. Жукова[1, 2] ✉, В.С. Онуприенко[3], А.А. Стрешнев[3]
[1] Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
[2] Мурманский арктический университет, Апатитский филиал, г. Апатиты, Российская Федерация
[3] Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Российская Федерация
✉ svetlana.zhukowa@yandex.ru

Резюме: В статье представлены результаты исследования сейсмичности при увеличении глубины горных работ на примере Кукисвумчоррского апатит-нефелинового месторождения (Хибинский массив). Исследование основано на статистической оценке сейсмического режима месторождения в целом и прогнозной оценке состояния блока 9/12 на глубоком горизонте +10 м. Для описания состояния динамики сейсмического режима использованы основные уровни сейсмичности: экстремально высокий, высокий, фоновый повышенный, фоновый средний и фоновый пониженный. Для прогноза состояния блока 9/12 проанализирована геомеханическая ситуация на соседних блоках 12/15 и 15/18, где ведутся горные работы. С помощью методов регионального прогноза удароопасности: аналитическое (численное) моделирование напряженного состояния, визуальное обследование горных выработок и по результатам непрерывного контроля сейсмичности были выявлены зоны с повышенной сейсмической активностью и высоким уровнем напряженно-деформированного состояния приконтурной части массива на глубоких горизонтах отработки (+25 м; +50 м; +75 м гор. +10 м). Визуальный осмотр выработок подтвердил образование локальных участков с признаками проявления горного давления. В ходе пространственно-временной оценки аномалий сейсмичности установлено, что сейсмичность мигрирует вместе с продвижением фронта горных работ, в том числе и на глубину. За последние 9 лет при переходе горных работ на глубокие горизонты наблюдается проявление мощных геодинамических явлений на нижних горизонтах отработки. Предложены профилактические мероприятия для снижения удароопасности.

Ключевые слова: удароопасность, геодинамическая безопасность, сейсмический мониторинг, наведенная сейсмичность, фоновая сейсмичность, подземные горные работы, Хибинский массив, Кукисвумчоррское месторождение, уровни сейсмичности

Для цитирования: Жукова С.А., Онуприенко В.С., Стрешнев А.А. Исследование сейсмического режима и удароопасности Кукисвумчоррского месторождения на глубоком горизонте +10 м. *Горная промышленность*. 2026;(5):265–271. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-265-271

A study into the seismic settings and rock-bump hazard at the Kukisvumchorr apatite-nepheline deposit at the deep +10 m level

S.A. Zhukova[1, 2] ✉, V.S. Onuprienko[3], A.A. Streshnev[3]
[1] Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
[2] Murmansk Arctic University, Branch, Apatity, Russian Federation
[3] Kirovsk Branch of JSC Apatit, Kirovsk, Russian Federation
✉ svetlana.zhukowa@yandex.ru

Abstract: This article presents the results of studying seismic activity with increasing mining depth using the Kukisvumchorr apatite-nepheline deposit (the Khibiny Mountain Range) as a case study. The study is based on a statistical assessment of the seismic settings of the deposit as a whole and a predictive assessment of the state of Block 9/12 at the deep +10 m level. The following main seismicity levels were used to describe the dynamics of the seismic settings: extremely high, high, elevated background, average background, and reduced background. Geomechanical situation in adjacent Blocks 12/15 and 15/18, where mining operations are underway, was analyzed to forecast the condition of Block 9/12. Zones with higher seismic activity and

a high level of stress-and-strain state in the boundary part of the mass at deep mining levels (+25 m; +50 m; +75 m; +10 m) were identified using the methods of regional rock-burst hazard forecasting, i.e. analytical (numerical) stress state modeling, visual inspection of the mine workings, and the results of continuous seismic monitoring. A visual inspection of the mine workings confirmed the development of localized areas showing signs of rock pressure. A spatiotemporal assessment of the seismic anomalies has shown that seismicity moves along with the advance of the mining front, including the depth changes. Significant geodynamic phenomena have been observed in the lower mining levels over the past 9 years, as mining operations have progressed to the deeper mine levels. Preventive measures have been proposed to reduce the risk of rock bumps.

Keywords: risk of rock bumps, geodynamic safety, seismic monitoring, induced seismicity, background seismicity, underground mining, Khibiny Mountain Range, Kukisvumchorr deposit, seismicity levels

For citation: Zhukova S.A., Onuprienko V.S., Streshnev A.A. A study into the seismic settings and rock-bump hazard at the Kukisvumchorr apatite-nepheline deposit at the deep +10 m level. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):265–271. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-265-271

Введение

Удароопасность пород возникает при совместном влиянии природных и техногенных условий. Базовой причиной служит сочетание высокой хрупкости пород с аномальным тектоническим напряжением массива. На эту основу накладывается комплекс природных факторов (структурно-тектонические, физико-механические и гидрогеологические особенности) и техногенных воздействий (параметры ведения горных работ), что создает итоговое геомеханическое состояние и риск возникновения динамических явлений [1–9]. По мере углубления горных выработок и наращивания интенсивности добычи ожидается существенное изменение геомеханической обстановки в массиве пород. С увеличением глубины разработки природные напряжения в толще горных пород неизбежно меняются. Кукисвумчоррское месторождение, отрабатываемое Кировским рудником Кировского филиала (КФ) АО «Апатит», отнесено к склонным и опасным по горным ударам с высотной отметки +322 м. В настоящее время очистные горные работы ведутся на глубине от поверхности около 720–750 м. Наблюдения подтверждают прямую зависимость между глубиной горных работ и масштабами геомеханических нарушений. Мощность зон хрупкого разрушения в кровле выработок возрастает с 0,5–0,7 м на верхних горизонтах до 1,5–2 м на глубоких, одновременно увеличиваются распространенность и частота динамических проявлений горного давления. Прогноз удароопасности проводится для того, чтобы обнаружить участки горного массива, где существует риск возникновения горных ударов. Эту работу выполняют специалисты службы прогноза и предотвращения горных ударов (СППГУ) КФ АО «Апатит».

Организация работ по оценке удароопасности осуществляется с учётом нескольких важных факторов. Прежде всего учитываются результаты регионального прогноза, который даёт общее представление о состоянии горного массива. Кроме того, важную роль играют визуальные наблюдения за состоянием горных выработок.

Эксплуатация глубоких горизонтов определяет также эффект взаимного влияния удароопасных зон, что требует проведения анализа не изолированно, а в масштабе всего района наблюдений. Следовательно, при оценке региональной удароопасности прогноз должен быть направлен не только на предсказание единичного сильного события, но и на анализ кумулятивного эффекта от множества слабых явлений. Критически важными прогностическими параметрами становятся пиковые значения мощности сейсмической активности и точные пространственные координаты формирующихся опасных участков. Целью работы является исследование геомеханического состояния, сейсмического режима и удароопасности Кукисвумчоррского месторождения при увеличении глубины отработки. Для достижения цели выполнена статистическая оценка сейсмического режима месторождения и прогнозная оценка состояния блока 9/12 на глубоком горизонте +10 м Кукисвумчоррского месторождения. Для описания состояния сейсмичности построена эмпирическая функция распределения выделившейся сейсмической энергии для определенных временных интервалов и слоев шахтного поля, использованы основные уровни сейсмичности: экстремально высокий, высокий, фоновый повышенный, фоновый средний и фоновый пониженный [10]. Для прогноза состояния блока 9/12 проанализирована геомеханическая ситуация на соседних блоках 12/15 и 15/18, где активно ведутся горные работы.

Материалы и методы

Кукисвумчоррское месторождение апатит-нефелиновых руд открыто в 1921 г., добыча полезного ископаемого началась с 1929 г. Кировским рудником. Северная граница месторождения детерминирована зоной Кукисвумчоррского радиального разлома. К югу от него наблюдается постепенный и непрерывный переход рудного тела сначала в месторождение Юкспоррское, а затем в «Апатитовый Цирк» и «Плато Расвумчорр» [11]. В совокупности эта система образует единую залежь, простирание которой в общей протяженности достигает приблизительно 12 км.

Важнейшим фактором, определяющим современное напряженно-деформированное состояние района, является развитие сдвиговой тектоники. Именно она, вероятно, послужила основной причиной формирования устойчивого поля повышенных субгоризонтальных напряжений, ориентированных согласно простиранию рудных тел. На месторождениях Кировского рудника смещения по сдвиговым нарушениям также имели преимущественно субгоризонтальный кинематический характер [12].

Общая тенденция для всех месторождений Хибинского массива – увеличение действующих напряжений с глубиной. На Кукисвумчоррском месторождении это проявляется следующим образом: на горизонте +320 м максимальные напряжения составляют около 30 МПа, на +250 м – около 40 МПа, а на горизонтах +170 и +90 м – около 50 и

60 МПа соответственно. Согласно нормативным документам, месторождение считается опасным по проявлению горных ударов, начиная с высотной отметки +322 м. Все действующие горизонты относятся к глубоким.

В период с 2017 по 2025 г. на Кукисвумчоррском месторождении добыча велась на горизонтах +250, +170 +90 и +10 м. В настоящее время на Кировском руднике используется система подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды. Важнейшим фактором, определяющим устойчивость горных выработок и эффективность систем разработки на подземных рудниках КФ АО «Апатит», является высокий уровень тектонической напряженности массива горных пород. Вокруг отработанного пространства в массиве формируются области повышенных напряжений. Методика оценки напряженного состояния для целей проектирования горных работ основывается на последовательном определении главных напряжений. Интенсивность динамических проявлений горного давления (стреляние, шелушение, динамическое заколообразование) распределяется крайне неоднородно не только в пределах месторождения, но и на разных горизонтах. Наиболее активные формы деструкции наблюдаются на локальных участках, приуроченных преимущественно к ийолит-уртитам лежачего бока рудного тела. Эта литологическая ассоциация демонстрирует повышенную склонность к хрупкому разрушению в условиях действующего поля напряжений.

Результаты

В работе использованы каталоги с 2017 по 2025 г., полученные по данным непрерывного мониторинга сейсмичности подземных рудников КФ АО «Апатит», который осуществляется с помощью автоматизированной системы контроля сейсмичности массива (АСКСМ), способной регистрировать геодинамические явления с энергией от 10^3 Дж [13].

Для исследования динамики сейсмического режима в работе применялась адаптированная методика В.А. Салтыкова на основе статистической оценки уровня сейсмичности [10]. Для оценки состояния сейсмичности построена эмпирическая функция распределения выделившейся сейсмической энергии для разных временных и пространственных интервалов. Шахтное поле рудника было разделено на слои по высотным отметкам, соответствующим горизонтам отработки. Для статистической оценки уровня сейсмичности рассчитаны значения функции распределения:

$$F(K) = P(\lg E < K),$$

где E – сейсмическая энергия, выделившаяся за определённый временной интервал. Интервалы между квантилями функции распределения выделившейся сейсмической энергии формируют шкалу, включающую пять уровней сейсмичности для Хибинских месторождений в условиях техногенного воздействия:

– экстремально высокий: $F(0{,}995) < \lg E$;
– высокий: $F(0{,}975) < \lg E < F(0{,}995)$;
– фоновый повышенный: $F(0{,}85) < \lg E < F(0{,}975)$;
– фоновый средний: $F(0{,}15) < \lg E < F(0{,}85)$;
– фоновый пониженный: $F(0{,}025) < \lg E < F(0{,}15)$.

Построены номограммы распределения сейсмической энергии для разных временных интервалов и пространственных слоев: на рис. 1, *а* представлены уровни сейсмичности для всей зоны контроля АСКСМ (выс. отм. –50 – +550 м) на Кукисвумчоррском месторождении, на остальных – для глубоких горизонтов отработки. На графиках показаны нижние границы уровней, т.е. при каких значениях энергии происходит переход на тот или иной уровень сейсмичности. По всей зоне контроля месторождения рост экстремально высокого уровня сейсмоактивности наблюдается в 2018, 2020, 2022 и 2025 гг.

Если ранее экстремальным уровнем считали происходящие события с энергетическим классом K = 6, то за годы углубления горных работ наблюдается повышение энергии событий и теперь чаще события с K = 7–8 и даже 9 происходят на нижних горизонтах отработки пока в глубине массива.

По всплескам на графиках можно отметить повышение нижней границы высокого уровня сейсмичности: на гор. +250 м в 2018, 2022 и в 2024 гг., на гор. 170 м в 2018, 2022,

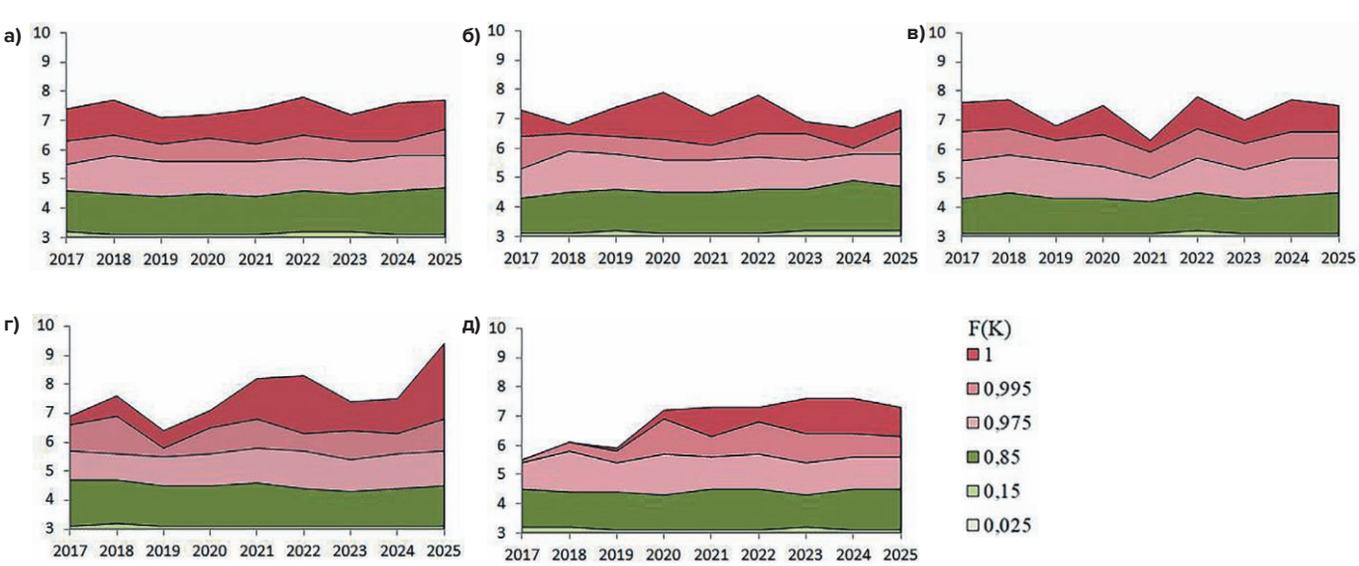


Рис. 1
Номограммы распределения сейсмической энергии (по оси Y – энергетический класс сейсмособытий): а – зона контроля; б – гор. +250 м; в – гор. +170 м; г – гор. +90 м; д – гор. +10 м

Fig. 1
Nomographic charts of seismic energy distribution (along the Y-axis: energy class of seismic events): а – the monitored zone; б – +250 m Level; в – +170 m Level; г – +90 m Level; д – +10 m Level

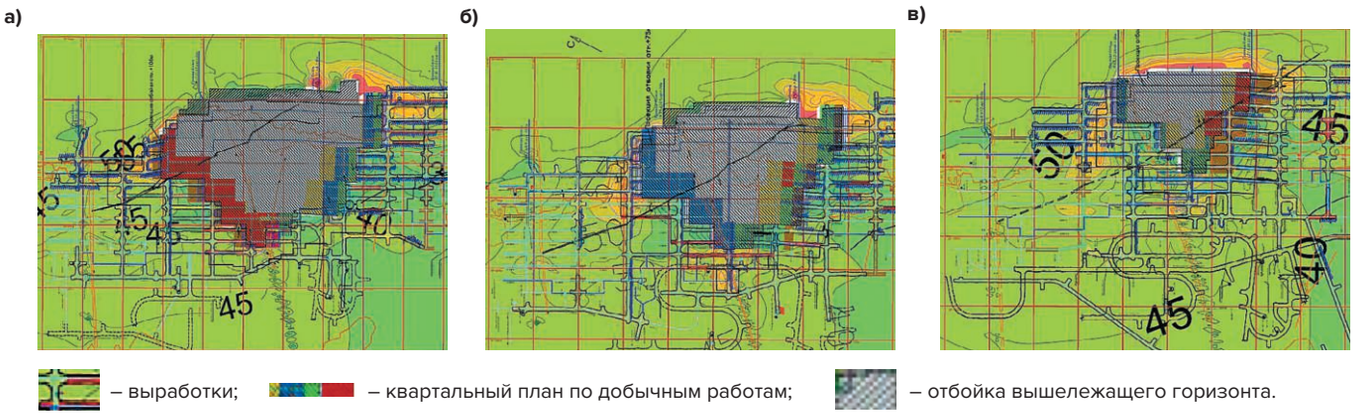


Рис. 2
Результаты численного моделирования напряженного состояния массива на конец ноября 2025 г. с зонами различного уровня напряжений (гор. +10 м): а – отм. +75 м; б – отм. +50 м; в – отм. +25 м

Fig. 2
Results of numerical modeling of the stress state of the rock mass as of the end of November 2025, showing zones with different stress levels (+10 m Level): а – +75 m Level; б – +50 m Level; в – +25 m Level

2024 гг., на гор. +90 м в 2021, 2022, в 2024 и 2025 гг., на гор. +10 м – в 2018, 2020, 2022, 2024 гг. Видно, что при переходе горных работ на глубокие горизонты отработки с годами растет уровень и фоновой сейсмичности: на гор. +250 м в 2017 г. нижнюю границу повышенного фонового уровня сейсмичности составляли события с $K = 4{,}3$ и к 2024 г. энергия событий выросла до $K = 4{,}9$. На гор. +170 м нижняя граница повышенного фонового уровня сейсмичности с 2017 по 2025 г. изменилась с $K = 4{,}3$ до $K = 4{,}5$. На более глубоких горизонтах отработки это прослеживается еще более явно: на гор. +90 м в 2017 г. граница повышенного фонового уровня сейсмичности уже – $K = 4{,}7$, однако к 2025 г. энергия событий снизилась до $K = 4{,}5$, видимо, в связи с миграцией сейсмичности на нижний горизонт +10 м, здесь события повышенного фонового уровня имеют энергетический класс $K = 4{,}5$ с 2017 г.

В ходе пространственно-временной оценки аномалий сейсмичности установлено, что сейсмичность мигрирует вместе с продвижением фронта горных работ, в том числе и на глубину. Установлено, что за последние 9 лет при переходе горных работ на глубокие горизонты наблюдается проявление мощных геодинамических явлений на нижних горизонтах отработки.

Известно, что частота возникновения во времени и в пространстве очагов сейсмических событий разной мощности напрямую зависит от изменения геомеханического состояния массива горных пород [14; 15].

По данным численного моделирования напряженного состояния массива горных пород Кукисвумчоррского месторождения для высотных отметок +25 м, +50 м, +75 м на сентябрь, октябрь и ноябрь 2025 г. выделены зоны с различным уровнем сжимающих напряжений: зона с высоким уровнем напряжений – 60 МПа и выше (на карте выделена красным цветом); среднего уровня напряжений – 50–55 МПа (желтым цветом); умеренно низких напряжений – 45 МПа (светло-зеленым цветом); минимальные напряжения – 40 МПа и ниже (зеленым цветом). Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород получены в программной среде Sigma GT [16].

Зона высоких напряжений на отм. +25 м с сентября по ноябрь приурочена к висячему боку рудного тела и охватывает наибольшую площадь (особенно в ноябре). На отм. +50 м данная зона расположена на правом фланге шахтного поля в области отбойки на границе извлечённого рудного тела и вмещающих пород и незначительно изменяется в размерах. На отм. +75 м в сентябре зона высоких напряжений в этом же районе охватывает три локальные области малого размера, в октябре две из них объединяются и тем самым увеличивают площадь высоких напряжений, которая в ноябре еще больше увеличивается. На рис. 2 представлены результаты численного моделирования напряженного состояния массива на конец ноября 2025 г.

Зоны со средним уровнем напряжений отмечены в районе разломных нарушений слева от границы отбойки, их образование, видимо, связано с ведением проходческих работ.

Таким образом, прослеживается тенденция формирования зон с высоким и средним уровнем напряжений в области очистного пространства, в висячем боку рудной залежи и в области влияния геологических нарушений.

Примером проявления повышенного напряженного состояния в массиве служат различные нарушения контура выработок. Специалистами СППГУ проведен визуальный осмотр выработок на исследуемом горном участке. На сопряжении выработок были выявлены признаки в виде отслоений горной массы, большей частью представленной нединамическими заколами изометрической формы, приуроченных к системам разноориентированных трещин. Следует отметить, что часто выработки с внешними признаками проявления горного давления в динамической форме проходят вблизи тектонических нарушений, представленных окисленными зонами различной мощности, мончикитовыми дайками или эгириновыми жилами. Такие участки массива являются зонами реализации геодинамических явлений, в связи с этим необходимо проводить непрерывный сейсмический мониторинг.

Проанализирован сейсмический режим исследуемого участка. В сентябре, октябре и ноябре 2025 г. АСКСМ зарегистрировано 33, 38 и 53 сейсмособытия с энергией $E \geq 10^3$ Дж, суммарная выделившаяся сейсмическая энергия составляет $2{,}7 \cdot 10^5$, $8 \cdot 10^5$ и $2{,}7 \cdot 10^6$ Дж соответственно.

7 сентября 2025 г. произошло сейсмособытие с энергией



Рис. 3
Временной ход сейсмичности в районе Кукисвумчоррского месторождения в 2025 г.

Fig. 3
Time variations in seismicity in the area of the Kukisvumchorr deposit in 2025.

1,3·10^5 Дж, 12 и 30 октября слоцировано два сейсмособытия с E = 10^5 Дж, 4 ноября произошло сильное сейсмособытие с E = 2,1·10^6 Дж. На рис. 3 показан временной ход сейсмичности исследуемого района горизонта +10 м – кумулятивный график, на котором отмечен момент проявления сильного сейсмического события. На протяжении всего периода наблюдается возрастание сейсмичности.

Концентрация сейсмических событий приурочена к лежачему боку рудной залежи. Количество событий с сентября по ноябрь увеличивается в области, ограниченной субвертикальными структурными нарушениями (рис. 4) в блоках 12/15 и 15/18, где ведутся горные работы. Схожая ситуация прослеживается и в блоке 9/12, где у геологического нарушения уже возникают сейсмические события. Можно ожидать развитие сейсмичности при приближении фронта горных работ к блоку 9/12.

Таким образом, были выявлены зоны с повышенной сейсмической активностью и высоким уровнем напряженно-деформированного состояния приконтурной части массива на глубоких горизонтах отработки (+25 м; +50 м; +75 м гор. +10 м). Визуальный осмотр выработок подтвердил образование локальных участков с признаками проявления горного давления. Исследование аномалий сейсмичности и данных об изменении НДС для выявления опасных участков важно для обеспечения безопасного ведения горных работ.

В связи с этим для работ в блоке 9/12 по методике регионального прогноза удароопасности рекомендуется:

– применить метод разгрузочной щели;

– обеспечить проведение периодического контроля по оценке удароопасности массива горных пород инструментальным методом на период отработки запасов;

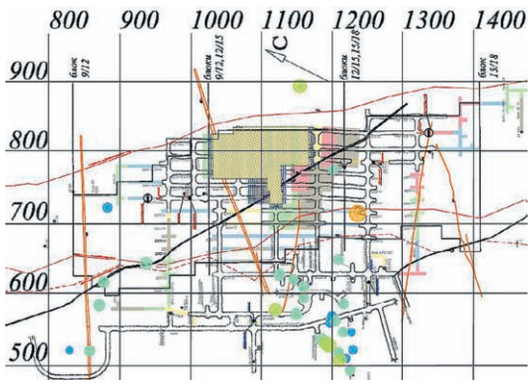
– обеспечить проведение визуального осмотра состояния горных выработок после производства работ по обезопашиванию;

– повысить частоту обследования зоны (в случае ухудшения состояния горной выработки по фактору горного давления, интенсификации внешних признаков динамических проявлений горного давления незамедлительно ставить в известность специалистов отдела СППГУ);

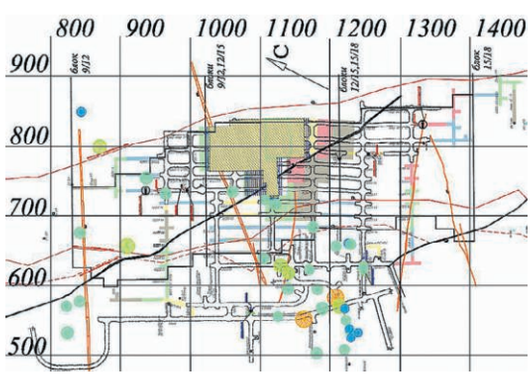
– при ведении работ проводить своевременные расчеты действующих напряжений;

– проводить опережающее бурение разгрузочных скважин и усилить выработку при помощи анкерной и набрызг-бетонной крепи.

а)



б)



в)

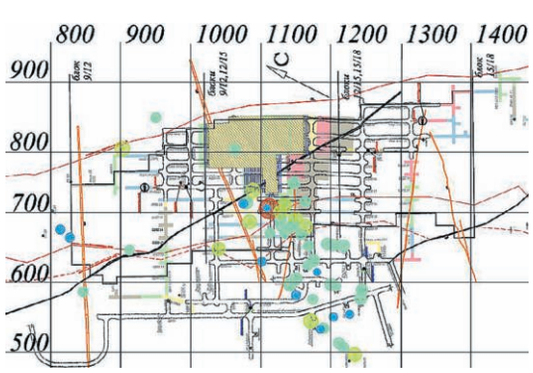


Рис. 4
Распределение эпицентров сейсмических событий в 2025 г. в пространстве шахтного поля на отм. +25 м гор. +10 м (синие сферы – события с E = 10^3 Дж; зеленые – 10^4 Дж; желто-оранжевые – 10^5 Дж; красные – 10^6 Дж): а – сентябрь; б – октябрь; в – ноябрь

Fig. 4.
istribution of the seismic event foci in 2025 within the mine field at Level of +25 m, +10 m (blue circles – events with E = 10^3 J; green circles – 10^4 J; yellow-orange circles – 10^5 J; red circles – 10^6 J): a – September; б – October; в – November

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 адаптированной методике В.А. Салтыкова на основе статистической оценки уровня сейсмичности. По всей зоне контроля месторождения рост экстремально высокого уровня сейсмоактивности отмечен в 2018, 2020, 2022 и в 2025 гг.

Выявлена миграция сейсмичности вместе с продвижением фронта горных работ, в том числе и на глубину. Установлено, что за последние 9 лет при переходе горных работ на глубокие горизонты наблюдается проявление мощных геодинамических явлений энергетического класса K = 7–9 на нижних горизонтах отработки.

Для прогноза состояния блока 9/12 проанализирована геомеханическая ситуация на соседних блоках 12/15 и 15/18, где ведутся горные работы. С помощью методов регионального прогноза удароопасности были выявлены зоны с повышенной сейсмической активностью и высоким уровнем напряженно-деформированного состояния приконтуроной части массива на глубоких горизонтах отработки (+25 м; +50 м; +75 м гор. +10 м).

Выявлены зоны с высоким и средним уровнем напряжений в области очистного пространства, в висячем боку рудной залежи и в области влияния геологических нарушений. Данные зоны характеризуются различным режимом проявления горного давления: во вмещающих породах и в рудной залежи. Установлено, что вокруг отработанного пространства в массиве формируются области повышенных напряжений.

Анализ сейсмического режима исследуемого района показал, что концентрация сейсмических событий приурочена к лежачему боку рудной залежи. Отмечена активизация сейсмичности с сентября по ноябрь в области, ограниченной субвертикальными структурными нарушениями, следует ожидать аналогичной ситуации в блоке 9/12 при приближении фронта горных работ, где у геологического нарушения уже происходят сейсмические события.

Выявленные тенденции формирования сейсмоактивных зон могут быть характерны в дальнейшем и для более глубоких горизонтов.

Проанализировано геомеханическое состояние массива в блоках 12/15, 15/18, на основе этого сделана оценка состояния массива в блоке 9/12 и предложены рекомендации по выбору профилактических мероприятий по снижению удароопасности.

Таким образом, для прогноза геомеханического состояния массива в блоках, к которым подходит фронт работ, необходимо учитывать геологическое строение, зоны концентрации напряжений, сейсмических событий и положения участков активного ведения горных работ. Данная информация способствует положительному результату планирования своевременных профилактических мероприятий по снижению горного давления.

Список литературы / References

1. 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
2. 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
3. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г., Куприш О.В. Наведённая 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
4. 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
   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
5. Ghasemi E., Gholizadeh H., Adoko A.C. Evaluation of rockburst occurrence and intensity in underground structures using decision tree approach. Engineering with Computers. 2020;36(1):213–225. https://doi.org/10.1007/s00366-018-00695-9
6. Song D., He X., Wang E., Li Z., Liu J. *Rockburst Evolutionary Process and Energy Dissipation Characteristics*. Singapore: Springer; 2020. 248 p. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6279-8
7. He M., Cheng T., Qiao Y., Li H. A review of rockburst: Experiments, theories, and simulations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023;15(2):1312–1353. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.07.014
8. Sibson R.H. Preparation zones for large crustal earthquakes consequent on fault-valve action. *Earth, Planets and Space*. 2020;72(1):31. https://doi.org/10.1186/s40623-020-01153-x
9. Nordström E., Dineva S., Nordlund E. Back analysis of short-term seismic hazard indicators of larger seismic events in deep underground mines (LKAB, Kiirunavaara Mine, Sweden). *Pure and Applied Geophysics*. 2020;177(2):763–785. https://doi.org/10.1007/s00024-019-02352-8

10. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки. *Вулканология и сейсмология*. 2011;(2):53–59.
Saltykov V.A. A statistical estimate of seismicity level: the method and results of application to Kamchatka. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2011;5(2):123–128. https://doi.org/10.1134/S0742046311020060

11. Иванюк Г.Ю., Горяинов П.М., Пахомовский Я.А., Коноплева Н.Г., Яковенчук В.Н., Базай А.В., Калашников А.О. *Самоорганизация рудных комплексов. Синергетические принципы прогнозирования и поисков полезных ископаемых*. М.: Геокарт-Геос; 2009. 392 с. Режим доступа: https://www.geokniga.org/books/3219 (дата обращения: 19.05.2026).

12. Онохин Ф.М. *Особенности структуры Хибинского массива и апатит-нефелиновых месторождений*. Л.: Наука, Ленингр. отд.; 1975. 106 с. Режим доступа: https://www.geokniga.org/books/9015 (дата обращения: 19.05.2026).

13. 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

14. 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
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

15. Козырев А.А., Савченко С.Н., Панин В.И., Семенова И.Э., Рыбин В.В., Федотова Ю. В. и др. *Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками*. Апатиты: КНЦ РАН; 2019. 431 с. https://doi.org/10.37614/978.5.91137.391.7

16. Дмитриев С.В., Семенова И.Э., Шестов А.А. Развитие CAE системы численного моделирования НДС SIGMA GT. *Горная промышленность*. 2023;(5S):135–141. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-135-141
Dmitriev S.V., Semenova I.E., Shestov A.A. Advancement of the SIGMA GT CAE system for numerical modeling of the stress-and-strain states. *Russian Mining Industry*. 2023;(5S):135–141. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-135-141

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; доцент кафедры горного дела, наук о Земле и природообустройства, Апатитский филиал Мурманского арктического университета, г. Апатиты, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-0769-6584; e-mail: svetlana.zhukowa@yandex.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

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; Associate Professor of the Department of Mining, Earth Sciences and Environmental Management, branch of the Murmansk Arctic University, Apatity, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-0769-6584; e-mail: svetlana.zhukowa@yandex.ru
Vyacheslav S. Onuprienko – Chief Engineer, Kirovsk Branch of JSC Apatit, Kirovsk, Russian Federation; e-mail: VOnuprienko@phosagro.ru
Anatoly A. Streshnev – Department of Rockburst Forecasting and Prevention, Kirovsk Branch of JSC Apatit, Kirovsk, Russian Federation; e-mail: astreshnev@phosagro.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 15.05.2026
Поступила после рецензирования: 23.06.2026
Принята к публикации: 14.07.2026

Article info
Received: 15.05.2026
Revised: 23.06.2026
Accepted: 14.07.2026