

# ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОТРАБОТКЕ УДАРООПАСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ХИБИНСКОГО МАССИВА

С.А. Жукова<sup>1</sup>, О.Г. Журавлева<sup>1</sup>, В.С. Онуприенко<sup>2</sup>, А.А. Стрешнев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия, e-mail: o.zhuravleva@ksc.ru

<sup>2</sup> Кировский филиал АО «Апатит», Кировск, Россия

**Аннотация:** Представлены результаты анализа сейсмичности удароопасных апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива, обрабатываемых Кировским и Расвумчоррским рудниками. Исходными данными являлись результаты сейсмического мониторинга по данным Автоматизированных систем контроля состояния массива Кировского и Расвумчоррского рудников КФ АО «Апатит». Проведенный анализ позволил выявить основные закономерности развития сейсмического процесса, формирования и локализации потенциально опасных зон при разработке удароопасных месторождений Хибин за десятилетний период мониторинга. Определены основные районы повышенной сейсмической активности: участки вблизи активного ведения горных работ; консольная часть массива необрушенных пород висячего бока рудной залежи. Выявлена периодическая активизация различных геолого-структурных неоднородностей массива. Отмечен рост количества сильных сейсмособытий в лежащем боку рудной залежи, причем зачастую такие события происходят в глубине массива. Отмечено значительное влияние на активизацию сейсмичности повышенной обводненности массива горных пород. Особенно ярко выражено влияние этого фактора на сейсмичность в карьере «Центральный» в весенние периоды из-за обильного снеготаяния. Проведенные исследования еще раз доказывают, что многолетний сейсмологический мониторинг рудников Хибинского массива — это эффективный инструмент контроля состояния массива горных пород в режиме реального времени, который позволяет горнодобывающему предприятию своевременно планировать и проводить профилактические мероприятия по предупреждению проявлений горного давления и минимизации рисков в случае таких проявлений.

**Ключевые слова:** удароопасные месторождения, геодинамическая безопасность, сейсмический мониторинг, наведенная сейсмичность, подземные горные работы, Хибинский массив, Кировский рудник, Расвумчоррский рудник.

**Для цитирования:** Жукова С. А., Журавлева О. Г., Онуприенко В. С., Стрешнев А. А. Особенности сейсмического режима массива горных пород при отработке удароопасных месторождений Хибинского массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 7. – С. 5–17. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_7\_0\_5.

---

## Seismic behavior of rock mass in mining rockburst-hazardous deposits in the Khibiny Massif

S.A. Zhukova<sup>1</sup>, O.G. Zhuravleva<sup>1</sup>, V.S. Onuprienko<sup>2</sup>, A.A. Streshnev<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Kirovsk Branch JSC «Apatit», Kirovsk, Russia

---

**Abstract:** The article describes the seismicity analysis of rockburst-hazardous apatite–nepheline deposits in the Khibiny Massif as a case-study of Kirov and Rasvumchorr mines. The source data are the seismic monitoring results from the automated control systems in Kirov and Rasvumchorr mines of Apatit JSC. The analysis reveals the patterns of the seismic behavior of rock mass, as well as the formation and localization of potentially hazardous zones in mining rockburst-hazardous deposits in Khibiny for the monitoring period of 10 years. The increased seismic activity areas are: the areas nearby active mining operations and the uncaved overhang in the hanging wall. It is found that structural geological discontinuities in rock mass periodically become active. It is emphasized that the number of strong seismic events in the footwall grows, and, moreover, such events take place deep inside rock mass. The activation of seismicity is largely governed by higher water content of rocks. The impact of this factor is particularly acute in the Central open pit in the spring, due to heavy snow melting. The implemented research proves again that the long-term seismic monitoring is the effective tool of the real-time ground control in the Khibiny Massif, and enables early prevention of dynamic events induced by rock pressure, or minimization of risks in case that such events yet happen.

**Key words:** rockburst-hazardous deposits, geodynamic safety, seismic monitoring, induced seismicity, underground mining, Khibiny Massif, Kirov mine, Rasvumchorr mine.

**For citation:** Zhukova S. A., Zhuravleva O. G., Onuprienko V. S., Streshnev A. A. Seismic behavior of rock mass in mining rockburst-hazardous deposits in the Khibiny Massif. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(7):5-17. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_7\_0\_5.

---

### Введение

Исследование геодинамических процессов при ведении горных работ предполагает выявление закономерностей изменения сейсмической активности, формирования и локализации потенциально опасных зон при разработке удароопасных месторождений, в пределах которых при неблагоприятном сочетании природных и техногенных факторов может произойти потеря устойчивости массива горных пород.

Как известно, обработка месторождений полезных ископаемых существенно изменяет геодинамический режим, в результате чего могут происходить опас-

ные геодинамические явления различного масштаба, последствия от которых могут быть от незначительных до катастрофических [1 – 6].

Проблема динамического проявления горного давления (от внезапных разрушений в единичных выработках до ощутимых сотрясений на поверхности) существует уже давно и поиску ее решения посвящены многолетние исследования ученых всего мира [2, 6, 7 – 19]. Поскольку подобные явления представляют серьезную опасность для персонала и оборудования горнодобывающие предприятия уделяют такой проблеме значительное внимание: проводится постоян-

ный контроль состояния массива различными методами, а также своевременно осуществляется разработка и выполнение профилактических мероприятий [20].

Как правило, геодинамические явления сопровождаются сильным сейсмическим эффектом. Поэтому для наблюдения за состоянием массива в режиме, близком к реальному времени, на рудниках устанавливают локальные системы сейсмического мониторинга. На сегодняшний день такие системы полноценно функционируют на многих месторождениях России и мира [2, 3, 13, 18, 19, 21 – 23].

Исследования, направленные на выявление особенностей и закономерностей развития сейсмического процесса при ведении горных работ на Хибинских апатитовых рудниках, обрабатываемых КФ АО «Апатит» проводятся уже около 30 лет [24]. Несмотря на выявленные ранее закономерности изменения сейсмической активности такие исследования остаются актуальными и на сегодняшний день, поскольку каждое месторождение является уникальным объектом, на котором сейсмичность проявляется под влиянием стационарных, условно-

стационарных и динамических факторов. Очевидно, что сейсмический процесс при отработке подземных рудников и при отработке карьеров развивается по-разному. Кроме того, существенные различия могут быть и при отработке месторождений подземным способом, например, в связи с отработкой от центра к флангам или встречными фронтами, а также при изменении технологии ведения работ.

В настоящей статье отражены результаты исследований, проведенных с целью выявления особенностей сейсмической активности месторождений, обрабатываемых Кировским и Расвумчорским рудниками. Исходными данными являлись результаты сейсмического мониторинга по данным Автоматизированных систем контроля состояния массива Кировского (АСКСМ-К) и Расвумчорского (АСКСМ-Р) рудников КФ АО «Апатит».

### Методы и объект исследований

Сейсмологические каталоги содержат информацию о сейсмических событиях, происходящих в зоне контроля АСКСМ-К и АСКСМ-Р. Регистрация

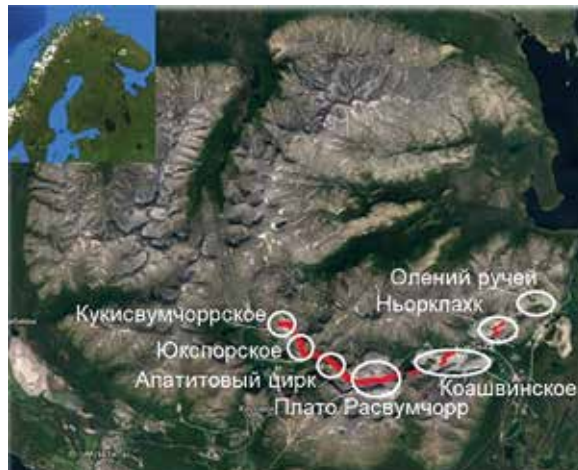


Рис. 1. Хибинский массив. Местоположение апатит-нефелиновых месторождений (красной линией показано рудное тело)

Fig. 1. Khibiny Massif. Location of apatite–nepheline deposits (red color line marks an ore body)

событий в зоне уверенной регистрации обеспечена с погрешностью не более 100 м (представительная энергия события от 1000 Дж), в районах повышенной точности – с погрешностью не более 25 м (представительная энергия события от 1000 Дж). Причем, как правило, в районах повышенной точности погрешность определения координат сейсмического события не превышает 10 м.

Подсистема АСКСМ-К контролирует Кукисвумчоррское и Юкспорское месторождения, в том числе район Саамского разлома, вскрытого карьерной выемкой. Подсистемой АСКСМ-Р контролируется зона стыковки подземного Расвумчоррского рудника (месторождение «Апатитовый цирк») с карьером «Центральный» (месторождение «Плато Расвумчорр»), район рудоспуска № 6 и северо-западный борт карьера. На космоснимке (рис. 1) схематично показано местоположение месторождений Хибинского массива.

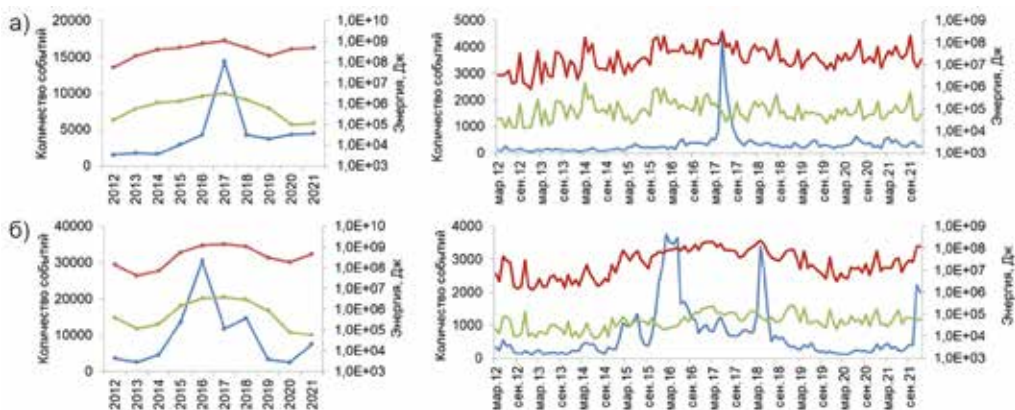
За время эксплуатации системы сейсмического мониторинга (начиная с 1989 г.) накоплен большой объем данных сейсмических наблюдений. В настоящем ис-

следовании рассмотрены результаты сейсмических наблюдений за десятилетний период: с 01.01.2012 г. по 31.12.2021 г. Такой период выбран в связи с тем, что, во-первых, является достаточно длительным для выявления каких-либо тенденций, и, во-вторых, в 2012 г. выполнена модернизация подсистемы сбора и обработки сейсмической информации АСКСМ.

Рассмотрены основные параметры сейсмической активности: суммарное количество сейсмических событий (ежегодное и/или ежемесячное), суммарное и среднее значение выделившейся энергии, Дж (в некоторых случаях вместо энергии применяется энергетический класс сейсмического события  $K$ ). Также рассматривались пространственно-временные характеристики сейсмособытий для выявления связи (или ее отсутствия) сейсмичности с проводимыми горными работами.

## Результаты

Кукисвумчоррское и Юкспорское месторождения обрабатываются Кировским рудником подземным способом.



Синим цветом показано распределение количества событий; красным – суммарная выделившаяся энергия; зеленым – средняя энергия

Рис. 2. Ежегодное и ежемесячное изменение параметров сейсмичности: Кукисвумчоррское месторождение (а); Юкспорское месторождение (б)

Fig. 2. Yearly and monthly change in seismicity parameters: Kukisvumchorr deposit (a); Yukspor deposit (b)

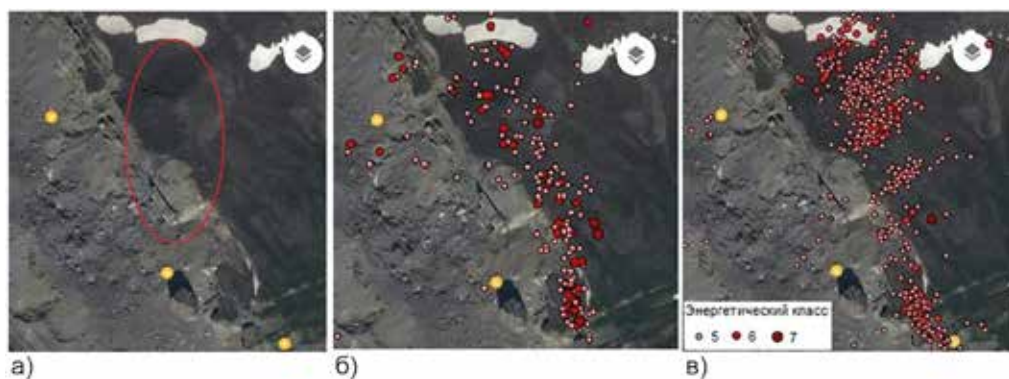


Рис. 3. Формирование магистрального разрыва: космоснимок поверхностной части Кукисвумчоррского месторождения, на котором отмечено место разрыва (а); распределение эпицентров сейсмических событий с января по апрель 2017 г. (б); с мая по сентябрь 2017 г. (в)

Fig. 3. Formation of main rupture: satellite image of Kukisvumchorr deposit surface with marked place of rupture (a); distribution of epicenters of seismic events between January and April 2017 (b); distribution of epicenters of seismic events between May and September 2017 (v)

Исторически сложилось, что работы на Кукисвумчоррском месторождении проводятся на более глубоких горизонтах по сравнению с Юкспорским. Разделителем рудного тела является Саамский разлом. Сейсмичность в районе разлома учитывается при анализе данных Кукисвумчоррского месторождения. На рис. 2 представлены графики изменения параметров сейсмичности по годам и месяцам.

Из представленных на рис. 2 данных видно ярко выраженное повышение параметров сейсмичности и на Кукисвумчоррском, и на Юкспорском месторождении (особенно — количество сейсмических событий), связанные с интенсивным трещинообразованием в консоли пород всячего бока рудной залежи.

На Кукисвумчоррском месторождении (рис. 2, а) процесс интенсивного трещинообразования в консоли пород всячего бока рудной залежи продолжался примерно 5 месяцев: начался в апреле 2017 г., максимальное число событий — в мае, а в сентябре произошел спад, что свидетельствует о завершении формирования магистрального разры-

ва. Максимальное значение суммарной выделившейся энергии также наблюдается в мае 2017 г. На космоснимках (рис. 3) показано распределение событий энергетического класса  $K \geq 5$ , видно, что эпицентры приурочены к зоне формирования разрыва.

На Юкспорском месторождении (рис. 2, б) процесс трещинообразования в консоли пород всячего бока рудной залежи в связи с особенностями отработки месторождения (встречными фронтами по специально разработанному регламенту) длился дольше: первый этап начался в 2015 г. и завершился примерно через год в 2016 г., второй этап — 2018 г. На рис. 4 представлены фото, сделанные в разные периоды времени, на которых отчетливо видно изменение конфигурации поверхностной части массива горных пород Юкспорского месторождения.

Как и на Кукисвумчоррском месторождении процесс трещинообразования развивался постепенно: сначала происходило большое количество слабых событий, т.е. формировались трещины одного масштаба, в дальнейшем начали происходить более сильные события,





Рис. 4. Изменение конфигурации Юкспорского обрушения  
 Fig. 4. Changed configuration of Yukspor fall

что может свидетельствовать о слиянии мелких и средних трещин в более крупные. При этом значения суммарной выделившейся энергии и суммарного числа событий на Юкспорском месторождении значительно выше, чем на Кукисвумчоррском. В конце 2021 г. было зарегистрировано большое число сильных сейсмических событий в консольной части Юкспорского месторождения, что в принципе и объясняется повышением значений параметров сейсмичности данного района (количество событий и суммарная выделившаяся энергия).

Для других периодов времени можно выделить следующие особенности проявления сейсмической активности.

*Кукисвумчоррское месторождение:*

- увеличение числа сейсмических событий и суммарного энерговыделения в 2015 – 2016 гг. связано с развитием горных работ в блоке 7/10;
- в 2018 и 2019 гг. наблюдается снижение числа сейсмических событий энергетического класса  $K \geq 6$  в целом по Кукисвумчоррскому месторождению;

- в 2020 г. — наблюдается рост сейсмической активности, который в основном связан с отработкой блока 4/7;
- уровень сейсмической активности в 2021 г. находился примерно на уровне 2013 – 2014 гг.

Далее более детально рассмотрены основные участки сейсмической активности на Кукисвумчоррском месторождении в 2019 – 2021 гг.

Блок 4/7. Как было установлено ранее [25], на этом участке к росту сейсмической активности приводит совместное влияние тектонических, геомеханических и технологических факторов. Периоды активизации сейсмичности наблюдались с июня 2019 г., затем начиная с февраля 2020 г., на этом участке произошел существенный рост сейсмической активности, в том числе произошло большое количество сильных сейсмических событий ( $K \geq 6$ ). В течение 2021 г. их число снизилось.

Другим сейсмически активным участком является район окисленной зоны, пересекающей блоки 16/19 – 19/21. На этом участке сильные сейсмособы-

тия происходят постоянно в течение многих лет, наблюдаются как периоды активизации, так и затишья. Так, в августе 2021 г. произошло сейсмическое событие энергетического класса  $K = 7$ , а через 18 дней – энергетического класса  $K = 8$ , которое ощущалось на поверхности, но к видимым разрушениям не привело. Расстояние между гипоцентрами событий составило  $\approx 350$  м.

В районе Саамского разлома сейсмическая активность в основном отмечается в лежачем боку рудной залежи, но иногда проявляются сильные события и в других частях разлома (например, в 2021 г.), что может свидетельствовать об активности разлома в целом и о миграции сейсмичности вдоль тела разлома.

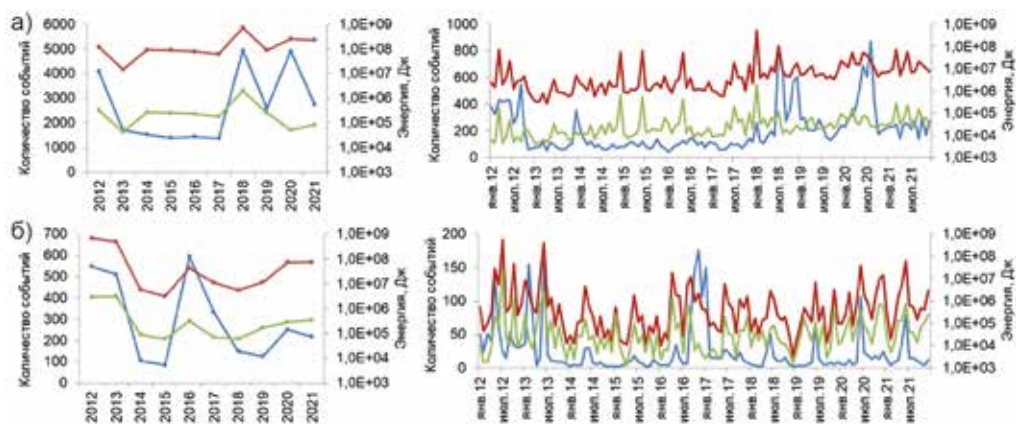
#### Юкспорское месторождение

В 2020 г. рост сейсмической активности наблюдался на участке ведения добычных работ в районе лежачего бока. Здесь зафиксирован отклик массива на продвижение горных работ – произошло сильное сейсмическое событие

энергетического класса  $K = 7$ , реализации которого способствовали взрывные работы при торцевом выпуске руды вблизи эгириновой жилы, а также упругое расширение рудного массива за счет выполненной надработки массива. Причем, стоит отметить, что на этом участке прослеживается миграция сейсмичности вслед за продвижением фронта горных работ.

В феврале 2021 г. на Юкспорском месторождении зафиксирована активизация сейсмичности: было зарегистрировано сейсмическое событие энергетического класса  $K = 6$  и продолжительная серия афтершоковых событий с максимальной энергией  $4,3 \cdot 10^5$  Дж. Факторами, способствующими реализации события являлись:

- геомеханические условия: нахождение участка массива горных пород в зоне опорного давления от очистной выемки и бровки обрушения покрывающих пород;
- геологическая обстановка: наличие крутопадающей высокопрочной мелкозернистой мончикитовой дайки и приу-



Синим цветом показано распределение количества событий; красным – суммарная выделявшаяся энергия; зеленым – средняя энергия

Рис. 5. Ежегодное и ежемесячное изменение параметров сейсмичности: месторождение «Апатитовый цирк» (а); месторождение «Плато Расвумчорр» (б)

Fig. 5. Yearly and monthly change in seismicity parameters: Apatite Circus deposit (a); Rasvumchorr Plateau deposit (b)

роченной к ее контакту с линзовидно-полосчатыми рудами зоны интенсивной трещиноватости.

В целом, на Кукисвумчоррском и Юкспорском месторождении формирование сейсмоактивных зон происходит неравномерно и зависит от сочетания природных и техногенных факторов.

На рис. 5 представлены графики изменения параметров сейсмического режима на месторождениях «Апатитовый цирк» и «Плато Расвумчорр».

Смежные месторождения «Апатитовый цирк» и «Плато Расвумчорр» расположены в зоне активного взаимного влияния. Выработки подземного рудника находятся в бортах карьера и под его дном, отвалы карьера расположены на поверхности над подземными выработками, что хорошо видно по прямоугольнику, ориентировочно показывающему местоположение подземного рудника (рис. 6).

Проявление сейсмической активности наблюдается в зоне стыковки под-

земного рудника и карьера чаще, чем на противоположных флангах шахтных полей. На рис. 6 шахтное поле условно разделено на две части: подземный рудник и зона стыковки подземного рудника и карьера.

В течение всего десятилетнего периода отмечается ярко выраженная сезонность: уровень сейсмоактивности в карьере растет в периоды повышенной обводненности массива с мая по июнь и в сентябре (снеготаяние, дожди) [26].

На протяжении всего периода мониторинга установлена миграция сейсмичности в сторону подземного рудника и сильные сейсмособытия происходят в зоне стыковки подземного рудника и карьера. Наиболее мощные сейсмические события, сопровождающиеся сотрясением земной поверхности, осыпанием уступов бортов и повреждением рудоспусков карьера «Центральный» были зарегистрированы в сентябре 2004 г., мае 2005, 2009, 2012 гг., июне 2013, 2019 гг. В районе рудоспусков карьера

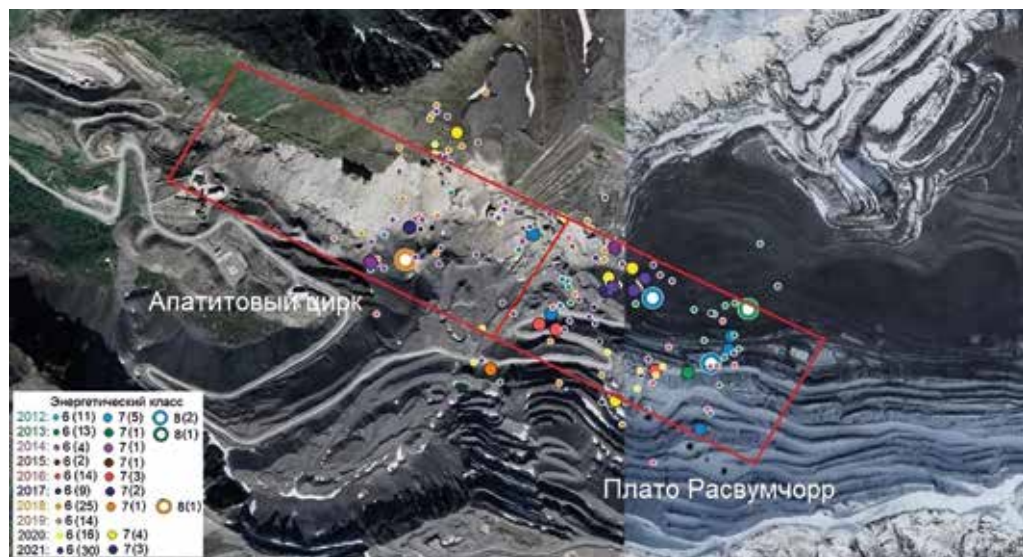


Рис. 6. Распределение эпицентров сильных сейсмособытий ( $K \geq 6$ ) на космоснимке месторождений «Апатитовый цирк» и «Плато Расвумчорр». Количество произошедших событий указано в скобках

Fig. 6. Distribution of epicenters of strong seismic events ( $K \geq 6$ ) in satellite images of Apatite Circus and Rasvumchorr Plateau deposits. Number of seismic events is given in brackets



«Центральный» также периодически происходили сильные сейсмические события, например, в 2020 г. произошло 5 сильных сейсмособытий.

Следует отметить, что обводненность является не единственным фактором, влияющим на сейсмичность массива в этом районе. На Расвумчоррском руднике зачастую сейсмическая активность связана как с развитием горных работ, так и со сложной геологической структурой массива. Случаи динамического проявления горного давления с нарушениями целостности контуров выработок подземного Расвумчоррского рудника за период анализа были зарегистрированы в 2018, 2020, 2021 гг. Последнее сильное сейсмособытие — горно-тектонический удар (09.01.2018) [7] произошло в районе сложной геологической структуры, где ранее неоднократно происходили горные удары различного масштаба.

### **Заключение**

Новизна полученных результатов исследования сейсмического режима массива горных пород при отработке удароопасных месторождений Хибинского массива определяется многолетними наблюдениями за сейсмичностью и уникальностью изучаемых месторождений, которые осложнены разномасштабными тектоническими и геологическими структурами, гидрологическим фактором, а также влиянием проводимых горных работ в условиях высокой тектонической напряженности региона.

Несомненно, при такой геомеханической ситуации существенное влияние на изменение геодинамического режима Хибинских месторождений имеет исходное напряженное состояние массива пород.

Проведенными исследованиями подтверждено, что основными участками повышенной сейсмической активности

являются участки вблизи активного ведения горных работ (особенно ощутимо влияние отбойки висячем боку рудной залежи); консоль необрушенных пород висячего бока рудной залежи, а также зоны тектонических нарушений, где происходит периодическая активизация различных геолого-структурных неоднородностей массива, особенно в периоды весенне-осеннего насыщения данных структур водой за счет инфильтрации атмосферных осадков.

Выявлено увеличение числа сильных сейсмических событий в лежащем боку рудной залежи, причем зачастую эти события происходят в глубине массива, где ранее такие события не регистрировались, по-видимому, причинами таких событий являются:

- углубление горных работ;
- изменение напряженно-деформированного состояния отдельных участков массива;
- тектоническая активизация района;
- увеличение скорости деформирования массива.

Таким образом, определяющая роль в обеспечении безопасности горных работ принадлежит геодинамическому мониторингу, в первую очередь мониторингу сейсмичности.

Проведение многолетнего сейсмологического мониторинга на рудниках Хибинского массива еще раз доказывает свою эффективность в контроле состояния массива горных пород в режиме реального времени, что в свою очередь позволяет своевременно идентифицировать район, участок массива горных пород, где необходимо проведение профилактических мероприятий по предупреждению проявлений горного давления и минимизации рисков в случае таких проявлений, а также предоставляет возможность изучения динамических явлений, в том числе и причин их происхождения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов И. М., Ильин А. М., Трубецкой К. Н. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках. — М.: Изд-во АГН, 1997. — 376 с.
2. Mendecki A. J. Mine seismology reference book: seismic hazard. Institute of Mine Seismology, 2016. 88 p.
3. Еременко А. А., Машуков И. В., Еременко В. А. Геодинамические и сейсмические явления при обрушении блоков на удароопасных месторождениях горной Шории // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2017. — № 1. — С. 70–76.
4. Lasocki S., Orlecka-Sikora B., Mutke G., Pytel W., Rudzinski L., Markowski P., Piasecki P. A catastrophic event in Rudna copper-ore mine in Poland on 29 November, 2016: What, how and why. Rock Mass Response to Mining and Underground Construction. Proceedings of the 9th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines. Santiago, Chile, 2017, pp. 316–324.
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, vol. 178, pp. 438–514. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.07.008.
6. Simser B. P. Rock burst management in Canadian hard rock mines // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019, vol. 11, no. 5, pp. 1036–1043. DOI: 10.1016/j.jrmge.2019.07.005.
7. Козырев А. А., Семенова И. Э., Журавлева О. Г., Пантелеев А. В. Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018 // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 12. — С. 74–83. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83.
8. Keneti A., Sainsbury B. Review of published rockburst events and their contributing factors // Engineering Geology. 2018, vol. 246, pp. 361–373. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.10.005.
9. He M. C., Xia H. M., Jia X. N., Gong W. L., Zhao F., Liang K. Y. Studies on classification, criteria and control of rockbursts // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2012, vol. 4, no. 2, pp. 97–114.
10. Durrheim R. J. Has research and development contributed to improvements in safety and profitability of deep South African mines? / Proceedings of the Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2014, pp. 23–40. DOI: 10.36487/ACG\_rep/1410\_0.2\_Durrheim.
11. Гурьев А. А. Устойчивое развитие рудно-сырьевой базы и обогатительных мощностей АО «Апатит» на основе лучших инженерных решений // Записки Горного института. — 2017. — Т. 228. — С. 662–673. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.662.
12. Батугин А. С. Общие закономерности проявления сильных горных ударов и индуцированных землетрясений на участках с предельно напряженным состоянием земной коры // Горный журнал. — 2021. — № 1. — С. 22–27. DOI 10.17580/gzh.2021.01.04.
13. 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. — Т. 2. — № 3. — С. 88–96. DOI: 10.35540/2686-7907.2020.3.08.
14. Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г., Усиков В. И., Потапчук М. И. Геодинамическое состояние массива пород Николаевского полиметаллического месторождения и особенности проявления удароопасности при его освоении // Горный журнал. — 2016. — № 12. — С. 13–19. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.03.
15. Злобина Т. В., Дягилев Р. А. Совершенствование модели влияния техногенных факторов для прогноза сейсмической активности на руднике СКРУ-2 // Геофизика. — 2019. — № 5. — С. 37–42.
16. Liu J., Xu S., Li Y., Lei G. Analysis of rock mass stability based on mining-induced seismicity: a case study at the hongtoushan copper mine in China // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019, vol. 52, no. 1, pp. 265–276. DOI: 10.1007/s00603-018-1541-y.

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

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

19. Маловичко Д. А. Оценка сейсмической опасности в рудниках // Российский сейсмологический журнал. — 2020. — Т. 2. — № 2. — С. 21–38. DOI: 10.35540/2686-7907.2020.2.02.

20. Корчак П. А. Геомеханический прогноз развития зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжения горных выработок в перенапряженном породном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5. — С. 85–98. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_5\_0\_85.


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

22. Дягилев Р. А., Шулаков Д. Ю., Верхованцев А. В., Глебов С. В. Мониторинг сейсмических процессов в калийных рудниках: результаты наблюдения и перспективы развития // Горный журнал. — 2013. — № 6. — С. 50–54.

23. Козырев А. А., Онуприенко В. С., Жукова С. А., Журавлева О. Г. Развитие инструментального и методического обеспечения контроля наведенной сейсмичности на Хибинских апатит-нефелиновых месторождениях // Горный журнал. — 2020. — № 9. — С. 19–26. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.02.

24. Сейсмичность при горных работах / Под. ред. Н. Н. Мельникова. — Апатиты: КНЦ РАН, 2002. — 325 с.

25. Семенова И. Э., Журавлева О. Г., Жукова С. А. Сейсмичность, как отражение изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород в процессе ведения горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 6. — С. 46–58. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_6\_0\_46.

26. 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. — С. 31–36. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.06. 

## REFERENCES

1. Petukhov I. M., Il'in A. M., Trubetskoy K. N. *Prognoz i predotvrashchenie gornykh udarov na rudnikakh* [Forecasting and prevention of rockbursts in mine], Moscow, Izd-vo AGN, 1997, 376 p.

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

3. Eremenko A. A., Mashukov I. V., Eremenko V. A. Geodynamic and seismic events under rockburst-hazardous block caving in Gornaya Shori. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2017, no. 1, pp. 70–76. [In Russ].

4. Lasocki S., Orlecka-Sikora B., Mutke G., Pytel W., Rudzinski L., Markowski P., Piasecki P. A catastrophic event in Rudna copper-ore mine in Poland on 29 November, 2016: What, how and why. *Rock Mass Response to Mining and Underground Construction. Proceedings of the 9th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines*. Santiago, Chile, 2017, pp. 316–324.

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, vol. 178, pp. 438–514. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.07.008.

6. Simser B. P. Rock burst management in Canadian hard rock mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019, vol. 11, no. 5, pp. 1036–1043. DOI: 10.1016/j.jrmge.2019.07.005.
7. Kozyrev A. A., Semenova I. E., Zhuravleva O. G., Pantelev A. V. Hypothesis of strong seismic event origin in Rasvumchorr Mine on January 9, 2018. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 12, pp. 74–83. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83.
8. Keneti A., Sainsbury B. Review of published rockburst events and their contributing factors. *Engineering Geology*. 2018, vol. 246, pp. 361–373. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.10.005.
9. He M. C., Xia H. M., Jia X. N., Gong W. L., Zhao F., Liang K. Y. Studies on classification, criteria and control of rockbursts. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2012, vol. 4, no. 2, pp. 97–114.
10. Durrheim R. J. Has research and development contributed to improvements in safety and profitability of deep South African mines? *Proceedings of the Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2014, pp. 23–40. DOI: 10.36487/ACG\_rep14110\_0.2\_Durrheim.
11. Guryev A. A. Sustainable Development of Crude Ore Resources and Beneficiation Facilities of JSC «Apatit» Based on Best Engineering Solutions. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 228, pp. 662–673. [In Russ]. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.662.
12. Batugin A. S. General regularities of occurrence of strong rockbursts and induced earthquakes in areas with the maximum stress state of the earth's crust. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 1, pp. 22–27. [In Russ]. DOI 10.17580/gzh.2021.01.04.
13. 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. *The Russian Journal of Seismology*. 2020, vol. 2, no. 3, pp. 88–96. [In Russ]. DOI: 10.35540/2686-7907.2020.3.08.
14. Rasskazov I. Yu, Saksin B. G., Usikov V. I., Potapchuk M. I. Rock mass geodynamics and mining-induced rockbursting at Nikolaev complex deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2016, no. 12, pp. 13–19. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.03.
15. Zlobina T. V., Dyagilev R. A. Improvement of the model of influence of mining-induced factors for seismic activity prediction at the SKRU-2 mine. *Geophysics*. 2019, no. 5, pp. 37–42. [In Russ].
16. Liu J., Xu S., Li Y., Lei G. Analysis of rock mass stability based on mining-induced seismicity: a case study at the hongtoushan copper mine in China. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019, vol. 52, no. 1, pp. 265–276. DOI: 10.1007/s00603-018-1541-y.
17. Yakovlev D. V., Tsirel' S. V., Mulev S. N. Laws of spreading and operational evaluation procedure for induced seismicity in mines and in mining areas. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2016, no. 2, pp. 34–47. [In Russ].
18. German V. I. Rock failure prediction in mines by seismic monitoring data. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014, no. 2, pp. 99–109. [In Russ].
19. Malovichko D. A. Assessment of seismic hazard in mines. *The Russian Journal of Seismology*. 2020, vol. 2, no. 2, pp. 21–38. [In Russ]. DOI: 10.35540/2686-7907.2020.2.02.
20. Korchak P. A. Geomechanical prediction of growth of brittle fracture zones in the vicinity of underground excavations in over-stress rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5, pp. 85–98. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_5\_0\_85.
21. Dineva S., Boskovic M. Evolution of seismicity at Kiruna Mine. *Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2017, pp. 125–140.
22. Dyagilev R. A. Shulakov D. Yu., Verkholantsev A. V., Glebov S. V. Monitoring of seismic processes in potash mines: observation results and development prospects. *Gornyi Zhurnal*. 2013, no. 6, pp. 50–54. [In Russ].
23. Kozyrev A. A., Onuprienko V. S., Zhukova S. A., Zhuravleva O. G. Induced seismicity of rock mass: development of instrumental and methodological support to control seismicity at



the Khibiny apatite-nepheline deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 9, pp. 19–26. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.02.

24. *Seismichnost' pri gornykh rabotakh*. Pod. red. N. N. Mel'nikova [Seismicity in mining. Melnikov N. N. (Ed.)], Apatity, KNTs RAN, 2002, 325 p.

25. Semenova I. E., Zhuravleva O. G., Zhukova S. A. Seismicity as an echo of stress-strain behavior change in rock mass in the course of mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 6, pp. 46–58. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_6\_0\_46.

26. 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, no. 1, pp. 31–36. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.06.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жукова Светлана Александровна<sup>1</sup> — канд. техн. наук,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: svetlana.zhukowa@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0769-6584,

Журавлева Ольга Геннадьевна<sup>1</sup> — канд. техн. наук,  
старший научный сотрудник, e-mail: o.zhuravleva@ksc.ru

ORCID ID: 0000-0002-8986-9559,

Онуприенко Вячеслав Сергеевич<sup>2</sup> — главный инженер,  
e-mail: VOnuprienko@phosagro.ru,

Стрешнев Анатолий Александрович<sup>2</sup> — начальник  
Службы прогноза и предотвращения горных ударов,  
e-mail: astreshnev@phosagro.ru.

<sup>1</sup> Горный институт КНЦ РАН,

<sup>2</sup> Кировский филиал АО «Апатит».

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

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.A. Zhukova<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,  
e-mail: svetlana.zhukowa@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0769-6584,

O.G. Zhuravleva<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,  
e-mail: o.zhuravleva@ksc.ru,

ORCID ID: 0000-0002-8986-9559,

V.S. Onuprienko<sup>2</sup>, Chief Engineer,  
e-mail: VOnuprienko@phosagro.ru,

A.A. Streshnev<sup>2</sup>, Head of Department  
of Rockburst Forecasting and Prevention,  
e-mail: astreshnev@phosagro.ru,

<sup>1</sup> Mining Institute, Kola Scientific Centre  
of Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia,

<sup>2</sup> Kirovsk Branch JSC «Apatit», 184250, Kirovsk, Russia.

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

Получена редакцией 09.03.2022; получена после рецензии 16.05.2022; принята к печати 10.06.2022.

Received by the editors 09.03.2022; received after the review 16.05.2022; accepted for printing 10.06.2022.

