

УДК 622.831

## ВЛИЯНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ НА СЕЙСМОАКТИВНОСТЬ МАССИВА ПОРОД ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ ХИБИН

© 2023 г. М. М. Каган<sup>1, \*</sup>, А. А. Козырев<sup>1, \*\*</sup>, А. Ю. Моторин<sup>2, 3, \*\*\*</sup>, А. А. Стрешнев<sup>2, \*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

<sup>2</sup>Кировский филиал АО “Апатит”, г. Апатиты, Россия

<sup>3</sup>Кольский Филиал ФГБУН ФИЦ “Единая геофизическая служба РАН”, г. Апатиты, Россия

\*E-mail: M.Kagan@ksc.ru

\*\*E-mail: a.kozyrev@ksc.ru

\*\*\*E-mail: AYuMotorin@phosagro.ru

\*\*\*\*E-mail: AStreshnev@phosagro.ru

Поступила в редакцию 22.09.2022 г.

После доработки 05.12.2022 г.

Принята к публикации 09.12.2022 г.

Рассматриваются вопросы причин и факторов проявления сейсмической активности при добыче полезных ископаемых в месторождениях Хибинского массива, обрабатываемых подземным способом. На основе данных сейсмического мониторинга выделены группы сейсмической активности, такие как сейсмичность в рабочей зоне, непосредственно связанная с взрывными работами и сейсмичность природная, относящаяся к другим горно-геологическим факторам. Показано различие характеристик проявления сейсмичности для этих двух групп сейсмических событий.

*Ключевые слова:* подземный рудник, сейсмические события, сейсмический мониторинг.

**DOI:** 10.31857/S0002333723030055, **EDN:** JZXPBV

### ВВЕДЕНИЕ

Хибинский массив, представляющий собой в геологическом отношении многофазную щелочную интрузию центрально типа, является тектонически напряженным массивом горных пород, при этом в массиве наблюдается явление превышения горизонтальными напряжениями вертикальных. Добыча полезных ископаемых в условиях высоконапряженного скального массива, осуществляемая в Хибинской ПТС системой подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды, неизбежно приводит к возникновению техногенной сейсмичности [Адушкин, 2016]. Сейсмоактивность массива горных пород в шахтных полях рудников есть явление динамического разрушения предельно напряженных участков массива. Сейсмоактивность тесно связана со структурными особенностями породного массива, физико-механическими свойствами составляющих горных пород и конфигурацией шахтного поля. Сейсмические явления возникают в тех участках массива, где скорость изменения напряженного состояния превышает предельную скорость релаксации напряжений (вследствие пластических деформаций) [Авершин, 1955]. Изменение на-

пряженного состояния массива в шахтных полях рудников связано с проводимыми горными работами и обусловлено несколькими факторами. Одним из действующих факторов является пригрузка высоконапряженного массива за счет сейсмического воздействия на него взрывных работ, широкого применяющихся при обработке месторождений. Кроме того, изменение напряженного состояния связано с перераспределением напряжений в результате изменения конфигурации подготовительных и очистных выработок в ходе проводимых горных работ. Еще один действующий фактор – глобальное перераспределение напряжений в массиве пород по имеющимся разрывным нарушениям в зонах повышенного горного давления в процессе длительной эксплуатации рудников. Была предпринята попытка количественно оценить взаимоотношения вышеперечисленных действующих факторов, определяющих сейсмоактивность породного массива для двух действующих апатитовых рудников Хибинского месторождения: Кировский рудник (далее в обозначениях *кир*) и Расвумчоррский рудник (далее в обозначениях *рас*) Кировского филиала АО “Апатит”.

**Таблица 1.** Результаты сейсмического мониторинга рудников за период с 2019 по 2020 год включительно

Тип события	Число событий по рудникам		
	<i>кир</i>	<i>рас</i>	общий итог
Технологические взрывы	45494	25795	71289
Сейсмика	36221	30115	66336
Общий итог	81715	55910	137625

**Таблица 2.** Общие результаты пространственного анализа сейсмоактивности в зоне влияния технологических взрывов (временной интервал – 72 ч)

Оценка	Рудник		
	<i>кир</i>	<i>рас</i>	общий итог
Число событий в зоне влияния взрывов	34667	24822	59489
% от общего числа событий	95.7	82.4	89.7

## МЕТОДЫ

Кировский и Расвумчоррский рудники входят в состав Кировского филиала АО Апатит и оборудованы системой автоматизированного сейсмического мониторинга шахтных полей в микросейсмическом диапазоне (АСКСМ) [Корчак и др., 2014]. АСКСМ хранит идентифицированную информацию обо всех зарегистрированных сейсмических явлениях как связанных с сейсмоактивностью массива, так и о технологических взрывах. Оценка выполнялась на основе анализа каталога сейсмических событий, зарегистрированных в период с 2019 по 2020 гг. включительно. Общие результаты регистрации по рудникам за анализируемый период приведены в табл. 1.

Выполнен анализ распределения зарегистрированных технологических взрывов и сейсмических событий на основе их энергий, взаимного расположения и хронологии. Зарегистрированные технологические взрывы с точки зрения их воздействия на массив пород использовались в двух аспектах. Во-первых, как источник возмущений в массиве, являющихся непосредственной причиной сейсмических явлений, во-вторых, как индикатор активных горных работ (отбойка, про-

ходка и т.п.), связанных с аккумуляцией накапливаемых структурных изменений в массиве.

Процедура анализа состояла в следующем: для каждого из зарегистрированных технологических взрывов с энергией выше определенного порога выбирались сейсмические события в фиксированном временном интервале после момента взрыва, попадающие в зону влияния взрыва. Для оценки зоны влияния взрывов с учетом их энергии в расчетах использовалась эмпирическая формула:

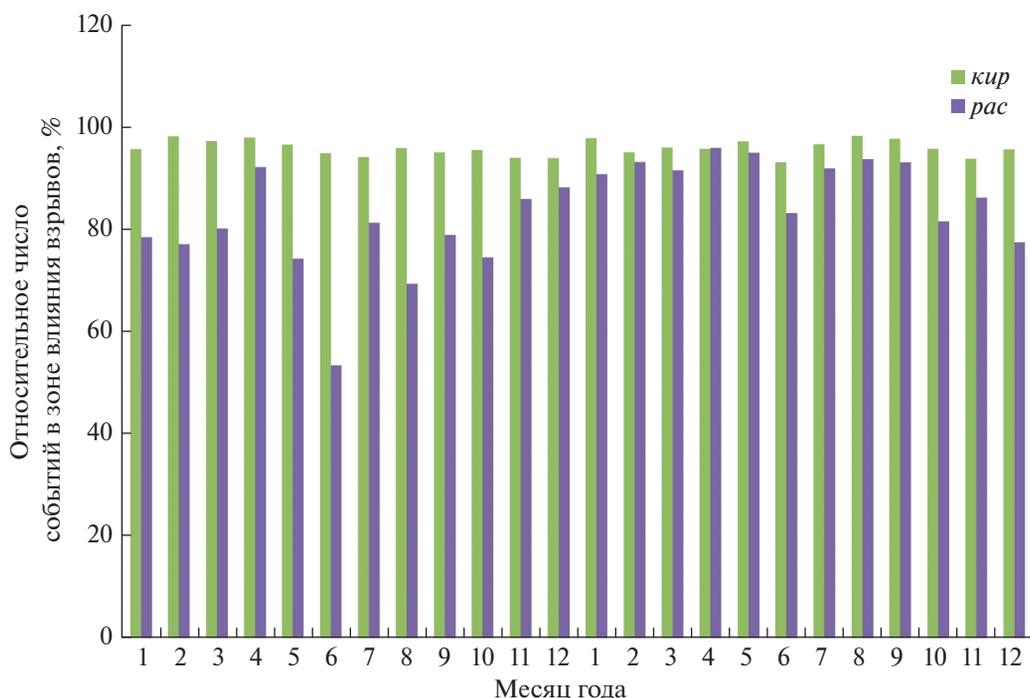
$$R = k\sqrt[3]{E}, \quad (1)$$

где:  $E$  – энергия взрыва, Дж;  $R$  – радиус зоны влияния, м;  $k$  – масштабирующий множитель.

Обоснованием для выбора эмпирической формулы послужили соображения размерности, а также некоторая аналогия с известной формулой, задающей связь между размерами очага сейсмического события и его энергией [Dobrovolsky и др., 1979]:

$$\lg L = 0.33 \lg E - 0.4,$$

где  $L$  – длина разрыва в очаге, м;  $E$  – энергия сейсмического события, Дж.



**Рис. 1.** Помесячное распределение относительного числа сейсмособытий в зоне влияния технологических взрывов за период с 2019 по 2020 гг. включительно на Кировском и Расвумчоррском рудниках.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Ниже (табл. 2 и рис. 1) приводятся результаты анализа при следующих параметрах:

- масштабирующий множитель  $k$  в эмпирической формуле (1) равен 1.2;
- минимальная энергия технологических взрывов, используемых в анализе, равна 1000 Дж;
- длительность временного интервала анализа равна 168 ч (7 сут).

Из приведенных данных следует, что подавляющее большинство сейсмических событий зафиксировано в зоне влияния, по крайней мере, одного технологического взрыва, причем это распределение устойчиво сохраняется со временем. Это справедливо для обоих рудников, хотя на Расвумчоррском руднике этот показатель несколько ниже.

На рис. 2 и рис. 3 представлено пространственное распределение сейсмических событий, зарегистрированных в феврале 2020 г. на обоих рудниках. Временной интервал ограничен с целью облегчения визуализации сейсмособытий, время выборки выбрано случайно, так как отражает типичное распределение сейсмособытий разных типов во всем анализируемом двухгодичном интервале. По каждому руднику выводятся отдельно

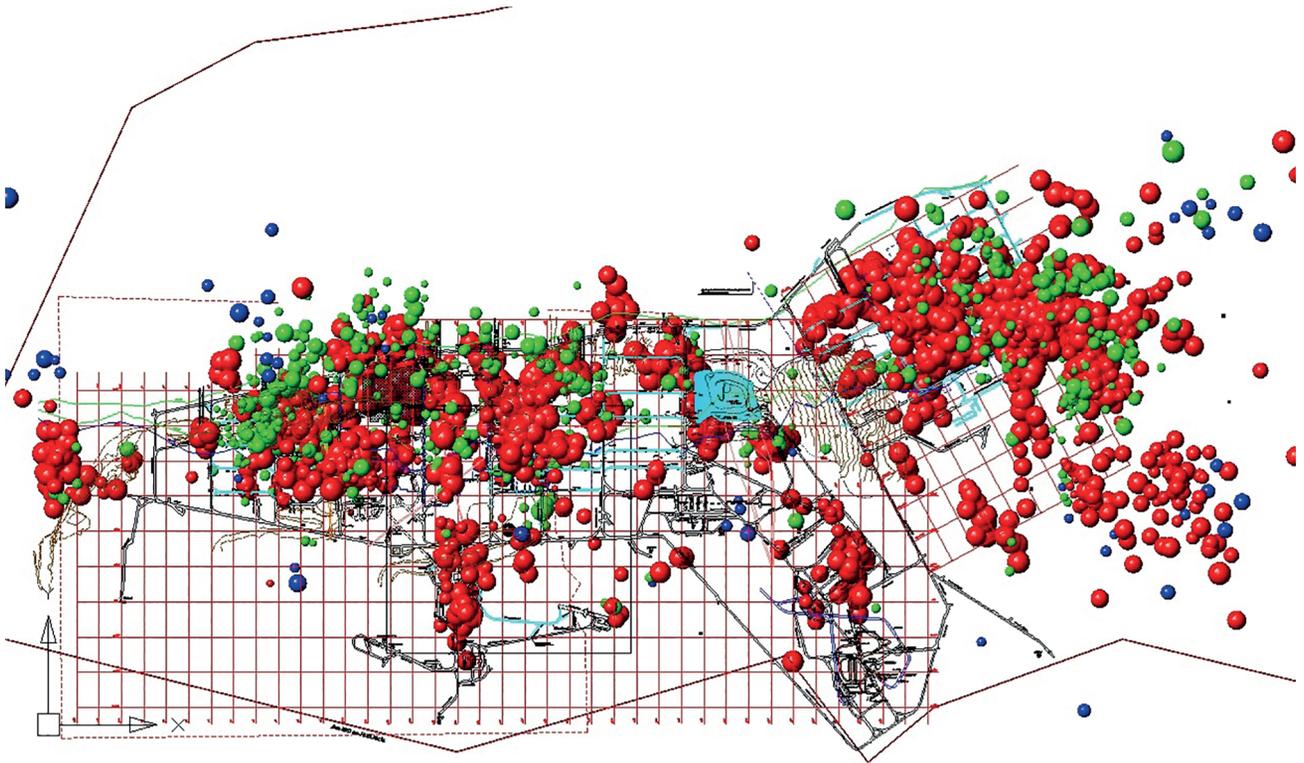
все сейсмические события и только события, связанные с сейсмоактивностью массива.

Можно видеть, что, при выбранных параметрах анализа, на обоих рудниках зарегистрированная сейсмоактивность в подавляющем большинстве случаев находится в зоне горных работ, связанных с технологическими взрывами. При этом технологические взрывы “выявляют” участки шахтных полей, находящихся в напряженно-деформированном состоянии, близком к предельному, и откликающихся на проводимые работы проявлениями сейсмоактивности. Сейсмоактивность проявляется в виде пространственно компактных кластеров сейсмособытий, легко выявляемых даже визуально.

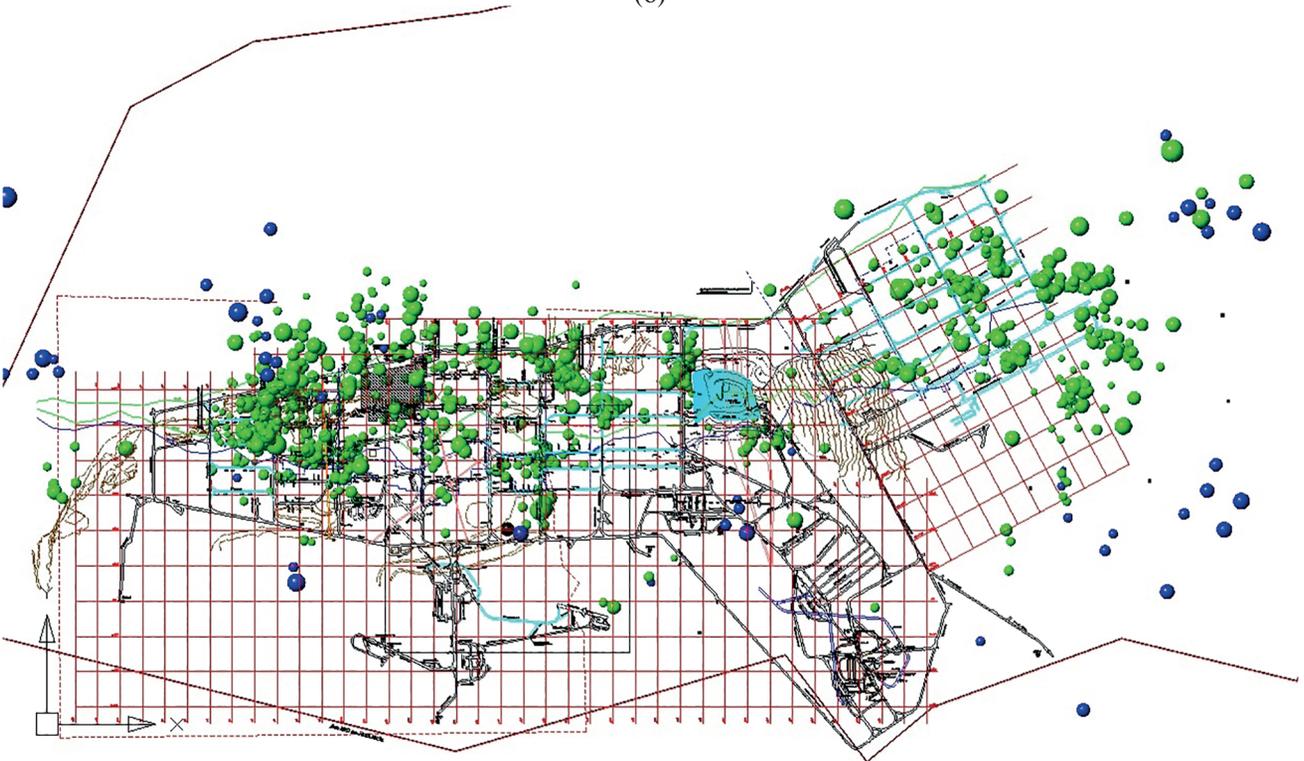
Выявление характерных механизмов формирования сейсмических событий в зоне влияния технологических взрывов выполнялось на основе анализа следующих показателей:

- числа воздействующих взрывов;
- периода воздействия взрывов, то есть временного интервала между временем события и первым взрывом, в зоне влияния которого произошло событие;
- времени отклика события, то есть временного интервала между временем события и последним взрывом, в зоне влияния которого произошло событие.

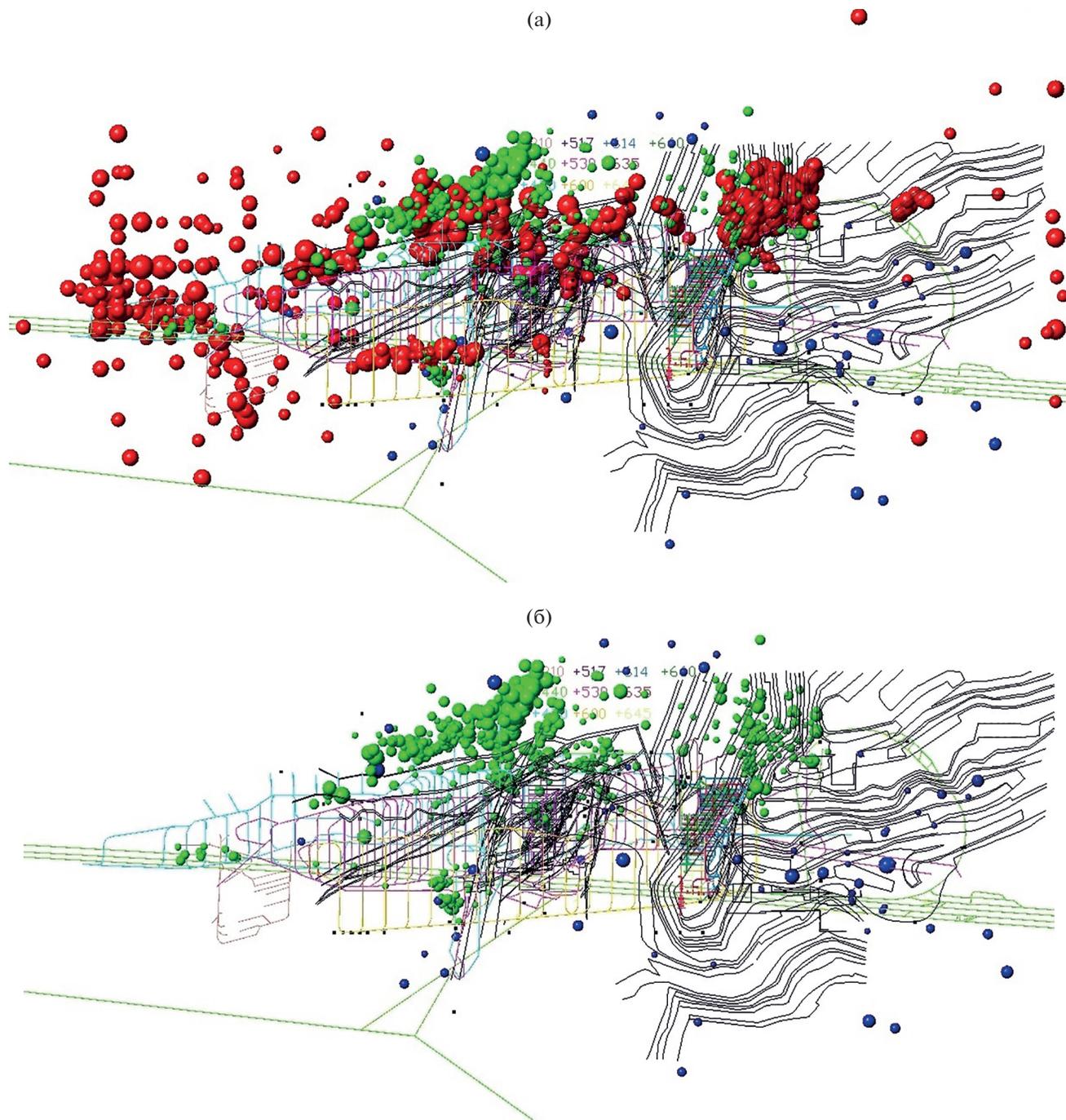
(a)



(б)



**Рис. 2.** Пространственное распределение сейсмических событий, Кировский рудник, февраль 2020 г. Цвета значков сейсмических событий: красный — взрыв, зеленый — сейсмическое событие в зоне влияния взрывов, синий — вне зоны влияния взрывов. Размер значков сейсмических событий пропорционален логарифму энергии. В части (а) показано распределение сейсмических событий с проекцией взрывов на план горизонта +170 м; в части (б) без проекции взрывов. Области, обозначенные цветом, представляют собой поквартальный план развития горных работ.



**Рис. 3.** Пространственное распределение сейсмособытий, Расвумчоррский рудник, февраль 2020 г. Цвета значков сейсмособытий: красный – взрыв, зеленый – сейсмособытие в зоне влияния взрывов, синий – вне зоны влияния взрывов. Размер значков сейсмособытий пропорционален логарифму энергии. В части (а) показано распределение сейсмических событий с проекцией взрывов на план горизонта +425 м; в части (б) без проекции взрывов. Области, обозначенные цветом, представляют собой поквартальный план развития горных работ.

Из данных, приведенных в табл. 3 и на рис. 4 и рис. 5, следует, что условия, приводящие к реализации сейсмического явления, создаются в процессе длительного накопления изменений напряженного состояния массива в связи с перераспре-

делением напряжений в результате изменения конфигурации подготовительных и очистных выработок в ходе проводимых горных работ. Сама реализация сейсмического события осуществляется чаще всего как следствие триггерных эффек-

**Таблица 3.** Усредненные параметры воздействия технологических взрывов на процесс формирования сейсмических событий в зоне ведения горных работ

Рудник	Число воздействующих взрывов	Длительность периода воздействия взрывов, ч	Время до последнего взрыва, ч	Суммарная энергия воздействующих взрывов, кДж
<i>кир</i>	13	148.0	15.7	2.9E + 08
<i>рас</i>	10	142.4	21.5	9.4E + 07

тов действия взрывов на участки массива, находящегося в состоянии, близком к предельному, за счет предшествующих горных работ (взрывов). Сейсмические события как результат прямого воздействия взрыва на массив составляют незначительное число относительно общего числа событий в зоне ведения горных работ.

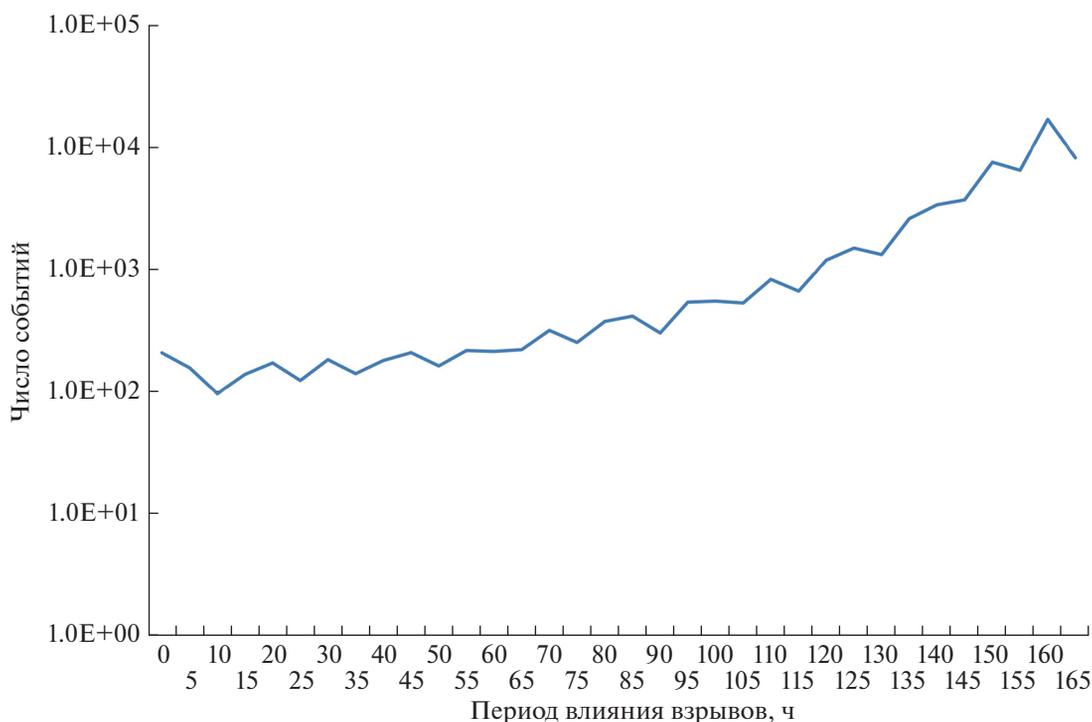
Распределение частоты возникновения сейсмических событий, произошедших в зоне влияния взрывов по времени после последнего взрыва, отражает плотность распределения во времени вероятности возникновения сейсмических событий в результате воздействия взрывов, представленную на рис. 5. Следует отметить, что распределение имеет вид быстрозатухающей гиперболической функции и хорошо совпадает с распределением афтершоков после мощных землетрясений,

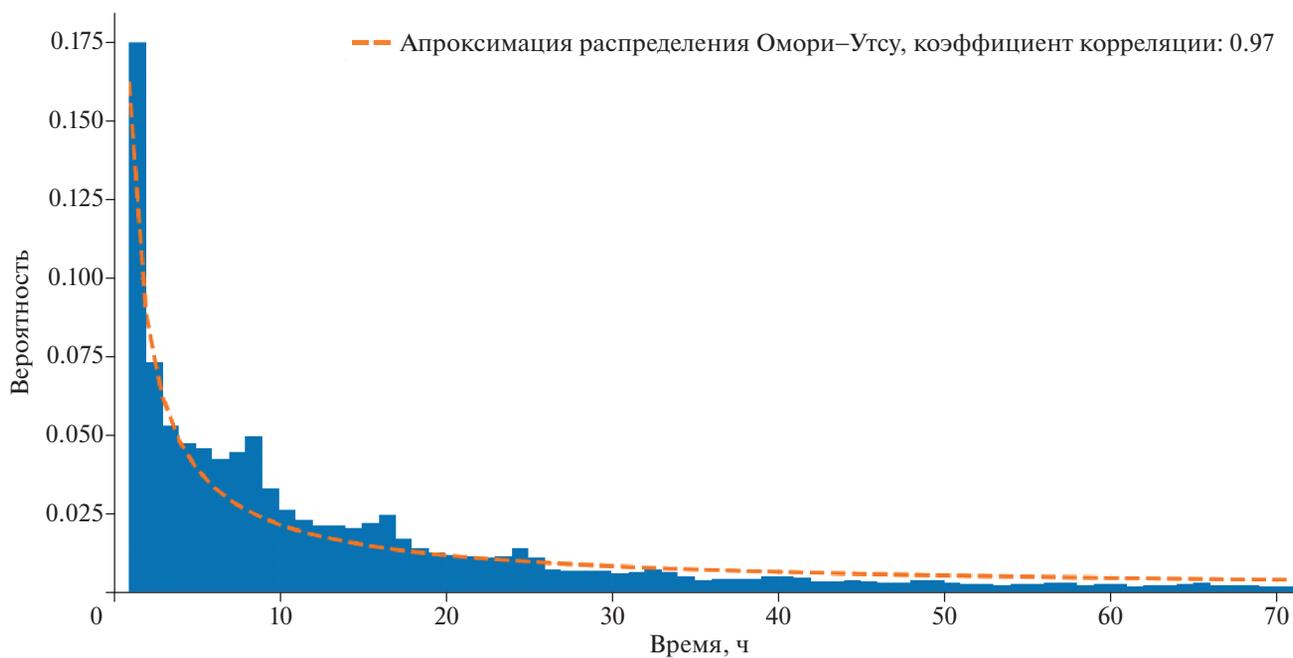
описываемых известным законом Омори–Утсу, согласно которому частота афтершоков убывает гиперболически с течением времени [Гульельми, 2016]:

$$n(t) = \frac{K}{(c-t)^p}, \quad (2)$$

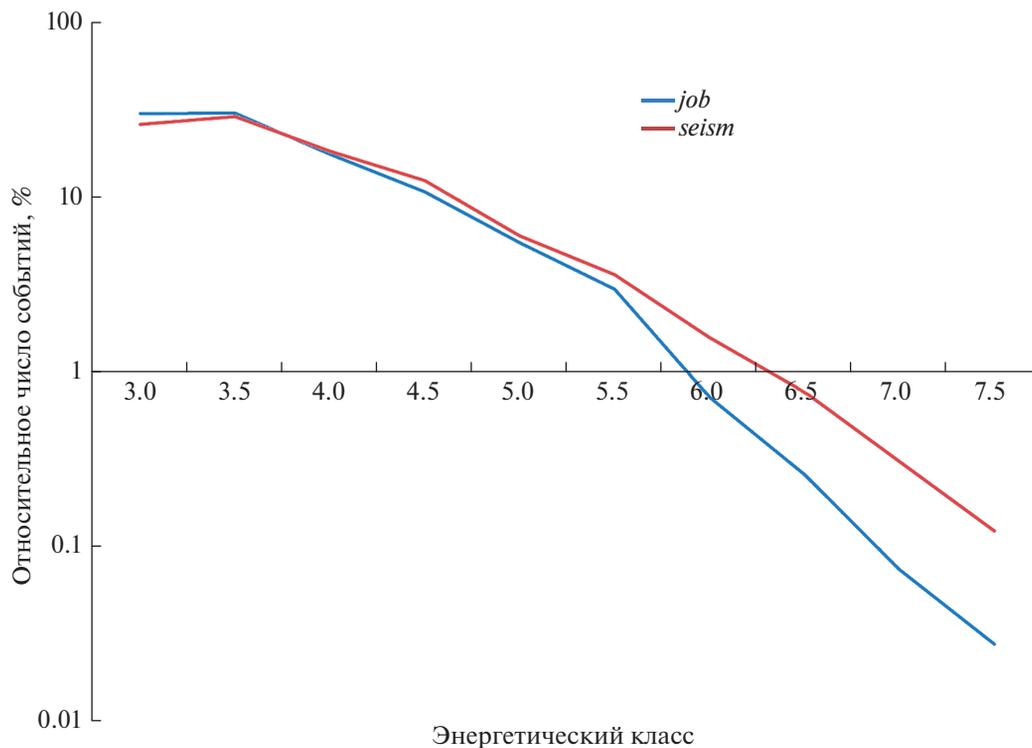
где:  $K$  – продуктивность серии афтершоков,  $c$  и  $p$  – эмпирические параметры закона Омори–Утсу;  $t$  – время после основного толчка.

Аппроксимация частоты возникновения событий законом Омори–Утсу с параметрами  $c = 0.01$  и  $p = 0.882$  показывает хорошее соответствие фактическим данным, коэффициент корреляции при этом равен 0.97 (рис. 5).

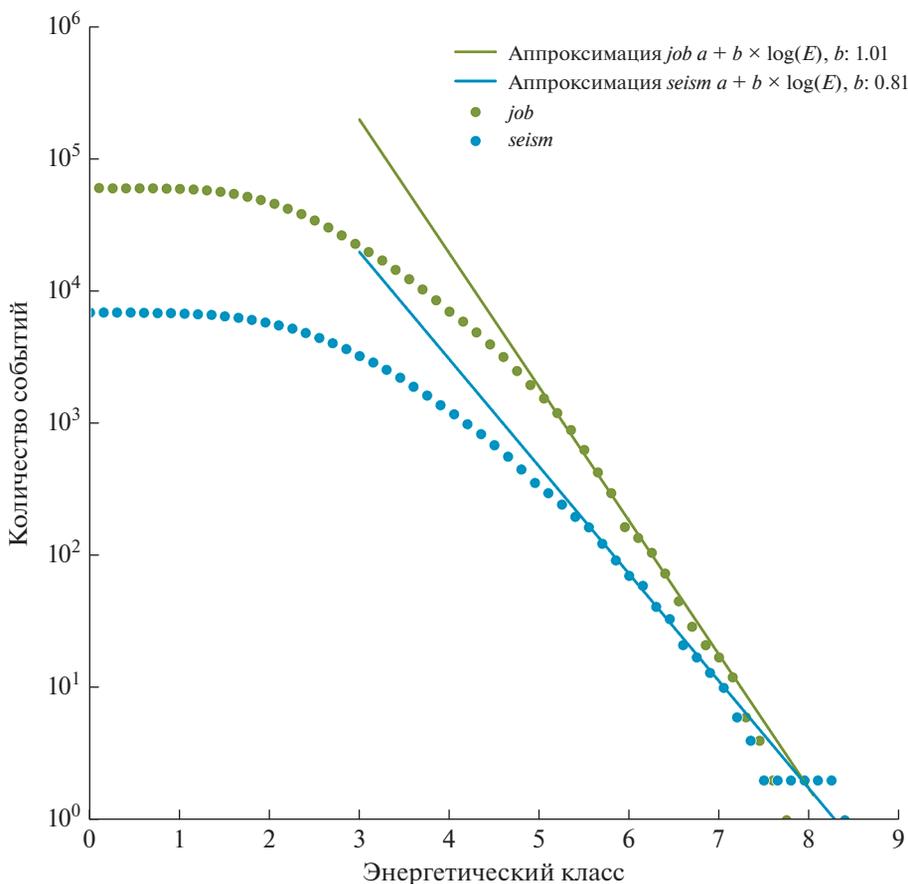
**Рис. 4.** Распределение длительности влияния технологических взрывов в период формирования сейсмических событий.



**Рис. 5.** Плотность распределения вероятности возникновения сейсмических событий после технологических взрывов на интервале времени 72 ч.



**Рис. 6.** Распределения числа событий по энергетическим классам для сейсмических событий из разных зон: в зоне горных работ — *job*, вне зоны — *seism*.



**Рис.7.** Кумулятивные графики повторяемости для сейсмических событий из разных зон: в зоне горных работ — *job*, вне зоны — *seism*.

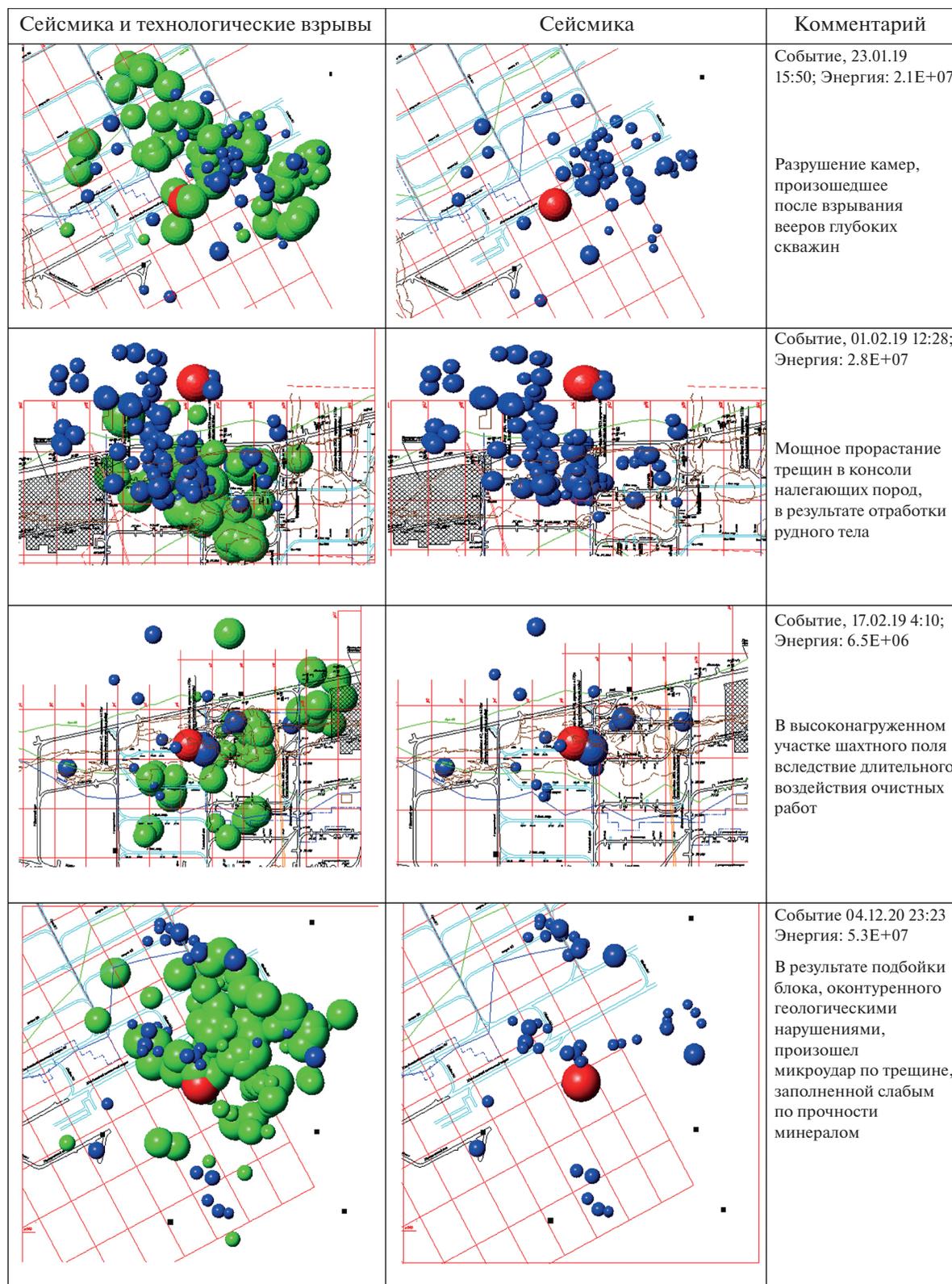
Имеется некоторое различие в проявлении сейсмоактивности на разных рудниках. В частности, на Расвумчоррском руднике относительная доля сейсмичности за пределами зоны влияния горных работ (*seism*) существенно больше по сравнению с Кировским рудником.

На рис. 6 приведены нормированные графики распределения числа событий по энергетическим классам для сейсмособытий, попавших в зону влияния горных работ, и сейсмоактивности вне зоны (на графике *job* и *seism* соответственно). Для построения графиков использовались сейсмособытия с энергией, большей нижнего порога чувствительности системы регистрации (1000 Дж). Приведенные графики показывают, что сейсмоактивность в зоне влияния горных работ, в целом, представлена сейсмособытиями с меньшей энергией по сравнению сейсмоактивностью за границами.

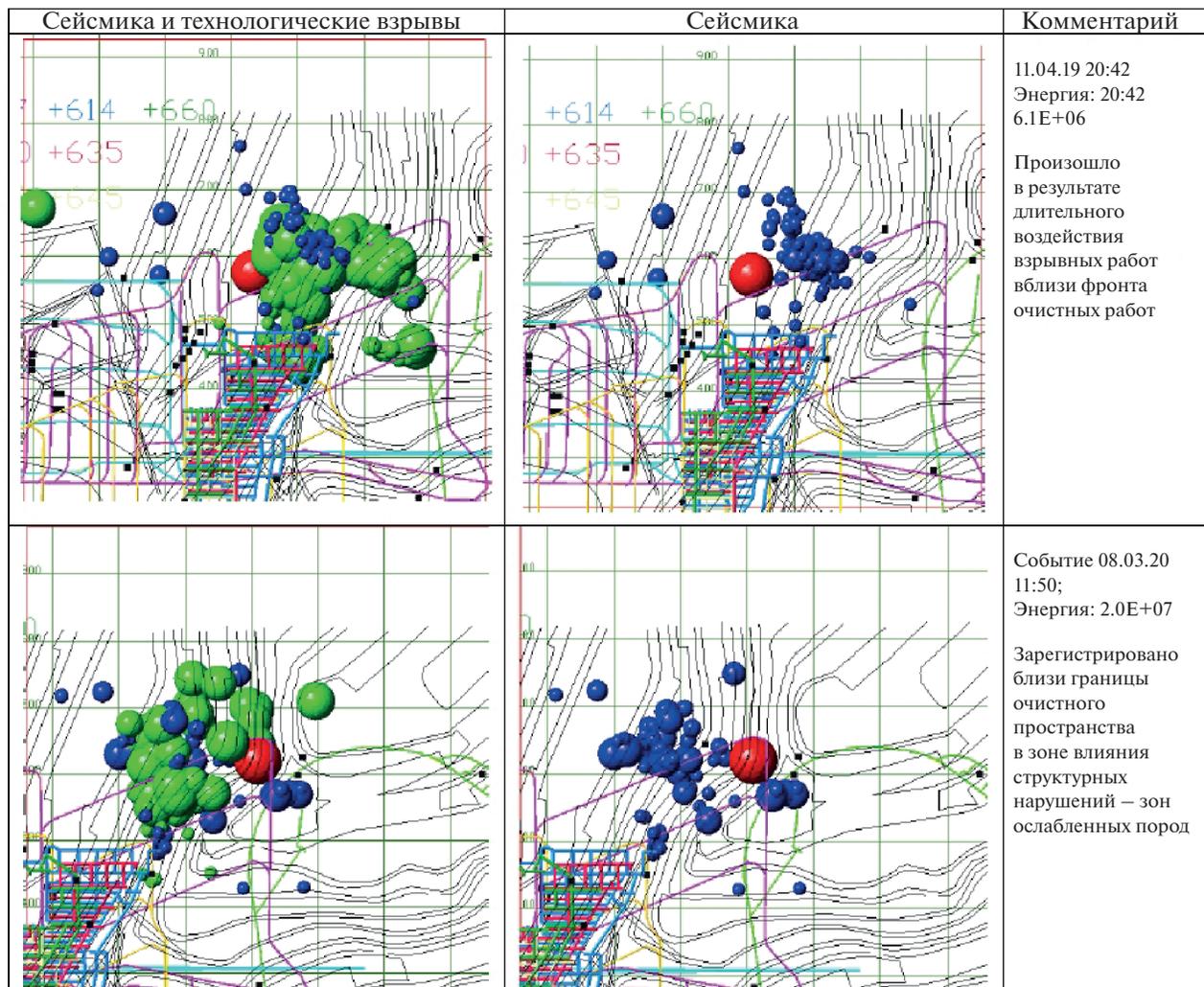
Для количественной оценки различия сейсмического режима в этих зонах были выполнены расчеты наклонов графика повторяемости в фор-

ме закона Гутенберга–Рихтера [Gutenberg, Richter, 1954] по методу максимального правдоподобия [Aki, 1965]. Результаты расчетов представлены на рис. 7, из которых следует, что расчетное значение *b-value* для сейсмособытий в зоне горных работ адекватно рассчитывается только для энергетических классов свыше 5.5 и превышает соответствующее значение *b-value* для сейсмособытий вне зоны более чем на 20%.

Проанализированы сценарии подготовки и реализации 32 сейсмических событий с излученной энергией большей  $5 \times 10^6$  Дж (горных ударов), зарегистрированных в период с 2019 по 2020 г. включительно в зоне влияния технологических взрывов. Как показал анализ, типичные сценарии подготовки и реализации горных ударов состоят в образовании кластеров событий с меньшей энергией с последующим горным ударом на периферии образованного кластера, либо в пространстве между близко расположенными кластерами. На рис. 8 и рис. 9 представлены несколько примеров таких реализаций по обоим рудникам.



**Рис. 8.** Кировский рудник. Пространственное распределение сейсмических событий в полукилометровой зоне в течение 7 сут, предвещающих сильное сейсмическое событие в зоне ведения горных работ. Размер значков событий пропорционален энергетическому классу. Цвета значков: зеленый – взрыв, красный – сильное сейсмическое событие, синий – сейсмическая предыстория.



**Рис. 9.** Расвумчоррский рудник. Пространственное распределение сейсмических событий в полукилометровой зоне в течение 7 сут, предворяющих сильное сейсмособытие в зоне ведения горных работ. Размер значков событий пропорционален энергетическому классу. Цвета значков: зеленый – взрыв, красный – сильное сейсмическое событие, синий – сейсмическая предыстория.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в подавляющем большинстве случаев (порядка 80%) сейсмоактивность массива горных пород в шахтных полях рудников проявляется в местах ведения горных работ, где выполняются работы по проходке и очистной выемке с проведением взрывов.

В результате анализа выявлены 2 группы формирования сейсмичности массива: сейсмичность в рабочих зонах, связанных с технологическими взрывными работами, и сейсмичность природная, определяющаяся структурно-геологическими факторами.

В целом, различие характеристик проявления сейсмичности для этих двух групп сейсмических событий состоит в следующем:

1. Сейсмоактивность после взрывных работ затухает по времени, аналогично афтершокам после сильных землетрясений. При этом сейсмические события, произошедшие с малым временем задержки от момента взрыва, т.е. такие, которые могут являться результатом непосредственного воздействия ударных волн от взрывов, в анализируемых данных практически отсутствуют.

2. При приближении фронта очистных работ взрывы активизируют участки в шахтном поле, находящиеся в состоянии, близком к предельно-

напряженному, в виде пространственно-компактных кластеров сейсмособытий.

3. Сейсмоактивность в зоне влияния технологических взрывов представлена сейсмособытиями с относительно меньшими энергиями по сравнению с сейсмоактивностью за ее пределами (угол наклона графика повторяемости *b-value*, рассчитанный по энергетическим классам, для сейсмособытий в зоне влияния технологических взрывов на 20% больше, чем за ее пределами).

Существенные различия в характеристиках сейсмоактивности в выявленных зонах можно интерпретировать следующим образом: сейсмоактивность в зоне влияния технологических взрывов связывается с процессами трещинообразования при перераспределении напряжений в процессе добычных работ, в то время, как вне зоны влияния взрывов, сейсмоактивность определяется тектоническими процессами и процессами, связанными с глобальной перестройкой напряженно-деформированного состояния породного массива по мере обработки месторождения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Авершин С. Г.* Горные удары. Углетехиздат. М. 1955. 236 с.

*Адушкин В. В.* Тектонические землетрясения техногенного происхождения // *Физика Земли*. 2016. № 2. С. 22–44.  
<https://doi.org/10.7868/S0002333716020010>

*Корчак П. А., Жукова С. А., Меньшиков П. Ю.* Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО “Апатит” // *Горный журн*. 2014. № 10. С. 42–46.

*Гульельми А. В.* Интерпретация закона Омори // *Физика Земли*. 2016. № 5. С. 165–166.

*Aki K.* Maximum Likelihood Estimate of *b* in the Formula  $\log N = a - bM$  and its Confidence Limits // *Bull. Earthquake Res. Ins.* 1965. V. 43. P. 237–23.

*Dobrovolsky I. R., Zubkov S. I., Myachkin V. I.* Estimation of the size of earthquake preparation zones // *Pageoph*. 1979. № 117. P. 1025–1044.

*Gutenberg B., Richter C. F.* Seismicity of the Earth and associated phenomena. Princeton Univ. Press, Princeton. 1954. 310 p.

## The Influence of Mining Operations on Seismic Activity of the Rocks in Underground Mines of the Khibiny Massif

**M. M. Kagan<sup>a, \*</sup>, A. A. Kozyrev<sup>a, \*\*</sup>, A. Yu. Motorin<sup>b, c, \*\*\*</sup>, and A. A. Streshnev<sup>b, \*\*\*\*</sup>**

<sup>a</sup>*Mining Institute, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Murmansk Region, 184209 Russia*

<sup>b</sup>*Kirovsk Branch of JSC Apatit, Apatity, Murmansk Region, 184250 Russia*

<sup>c</sup>*Geophysical Survey, Kola Branch, Russian Academy of Sciences, Apatity, 184209 Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: M.Kagan@ksc.ru*

<sup>\*\*</sup>*e-mail: a.kozyrev@ksc.ru*

<sup>\*\*\*</sup>*e-mail: AYuMotorin@phosagro.ru*

<sup>\*\*\*\*</sup>*e-mail: AStreshnev@phosagro.ru*

The issues of the causes and factors of manifestation of seismic activity during the extraction of minerals in the deposits of the Khibiny massif, which are mined underground, are considered. Based on seismic monitoring data, groups of seismic activity were identified, such as seismicity in the working area, directly related to blasting and natural seismicity, related to other mining and geological factors. The difference in the characteristics of the manifestation of seismicity for these two groups of seismic events is shown.

*Keywords:* underground mine, seismic events, seismic monitoring