

Классификация источников сейсмических сигналов по идентификации файлов волновых форм (на примере прогноза удароопасности подземных рудников Кировского филиала АО «Апатит»)

С.А. Жукова^{1,2} , В.С. Онуприенко³, А.А. Стрешнев³

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

² Мурманский арктический университет, Апатитский филиал, г. Апатиты, Российской Федерации

³ Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Российской Федерации

 svetlana.zhukowa@yandex.ru

Резюме: При ведении горных работ на больших территориях существенно растет скорость деформирования пород и происходит перераспределение напряжений по сравнению с естественными процессами в нетронутом массиве при тектонической и гравитационной нагрузках. Эти процессы приводят к росту сейсмичности на отрабатываемых месторождениях, в связи с этим на подземных рудниках ведется сейсмический мониторинг с помощью автоматизированных систем контроля. Целью наблюдения является своевременное выявление удароопасных зон. Региональный прогноз удароопасности на подземных рудниках КФ АО «Апатит» основан на непрерывной регистрации сейсмических данных, которые проходят идентификацию по определенным параметрам. Составлена классификация источников сейсмических сигналов по действующей идентификации файлов волновых форм. Выделены четыре основные категории источников сейсмических колебаний, каждая из которых включает несколько идентификаторов. Установлено, что для корректной идентификации источников сигналов иногда требуются сведения о наличии геологических нарушений, маркшейдерской съемке кромки обрушения, технологических и массовых взрывах и др.

Ключевые слова: сейсмическое событие, сейсмичность, Хибинский массив, источник сейсмособытия, геодинамические явления, горные работы

Для цитирования: Жукова С.А., Онуприенко В.С., Стрешнев А.А. Классификация источников сейсмических сигналов по идентификации файлов волновых форм (на примере прогноза удароопасности подземных рудников Кировского филиала АО «Апатит»). *Горная промышленность*. 2025;(6):164–172. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-164-172>

Classification of seismic signal sources based on waveform file identification (as exemplified by rock-bump hazard forecasting in underground mines of the Kirovsk Branch of JSC «Apatit»)

С.А. Жукова^{1,2} , В.С. Онуприенко³, А.А. Стрешнев³

¹ Mining Institute Kola Science Centre 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: When mining operations are performed over large areas, the rate of rock deformation increases significantly and the stresses are redistributed compared to the natural processes in an undisturbed rock mass under the tectonic and gravitational loads. These processes cause an increase in seismicity at the mined deposits, and therefore seismic monitoring is carried out in underground mines using automated control systems. The purpose of this monitoring is to identify shock-prone areas in a timely manner. The regional forecast of the rock-bump hazard in the underground mines of the Kirovsk Branch of JSC «Apatit» is based on the continuous recording of seismic data, which is identified according to certain parameters. A classification of seismic signal sources has been compiled based on the current identification of the waveform files. Four main categories of seismic vibration

sources have been identified, each of which includes several identifiers. It has been established that, in order to correctly identify the signal sources, information is sometimes required on the presence of geological disturbances, mine surveying of the caving edge, technological and large-scale blasting, etc.

Keywords: seismic event, seismicity, Khibiny massif, seismic event source, geodynamic phenomena, mining operations

For citation: Zhukova S.A., Onuprienko V.S., Streshnev A.A. Classification of seismic signal sources based on waveform file identification (as exemplified by rock-bump hazard forecasting in underground mines of the Kirovsk Branch of JSC «Apatit». *Russian Mining Industry*. 2025;(6):164–172. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-164-172>

Введение

В Хибинском массиве уже без малого 100 лет извлекаются и перемещаются значительные объемы апатит-нефелиновой руды и горной массы, формируются существенные по площади выработанные пространства, изменяется и рельеф поверхности. В то же время динамическое воздействие от взрывов влияет на возрастание скорости деформирования пород по сравнению с естественными природными процессами, происходящими в течение времени в нетронутом массиве [1].

При отработке удароопасных месторождений Хибин существует проблема возникновения мощных геодинамических явлений в связи с постоянным углублением и расширением горных работ, усложнением горнотехнических условий месторождений полезных ископаемых. Усиление сейсмичности обусловлено перераспределением гравитационно-тектонических напряжений в массиве горных пород. В свою очередь, это способствует проявлению горного давления в виде горных ударов, толчков и др., прогноз этих геодинамических явлений считается важной задачей не только в России, но и для многих рудников в мире [2–9].

В настоящее время цифровые технологии широко применяются для решения задач обработки, анализа данных микросейсмического мониторинга и прогноза мощных геодинамических явлений. Для безопасного ведения горных работ и обеспечения информацией о формирующихся разрушениях наблюдение за сейсмичностью на подземных рудниках КФ АО «Апатит» ведется с помощью автоматизированных систем контроля состояния массива (АСКСМ) [10]. В составе системы сейсмического мониторинга применяется современное цифровое телекоммуникационное оборудование, точная синхронизация времени происходящих геодинамических явлений. Целью наблюдения является своевременное выявление зон, потенциально опасных по проявлению горных ударов [11].

Сейсмическая сеть на рудниках построена с приоритетами мониторинга сейсмической активности в районах ведения горных работ, причем качественная регистрация сейсмических данных обеспечивается в районах блоков-целиков и зон стыковки подземных работ с карьерами. Такие зоны получили название – районы повышенной точности. Погрешность расчета координат гипоцентра сейсмособытия в этих районах считается не хуже 25 м за счет высокой плотности расстановки сейсмопунктов и детального исследования скоростей сейсмических волн. По мере удаления от участков ведения горных работ за пределами районов повышенной точности плотность сейсмической сети ниже, и могут отсутствовать данные о скоростях сейсмических волн, поэтому погрешность определения координат гипоцентров событий может достигать 100 м и более.

Ежедневно АСКСМ регистрируется в среднем около пяти сот сейсмических событий. В качестве полезной информации и дальнейшего анализа используются только те сейсмособытия, которые связаны с динамическим проявлением горного давления. На КФ АО «Апатит» применяется идентификация сейсмических событий, например, проявлением горного давления принято считать высокочастотные и низкочастотные сигналы сейсмособытий. По определенной частотной характеристике сигнала различают также сейсмособытия от проводимых горных работ и идентифицируют их как взрыв на добыче, при проходке выработки и др., помехи от работающих механизмов и сейсмичность за зоной контроля.

Целью исследования является статистический анализ всех зарегистрированных АСКСМ сейсмособытий и разработка классификации источников сейсмических сигналов.

Объекты исследования и их сейсмический режим

Объектами исследования являются четыре апатит-нефелиновых месторождения Хибинского массива: Кукисумчоррское и Юкспорское (Кировский рудник), Апатитовый Цирк и Плато Расвумчорр (Расвумчоррский рудник).

Апатитовые месторождения представляют собой пластообразную залежь протяженностью около 12 км, осложненную раздувами (линзами) и пережимами (резким уменьшением мощности) между ними. Одна линза объединяет Кукисумчоррское и Юкспорское месторождения, вторая – Апатитовый Цирк и Плато Расвумчорр. Оба линзообразных тела сходны по своим морфоструктурным особенностям [12].

За время работы системы мониторинга установлено, что сейсмический режим района производственной деятельности эволюционирует в результате перехода на более глубокие горизонты отработки [13; 14], что, в свою очередь, зависит от интенсивности горных работ, а также от сезонной обводненности участков массива горных пород (количество сейсмических событий в сутки в весенне-осенний период может достигать 1000) [15]. За последние десять лет в районе производственной деятельности КФ АО «Апатит» все чаще стали происходить мощные сейсмические события (энергия от $1E+06$ Дж и выше). Некоторые из таких событий сопровождались сильным звуковым эффектом, сотрясением массива и дневной поверхности, ощущались жителями городов Кировск и Апатиты. На рис. 1 представлены эпицентры мощных сейсмособытий, зарегистрированные с 1987 г. по май 2025 г. Большая часть событий приурочена к границам очистных работ, к области влияния консоли налегающих пород, а также к зоне стыковки подземного Расвумчоррского рудника и карьера Центральный.

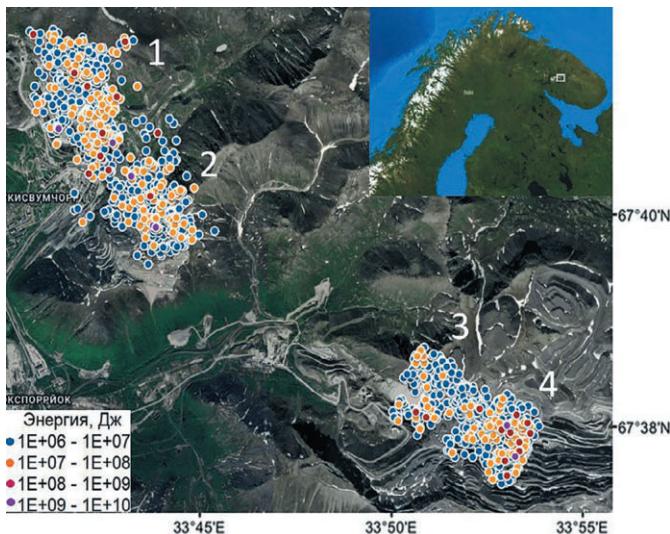


Рис. 1
Фрагмент космоснимка
Хибинского массива с
эпицентрами сейсмособытий
на месторождениях:
1 – Кукисвумчорское;
2 – Юкспорское;
3 – Апатитовый цирк;
4 – Плато Расвумчорр
(прямоугольником показано
местоположение района
исследований)

Fig. 1
A fragment of a satellite
image of the Khibiny massif
group with the foci of seismic
events at the deposits:
1 - Kukisvumchorr;
2 - Yuxspor;
3 - Apatitovsky Tsirk;
4 - Platо Rasvumchorr Plateau
(the rectangle shows the
location of the surveyed area)

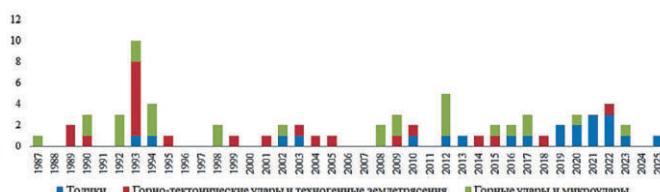


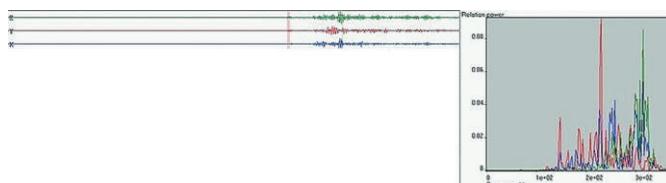
Рис. 2
Временное распределение
геодинамических явлений,
зарегистрированных в Хибинах

Fig. 2
Temporal distribution of the
geodynamic phenomena
recorded in the Khibiny massif

периодичность. Такая информация может быть полезна при проектировании и планировании работ, своевременных профилактических мероприятий по снижению удароопасности. Графики повторяемости позволяют оценить максимально возможную энергию сейсмособытия и выявить изменения энергетических характеристик сейсмического режима контролируемого района. Однако следует отметить, что максимально возможная энергия события, рассчитанная по графику повторяемости, не учитывает блочную структуру массива. Как правило, максимальный размер трещины (и энергия) ограничивается размерами блока, оконтуренного тектоническими нарушениями.

Методы идентификации сейсмических сигналов

Непрерывный сейсмический мониторинг ведется двумя системами: АСКМ-К – на Кировском руднике и АСКМ-Р – на Расвумчорском руднике, где сейсмическая сеть охватывает не только зону ведения горных работ на месторождении Апатитовый Цирк, но и северо-западную часть месторождения Плато Расвумчорр. Регистрация сейсмических сигналов на каждой из систем осуществляется трехкомпонентными датчиками ускорения (тип S1073 3С, акселерометр) и геофонами (тип S2123 3С, велосиметр). Для записи данных используются, как правило, датчики ускорения. Геофоны установлены вне измерительной сети с тем, чтобы фиксировать сейсмические события, происходящие за ее пределами. Оцифровка сигналов происходит при 1000 Гц непосредственно на датчике. События формируются в случае превышения сигнала над фоном в 4 раза по пяти и более сейсмопунктам за 500 мс.



По результатам микросейсмического мониторинга в Хибинском массиве с 1987 г. по май 2025 г. зарегистрировано 71 геодинамическое явление, ощущаемое на земной поверхности (рис. 2).

Региональный прогноз удароопасности на подземных рудниках КФ АО «Апатит» основан на непрерывной регистрации сейсмических данных, т.е. время простое системы сбора сейсмособытий не превышает 10%.

Текущая оценка удароопасности проводится за 30 сут, предшествующих моменту анализа сейсмичности. Осуществляется расчет максимальной энергии вероятного сейсмического события для всей зоны регистрации и в случае превышения текущего значения максимальной энергии над средним длительным в 100 раз в выделенной зоне устанавливается первая степень удароопасности.

Зависимости сейсмичности от времени (временные ряды) в заданной зоне позволяют выявить реакцию массива горных пород на техногенные воздействия, тренды и

Способ крепления сейсмометров к фундаменту играет важную роль для определения характеристик произошедшего сейсмического события. На рис. 3 представлена запись сейсмического сигнала и показаны амплитудно-частотные характеристики акселерометра, плохо закрепленного на фундаменте.

Видно, что на записи присутствуют высокочастотные монохроматические пакеты, а в спектре наблюдаются всплески, из-за этого может быть неустойчивость расчетов сейсмической энергии события. Спектральный состав, длительность и форма сигналов применяются также и для идентификации сейсмособытия, т.к. дополнительная фильтрация на стадии интерактивной обработки информации путем применения соответствующих алгоритмов очень важна для корректного выявления источника сигналов.

После обнаружения события автоматически производится предварительная расшифровка данных; при этом происходит улавливание времени прибытия *P*-волн и опре-

деляется место события и источник сейсмической энергии. После первичной расшифровки данные обрабатываются вручную, при этом производится расчет прибытия *S*-волн и при необходимости корректировка прибытия *P*-волн. Определение очага события осуществляется посредством гомогенной скоростной модели. По данным контрольных взрывов средние скорости волн в массиве составляют $V_p = 5,7$ км/с, $V_s = 3,2$ км/с, среднеквадратическое отклонение равно 0,13 и 0,16 км/с соответственно, отношение скорости продольной волны к скорости поперечной – $V_p / V_s = 1,8$. При этом для каждой станции могут использоваться различные параметры скорости сейсмических волн. Очевидно, что в зависимости от конкретных условий регистрации сигналы могут в большей или меньшей степени отражать особенности события, свойства среды по пути распространения сейсмоволн, сейсмический фон в момент регистрации, амплитудно-частотную характеристику сейсмометров и т.д. От соотношения этих факторов зависит информативность вектора свойств, а значит и вероятность правильной идентификации события.

Определение источника сейсмособытия проводится по методике идентификации АСКМ КФ АО «Апатит», а именно по базе данных карточек описания типовых событий данного класса. Набор карточек позволяет выполнять отнесение сейсмического события к определенному классу (идентификатору). Способ идентификации источника сейсмособытия – экспертный. Каждое событие описывается по всему перечню параметров и их отдельных характеристик (табл. 1). «Мощность» – это среднее значение параметра во всем диапазоне возможных значений данного параметра либо процент присутствия данного признака во всем объеме выборки данного класса событий. Например, некоторые из них: вступление *P*-, *S*-волн оценивается как вероятность уверенного определения первого вступления; их интенсивность – это крутизна первого вступления (100% – вступ-

ление под углом 90°); основная частота – это максимум спектральной плотности мощности сигнала; знак первого вступления сейсмоволны («+» – сжатие, «–» – растяжение); декремент затухания – это интенсивность уменьшения амплитуды сигнала (0% – не затухает в пределах записи, 100% – затухает в пределах 200–300 мс). Воздушная волна – это колебания сейсмометра, вызванные приходом воздушной волны от события (взрыва) на пункт регистрации. Амплитуда сигнала подразделяется на раскачивание массива – это означает, что относительно высокочастотное событие порождает слабозатухающие низкочастотные колебания массива, а превышение диапазона, что амплитуда сигнала превышает динамический диапазон системы. Параметр «координаты» содержит следующие характеристики: зона горных работ (это районы, где ведутся проходка выработок, добыча и прочие технологические взрывы); вне зоны работ (районы, где регулярные технологические взрывы не наблюдаются) и вне зоны контроля. В таблице представлены параметры и характеристики высокочастотного сейсмического события.

Классификация сейсмических событий, применяемая в АСКМ до 2011 г., состояла из 14 идентификаторов (табл. 2) и разбиения на определенные категории не осуществлялось, для регионального прогноза удароопасности применяли события с идентификаторами Ид = 1, 2, 4.

До 2000 г. на рудниках применяли огневое взрывание. Сигнал события от такого взрыва имел определенные характеристики, которые распознавал геофизик при его идентификации. При переходе на другую систему обработки от такого типа взрывания отказались. После обновления программы обработки сейсмической информации в 2012 г. несколько изменились идентификаторы сейсмических событий. Естественному сейсмическому событию присвоен идентификатор высокочастотное событие; серии естественных сейсмических событий на записи – мульти-

Таблица 1
Пример карточки высокочастотного сейсмического события

Table 1
An example of a high-frequency seismic event card

Параметр	Характеристика	Мощность, % 0.....+25.....+50.....+75.....+100	Прим.
<i>P</i> -волны	Вступление волны		
	Интенсивность		
	Основная частота		
	Знак		
	Декремент затухания		Минус
Воздушная волна			
Амплитуда	Раскачивание массива		
	Превышение диапазона		
Событий на записи >1			
<i>S</i> -волны	Вступление волны		
	Интенсивность		
	Основная частота		
	Декремент затухания		
Координаты	Зона горных работ		
	Вне зоны работ		
	Вне зоны контроля		
Время регистрации	Рабочая смена		
	Межсмены		
	Выходной день		

Таблица 2
Идентификаторы сейсмических событий, используемые в АСКМ до 2011 г.

№ Ид	Источник сейсмособытия
1	Естественное событие
2	Более двух естественных событий на записи
3	Плохое естественное событие
4	Низкочастотное событие
5	Событие за зоной уверенной регистрации
6	Телеметрическая помеха (импульсная)
7	Массовый взрыв
8	Огневое взрывание
9	Электровзрывание
10	Технологический взрыв с воздушной волной
11	Падение, обрушение пород
12	Неопознанный взрыв
13	Телеметрическая помеха (сбой каналов)
14	Неопознанное сейсмическое событие

событие. Идентификатор «взрывы на добыче» теперь включает в себя событие, источником которого является массовый взрыв, торцевой взрыв (по данным телефонограммы, звонку диспетчера). Неопознанный взрыв и неопознанное сейсмическое событие не используются в классификации источников событий как неинформативные.

Разработка классификации источников сейсмических сигналов

Источники сейсмических колебаний были условно разделены на следующие категории: динамические проявления горного давления; взрывные работы; работающие машины и механизмы, обрушение пород; сейсмичность за зоной контроля. В программу обработки файлов волновых форм для упрощения эти категории внесены соответственно как: сейсмика; взрыв; помехи; за зоной (рис. 4), и применяются при интерактивной обработке события и сохранении в базу данных АСКМ.

Рис. 4
Классификация источников сейсмических сигналов на подземных рудниках Кировского филиала АО «Апатит»

Итак, в каждую из представленных на рис. 4 общих категорий источников сейсмических колебаний входят сейсмические события, различные по частотным характеристикам и механизмам разрушения среды, которые проходят более детальную классификацию по идентификаторам.

Отличительными признаками событий категории «сейсмика» являются различные знаки вступления P -волн по пунктам, отношение максимальных амплитуд P - и S -волн $AP/AS < 1/2$. Для высокочастотного события (рис. 5, а) частота вступления P -волны выше 60 Гц, для низкочастотного – 3–15 Гц. Источниками таких событий являются развитие трещин прорастания, отрыва и сдвига, предшествующее и сопровождающее раздавливание целиков и обрушение покрывающих пород. Событие в консоли определяется по координатам и местоположению кромки обрушения.

Для событий из категории «взрыв» взрыв на добыче и взрыв по знакам характерны положительные знаки вступления сейсмических волн по пунктам и соотношение сигнал-фон более 1000. У взрыва при проходке выработки знаки вступления на сигнале по сейсмопунктам будут положительны в случае отсутствия свободных поверхностей ближе 4–5 м. Главной отличительной особенностью такого события является наличие на записи серии четких сигналов, а временные пропуски на записи обоснованы несрабатыванием зарядов в груди забоя или следствием применения средств инициирования с разной величиной замедления (рис. 5, в). Взрыв с воздушной волной – это событие, на записи которого имеется вступление сигнала от воздушной волны (задержка от первого сигнала до второго соответствует скорости распространения 300 м/с воздушной волны по выработкам), основная частота сигнала 5–30 Гц. Знаки вступления сейсмических волн по пунктам различны, характерно вялое вступление продольной волны, $AP/AS < 1/3$.

Идентификатор «плохое событие» в категории «помехи» присваивается событию, параметры которого не удалось рассчитать из-за недостаточного количества активных сейсмопунктов (менее 5) или плохой конфигурации сейсмической сети (активные сейсмопункты находятся на прямой линии или на плоскости). Также к этой категории относится «ошибка телеметрии», т.е. сбой в виде путаницы каналов,

Fig. 4
Classification of seismic signal sources in underground mines of the Kirovsk Branch of JSC «Apatit»



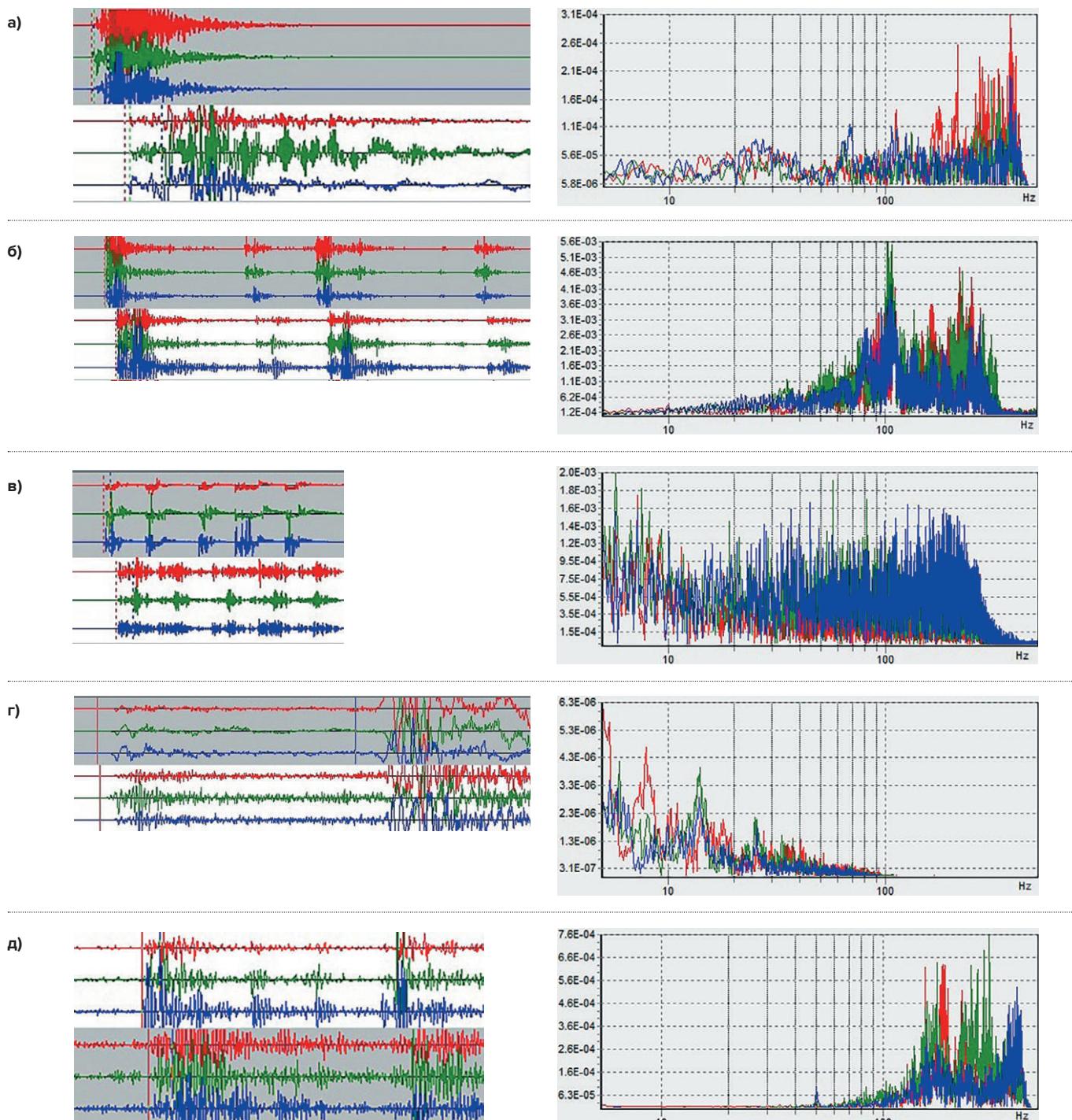


Рис. 5

Примеры фрагментов записи волновых форм и спектральный состав по сейсмопунктам (выделено серым цветом):
 а – высокочастотное событие ($E = 7,0\text{E}+05$ Дж) и спектр по сейсмопункту;
 б – мульти событие ($E = 4,0\text{E}+06$ Дж) и спектр по сейсмопункту;
 в – взрывание проходческого забоя ($E = 2,0\text{E}+06$ Дж) и спектр по сейсмопункту;
 г – естественное событие за зоной контроля ($E = 2,0\text{E}+09$ Дж) и спектр по сейсмопункту;
 д – падение пород ($E = 8,0\text{E}+02$ Дж) и спектр по сейсмопункту

пропадание сигнала. Источниками сейсмособытий данной категории могут быть: работа бурового оборудования; движение рельсового транспорта; автомобильная откатка; электродвигатели (вибропитатели, вентиляторы, скреперы, подъемные машины и т.д.), силовые трансформаторы. События данной категории плохого качества, помехи, и

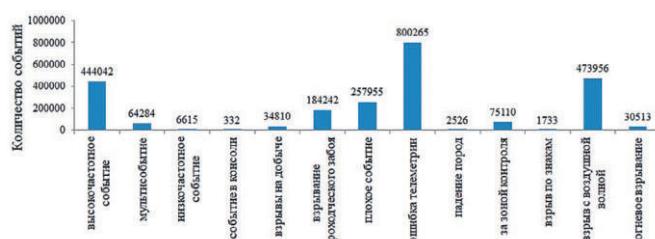
Fig. 5

Examples of waveform recording fragments and spectral composition by seismic stations (highlighted in grey):
 a – high-frequency event ($E = 7.0\text{E}+05$ J) and spectrum by seismic station;
 b – multi-event ($E = 4.0\text{E}+06$ J) and spectrum at the seismic point;
 в – blasting of the tunnelling face ($E = 2.0\text{E}+06$ J) and spectrum at the seismic point;
 г – a natural event outside of the monitoring zone ($E = 2.0\text{E}+09$ J) and spectrum at the seismic point;
 д – rock caving ($E = 8.0\text{E}+02$ J) and spectrum at the seismic point

они несут лишь статистическую значимость для анализа работоспособности системы.

Идентификатор «падение пород» в данной категории относится к событию, источником которого является падение горной массы по рудоспуску, сигнал такого события имеет характерную форму, напоминающую «селедку»,

а)



б)

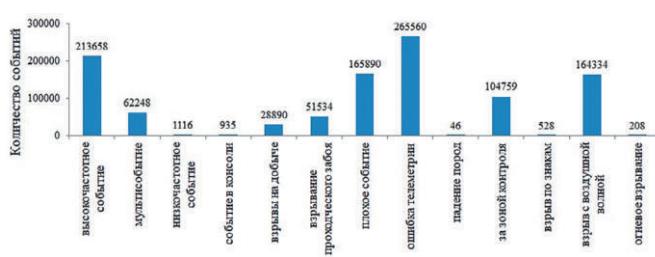


Рис. 6
Распределение сейсмособытий по идентификаторам на рудниках:
а – Кировском;
б – Расвумчоррском

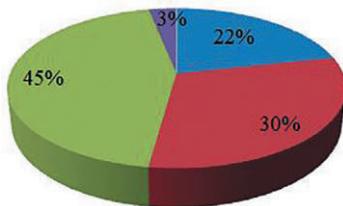
Fig. 6
Distribution of the seismic events by identifiers in the following mines:
a – Kirovsk mine;
b – Rasvumchorr mine

в большинстве случаев сигнал низкочастотный, частота 5–8 Гц, знаки вступления по пунктам различны. Также источником события может быть обрушение зависшей руды и покрывающих пород, обрушение поверхностных обнажений (рис. 5, д), сигнал такого события высокочастотный.

На территории Кировско-Апатитского района находятся два карьера – Коашвинский и Ньюркпаххский, а также горнодобывающие объекты АО «Северо-Западной Фосфорной Компании». Предприятие добывает руду на месторождении «Олений Ручей» открытым и подземным способами. АСКСМ КФ АО «Апатит» ежедневно с этих районов регистрирует сигналы от взрывной деятельности, а также природного происхождения, но с большой погрешностью координат событий. Чувствительность датчиков АСКСМ позволяет фиксировать сигналы, происходящие в удалении от зоны контроля, в анализе удароопасности для района повышенной точности сети такие сейсмические события не участвуют, однако для общего анализа сейсмичности района могут быть информативны, поэтому предложено их внести в отдельную категорию «за зоной» (рис. 5, г, естественное событие с рудника Олений Ручей).

На рис. 5 представлены примеры записи сигналов от разных источников сейсмических колебаний и спектральный состав по выделенному пункту. Видно, что в зависимости от источника сигнала и выбранного сеймопункта форма и уровень спектров значительно варьируют: выделяются как относительно высокочастотные, так и относительно низкочастотные спектры. Каких-либо отчетливых специфических особенностей в спектральном представлении сигналов от источников различного происхождения не выявлено. Не прослеживается однозначная корреляция между энергией источника и его спектральным составом. В качестве примера приведены спектральные характеристики сигналов от разных источников с различной энергией.

а)



б)

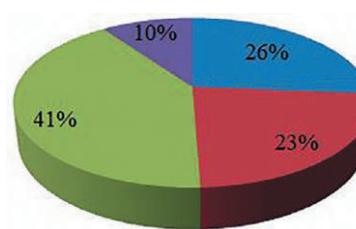


Рис. 7
Диаграмма распределения событий по классификации источников сейсмических сигналов на подземных рудниках Кировского филиала АО «Апатит»: а – Кировском;
б – Расвумчоррском

Fig. 7
A distribution diagram of the events by classification of the seismic signal sources in the underground mines of the Kirovsk Branch of JSC «Apatit»: a – Kirovsk mine;
b – Rasvumchorr mine

Распределение сейсмособытий по идентификаторам показало, что за время работы АСКСМ на обоих рудниках было зарегистрировано больше сейсмособытий-помех, таких как плохое событие, ошибка телеметрии. Причиной этого, видимо, послужили периоды становления системы сбора (с 1985 по 1987 г. на Кукисвумчоррском месторождении, в 1994 г. – на Юкспорском; с 2000 по 2001 г. – на месторождениях Апатитовый цирк и Плато Расвумчорр), ее реконструкция, т.е. замена аналоговой системы сбора на цифровую (с 2003 по 2007 г.) и модернизация программы обработки файлов волновых форм (с 2011 по 2012 г.). На втором и третьем месте по количеству идентифицировано сигналов таких, как взрыв с воздушной волной и высокочастотное событие (рис. 6).

В качестве полезной информации для регионального прогноза удароопасности используются только события из категории «сейсмика», а для выявления факторов, повлиявших на это, учитывают остальные данные. Доля первых (рис. 7) на Кировском руднике составляет 22% всех сейсмособытий, на Расвумчоррском руднике – 26%. Следует отметить, что источников от проводимых взрывных работ на Кировском руднике зафиксировано больше, вероятно, из-за того, что сейсмический мониторинг осуществляется с 80-х годов прошлого века, а на Расвумчоррском руднике – с 2000-х годов.

Следует отметить, что иногда на одной записи волновых форм может быть полезная информация и о взрыве, и о его последствиях (проявлении горного давления). Такую запись разделяют на два сейсмособытия и идентифицируют, чтобы в базе данных сохранить детальную информацию о каждом.

Таким образом, в настоящее время в группе геофизического мониторинга КФ АО «Апатит» успешно применяется разработанная классификация источников сейсмических сигналов, категории источников и принадлежащие им

идентификаторы включены в программу интерактивной обработки сейсмических данных для выбора и сохранения сейсмособытия с этой информацией в базу АСКМ.

Заключение

В течение многолетних наблюдений за сейсмичностью на подземных рудниках КФ АО «Апатит» установлено, что для корректной классификации источников сигналов требуются сведения о наличии геологических нарушений, маркшейдерской съемке кромки обрушения, технологических и массовых взрывах и др.

Выделены четыре основные категории источников сейсмических колебаний: сейсмика (динамические проявления горного давления); взрыв (взрывные работы); помехи (работающие машины и механизмы); сейсмичность за зоной контроля.

Проведен статистический анализ всех зарегистрированных АСКМ сейсмособытий. Доля источников от динамического проявления горного давления на Кировском руднике составляет 22% всех сейсмособытий, на Расвумчоррском руднике – 26%. Выявлено, что источников от проводимых

взрывных работ на Кировском руднике зафиксировано больше (30%), на Расвумчоррском – 23% всех событий. Вероятно, из-за того, что сейсмический мониторинг осуществляется на Кировском руднике с 1987 г., а на Расвумчоррском руднике – с 2001 г.

За весь период мониторинга на Кировском руднике с июня 1987 г. АСКМ было зарегистрировано более 1,5 млн сейсмособытий от различных источников, на Расвумчоррском руднике с апреля 2001 г. – около 900 тыс. событий.

В целом, все составляющие информационного потока носят стохастический, гауссовский характер и могут обрабатываться только в определенном вероятностном приближении. Поэтому при анализе сейсмоактивности существенными являются статистические характеристики как всего потока, так и его составляющих (фон, полезный сигнал). Как показала многолетняя практика, некоторые сейсмические события по статистическим параметрам являются трудноотличимыми для их идентификации и классификации без определенной, дополнительной информации.

Список литературы / References

1. 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>
2. Батутин 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>
Batutin 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. Abolfazlzadeh Y., Hudyma M. Identifying and describing a seismogenic zone in a sublevel caving mine. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;49(9):3735–3751. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1017-x>
6. Gonzalez F.J., Vallejos J.A., Rojas E., Landeros P. Evaluation of the seismic rock mass response to mining and the impact of preconditioning using an epidemic-type aftershock model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2022;150:104975. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104975>
7. Gibowicz S.J., Lasocki S. Seismicity induced by mining: Ten years later. *Advances in Geophysics*. 2001;44:39–183. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(00\)80007-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(00)80007-2)
8. Kozlowska M., Orlecka-Sikora B., Dineva S., Rudzinski L., Boskovic M. What Governs the Spatial and Temporal Distribution of Aftershocks in Mining-Induced Seismicity: Insight into the Influence of Coseismic Static Stress Changes on Seismicity in Kiruna Mine, Sweden. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2021. Vol 111. no 1. pp. 409–423. DOI <https://doi.org/10.1785/0120200111>
9. Wang S., Si G., Wang C., Cai W., Li B., Oh J., Canbulat I. Quantitative assessment of the spatio-temporal correlations of seismic events induced by longwall coal mining. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022;14(5):1406–1420. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.04.002>

10. 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;(S1):36–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-36-42>
11. Корчак П.А., Жукова С.А., Меньшиков П.Ю. Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО «Апатит». *Горный журнал*. 2014;(10):42–46.
Korchak P.A., Zhukova S.A., Menshikov P.Yu. Formation and development of the seismic process monitoring system in the production area of Apatit JSC. *Gornyi Zhurnal*. 2014;(10):42–46. (In Russ.)
12. Онохин Ф.М. Особенности структуры Хибинского массива и апатитонефелиновых месторождений. Ленинград: Наука. Ленингр. отд-ние; 1975. 106 с.
13. 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. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-110-116>
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. Kozyrev A., Batugin A., Zuo J., Zhukova S. The impact of surface water seepage on seismicity and rockbursting in mines. *Sustainability*. 2022;14(22):15414. <https://doi.org/10.3390/su142215414>

Информация об авторах

Жукова Светлана Александровна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории прогноза удароопасности рудных месторождений, отдел геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; 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

Article info

Received: 23.08.2025

Revised: 23.10.2025

Accepted: 27.10.2025

Информация о статье

Поступила в редакцию: 23.08.2025

Поступила после рецензирования: 23.10.2025

Принята к публикации: 27.10.2025