

УДК 622.83

**РАЗВИТИЕ ЗОН СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ
В ПОДРАБОТАННОЙ ТОЛЩЕ ПОРОД ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОТРАБОТКЕ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ КИРОВСКОГО РУДНИКА**

И. Э. Семенова, С. А. Жукова, О. Г. Журавлева

*Горный институт Кольского научного центра РАН,
E-mail: i.semenova@ksc.ru, ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия*

Представлены результаты анализа параметров сейсмической активности в подработанной толще пород на одном из рудников Хибинского массива за период 2008 – 2020 гг. Выявлены факторы, оказывающие значимое воздействие на процессы деформирования, прорастания трещин отрыва и обрушения подработанного массива. Выделены три зоны с различным характером и скоростью деформирования подработанных пород на Кировском руднике: зона в районе стыковки подземных горных работ с карьерной выемкой; зона с консольным типом зависания пород; зона двух- и трехстороннего опирания в краевых областях отрабатываемых месторождений. Уставлено негативное влияние ведения горных работ встречными фронтами с формированием опорного целика и зависанием необрушенной консоли. Последующее разрушение целика и деформирование опирающейся на него толщи при отбойке стыковочных секций на подэтажах происходит в динамическом режиме, сопровождаясь высокой сейсмической активностью как по числу событий, так и по параметрам энерговыделения. Выявлена зависимость ширины полосы сейсмической активности и шага обрушения консольной части массива от высоты подработанной толщи.

Управление геодинамическими рисками, напряженно-деформированное состояние, сближенные месторождения, крупномасштабные горные работы, численное моделирование, тектонически напряженные массивы горных пород, сейсмический мониторинг

DOI: 10.15372/FTPRI20220611

Продолжительное ведение крупномасштабных горных работ на рудниках Хибинского массива (более 90 лет), их интенсификация и углубление приводит к развитию геомеханических и геодинамических процессов в массиве горных пород, что характерно для месторождений со сложными горно-геологическими условиями и выраженным действием тектонических напряжений [1 – 5]. Эти процессы сопровождаются трансформацией напряженно-деформированного состояния (НДС) массива пород как в окрестности продвигающихся фронтов горных работ, так и в подработанной толще пород. Миграция зон концентрации и разгрузки массива обуславливает динамические события, которые проявляются, с одной стороны, в виде заколообразования и горно-тектонических ударов в выработках [6], с другой — как трещинообразование и форми-

рование магистральных трещин отрыва в налегающем массиве [7]. Регулярное обрушение подработанной толщи приводит к снижению концентрации сжимающих напряжений в зонах опорного давления, что уменьшает геомеханические и геодинамические риски при отработке запасов в условиях выраженного тектонического сжатия пород. Планомерному самообрушению пород висячего бока способствует рациональный порядок ведения горных работ [8] без формирования блоков-целиков, с опережающим развитием выемки по висячему боку рудной залежи [9]. По мере увеличения высоты подработанной толщи пород и уменьшения мощности рудных тел самообрушение замедляется, что затрудняет технологические процессы, связанные с выпуском руды, а также усугубляет удароопасные условия ведения горных работ.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются Кукисвумчоррское и Юкспорское месторождения, отработку которых ведет Кировский рудник КФ АО “Апатит” системой подэтажного принудительного обрушения. В рассматриваемый период (2008–2020 гг.) Кукисвумчоррское месторождение обрабатывалось от центра к флангам, Юкспорское месторождение — встречными фронтами с дальнейшим переходом на глубоких горизонтах к ведению работ от единой разрезки. Месторождения разделены Саамским карьером, работы в котором завершены. Рельеф характеризуется существенной изменчивостью: от +350 м на уровне долин до +1000 м в точках максимальных высот. Руды и вмещающие породы являются крепкими и хрупкими, тип исходного НДС гравитационно-тектонический с преобладанием тектонических напряжений над гравитационными более чем в 2 раза $\sigma_t > 2\gamma H$. Месторождения отнесены к склонным и опасным по горным ударам с глубины +300 м от дневной поверхности [10], фактическая глубина подземных горных работ в настоящее время до 1000 м. Направление действия максимальных сжимающих напряжений $\sigma_{\max}$ субгоризонтальное. Соотношение предела прочности пород на одноосное сжатие $\sigma_{\text{пр}}$ к $\sigma_{\max}$ около 0.6. Прорастание трещин отрыва в подработанном массиве, особенно на больших глубинах, затруднено.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАРКШЕЙДЕРСКОЙ СЪЕМКИ КРОМКИ ОБРУШЕНИЯ

Проведен анализ динамики продвижения кромки обрушения на Кукисвумчоррском и Юкспорском месторождениях по результатам ежегодной маркшейдерской съемки Кировского рудника за период 2008–2020 гг., который показал, что существенное изменение положения кромки обрушения происходило в 2012, 2016, 2018 и 2020 гг. Выявлены типовые участки с характерной спецификой процессов обрушения подработанной толщи в эти годы. Первый тип включает области, прилегающие к Саамскому карьеру, где происходит достаточно планомерное осыпание горной массы без формирования существенных зависаний подработанных пород.

Ко второму типу можно отнести области с консольным типом опирания налегающей толщи, где процесс обрушения идет с развитием существенных зависаний, особенно в местах с максимальными отметками рельефа. На Кукисвумчоррском месторождении шаг обрушения составляет до 100 м (рис. 1: по X от 500 до 900, по Y от 550 до 700), на Юкспорском месторождении — до 150 м (рис. 1: по X от 2700 до 3300, по Y от 700 до 1000). Основная причина таких массивных зависаний на Юкспорском месторождении — ведение горных работ встречными фронтами, вследствие чего сформировался целик, поддерживающий налегающую толщу пород. При его отбойке происходит внезапное неконтролируемое обрушение сформировавшихся зависаний, которое сопровождается динамическими явлениями как в консоли, так и в породах заделки. Процесс обрушения пород висячего бока до дневной поверхности в условиях действия

тектонических сил имеет несколько стадий: развитие и накопление трещин в зонах, приуроченных к границам заделки подработанных пород, и непосредственно на дневной поверхности; слияние трещин и формирование магистрального разрыва; образование единой плоскости обрушения до дневной поверхности [11].

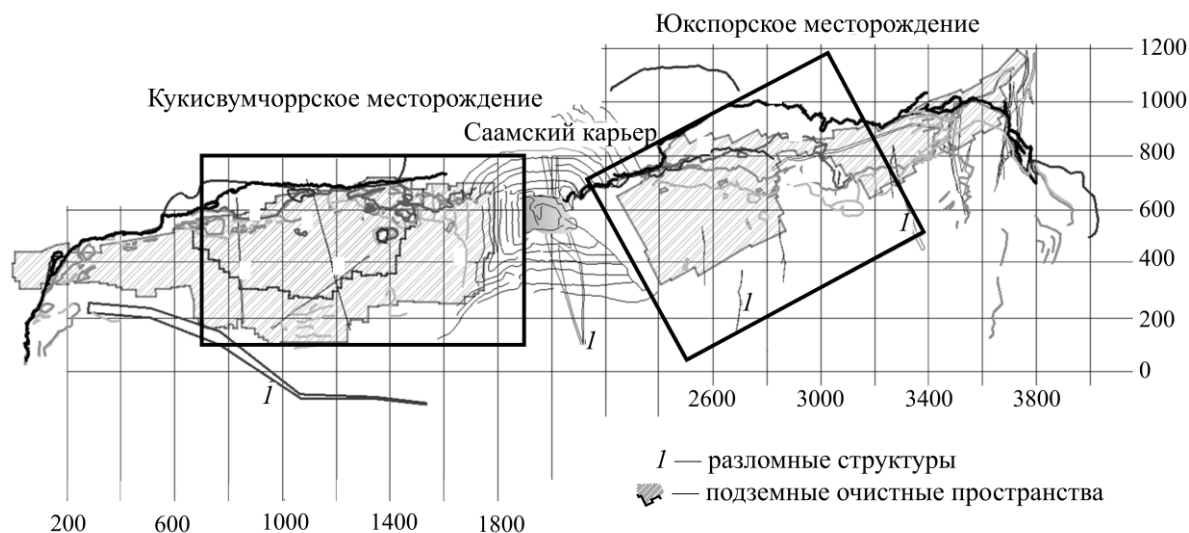


Рис. 1. Шахтное поле Кировского рудника с нанесенными кромками обрушения подработанных пород: прямоугольниками показаны границы зон уверенной регистрации сейсмической активности в период 2008 – 2020 гг.

К третьему типу относятся краевые зоны месторождений, характеризующиеся трехсторонним опиранием подработанного массива. Здесь развитие процессов деформирования подработанной толщи происходит с наименьшей скоростью.

ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Сейсмический мониторинг на подземных рудниках Хибинского массива осуществляется автоматизированной системой контроля состояния массива (АСКСМ), представляющей собой распределенную систему длительного непрерывного действия. Сбор и обработка АСКСМ полной и достоверной информации о сейсмособытиях проводится в реальном времени; редактирование событий происходит в интерактивном режиме. В результате устанавливаются следующие расчетные параметры сейсмических событий: координаты гипоцентра и расчетная ошибка в определении координат; энергия и магнитуда в целом и по частотным полосам регистрации; сброс напряжения в очаге, сейсмический момент и их стандартное отклонение; параметры поляризации S -волн по сеймопунктам; знаки первых вступлений P -волн по сеймопунктам. Параметры фиксируются в зоне уверенной регистрации АСКСМ — это район, в котором регистрируется выделение сейсмических событий энергии от 10^3 Дж с вероятностью не менее 0.8 по четырем и более сеймопунктам. Сейсмическая сеть построена с приоритетами на участках ведения горных работ с максимальным качеством регистрации в районах блоков-целиков и зон стыковки подземных работ с Саамским карьером (районы повышенной точности). Погрешность расчета координат гипоцентра в районах повышенной точности составляет до 25 м за счет высокой плотности сети сеймопунктов и детального исследования скоростей сейсмических волн. За пределами районов повышенной точности плотность сейсмической сети ниже, могут отсутствовать данные о скоростях сейсмических

волн, погрешность определения координат гипоцентра может достигать 100 м [12]. Зона уверенной регистрации сейсмической сети на Кировском руднике показана на рис. 1, по высотным отметкам охватывает $-552 \div 552$ м.

Анализ параметров сейсмической активности подработанных пород позволяет выявить закономерности прорастания трещин отрыва и причины активизации процессов трещинообразования [13–15].

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ПОДРАБОТАННЫХ ПОРОДАХ

Для проведения анализа сейсмических данных оба месторождения условно разделялись по высотной отметке на район ведения горных работ и консольную часть массива горных пород: на Кукисвумчоррском месторождении такой границей принята высотная отметка +300 м, на Юкспорском — высотная отметка +400 м. Различия в высотных отметках объясняются большей глубиной ведения горных работ на Кукисвумчоррском месторождении.

Анализ сейсмических событий за период 2008–2018 гг. показал, что на Кукисвумчоррском месторождении в зоне ведения горных работ зарегистрировано больше сейсмособытий (около 19.2 тыс.), чем в консольной части массива (около 17.3 тыс.). На Юкспорском месторождении ситуация обратная: больше сейсмособытий (около 51.5 тыс.) произошло в подработанной толще пород, чем на глубинах ведения горных работ (около 34.4 тыс.). По числу зарегистрированных сейсмособытий видно, что на Юкспорском месторождении сейсмоактивность значительно выше, чем на Кукисвумчоррском. Наиболее вероятной причиной таких различий сейсмической активности является различный порядок ведения горных работ в исследуемом периоде: расходящимися фронтами на Кукисвумчоррском месторождении и встречными — на Юкспорском, где горные работы велись на уменьшающийся блок-целик и постепенно формировалась зона стыковки. Именно стыковочная зона — самая сейсмически нестабильная на протяжении всего анализируемого периода, особенно с 2015 г., когда началась активная отработка стыковочных секций на подэтажах массовыми взрывами.

По изменению конфигурации кромки обрушения исследуемые месторождения разделялись на отдельные участки — области различного деформирования массива и земной поверхности. Проведен детальный анализ сейсмичности ниже и выше обозначенных границ высотных отметок. Кукисвумчоррское месторождение разделено на следующие участки: по координате X от 400 до 1550 м (над зоной подземных горных работ) и по X от 1550 до 1800 м (над зоной стыковки с Саамским карьером) (рис. 2а, б); Юкспорское месторождение: по X от 2420 до 3500 м (над зоной подземных горных работ) по X от 2240 до 2420 м (над зоной стыковки с Саамским карьером) (рис. 2в, г). Такое разделение массива горных пород позволило выявить некоторые особенности развития сейсмического процесса в подработанной толще пород.

Максимальные значения энерговыделения отмечались в 2014 г. и в 2017 г. (рис. 2а), причем в 2014 г. зафиксировано 261 событие со средней энергией, близкой к 10^6 Дж. Они связаны с отработкой наиболее удароопасного блока Кукисвумчоррского месторождения [16]. Максимальное количество сейсмических событий (рис. 2б) на втором участке наблюдалось в 2017 г. — 320. На этом участке имеют место более резкие изменения суммарного энерговыделения, они связаны с отработкой переходных зон между подземными горными работами и Саамским карьером. На рис. 2в представлена динамика сейсмичности на Юкспорском месторождении в зоне, включающей в себя блок-целик.

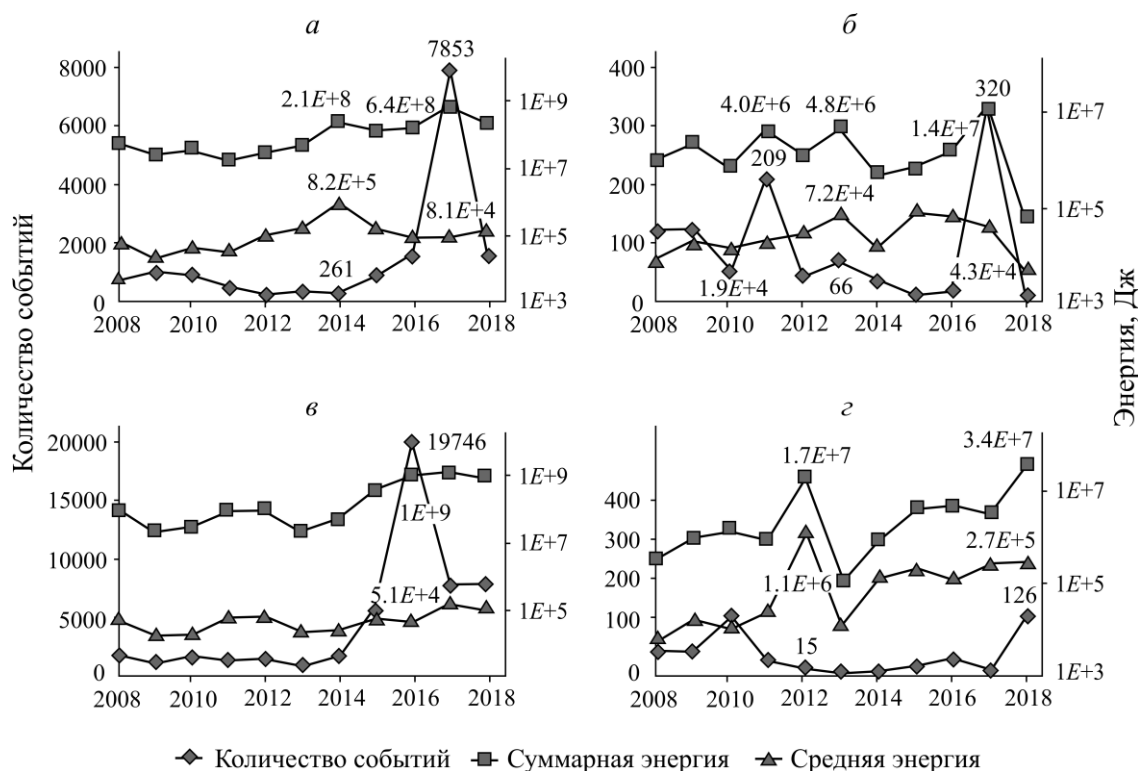


Рис. 2. Динамика сейсмичности для зон различного деформирования массива горных пород. Кукисвумчорское месторождение по X : a — от 400 до 1550 м; b — от 1550 до 1800 м; Юкспорское месторождение по X : v — от 2420 до 3500 м; z — от 2240 до 2420 м

Максимальное количество сейсмических событий (около 19.7 тыс.) здесь наблюдалось в 2016 г. при подходе к стыковочной секции и ее отбойке на нижнем подэтаже горизонта +320 м. Интенсивное трещинообразование в консоли развивалось поэтапно: сначала произошел резкий рост числа слабых сейсмических событий, а затем возникали сильные сейсмические события. В зоне стыковки с Саамским карьером со стороны Юкспорского месторождения первые максимальные значения энерговыделения наблюдались в 2012 г. (рис. 2в). Второй максимум — 2018 г. при интенсификации процесса обрушения горной массы в сторону Саамского карьера.

Космоснимок с нанесенными сейсмособытиями, зарегистрированными за период 2008–2018 гг. в подработанной части массива, демонстрирует, что большинство сильных сейсмических событий группируется на участках необрушенных пород (рис. 3).



Рис. 3. Карта эпицентров сейсмособытий. Стрелкой указано направление на север

На Кукисвумчоррском месторождении сейсмособытия выстраиваются в одну линию вдоль поверхностной части горы Кукисвумчорр, направленной по склону горы к зоне стыковки с Саамским карьером. На Юкспорском месторождении явно выделяются два облака событий. Наибольшее число событий приурочено к верхней части горы Юкспор и по местоположению совпадает с блоком-целиком. Второе облако событий связано с формированием процессов обрушения и осыпания горной массы в Саамский карьер. Одиночные события (в верхней части рис. 3), по всей видимости, могут быть отнесены к зоне плавных сдвижений.

Следует отметить, что чем выше рельеф дневной поверхности, соответственно, больше глубина горных работ, тем шире полоса сейсмической активности консольной части массива. Это подтверждается данными расчетов НДС, а именно распределением растягивающих напряжений в подработанном массиве (рис. 4). Зона растягивающих напряжений, в том числе, превышающих предел прочности пород на растяжение, уходит на 200 м и более от границы фактического обрушения, создавая условия для прорастания трещин отрыва. То есть процессы активного трещинообразования, связанные с деформацией подработанной толщи пород, распространяются на значительные расстояния (около 150–200 м) от кромки обрушения. Как показал анализ конфигурации кромок, полное обрушение происходит с определенной задержкой по времени и увеличением шага обрушения, что объясняется действием высоких сжимающих напряжений, препятствующих формированию единой плоскости разрыва на всю высоту подработанной толщи.

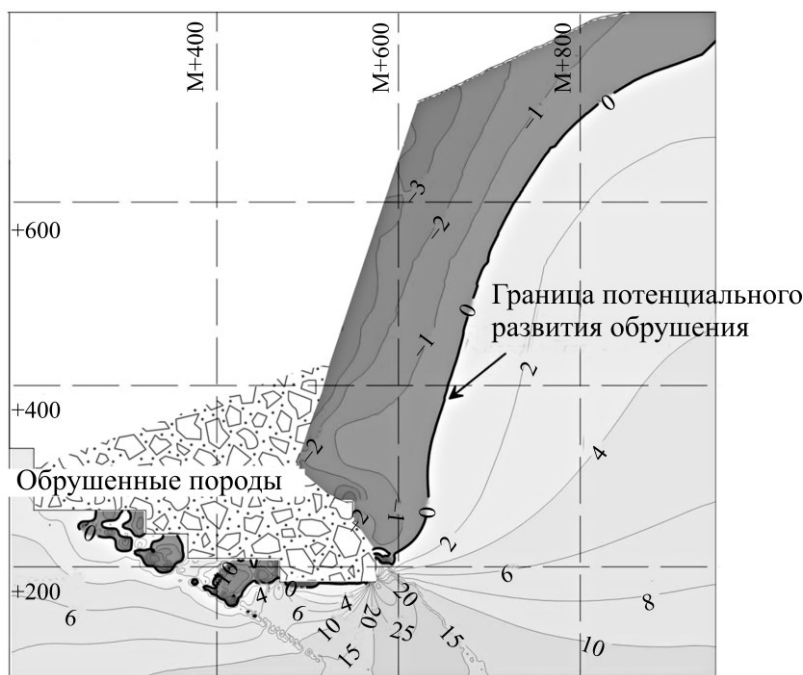


Рис. 4. Распределение минимальной компоненты главных напряжений $\sigma_{\min}$ в подработанном массиве с выделенной более темным цветом областью растягивающих напряжений. Разрез представлен в системе координат Кировского рудника (M — магистрали)

Распределение сильных сейсмособытий в консольной части массива по годам показывает, что существенная активизация сейсмичности (а именно проявление сильных сейсмических событий) началась практически одновременно в 2015 г. с максимумом в 2017 г. (таблица). С большой вероятностью резкие изменения геодинамического режима массива горных пород

связаны с интенсификацией и углублением горных работ, началом строительства и отработки нижних горизонтов. На Юкспорском месторождении число событий примерно в 5 раз превышает число событий на Кукисвумчоррском. Количество сильных сейсмических событий на Юкспорском месторождении, произошедших в 2017 г. при отработке блока-целика, является максимальным за всю историю наблюдений (454 события энергетического класса 6 и выше).

Количество сильных сейсмических событий по годам

Энергетический класс K	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Кукисвумчоррское месторождение											
6	12	2	6	3	2	6	4	8	28	97	39
7					1	1	1	2	1	4	2
8							1				
Юкспорское месторождение											
6	33	5	7	12	4	3	8	50	327	454	254
7				1	4			2	1	2	1

ВЫВОДЫ

Выделены три зоны с различным характером и скоростью деформирования подработанных пород на Кировском руднике: зона в районе стыковки подземных горных работ с карьерной выемкой; зона с консольным типом зависания пород; зона двух- и трехстороннего опирания в краевых областях обрабатываемых месторождений.

Количество сейсмических событий в подработанных породах Юкспорского месторождения в 2 раза выше данного показателя на Кукисвумчоррском месторождении. Это связано с ведением горных работ на Юкспорском месторождении встречными фронтами, формированием опорного целика с частично необрушенной консолью и последующим разрушением целика и опирающейся на него толщи в динамическом режиме при отбойке стыковочных секций на подэтажах. Чем выше рельеф дневной поверхности и, соответственно, больше глубина горных работ, тем шире полоса сейсмической активности консольной части массива и больше шаг обрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидоров Д. В., Потапчук М. И., Сидляр А. В. Прогнозирование удароопасности тектонически нарушенного рудного массива на глубоких горизонтах Николаевского полиметаллического месторождения // Зап. горн. ин-та. — 2018. — Т. 234. — С. 604–611.
2. Липин Я. И., Криницын Р. В. Актуальные вопросы оценки напряжений при прогнозе удароопасности на современном этапе // Современные проблемы механики. — 2018. — № 33 (3). — С. 410–418.
3. Рассказов М. И., Гладырь А. В., Терёшкин А. А., Цой Д. И., Васянович Ю. А. Проведение экспериментальных исследований удароопасности горных пород на Расвумчоррском месторождении с применением специальных технических средств // ГИАБ. — 2019. — № S30. — С. 98–105.
4. Еременко А. А., Мулев С. Н., Штирц В. А. Мониторинг геодинамических явлений микросейсмическим методом при освоении удароопасных месторождений // ФТПРПИ. — 2022. — № 1. — С. 12–22.

5. **Смирнов О. Ю.** Оценка влияния природных и техногенных факторов на механизм формирования удароопасности рудных месторождений // Горн. журн. — 2011. — № 8. — С. 4–9.
6. **Козырев А. А., Семенова И. Э., Журавлева О. Г., Пантелеев А. В.** Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018 г. // ГИАБ. — 2018. — № 12. — С. 74–83.
7. **Батугин А. С., Батугина И. М., Юй Л., Чжао Ц., Ван Ч.** Взаимосвязь высокой удароопасности и процессов сдвижения на шахте Хуафэн в Китае // Современные проблемы в горном деле и методы моделирования горно-геологических условий при разработке месторождений полезных ископаемых. Сб. материалов всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием. — 2015. — С. 15.
8. **Мельников Н. Н., Козырев А. А., Демидов Ю. В., Енютин А. Н., Мальцев В. А., Свинин В. С.** Геомеханическое обоснование эффективной технологии отработки мощных месторождений на больших глубинах // Горн. дело в Арктике. Тр. VIII междунар. симпозиума. — Апатиты–СПб., 2005. — С. 26–34.
9. **Демидов Ю. В., Козырев А. А., Мальцев В. А., Енютин А. Н., Семенова И. Э.** Отработка горизонта с применением протяженных разгрузочных зон в удароопасном массиве // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. — 2004. — С. 413–418.
10. **Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых”** Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 г. № 505.
11. **Козырев А. А., Семенова И. Э., Аветисян И. М.** Исследование особенностей процесса обрушений подработанных пород с увеличением глубины горных работ на месторождениях ОАО “Апатит” // Проблемы и тенденции рационального и безопасного освоения георесурсов. Сб. докладов Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием, посвященной 50-летию ГИ КНЦ РАН. — 2011. — С. 400–405.
12. **Корчак П. А., Жукова С. А., Меньшиков П. Ю.** Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО “Апатит” // Горн. журн. — 2014. — № 10. — С. 42–46.
13. **Адушкин В. В., Кишкина С. Б., Куликов В. И., Павлов Д. В., Анисимов В. Н., Салтыков Н. В., Сергеев С. В., Спунгин В. Г.** Построение системы мониторинга потенциально опасных участков коробковского месторождения Курской магнитной аномалии // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 3–13.
14. **Кочарян Г. Г., Будков А. М., Кишкина С. Б.** Об инициировании тектонических землетрясений при подземной отработке месторождений // ФТПРПИ. — 2018. — № 4. — С. 34–43.
15. **Логинов Г. Н., Яскевич С. В., Дучков А. А., Сердюков А. С.** Совместная обработка данных поверхностных и подземных систем микросейсмического мониторинга при добыче твердых полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 100–107.
16. **Семенова И. Э., Журавлева О. Г., Жукова С. А.** Сейсмичность как отражение изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород в процессе ведения горных работ // ГИАБ. — 2021. — № 6. — С. 46–58.

Поступила в редакцию 25/VII 2022

После доработки 20/IX 2022

Принята к публикации 24/XI 2022