

Факторы изменения сейсмического режима и локализации опасных зон при крупномасштабном техногенном воздействии

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

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

✉ svetlana.zhukowa@yandex.ru

Резюме: Ведение крупномасштабных горных работ на протяжении уже более 90 лет на апатит-нефелиновых месторождениях Хибин с выраженным гравитационно-тектоническим типом напряженно-деформированного состояния трансформирует исходное поле напряжений массива горных пород, что приводит к периодической реализации горных ударов. Эта проблема не теряет своей актуальности, так как в последние два десятилетия постоянно растет интенсивность горных работ на апатитовых рудниках, происходит усложнение горно-геологических и геомеханических условий. Соответственно наблюдается увеличение проявлений горного давления в динамической форме. По результатам ретроспективного анализа данных о проявлении геодинамических явлений на удароопасных месторождениях Хибинского массива определен комплекс факторов, влияющих на изменение сейсмического режима и локализацию опасных зон в сложных горнотехнических системах. Систематизированы данные многолетних наблюдений о проявлениях горного давления в динамической форме на Хибинских апатитовых рудниках с учетом параметров сейсмичности, масштабов разрушений в руднике, техногенных полей напряжений, геологических и геомеханических особенностей массива горных пород в конкретные моменты времени. Разработана структурная схема и проведено ранжирование факторов с учетом времени воздействия на массив горных пород.

Ключевые слова: удароопасность, горный удар, индуцированная сейсмичность, мониторинг, Хибинский массив, напряженно-деформированное состояние, природные и техногенные факторы, горные работы

Для цитирования: Козырев А.А., Семенова И.Э., Жукова С.А., Журавлева О.Г. Факторы изменения сейсмического режима и локализации опасных зон при крупномасштабном техногенном воздействии. *Горная промышленность*. 2022;(6):95–102. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-95-102>

Factors of seismic behavior change and localization of hazardous zones under a large-scale mining-induced impact

A.A. Kozyrev, I.E. Semenova, S.A. Zhukova✉, O.G. Zhuravleva

Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

✉ svetlana.zhukowa@yandex.ru

Abstract: Large-scale mining operations over 90 years at the Khibiny apatite-nepheline deposits that are characterized with the conspicuous gravity-tectonic type of the stress-strain state have transformed the initial stress field of the rock massif, which has led to the recurrent occurrence of rockbursts. This problem retains its relevance due to constant increasing intensity of mining operations at the apatite mines during the last two decades and complicated mining, geological and geomechanical conditions. Accordingly, the dynamic rock pressure is increasing.

We have retrospectively analyzed data on the manifestations of geodynamic events in the Khibiny rockburst-hazardous deposits and determined a set of factors that influence the changes in seismic behavior and localization of hazardous zones in complicated mining and engineering systems.

We have systematized the data of long-term observations on dynamic rock pressure manifestations at the Khibiny apatite mines, taking into account the seismicity parameters, the scale of mine damage, the mining-induced stress fields, and geological and geomechanical features of the rock massif at specific time points. A structural scheme has been developed and ranking of factors has been carried out, considering the time of impact on the rock massif.

Keywords: rockburst hazard, rockburst, induced seismicity, monitoring, the Khibiny rock massif, stress-strain state, natural and mining-induced factors, mining operations

For citation: Kozyrev A.A., Semenova I.E., Zhukova S.A., Zhuravleva O.G. Factors of seismic behavior change and localization of hazardous zones under a large-scale mining-induced impact. *Russian Mining Industry*. 2022;(6):95–102. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-95-102>

Введение

В зоне воздействия крупномасштабных горных работ на протяжении многих десятков лет извлекаются и перемещаются значительные объемы горной массы, формируются существенные по площади выработанные пространства, происходит постоянное динамическое воздействие на массив технологических взрывов, что в совокупности приводит к ускорению деформирования пород по сравнению с естественным развитием природных процессов. Это характерно для многих месторождений России и мира, в том числе для месторождений Хибинского массива.

При переходе на большие глубины резко ухудшаются условия эксплуатации месторождений, так как увеличивается горное давление и изменяются физико-механические свойства горных пород. В связи с этим возникают серьезные технологические и технико-экономические трудности при обеспечении устойчивости выработок в период их проходки и развития очистной выемки. В результате отработки горизонтов происходит подработка пород всячего бока рудной залежи, которая вызывает образование зон растяжения в одной части массива и увеличение напряжений сжатия в другой. Такие постоянные воздействия на массив вызывают его растрескивание и разупрочнение.

Горные работы создают в массиве новые трещины и пустоты, которые в свою очередь приводят к перераспределению естественных полей напряжений. Разрушаются слабые породы, заполняющие тектонические нарушения. Нарушается равновесие блоковой структуры массива. В всячем боку со временем образуется больше разнонаправленных и протяженных трещин. Массив постепенно переходит на все более высокие иерархические уровни процесса разрушения за счет слияния зон разупрочнения, вызванных технологическими и тектоническими воздействиями на массив. Происходит постоянное перераспределение гравитационно-тектонических напряжений в массиве горных пород, что в свою очередь усиливает сейсмичность [1].

Сейсмическая активность является откликом массива горных пород на техногенное воздействие. Оценке сейсмического отклика массива горных пород на проводимые горные работы посвящено большое количество исследований [2–9].

В последнее время в районе ведения горных работ на апатитовых рудниках Хибин все чаще фиксируются сильные сейсмические события энергетического класса $K \geq 7$. В целом при отработке месторождений Хибинского массива наблюдаются геодинамические явления, различные по масштабу и характеру разрушений: шелушение, динамическое заколообразование, стреляние пород, микроудары и горные удары, толчки, горно-тектонические удары и техногенные землетрясения.

В настоящее время проблема горных ударов сохраняет свою актуальность. Целью представленного исследования являлась систематизация и структуризация факторов, влияющих на изменение состояния массива горных пород и сейсмичности, на примере удароопасных месторождений Хибинского массива. Для ее достижения был проведен детальный анализ и обобщены причины произошедших опасных геодинамических явлений с учетом параметров сейсмичности, техногенных полей напряжений, геологических и геомеханических особенностей массива горных пород в конкретные моменты времени. В связи с этим одной из главных задач являлась разработка базы данных горных ударов, которая включает в себя систематизацию

данных многолетних наблюдений о проявлениях горного давления в динамической форме на Хибинских апатитовых рудниках. Проведено определение и ранжирование основных причин изменения сейсмической активности и возникновения опасных геодинамических явлений на апатит-нефелиновых месторождениях Хибинского массива.

Объекты исследования

Наиболее крупные апатитовые месторождения разрабатываются АО «Апатит» и сосредоточены в юго-западной и юго-восточной частях рудного поля на участке длиной около 15 км (рис. 1): Кукисвумчоррское, Юкспорское (отрабатывает Кировский рудник), Апатитовый цирк (Расвумчоррский рудник), Плато Расвумчорр (карьер Центральный), Коашвинское и Ньоркпахкское (Восточный рудник). Апатит-нефелиновые руды центральной группы разрабатываемых месторождений (Кукисвумчоррского, Юкспорского, Апатитового цирка и Плато Расвумчорр) представлены мощными (до 100–300 м) пластовыми телами в всячем боку уртитов. Мощность рудных тел уменьшается с глубиной. Характерной особенностью этих месторождений является неравномерное распределение полезного компонента в рудном теле [10].

По условиям формирования и распределения подземных вод на территории Балтийского гидрогеологического щита Хибинский кристаллический массив выделен в отдельный гидрогеологический район [11]. Этот район отличается обособленностью положительной геологической структуры, сравнительно однородным составом слаборастворимых интрузивных пород типа нефелиновых сиенитов, влажным климатом с повышенным количеством осадков и конденсационной влаги, интенсивным стоком поверхностных и подземных вод.

На рудниках проводится сейсмический мониторинг с конца 1980 г., ведется учет объемов водопритоков, на протяжении многих лет проводились измерения напряженно-деформированного состояния массива горных пород (рис. 1).



Рис. 1
 Схема действия тектонических напряжений на месторождениях Хибинского массива по данным натурных определений
 Месторождения:
 1 – Кукисвумчоррское;
 2 – Юкспорское;
 3 – Апатитовый цирк;
 4 – Плато Расвумчорр;
 5 – Коашвинское;
 6 – Ньоркпахкское.
 - - - - апатитовая дуга;
 ○ – подземные горные работы; ○ – открытые горные работы;
 → ← направление тектонических напряжений (σ_1)

Fig. 1
 Schematic representation of the tectonic stresses in the deposits of the Khibiny massif, based on in situ definitions
 Deposits:
 1 – Kukisvumchorr;
 2 – Yukspor;
 3 – Apatite Circus;
 4 – Rasvumchorr Plateau;
 5 – Koashvin;
 6 – Nyorkpakhk
 - - - - the apatite arc;
 ○ – underground mining operations;
 ○ – surface mining operations;
 → ← the direction of tectonic stresses (σ_1)

Известно, что к зонам тектонических поднятий Хибинского массива приурочены области высоких горизонтальных (тектонических) напряжений в массивах горных пород. Тектоническое формирование Хибинского массива сопровождается переупаковкой отдельных блоков под воздействием высоких сжимающих напряжений. Этот процесс сопровождается внезапными подвижками и проскальзыванием блоков по существующим и вновь формирующимся разломам и сопровождается выделением различных видов энергии, в том числе сейсмической, которая проявляется в виде землетрясений и толчков [12–13].

База данных горных ударов месторождений Хибинского массива

Вся информация о проявлениях горного давления в динамической форме на месторождениях Кольского полуострова систематизирована в виде базы данных, основной целью создания которой являлось структурирование информации о геодинамических явлениях и их причинах. База данных в дальнейшем может применяться при решении задач выделения потенциально удароопасных зон с учетом всего комплекса геологических и горнотехнических факторов.

Проведен поиск и анализ информации на основе имеющихся в Горном институте данных, выполнен обзор литературных источников, проанализирована и систематизирована официальная документация: карточки горных ударов, протоколы заседаний Комиссий по горным ударам, протоколы технических совещаний. Сформирована база данных, которая включает в себя информацию о времени, месте, классификации, интенсивности, причинах и последствиях геодинамических явлений, произошедших в Хибинах с 1948 по 2021 г.

Всего в Горном институте КНЦ РАН имеется 64 карточки горных ударов (36 шт. – Кировский рудник; 28 шт. – Расвумчоррский рудник). Дополнительно учтена информация о событиях, которые, по мнению Горного института, также могут быть отнесены к опасным геодинамическим явлениям.

Таким образом, на сегодняшний день для рудников Хибинского массива, обрабатываемых АО «Апатит», систематизирована информация о 92 геодинамических явлениях. Наиболее разрушительными событиями являются техногенное землетрясение, произошедшее 16 апреля 1989 г. на Кировском руднике ($M \approx 4.2$) [14], а также произошедший 9 января 2018 г. горно-тектонический удар на Расвумчоррском руднике ($M \approx 3.3$) [15].

На рис. 2 представлена временная шкала сильных геодинамических явлений, зафиксированных на месторожде-

ниях. В табл. 1 представлены количественные данные о различных геодинамических явлениях: горно-тектонический удар (ГТУ), горный удар (ГУ), микроудар, техногенное землетрясение (ТЗ), толчок и иные случаи. К иным случаям отнесены случаи проявления горного давления, которые не подходят под классификацию, принятую на КФ АО «Апатит» в соответствии с действующими нормативными документами. На сегодняшний день официально зарегистрирован только один такой случай: самопроизвольное обрушение заколов с большой площади обнажения на Кукисвумчоррском месторождении (август 2003 г.).

Проведен анализ фактически произошедших геодинамических явлений на рудниках с точки зрения выявления закономерностей параметров сейсмичности, техногенных полей напряжений и геологических и геомеханических характеристик массива горных пород на локальном участке или на месторождении в целом, до и после реализации геодинамических явлений.

Ретроспективный анализ является важным этапом для разработки структурной схемы факторов, влияющих на формирование геодинамических явлений, и с практической точки зрения представляет собой разбор уже проявившихся геодинамических явлений. Результаты такого анализа в дальнейшем могут быть использованы для построения прогнозных моделей и учтены, например, при планировании горных работ.

Изучение причин произошедших геодинамических явлений и ранжирование их по классификации, применяемой в АО «Апатит», показало, что в 55 случаях динамических проявлений горного давления можно выделить наиболее явную причину, а в 37 случаях проявлений – повлияло совместное действие факторов (табл. 2). В связи с этим в данной работе авторы предлагают провести распределение выявленных причин по определенным наиболее влияющим факторам: геологический, горные работы, метео- и гидрогеологический, тектонический (следует обозначить, как постоянно действующий) (рис. 3 согласно данным табл. 2).

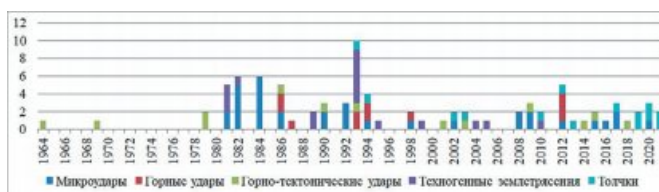


Рис. 2
Временная шкала сильных геодинамических явлений

Fig. 2
Time scale of intensive geodynamic phenomena

Таблица 1
Данные о зарегистрированных геодинамических явлениях

Table 1
Data on the registered geodynamic phenomena

Геодинамическое явление	Месторождения					
	Всего	Кукисвумчоррское	Юкспорское	Апатитовый цирк	Плато Расвумчорр	Коашвинское
ГТУ	13	8	0	3	2	0
ГУ	11	6	1	3	1	0
Микроудар	34	16	9	9	0	0
ТЗ	19	14	0	0	5	0
Толчок	14	5	2	3	3	1
Иное	1	1	0	0	0	0
Итого	92	50	12	18	11	1

Таблица 1
Данные о зарегистрированных геодинамических явлениях

Table 1
Data on the registered geodynamic phenomena

Геодинамическое явление	Явная преобладающая причина					Совместное влияние нескольких факторов
	Действие высоких тектонических напряжений в массиве	Наличие мончечитовой дайки, натролитовой трещины, пегматитовых жил, зон шпреуштейнизированных пород	Наличие зоны опорного давления, очистные работы, после производственного взрыва	Интенсивное снеготаяние, продолжительные дожди	Перепады температуры воздуха (промерзание/оттаивание обводненных трещин)	
ГТУ	5	2	0	2	1	3
ГУ	3	1	0	2	0	5
Микроудар	5	4	1	4	2	18
ТЗ	3	0	0	3	3	10
Толчок	1	1	1	8	1	2
Иное	0	0	0	0	0	1



Рис. 3
Распределение факторов

Fig. 3
Distribution of factors

Факторы, влияющие на изменение сейсмической активности

Анализ горных ударов, произошедших за годы отработки Хибинских месторождений, показал, что факторы, влияющие на удароопасность, можно прежде всего разделить на природные и техногенные. К природным факторам, отражающим особенности геологического строения (блочность и структурная неоднородность) и тектонической обстановки на месторождениях, относятся: современные тектонические боковые движения, высокие тектонические напряжения, действующие в массиве горных пород, наличие разрывных нарушений, различие физико-механических свойств пород и руд, высокая анизотропия горизонтальных напряжений даже в пределах одного шахтного поля. Влияние этих факторов на напряженно-деформированное состояние и сейсмичность массива горных пород, а также на формирование опасных геодинамических явлений хорошо продемонстрировано во многих работах [16–20].

Техногенные факторы обусловлены особенностями применяемой системы разработки, которые заключаются в том, что самообрушение покрывающих пород до поверхности происходит не сразу после отбойки руды в секции, а позднее, после начала выпуска, в результате чего образуются консольные зависания (висячие блоки над отбитым пространством), приводящие к увеличению напряжений в зоне опорного давления. Проявление техногенной сейсмичности связывают с пригрузкой или разгрузкой припо-

верхностной части земной коры в пространстве и во времени и наличием разрывных нарушений. При этом большое значение придается степени активности разломов.

Принято считать, что сейсмические события – это следствие внезапных подвижек по существующим разломам, их дальнейшего «прорастания», развития в пространстве или образования новых разломов. Обычно любая подвижка по разлому в скальных породах сопровождается выделением сейсмической энергии, поскольку при этом происходит разрушение пород в самой зоне разлома и вблизи нее. А это значит, что если есть движения в скальных хрупких массивах, то рано или поздно они проявятся в виде землетрясений.

Большинство происходящих сейсмических событий на рудниках регистрируются лишь внутрирудничными сетями сейсмического мониторинга.

На Кировском и Расвумчоррском рудниках, как в предыдущие годы, основными участками повышенной сейсмической активности являлись участки вблизи активного ведения горных работ, а также массив консоли необрушенных пород висячего бока рудной залежи. Кроме того, периодически происходит активизация различных геолого-структурных неоднородностей массива. Важным изменением сейсмического режима месторождений Хибинского массива является увеличение числа сильных сейсмических событий в лежащем боку рудной залежи, причем зачастую эти события происходят на глубине, где ранее такие события не регистрировались, по-видимому, причиной таких событий является углубление и интенсификация горных работ, а также уменьшение вертикальной нагрузки при таких же значениях горизонтальных напряжений.

Крупномасштабные горные работы приводят к изменению гидрогеологического режима, что отражается и на изменении сейсмичности [21–22]. Активизации сейсмичности способствуют сезонное увеличение водопритоков, резкие изменения температуры, наличие разломов, заполненных проницаемым материалом, снижение прочностных свойств контактов разрывных нарушений. Увеличение объемов водопритока в последние годы говорит о возможном изменении рельефа в районе рудоспусков карьера «Центральный», что также может влиять на активизацию сейсмичности.

Сейсмическая активность на месторождениях Хибин-

ского массива тесно связана с проводимыми горными работами и технологическими взрывами. Установлено, что затухание сейсмичности после проведения взрывных работ происходит подобно затуханию сейсмичности после реализации сильных землетрясений. Отклик массива горных пород на проводимое взрывное воздействие отличается на разных участках рудника в зависимости от действующего поля напряжений: чем ближе напряженное состояние массива к предельному, тем существеннее отклик массива горных пород.

Схема факторов, действующих на изменение состояния массива горных пород

Активизация техногенной сейсмичности – это результат совместного влияния целого ряда факторов: геологических (строение массива), топографических (рельеф местности), геодинамических (тектонические процессы), антропогенных (горные работы), гидрогеологических (обводненность массива пород), метеорологических (резкие перепады температуры). На диаграмме связей (рис. 4) показаны основные потенциальные причины изменения сейсмической активности исследуемых апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива.

В большинстве случаев проявлению динамических событий способствует совокупное действие этих факторов, влияние одного из которых может являться основным триггером. Как общее, так и отдельное влияние каждого фактора ведет к изменению деформационных характеристик обрабатываемого месторождения в большей или меньшей степени, а следовательно – к изменению параметров поля напряжений массива.

К геологическим факторам относятся строение массива горных пород, определяющее его прочностные свойства и их изменчивость, а также перепад высот поверхности.

На формирование поля напряжений влияют тектонические процессы (геодинамические факторы).

К антропогенным факторам относятся горные работы (глубина, скорость отработки, технология), которые приводят к перераспределению полей напряжений на участках шахтного поля, образованию пустот, раскрытию трещин, а в целом – к разрушению этого участка массива горных пород и изменению сейсмичности.

Гидрогеологический фактор определяет водонасыщенность массива. Сезонная обводненность влияет на активизацию сейсмической активности вследствие изменения трещинно-порового давления (при заполнении пустот и трещин в массиве) [23–27] и изменения сцепления и коэффициента трения в системе блок-разлом (при перенасыщении водой разрывных нарушений) [28–30].

Метеорологический фактор включает резкие перепады температуры воздуха. Промерзание или оттаивание заполненных водой трещин изменяет давление в них, что способствует смещению блоков породы, находящихся в предельном состоянии.

Время воздействия этих факторов на изменение состояния массива горных пород играет важную роль, например, геологический фактор – формирование строения горного массива – составляет несколько миллионов лет; геодинамический и антропогенный в настоящее время – постоянно действующие факторы и время их воздействия зависит от темпов ведения горных работ; гидро- и метеорологические факторы имеют время воздействия от часов до нескольких суток и зависят от накопленного объема жидкости на участках массива горных пород и резких перепадов температуры воздуха.

Следует выделить управляемые факторы (см. рис. 4), такие как формирование конфигурации очистного пространства, глубина горных работ и сейсмическое воздействие взрывов. Это те факторы, которые может скорректировать горный специалист, назначив необходимые профилактические мероприятия по снижению удароопасности на опасном участке рудника.



Рис. 4
Обобщающая схема факторов, влияющих на изменение сейсмической активности и формирование опасных зон

Fig. 4
A generalizing flowchart of the factors influencing the changes in seismic activity and formation of hazardous zones

Остальные факторы относятся к неуправляемым. Из всех представленных факторов можно выделить триггеры: сейсмическое воздействие взрывов, сезонные колебания водопритоков, стремительное снеготаяние и промерзание обводненных трещин. При определенном предельном напряженном состоянии участка массива горных пород действие любого из этих факторов в этот момент может привести к катастрофическим последствиям.

Кроме этого, в земной коре действуют и другие факторы, которые вносят свой вклад в формирование общего поля напряжений. К ним относятся действие подземных газов, космические факторы (влияние лунно-солнечной активности), атмосферного давления и других внешних воздействующих полей [31–32]. В рамках нашего исследования такие факторы приняты как слабо влияющие на изменение сейсмического режима Хибинского массива и не учитываются.

Заключение

Составлена и систематизирована база данных горных ударов, в которую вошли все данные многолетних наблюдений о проявлениях горного давления в динамической форме на Хибинских апатитовых рудниках.

Проведен детальный анализ причин произошедших опасных геодинамических явлений, с помощью которого определены и ранжированы явные преобладающие причины изменения сейсмического режима и возникновения опасных геодинамических явлений на исследуемых апатит-нефелиновых месторождениях Хибинского массива.

Выявлены основные потенциальные причины изменения сейсмической активности исследуемых месторождений Хибин, которые положены в основу структурной схемы к комплексной оценке состояния массива горных пород.

Применение предложенной схемы позволит проводить сравнительный анализ влияния определенных факторов опасности как по отдельности, так и в совокупности, а также подготовить рекомендации по ведению горных работ, в том числе по определению необходимых профилактических мероприятий.

Список литературы

1. Мельников Н.Н. (ред.) *Сейсмичность при горных работах*. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН; 2002. 325 с.
2. 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>
3. 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>
4. Kozłowska 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;111(1):409–423. <https://doi.org/10.1785/0120200111>
5. 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>
6. Gibowicz S., 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)
7. 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/FTPRP120220102>
8. 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):5–17. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_7_0_5
9. Emanov A.A., Emanov A.F., Rebetsky Y.L., Kuprish O.V., Fateev A.V., Shevkunova E.V. Induced seismicity of the Bachat coal mine and the stress state of the earth's crust. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2021;15(6):435–444. <https://doi.org/10.1134/S0742046321060026>
10. Онохин Ф.М. *Особенности структуры Хибинского массива и апатитонефелиновых месторождений*. Л.: Наука; 1975. 106 с.
11. Каменский Г.Н., Толстихина М.М., Толстихин Н.И. *Гидрогеология СССР*. М.: Госгеолтехиздат; 1959. 366 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/5741?ysclid=labcqjiikw750567859>
12. Марков Г.А. *Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива*. Л.: Наука; 1977. 213 с.
13. Марков Г.А., Савченко С.Н. *Напряженное состояние пород и горное давление в структурах гористого рельефа*. Л.: Наука; 1984. 140 с.
14. Сырников Н.М., Тряпицын В.М. О механизме техногенного землетрясения в Хибинах. *Доклады Академии наук СССР*. 1990;314(4):830–833. Режим доступа: <http://www.mathnet.ru/links/85db7f533c3db5ef03948eb1cbb7bce2/dan48980.pdf>
15. 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):74–83. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83>
16. Семенова И.Э., Аветисян И.М., Земцовский А.В. Геомеханическое обоснование отработки запасов глубокого горизонта в сложных горно-геологических и геодинамических условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(12):65–73. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-65-73>

17. Котиков Д.А., Шабаров А.Н., Цирель С.В. Установление связи между распределением сейсмособытий в массиве горных пород и его тектоническим строением. *Горный журнал*. 2020;(1):28–32. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.05>
18. Han J., Zhang H., Liang B., Rong H., Lan T., Liu Y., Ren T. Influence of large syncline on in situ stress field: A Case study of the Kaiping Coalfield, China. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;49:4423–4440. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1039-4>
19. Keneti A., Sainsbury B.A. Review of published rockburst events and their contributing factors. *Engineering Geology*. 2018;246:361–373. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.005>
20. Тарасов Б.Г. Парадоксы прочности и хрупкости горных пород в условиях сейсмических глубин. *Горный журнал*. 2020;(1):11–17. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.02>
21. Козырев А.А., Жукова С.А., Батугин А.С. О влиянии обводненности массива на его сейсмическую активность при разработке апатитовых месторождений Хибин. *Горный журнал*. 2021;(1):31–36. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.06>
22. Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Исаева А.В., Бондаренко Н.Б., Патонин А.В., Казначеев П.А., Строганова С.М., Потанина М.Г., Chadha R.K., Агора К. Флюидная инициация разрушения в сухих и водонасыщенных горных породах. *Физика Земли*. 2020;(6):86–105. <https://doi.org/10.31857/S0002333720060095>
23. Costain J.K. Groundwater recharge as the trigger of naturally occurring intraplate earthquakes. *Geological Society, London, Special Publications*. 207;432(1):91–118. <https://doi.org/10.1144/SP432.9>
24. Scholz C.H. *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge Univ. Press.; 2002. 471 p.
25. Pintori F., Serpelloni E., Longuevergne L., Garcia A., Faenza L., D'Alberto L., Gualandi A., Belardinelli M.E. Mechanical response of shallow crust to groundwater storage variations: Inferences from deformation and seismic observations in the eastern Southern Alps, Italy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2021;126(2):e2020JB020586. <https://doi.org/10.1029/2020JB020586>
26. Maystrenko Y.P., Brönnner M., Olesen O., Saloranta T.M., Slagstad T. Atmospheric precipitation and anomalous upper mantle in relation to intraplate seismicity in Norway. *Tectonics*. 2020;39(9):e2020TC006070. <https://doi.org/10.1029/2020TC006070>
27. Heinicke J., Woith H., Alexandrakos C., Buske S., Telesca L. Can hydroseismicity explain recurring earthquake swarms in NW-Bohemia? *Geophysical Journal International*. 2018;212(1):211–228. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx412>
28. Renner J., Steeb H. Modeling of Fluid Transport in Geothermal Research. In: Freedon W., Nashed M., Sonar T. (eds). *Handbook of Geomathematics*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2014, pp. 1–55. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27793-1_81-2
29. Жукова С.А. Взаимосвязь гидрогеологической обстановки с активизацией сейсмичности на месторождениях Апатитовый цирк и Плато Расвумчорр. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(1):319–329.
30. Scholz C.H. *The mechanics of earthquakes and faulting*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2018. 519 p. <https://doi.org/10.1017/9781316681473>
31. Сидорин А.Я. Суточная периодичность землетрясений и ее сезонные изменения. *Сейсмические приборы*. 2009;45(4):69–84.
32. Zhirova A.M., Zhirov D.V. Sun-Moon tides and Induced Seismicity at the mines in the Khibiny massif (NE of the Fennoscandian shield). In: *Conference Proceedings The 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO (SGEM-2019), Albena (Bulgaria) 30 June – 6 July 2019*. Albena (Bulgaria); 2019, Vol. 19, pp. 967–974. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/1.1/S05.119>

References

1. Melnikov N.N. (ed.) *Seismic activity during mining works*. Apatity: Kola Science Centre RAS; 2002. 325 p. (In Russ.)
2. 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>
3. 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>
4. Kozłowska 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;111(1):409–423. <https://doi.org/10.1785/0120200111>
5. 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>
6. Gibowicz S., 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)
7. Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A. Microseismic monitoring of geodynamic phenomena in rockburst-hazardous mining conditions. *Fiziko-texnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2022;(1):12–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220102>
8. 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. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(7):5–17. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_7_0_5
9. Emanov A.A., Emanov A.F., Rebetsky Y.L., Kuprish O.V., Fateev A.V., Shevkunova E.V. Induced seismicity of the Bachat coal mine and the stress state of the earth's crust. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2021;15(6):435–444. <https://doi.org/10.1134/S0742046321060026>
10. Onokhin F.M. *Specific structural features of the Khibiny massif and apatite-nepheline deposits*. Leningrad: Nauka; 1975. 106 p. (In Russ.)
11. Kamensky G.N., Tolstikhina M.M., Tolstikhin N.I. *Hydrogeology of the USSR*. Moscow: Gosgeoltekhizdat; 1959. 366 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/5741?ysclid=labcrciikw750567859>
12. Markov G.A. *Tectonic stresses and rock pressure in the mines of the Khibiny massif*. Leningrad: Nauka; 1977. 213 p. (In Russ.)
13. Markov G.A., Savchenko S.N. *Stress-and-strain state of rocks and rock pressure in the mountainous terrain structures*. Leningrad: Nauka; 1984. 140 p. (In Russ.)
14. Syrnikov N.M., Tryapitsyn V.M. Regarding the mechanism of a mining-induced earthquake in the Khibiny. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1990;314(4):830–833. (In Russ.) Available at: <http://www.mathnet.ru/links/85db7f533c3db5ef03948eb1cbb7bce2/dan48980.pdf>
15. Kozыrev A.A., Semenova I.E., Zhuravleva O.G., Panteleev A.V. Hypothesis of strong seismic event origin in Rasvumchorr mine on January 9, 2018. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(12):74–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83>
16. Semenova I.E., Avetisian I.M., Zemtsovskiy A.V. Geomechanical modeling of deep-level mining under difficult geological and geodynamic conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(12):65–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-65-73>

17. Kotikov D.A., Shabarov A.N., Tsirel S.V. Connecting seismic event distribution and tectonic structure of rock mass. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):28–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.05>
18. Han J., Zhang H., Liang B., Rong H., Lan T., Liu Y., Ren T. Influence of large syncline on in situ stress field: A Case study of the Kaiping Coalfield, China. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;49:4423–4440. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1039-4>
19. Keneti A., Sainsbury B.A. Review of published rockburst events and their contributing factors. *Engineering Geology*. 2018;246:361–373. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.005>
20. Tarasov B.G. Paradoxes of strength and brittleness of rocks at seismic depths. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):11–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.02>
21. 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;(1):31–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.06>
22. Smirnov V.B., Isaeva A.V., Bondarenko N.B., Potanina M.G., Ponomarev A.V., Patonin A.V., Kaznacheev P.A., Stroganova S.M., Chadha R.K., Arora K. Fluid initiation of fracture in dry and water saturated rocks. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020;56(6):808–826. <https://doi.org/10.1134/S1069351320060099>
23. Costain J.K. Groundwater recharge as the trigger of naturally occurring intraplate earthquakes. *Geological Society, London, Special Publications*. 207;432(1):91–118. <https://doi.org/10.1144/SP432.9>
24. Scholz C.H. *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge: Cambridge University Press; 2002. 471 p.
25. Pintori F., Serpelloni E., Longuevergne L., Garcia A., Faenza L., D'Alberto L., Gualandi A., Belardinelli M.E. Mechanical response of shallow crust to groundwater storage variations: Inferences from deformation and seismic observations in the eastern Southern Alps, Italy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2021;126(2):e2020JB020586. <https://doi.org/10.1029/2020JB020586>
26. Maystrenko Y.P., Brønner M., Olesen O., Saloranta T.M., Slagstad T. Atmospheric precipitation and anomalous upper mantle in relation to intraplate seismicity in Norway. *Tectonics*. 2020;39(9):e2020TC006070. <https://doi.org/10.1029/2020TC006070>
27. Heinicke J., Woith H., Alexandrakos C., Buske S., Telesca L. Can hydroseismicity explain recurring earthquake swarms in NW-Bohemia? *Geophysical Journal International*. 2018;212(1):211–228. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx412>
28. Renner J., Steeb H. Modeling of Fluid Transport in Geothermal Research. In: Freedon W., Nashed M., Sonar T. (eds). *Handbook of Geomathematics*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2014, pp. 1–55. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27793-1_81-2
29. Zhukova S.A. The relationship of hydrogeological situation and activation of seismic activity on apatite circus deposit and Rasvumchorr deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(1):319–329. (In Russ.)
30. Scholz C.H. *The mechanics of earthquakes and faulting*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2018. 519 p. <https://doi.org/10.1017/9781316681473>
31. Sidorin A.Ya. Diurnal periodicity of earthquakes and its seasonal changes. *Seismicheskie Pribory*. 2009;45(4):69–84. (In Russ.)
32. Zhirova A.M., Zhirov D.V. Sun-Moon tides and Induced Seismicity at the mines in the Khibiny massif (NE of the Fennoscandian shield). In: *Conference Proceedings The 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO (SGEM-2019), Albena (Bulgaria) 30 June – 6 July 2019*. Albena (Bulgaria); 2019, Vol. 19, pp. 967–974. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/1.1/S05.119>

Информация об авторах

Козырев Анатолий Александрович – доктор технических наук, профессор, начальник отдела геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация, e-mail: a.kozyrev@ksc.ru

Семенова Инна Эриковна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник сектора прогноза удароопасности рудных месторождений, отдел геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация, e-mail: i.semenova@ksc.ru

Жукова Светлана Александровна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник сектора прогноза удароопасности рудных месторождений, отдел геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация, e-mail: svetlana.zhukova@yandex.ru

Журавлева Ольга Геннадьевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник сектора прогноза удароопасности рудных месторождений, отдел геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация, e-mail: o.zhuravleva@ksc.ru

Information about the authors

Anatoly A. Kozyrev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief of Rock Mechanics Department, Mining Institute Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation, e-mail: a.kozyrev@ksc.ru

Inna E. Semenova – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Sector of Prediction of Rockburst Hazard of Rock Deposits, Rock Mechanics Department, Mining Institute Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation, e-mail: i.semenova@ksc.ru

Svetlana A. Zhukova – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Sector of Prediction of Rockburst Hazard of Rock Deposits, Rock Mechanics Department, Mining Institute Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation, e-mail: svetlana.zhukova@yandex.ru

Olga G. Zhuravleva – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Sector of Prediction of Rockburst Hazard of Rock Deposits, Rock Mechanics Department, Mining Institute Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation, e-mail: o.zhuravleva@ksc.ru

Article info

Received: 13.10.2022

Revised: 08.11.2022

Accepted: 09.11.2022

Информация о статье

Поступила в редакцию: 13.10.2022

Поступила после рецензирования: 08.11.2022

Принята к публикации: 09.11.2022