ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(6):46-58
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 550.343+УДК 622.83 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_46

СЕЙСМИЧНОСТЬ КАК ОТРАЖЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ

И.Э. Семенова[1], О.Г. Журавлева[1], С.А. Жукова[1]

[1] Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия, e-mail: zhuravlevaog@goi.kolasc.net.ru

Аннотация: Представлены результаты исследования изменений сейсмичности массива горных пород за восьмилетний период мониторинга на участке Кукисвумчоррского месторождения со сложными горно-геологическими условиями при развитии горных работ, которые проводятся одновременно на нескольких горизонтах. Выполнен анализ сейсмических данных для оценки состояния массива горных пород на рассматриваемом участке, где были зарегистрированы сильные сейсмические события (энергетический класс $K \geqslant 6$) в январе 2016 г. и апреле 2020 г., в результате которых произошла потеря устойчивости массива и выявлены нарушения контуров горных выработок. Проведено сопоставление сейсмических данных с расчетными характеристиками действующего поля напряжений. Установлены возможные причины активизации сейсмичности, являющейся отражением процесса перераспределения напряжений, происходящего под влиянием горных работ в целом, а также проводимых практически ежедневно взрывных работ, которые могут привести к разгрузке массива или, наоборот, к росту напряжений на некоторых участках. При этом определенной сложностью при прогнозе удароопасности является тот факт, что при высоком уровне сейсмической активности на определенном участке возможно как сохранение устойчивого состояния массива, так и активизация данного процесса на разных масштабных уровнях. Представленный в работе подход является продолжением исследований по выработке комплексного критерия удароопасности для отдельных участков массива горных пород.

Ключевые слова: мониторинг, горнотехническая система, сейсмичность, геодинамическая безопасность, удароопасные месторождения, поле напряжений, напряженно-деформированное состояние, Хибинский массив.

Благодарность: Работа выполнена в рамках темы НИР 0226-2019-0058, а также при поддержке КФ АО «Апатит».

Для цитирования: *Семенова И. Э., Журавлева О. Г., Жукова С. А.* Сейсмичность как отражение изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород в процессе ведения горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 6. – С. 46–58. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_46.

Seismicity as an echo of stress–strain behavior change in rock mass in the course of mining

I.E. Semenova[1], O.G. Zhuravleva[1], S.A. Zhukova[1]

[1] Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, e-mail: zhuravlevaog@goi.kolasc.net.ru

© И.Э. Семенова, О.Г. Журавлева, С.А. Жукова. 2021.

Abstract: The article presents the studies into seismicity variation monitoring in rock mass for eight years during mining operations carried out simultaneously on a few levels in the Kukisvumchorr deposit site with difficult ground conditions. The seismic data are analyzed in order to obtain the rock mass estimate in the test site where strong seismic events (energy class K⩾6) were recorded in January 2016 and in April 2020, which induced instability in rock mass and damaged boundaries of underground excavations. The actual seismic data are compared with estimated characteristics of the effective stress field. The possible causes of activation of seismicity as an echo of stress redistribution under the influence of mining and daily blasting, which can induce either stress relaxation or stress increase, are identified. The rockburst hazard prediction can be complicated by the fact that in case of high seismic activity in some area in rock mass, both high stability of rock mass and actuation of seismicity in this site are possible. The described approach is a continuation of the research aimed at development of an integrated rockburst hazard criterion for different areas in rock mass.

Key words: monitoring, geotechnical system, seismicity, geodynamic safety, rockburst-hazardous deposit, stress field, stress–strain behavior, Khibiny Massif.

Acknowledgements: The study was carried out in the framework of R&D Topic 0226-2019-0058 and was supported by Apatit's Kirovsk Division.

For citation: Semenova I. E., Zhuravleva O. G., Zhukova S. A. Seismicity as an echo of stress–strain behavior change in rock mass in the course of mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(6):46-58. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_46.

Введение

Добыча апатит-нефелиновых руд месторождений Хибинского массива ведется в удароопасных условиях с 1929 г. При разработке удароопасных месторождений неизбежно возникает задача прогноза и предотвращения опасных геодинамических явлений различного масштаба от горных ударов до землетрясений [1—7], для решения которой применяются различные методы. С целью контроля и оценки состояния массива горных пород на рудниках Хибинского массива, как и на многих месторождениях в России и в мире, применяется сейсмический мониторинг [8—11].

Углубление и интенсификация горных работ привели к увеличению фонового уровня напряжений на отрабатываемых горизонтах. В окрестности продвигающихся фронтов горных работ отмечается увеличение зон повышенной концентрации напряжений (по площади и по абсолютным значениям). Изменение напряженно-деформированного состояния (НДС), определяемого совокупностью различных факторов как тектонических, так и технологических, в том числе постоянное взрывное воздействие, влияет на сейсмическую активность массива горных пород.

Проведение технологических взрывов может привести как к затуханию сейсмической активности (т.е. к разгрузке массива горных пород), так и, наоборот, — к ее росту. При этом необходимо учитывать, что не всегда высокий уровень сейсмической активности сопровождается потерей устойчивости массива горных пород: возможны различные ситуации от сохранения устойчивости и отсутствия нарушений контуров горных выработок до локальных проявлений горного давления, а в редких случаях до событий регионального масштаба. В связи с этим актуальной является за-

дача изучения сейсмичности как отражения изменения НДС массива горных пород на участках с осложненными горно-геологическими условиями.

Объект исследования — участок Кукисвумчоррского месторождения Кировского рудника вблизи северного фронта развития подземных горных работ, на котором Службой прогноза и предотвращения горных ударов АО «Апатит» (СППГУ) с 2014 по 2020 гг. неоднократно устанавливались зоны 1 степени удароопасности, фиксировались динамические проявления горного давления и проводились профилактические мероприятия по приведению массива горных пород в неудароопасное состояние в соответствии с действующими инструктивными документами [12].

Геомеханическая характеристика исследуемого участка месторождения

В отработке Кукисвумчоррского месторождения одновременно находятся несколько горизонтов. Максимальная глубина горных работ в настоящее время достигает 750 м. Важными характеристиками месторождения, определяющими параметры НДС и особенности нарушений контуров горных выработок, являются:

- действие на глубине ведения горных работ тектонических напряжений практически вкрест простирания рудного тела, фоновый уровень которых в два и более раз превышает уровень напряжений от действия собственного веса пород;
- крепкие вмещающие породы и руды, склонные к хрупкому разрушению;
- высокий уровень концентрации напряжений вблизи отдельных участков фронта горных работ;
- наличие разломных структур и окисленных зон.

Эти особенности определяют местоположение зон максимального проявления горного давления в динамических формах.

В районе исследований выделен ряд тектонических разрывных нарушений, которые разделяют существующий вмещающий породный массив и рудное тело на отдельные блоки с определенной вариативностью параметров НДС.

Наиболее проблемными по фактору удароопасности на Кукисвумчоррском месторождении являются отрабатываемые участки горизонта +170 м в окрестности развивающегося фронта горных работ в северо-западном направлении, что подтверждается и результатами численного моделирования НДС на основе разработанных в Горном институте КНЦ РАН программ и конечно-элементных моделей [13, 14]. Это связано с более высоким исходным уровнем максимальных сжимающих напряжений σ_{max} в северо-западной части месторождения и более низкими величинами σ_{max} в юго-восточной части (рис. 1). Данная особенность естественного поля напряжений месторождения в существенной мере обусловлена гористым рельефом дневной поверхности, достигающим максимальных высотных отметок на участке III, и условиями формирования обрушения подработанной толщи пород [15].

Техногенным фактором, определяющим формирование области концентрации σ_{max} в зоне активного ведения горных работ, является наличие неотработанных запасов треугольника висячего бока по вышележащему горизонту +250 м, где очистные работы велись в 90-х годах прошлого столетия, поэтому в настоящее время на руднике идет проходка дополнительных выработок, чтобы отбить эти запасы.

Результаты сейсмического мониторинга

На Кировском руднике с 1987 г. проводится непрерывный сейсмический

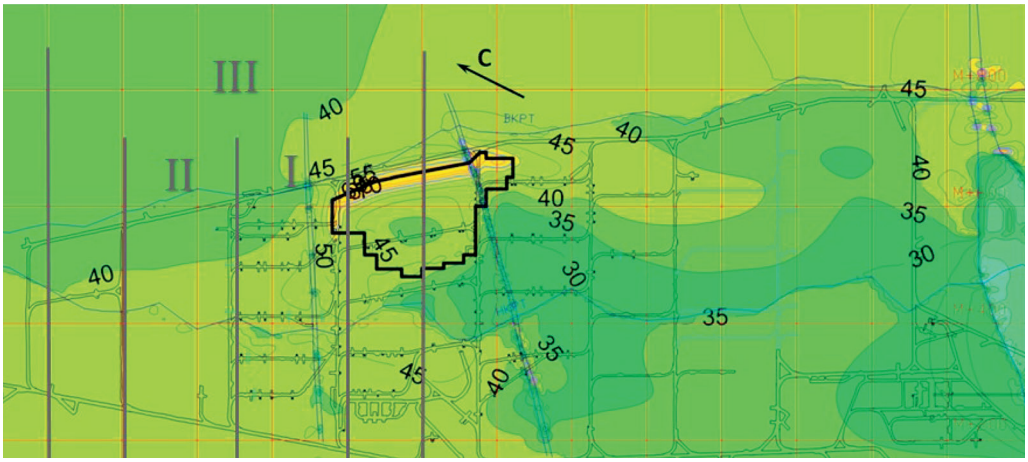


Рис. 1. Распределение σ_{max} на откаточном горизонте +170 м
Fig. 1. Distribution of σ_{max} on haulage level +170m

мониторинг автоматизированной системой контроля состояния массива (АСКСМ).

На основе результатов сейсмических наблюдений в режиме реального времени осуществляется прогноз региональной удароопасности, главной задачей которого является выявление удароопасных зон (зон 1 степени) в районе повышенной точности сейсмической сети с учетом фактора времени и оценки степени опасности [11, 12].

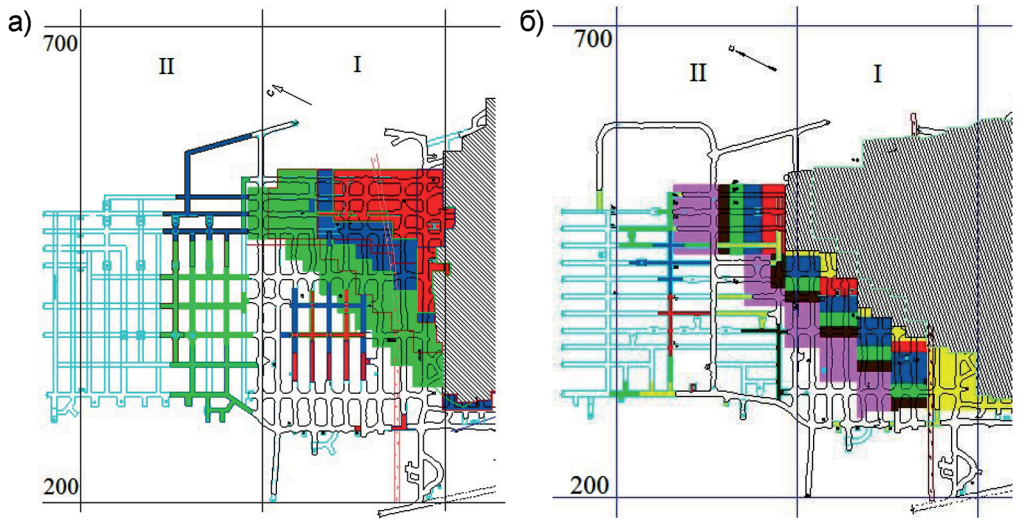
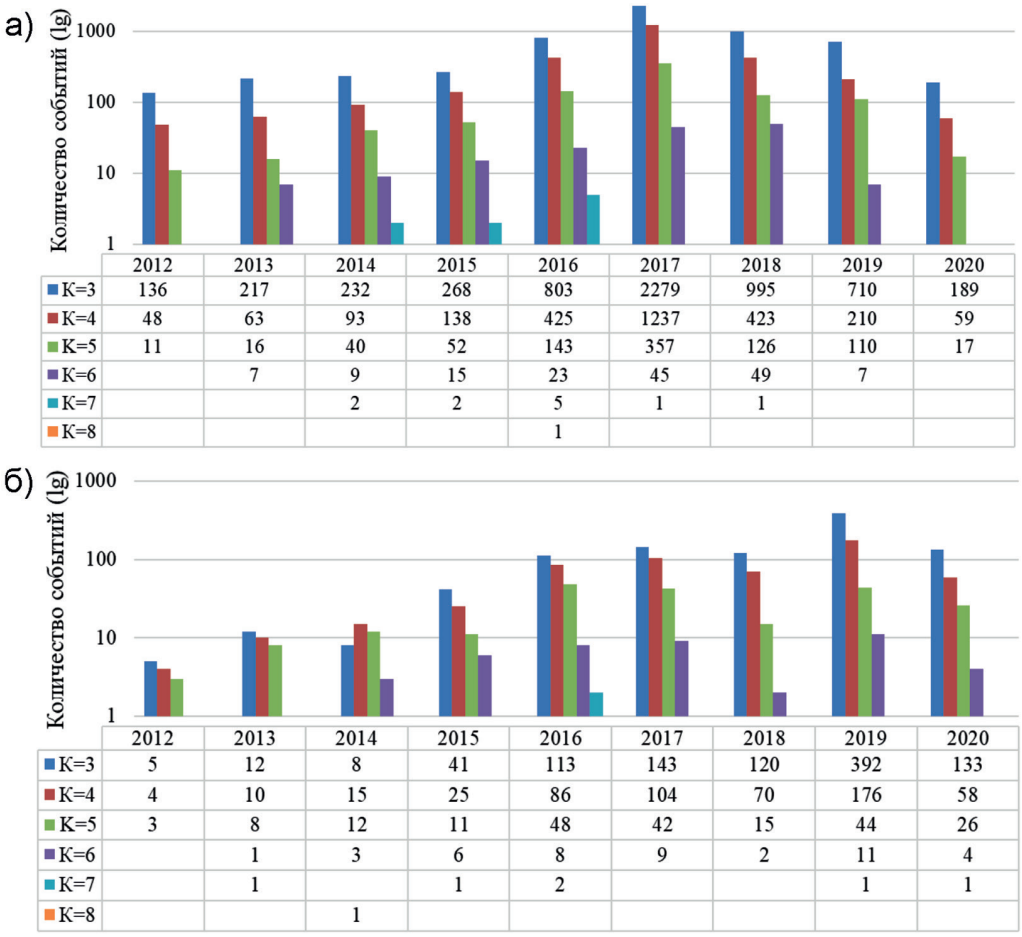


Рис. 2 Схема горных работ на отм. +236 м Кукисвумчоррского месторождения с разделением исследуемой зоны на два участка, длина участка по простиранию рудного тела — 192 м (отмечено I и II): для 2016—2018 гг. (а); для 2020 г. (б). Цветом показан порядок развития добычных и проходческих работ: красным — в 2016 г.; синим — в 2017 г.; зеленым — в 2018 г. (а); поквартально — в 2020 г., серым — очистное пространство на конец 2019 г. (б)

Fig. 2. Plan of mining operations on level +236m in Kukisvumchorr deposit, with division of the test zone into two sites. The length of the zone along the strike of the ore body is 192m (I and II). Sequences of advance in actual mining and heading operations are shown by colors: red — 2016; blue — 217; green — 2018 (a); quarterly — 2020; grey — goaf area by the end of 2019 (b)



	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
K=3	136	217	232	268	803	2279	995	710	189
K=4	48	63	93	138	425	1237	423	210	59
K=5	11	16	40	52	143	357	126	110	17
K=6		7	9	15	23	45	49	7	
K=7			2	2	5	1	1		
K=8					1				

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
K=3	5	12	8	41	113	143	120	392	133
K=4	4	10	15	25	86	104	70	176	58
K=5	3	8	12	11	48	42	15	44	26
K=6		1	3	6	8	9	2	11	4
K=7		1		1	2			1	1
K=8			1						

Рис. 3. Распределение событий по энергетическим классам для исследуемых участков рудника: участок I (а); участок II (б)

Fig. 3. Seismic events per classes of energy in the test sites of mine: site I (a); site II (b)

Рост сейсмической активности на исследуемом участке I месторождения наблюдается с 2013 г. Причиной роста являются сложные горно-геологические условия. Под влиянием комплекса различных горно-геологических факторов произошел переход сейсмичности на более высокий масштабный уровень: стали возникать сейсмические события энергетического класса K = 6. Значительная активизация сейсмичности отмечается с 2014 г.: общее количество зарегистрированных сейсмособытий увеличилось на несколько десятков и добавились события K = 7 (рис. 3, *а*). 27 января 2016 г. была зафиксирована повышенная сейсмоактивность на участке I на горизонте +170 м, которая сопровождалась динамическими проявлениями горного давления в выработках от шелушения до интенсивного динамического заколообразования. Наибольшие нарушения и многочисленные заколы были выявлены на третьем подэтаже гор. +170 м (отм. +236 м). Событие классифицировано как микроудар, причиной которого являлись действие высоких тектонических напряжений в массиве, наличие зоны

опорного давления от очистных работ горизонта +250 м и влияние консоли вышележащих покрывающих пород [16].

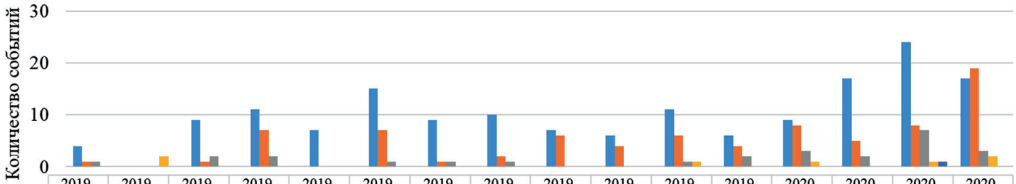
На участке II активизация сейсмичности наблюдается также с 2014 г. (рис. 3, *б*) — отмечается рост числа сейсмических событий и их энергии. На границе исследуемых участков зарегистрировано сейсмособытие энергетического класса $K = 8$. В последующие годы ситуация только усугубляется: количество событий увеличивается из года в год, что особенно заметно в 2019 г.

Первая существенная активизация сейсмичности наблюдалась в ноябре 2019 г., когда после большого перерыва произошло событие энергетического класса $K = 6$. Затем после незначительного затишья в декабре возросла сейсмическая активность: увеличилось число зарегистрированных событий всех энергетических классов. В дальнейшем активизация сейсмичности продолжилась. В марте и начале апреля произошло 3 сильных сейсмособытия энергетического класса $K = 6$ и одно энергетического класса $K = 7$ (рис. 4).

На отм. +248 м, участок II, 08 апреля 2020 г. было зарегистрировано сейсмическое событие $K = 6$, после которого были зафиксированы множественные изменения контуров горных выработок: по кровле одной из выработок выявлено нарушение набрызг-бетонного крепления и заколообразование в районе структурных нарушений; на подошве соседней выработки — изометричные обломки горной массы, обусловленные отслоением по геологическим трещинам; обрушение кусков горной массы, сформированных в зоне отжима от ранее обуренной строчки разгрузочных скважин; увеличение трещин в набрызг-бетонной крепи в целиках между выработками; очаговые нарушения набрызг-бетонной крепи по западной пяте свода выработки. Отмечается падение заколов по кровле, которое произошло в течение короткого времени, вероятно, вследствие толчка, спровоцированного сильным сейсмическим событием, подготовка которого, по-видимому, заняла длительный промежуток времени.

Анализ данных показал, что все сильные сейсмические события (энергетического класса $K = 6 \div 7$) произошли в основном через несколько часов после взрывных смен, кроме последнего события 08.04.2020 г., которое было зарегистрировано через несколько минут после двух проходческих взрывов на этом участке. После этого события до 10 апреля наблюдалась серия афтершоков, было зафиксировано 39 событий.

Для регионального прогноза удароопасности на руднике применяется ме-



	2019, январь	2019, февраль	2019, март	2019, апрель	2019, май	2019, июнь	2019, июль	2019, август	2019, сентябрь	2019, октябрь	2019, ноябрь	2019, декабрь	2020, январь	2020, февраль	2020, март	2020, апрель
K=3	4	0	9	11	7	15	9	10	7	6	11	6	9	17	24	17
K=4	1	0	1	7	0	7	1	2	6	4	6	4	8	5	8	19
K=5	1	0	2	2	0	1	1	1	0	0	1	2	3	2	7	3
K=6	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	2
K=7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Рис. 4. Распределение событий по энергетическим классам для участка II, М+350 ÷ М+550, отм. +195 м ÷ ÷ отм. +300 м

Fig. 4. Seismic events per classes of energy in site II, M+350–M+550, levels +195m–+300m

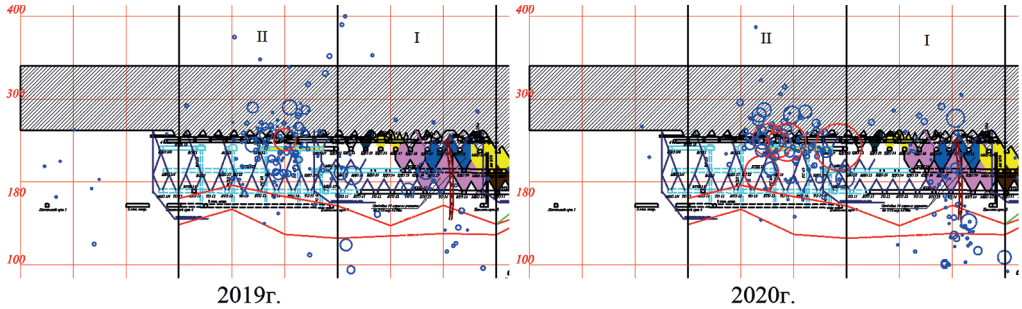


Рис. 5. Проекция сейсмических событий на разрез по М+450 м
Fig. 5. Projection of seismic events on section by M+450m

тодика, основанная на непрерывной регистрации сейсмичности. По мере продвижения горных работ проводилось развитие АСКСМ и изменялись границы района повышенной точности как для осуществления ежедневного контроля потенциально опасных участков месторождения, так и для оценки геодинамической ситуации в целом. При развитии горных работ на участке II также возникла необходимость расширения зоны контроля. В связи с этим в СППГУ было принято решение о его включении в район повышенной точности АСКСМ (с учетом регистрационных возможностей сети сейсмического мониторинга).

Благодаря этому с 25 ноября 2019 г. по 08 апреля 2020 г. своевременно были установлены зоны 1 степени удароопасности в исследуемом районе и, в соответствии с нормативными документами [12], при проведении проходческих работ в выработках были выполнены профилактические мероприятия по приведению выработок в неудароопасное состояние, возведено комбинированное крепление.

Тем не менее, несмотря на проводимые профилактические мероприятия, в результате сильного сейсмического события (энергетический класс K = 6, 08.04.2020 г.) произошла потеря устойчивости массива, следствием которой стали нарушения контуров выработок.

Состояние массива, вмещающего эти выработки, характеризуется действием

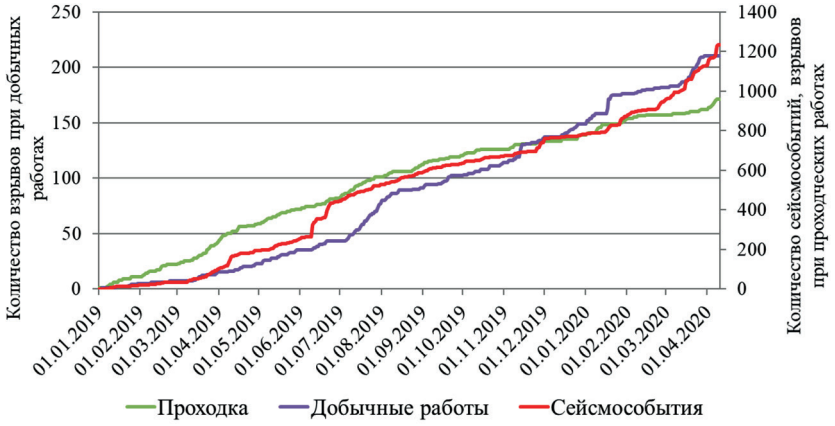


Рис. 6. Количество сейсмических событий, взрывов при проходке выработок и при добычных работах (кумулятивный график)
Fig. 6. Cumulative graph of seismic events and blasts in the course of heading and actual mining

повышенных значений сжимающих напряжений и осложняется наличием системы трещин. По-видимому, резкое изменение уровня напряжений при проведении взрывных работ нашло выход в наиболее слабом месте, которое пришлось на соседнюю выработку, и реализовалось в виде мгновенной подвижки по одной из трещин.

На рис. 5 показана проекция произошедших сейсмических событий на разрез по М+450 (выборка по магистрали от М+400 до М+500). Наибольшее количество событий приурочено к участку II. Видно, что и количество сейсмических событий, и их энергия в начале 2020 г. увеличились по сравнению с 2019 г. Такая активизация сейсмичности могла быть спровоцирована совместным влиянием тектонических, геомеханических и технологических факторов.

Сопоставление результатов сейсмического мониторинга с данными о проводимых взрывных работах (рис. 6) на исследуемом участке показало, что в день активизации сейсмичности 25 ноября 2019 г. был проведен проходческий взрыв. В этот же день было зарегистрировано событие K = 6 (расстояние между взрывом и событием около 26 м). В дальнейшем 26—27 ноября 2019 г. также проводились взрывные работы.

В период с 25 февраля по 02 марта 2020 г. отмечалась очередная активизация сейсмичности, которая напрямую не связана со взрывными работами (в этот период только 26 февраля 2020 г. был произведен один маломощный добычной взрыв), т.е. проведение взрывных работ на данном участке было приостановлено, однако массив все еще находился в неустойчивом состоянии, т.к. происходило перераспределение напряжений.

Последующая активизация сейсмичности в конце марта может быть продолжением начавшегося в феврале процесса перераспределения напряжений, который был ускорен очередными взрывными работами на участке II.

Отметим, что число взрывов при проходке выработок примерно в 1,5 раза меньше числа взрывов при добычных работах, при этом их суммарная энергия больше суммарной энергии взрывов при добычных работах почти в 3,5 раза.

Таким образом, постоянное взрывное воздействие на массив горных пород и сложная горно-геологическая обстановка привели к росту сейсмичности в исследуемом блоке. Исходя из опыта наблюдений за сейсмичностью Кукисвумчоррского месторождения, в том числе на участке I [16], нельзя исключать последующую более значительную реакцию массива горных пород на проводимые горные работы. Практика проведения взрывных работ в высоконапряженных участках показывает, что это может приводить к более существенному сейсмическому отклику массива, чем в менее напряженных участках [7, 10, 17]. В связи с этим при планировании и проведении работ рекомендуется учитывать результаты моделирования НДС массива.

Комплексирование результатов моделирования НДС и данных сейсмического мониторинга для локализации опасных зон

Совместный учет результатов сейсмических наблюдений и результатов численного моделирования НДС массива позволяет более точно оценить геомеханическое состояние массива горных пород и степень опасности динамических явлений. Участки с высоким уровнем сейсмической активности и с повышенным уровнем действующих напряжений могут быть отнесены к потенциально удароопасным, что может быть учтено при разработке соответ-

ствующих мероприятий и повысит безопасность горных работ.

На рис. 7, *а* представлена проекция сейсмических событий, произошедших в марте и начале апреля 2020 г., совмещенная с данными о распределении напряжений на участке массива на апрель 2020 г. Наиболее мощное сейсмическое событие произошло в марте 2020 г. в районе наибольшей концентрации напряжений. Остальные сильные события также произошли на участках с повышенными значениями напряжений, но их уровень ниже, чем на участке вблизи границ очистного пространства. Эти события произошли на участке массива, где осуществляется проходка выработок. При взрывном воздействии перераспределяются напряжения в массиве горных пород, что на данном участке привело к реализации сильных сейсмических событий.

Как было показано в работе [16], наиболее вероятной причиной увеличения сейсмоактивности на участке I и произошедшего 27.01.2016 г. микроудара являются проходческие работы на отм. +236 м в зоне опорного давления от очистных работ вышележащего горизонта. На участке II нарушение приконтурной части массива было вызвано рядом схожих факторов: влиянием высоких сжимающих напряжений в зоне опорного давления от очистных работ гор. +252 м и разрушением склонного к хрупкой деформации массива под воздействием подвижки, которая, возможно, была спровоцирована технологическими взрывами. К осложняющим факторам можно отнести высокую изрезанность массива выработками, пройденными перпендикулярно действию максимальных сжимающих напряжений. К улучшению ситуации может привести снижение взрывного воздействия на массив горных пород, поскольку высока вероятность того, что в сложившихся условиях один из взрывов способен стать триггером сильного сейсмического события, последствия которого можно минимизировать профилактическими мероприятиями.

Региональным мероприятием, способным привести к существенной разгрузке массива, является отбойка запасов треугольника висячего бока по вышележащему горизонту +250 м. Эффективность этой меры подтверждена прогнозным моделированием НДС (рис. 8). Чем дальше в висячий бок продвинется фронт работ по гор. +250 м, тем сильнее уменьшится зона опасной

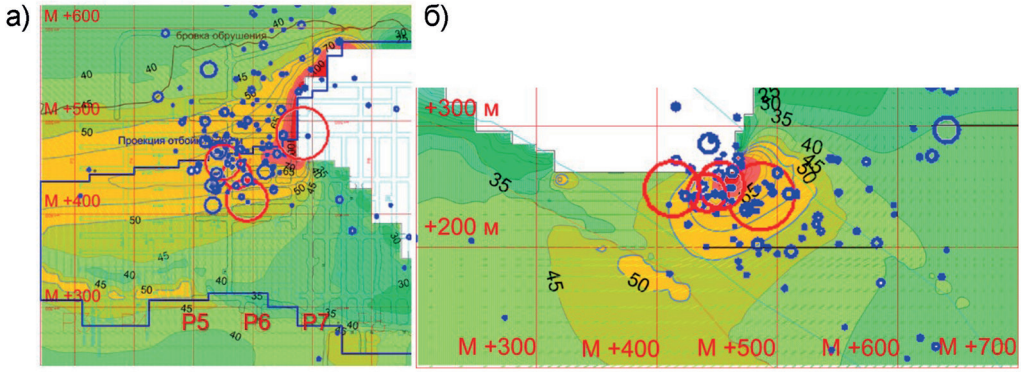


Рис. 7. Проекция сейсмических событий (март — начало апреля 2020 г.) и распределение максимальных сжимающих напряжений на апрель 2020 г.: на отм. +236 м (а); на разрез 6 (б)

Fig. 7. Project of seismic events (March–early April 2020) and distribution of maximal compressive stresses by April 2020: on level +236m (a); on section 6 (b)

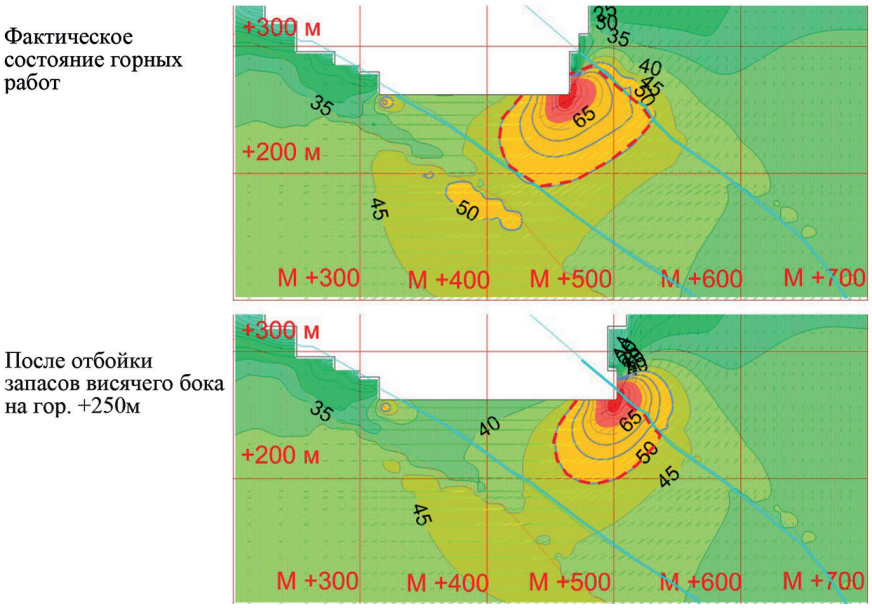


Рис. 8. Сокращение площади зоны концентрации σ_{max} в зоне активного ведения горных работ после отбойки запасов треугольника висячего бока по вышележащему горизонту +250 м

Fig. 8. Reduction in concentration zone area of σ_{max} in the zone of active mining operations after breakage of triangular hanging wall reserves on above-lying level +250m

концентрации напряжений в пределах рудного тела.

Также запланировано бурение строчки глубоких скважин для дополнительной разгрузки массива. Имитация данной ситуации показывает уменьшение действующих сжимающих напряжений в окрестности выработок висячего бока до величин ниже половины прочности пород на сжатие ($\sigma_д < 0{,}5\sigma_{сж}$).

Выводы

В высоконапряженных участках массива горных пород Кукисвумчоррского месторождения к существенной активизации сейсмичности приводит совместное действие факторов: тектонических, геомеханических и технологических.

Рост сейсмичности на исследуемых участках I и II связан не только с интенсивным ведением горных работ, но и в большей степени с горно-геологическими условиями. Осложняющими факторами также являются высокая изрезанность массива выработками, пройденными перпендикулярно действию максимальных сжимающих напряжений.

На участках наиболее высокой концентрации напряжений в зоне влияния консоли вышележащих пород с существенной тектонической и техногенной нарушенностью массив горных пород является более чувствительным к динамическому воздействию технологических взрывов при проходке горных выработок.

Выявление зон повышенной чувствительности к взрывному воздействию на основе прогнозов НДС и сейсмичности позволит при необходимости своевременно скорректировать планы развития горных работ, а также снизить в этих локальных зонах динамическую нагрузку на массив оперативно проведенными профилактическими мероприятиями.

Эффективность и безопасность ведения горных работ во многом зависит

как от долгосрочного прогноза зон концентрации напряжений, проводимого при планировании горных работ, так и от оперативного прогноза зон региональной удароопасности.

Таким образом, представленные результаты анализа сейсмических данных и численного моделирования НДС массива при разработке месторождений, опасных по горным ударам, показывают возможности как отдельных методов, так и их совместного применения при решении задач геомеханики, что позволяет более эффективно проводить оценку и прогноз состояния исследуемого объекта. Представленный подход является продолжением исследований по выработке комплексного критерия удароопасности для отдельных участков массива горных пород.

Своевременные профилактические мероприятия по приведению массива горных пород в неудароопасное состояние, а также ведущаяся службами АО «Апатит» работа по прогнозированию геодинамических явлений позволяют минимизировать риски, связанные с технологической деятельностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. *Ptáček J.* Rockburst in Ostrava-Karvina Coalfield // Procedia Engineering. 2017. Vol. 191. Pp. 1144–1151. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.289.

3. *Liu J.-P, Feng X.-T, Van Aswegen G., Blake W., Srinivasan C., Rao M. V. M. S., Zembaty Z.* Case Histories of Rockbursts at Metal Mines / Rockburst. Mechanisms, Monitoring, Warning, and Mitigation. 2018. Pp. 47–92. DOI: 10.1016/B978-0-12-805054-5.00003-2

4. *Simser B. P.* Rock burst management in Canadian hard rock mines // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. No 5. Pp. 1036–1043.

5. *Гурьев А. А.* Устойчивое развитие рудно-сырьевой базы и обогатительных мощностей АО «Апатит» на основе лучших инженерных решений // Записки Горного института. — 2017. — Т. 228. — С. 662 — 673. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.662.

6. *Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Лескова Е. В., Шевкунова Е. В., Подкорытова В. Г.* Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г.) // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 41 — 46.

7. *Козырев А. А., Семенова И. Э., Журавлева О. Г., Пантелеев А. В.* Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018 // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 12. — С. 74 — 83. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83.

8. *Mendecki A. J.* Seismic monitoring in mines. London, Chapman and Hall, 1997.

9. *Dineva S., Boskovic M.* Evolution of seismicity at Kiruna Mine / Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining, Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2017, Pp. 125 — 139, DOI: 10.36487/ACG_rep/1704_07_Dineva.

10. *Козырев А. А., Панин В. И., Савченко С. Н. и др.* Сейсмичность при горных работах. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. — 325 с.

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. — С. 42 — 46.

12. *Козырев А. А., Семенова И. Э., Рыбин В. В., Панин В. И. и др.* Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным

ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения). — Апатиты: ГоИ КНЦ РАН, АО «Апатит», 2016. — 112 с.

13. *Козырев А. А.*, *Панин В. И.*, *Семенова И. Э.*, *Рыбин В. В.* Геомеханическое обеспечение горных работ на горнодобывающих предприятиях Мурманской области // Горный журнал. — 2019. — № 6. — С. 45—50. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.05.

14. *Козырев А. А.*, *Енютин А. Н.*, *Мальцев В. А.*, *Семенова И. Э.* Методика регионального прогноза удароопасности и состояния массива пород и выбора технических решений по обеспечению безопасности и эффективности горных работ / Инновационный потенциал Кольской науки. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2005. — С. 52—56.

15. *Козырев А. А.*, *Демидов Ю. В.*, *Мальцев В. А.*, *Енютин А. Н. и др.* Указания по управлению обрушением покрывающих пород, охране сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на рудниках открытого акционерного общества «Апатит». — Апатиты: ГоИ КНЦ РАН; ОАО «Апатит», 2002. — 51 с.

16. *Козырев А. А.*, *Журавлева О. Г.*, *Семенова И. Э.* Комплексирование сейсмических данных и результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива для оценки потенциально удароопасных зон при ведении горных работ / Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Т. 2. — М.: ИФЗ РАН, 2016. — С. 77—81.

17. *Сырников Н. М.*, *Тряпицын В. М.* О механизме техногенного землетрясения в Хибинах // Доклады Академии наук СССР. — 1990. — Т. 314. — № 4. — С. 830—833. ГИАБ

REFERENCES

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

2. Ptáček J. Rockburst in Ostrava-Karvina Coalfield. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 191. Pp. 1144–1151. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.289.

3. Liu J.-P, Feng X.-T, Van Aswegen G., Blake W., Srinivasan C., Rao M. V. M. S., Zembaty Z. Case Histories of Rockbursts at Metal Mines. *Rockburst. Mechanisms, Monitoring, Warning, and Mitigation*. 2018. Pp. 47–92. DOI: 10.1016/B978-0-12-805054-5.00003-2

4. Simser B. P. Rock burst management in Canadian hard rock mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 11. No 5. Pp. 1036–1043.

5. GuryevA.A. Sustainable developmentof crude ore resources and benefication facilities of JSC «Apatit» based on best engineering solutions. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 228, pp. 662—673. [In Russ]. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.662.

6. Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., Leskova E. V., Shevkunova E. V., Podkorytova V. G. Mining-induced seismicity at open pit mines in Kuzbass (Bachatsky earthquake on June 18, 2013). *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2014, no 2, pp. 41—46. [In Russ].

7. Kozyrev A. A., Semenova I. E., Zhuravleva O. G., Panteleev A. V. Hypothesis of strong seismic event origin in Rasvumchorr Mine on January 9, 2018. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no 12, pp. 74—83. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83.

8. Mendecki A. J. *Seismic monitoring in mines*. London, Chapman and Hall, 1997.

9. Dineva S., Boskovic M. Evolution of seismicity at Kiruna Mine. *Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*, Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2017, Pp. 125—139, DOI: 10.36487/ACG_rep/1704_07_Dineva.

10. Kozyrev A. A., Panin V. I., Savchenko S. N. *Seysmichnost' pri gornykh rabotakh* [Seismicity under mining], Apatity, Izd-vo KNTS RAN, 2002, 325 p.

11. Korchak P. A., Zhukova S. A., Menshikov P. Yu. Seismic monitoring build-up and development in the production activity zone of Apatit JSC. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no 10, pp. 42—46. [In Russ].

12. Kozyrev A. A., Semenova I. E., Rybin V. V., Panin V. I. *Ukazaniya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na mestorozhdeniyakh, sklonnykh i opasnykh po gornym udaram (Khibinskie apatit-nefelinovye mestorozhdeniya)* [Guidelines on safe mining in rockburst-hazardous conditions (Khibiny apatite–nepheline deposits)], Apatity, GoI KNTS RAN, AO «Apatit», 2016, 112 p.

13. Kozyrev A. A., Panin V. I., Semenova I. E., Rybin V. V. Geomechanical support of mining operations in mines of the Murmansk region. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no 6, pp. 45 — 50. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.05.

14. Kozyrev A. A., Enyutin A. N., Mal'tsev V.A., Semenova I. E. Procedure for regional prediction of rockburst hazard and rock mass behavior, and for selection of technical solutions towards safe and efficient mining. *Innovatsionnyy potentsial Kol'skoy nauki* [The innovative potential of the Kola science], Apatity, Izd-vo KNTS RAN, 2005, pp. 52 — 56.

15. Kozyrev A. A., Demidov YU. V., Mal'tsev V. A., Enyutin A. N. *Ukazaniya po upravleniyu obrusheniem pokryvayushchikh porod, okhrane sooruzheniy i prirodnykh ob"ektov ot vrednogo vliyaniya podzemnykh razrabotok na rudnikakh otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Apatit»* [Guidance for management of overlying rock failure and protection of installations and natural objects against harmful effects of underground mining at JSC «Apatit» mines]. Apatity, GoI KNTS RAN; OAO «Apatit», 2002, 51 p.

16. Kozyrev A. A., Zhuravleva O. G., Semenova I. E. Integration of seismic data and the results of numerical modeling of the stress-strain state of the rock mass for the assessment of potentially rockburst hazardous zones during mining operation. *Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle. Chetvertaya tektonofizicheskaya konferentsiya v IFZ RAN* [Tectonophysics and Actual Issues of Geosciences: IV Tectonophysical Conference of the Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences], vol. 2, Moscow, IFZ RAN, 2016, pp. 77 — 81. [In Russ].

17. Syrnikov N. M., Tryapitsyn V. M. Mechanism on induced earthquake in the Khibiny. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1990, vol. 314, no 4, pp. 830 — 833. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Семенова Инна Эриковна[1] — канд. техн. наук,
зав. сектором, e-mail: innas@goi.kolasc.net.ru,
Журавлева Ольга Геннадьевна[1] — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: zhuravlevaog@goi.kolasc.net.ru,
Жукова Светлана Александровна[1] — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: svetlana.zhukowa@yandex.ru,
[1] Горный институт КНЦ РАН.
Для контактов: Журавлева О.Г., e-mail: zhuravlevaog@goi.kolasc.net.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.E. Semenova[1], Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector,
e-mail: innas@goi.kolasc.net.ru,
O.G. Zhuravleva[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e-mail: zhuravlevaog@goi.kolasc.net.ru,
S.A. Zhukova[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e-mail: svetlana.zhukowa@yandex.ru,
[1] Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,
184209, Apatity, Russia.
Corresponding author: O.G. Zhuravleva, e-mail: zhuravlevaog@goi.kolasc.net.ru.

Получена редакцией 04.08.2020; получена после рецензии 25.08.2020; принята к печати 10.05.2021.
Received by the editors 04.08.2020; received after the review 25.08.2020; accepted for printing 10.05.2021.