

ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ОТРАБОТКИ ПОДЗЕМНЫХ ЗАПАСОВ РУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С УЧЕТОМ КРУПНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ

И.Э. Семенова¹, И.М. Аветисян¹

¹ Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия, e-mail: i.semenova@ksc.ru

Аннотация: Представлены результаты модельных исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) при отработке подземных запасов апатит-нефелинового месторождения Олений ручей, расположенного в юго-восточной части Хибинского массива. Моделирование проведено с учетом гористого рельефа, параметров рудных тел и крупных структурных нарушений, а также данных натурных определений параметров НДС. Кроме того, слагающие массив крепкие и хрупкие породы, а также действие высоких тектонических напряжений определяют отнесение месторождения к склонным и опасным по горным ударам. Параметры разработанной авторами модели позволяют прогнозировать геомеханическую ситуацию при различной конфигурации очистных пространств на несколько лет вперед. Многовариантные расчеты НДС при последовательной отработке запасов выполнены в приложении Sigma GT, реализующем метод конечных элементов в объемной постановке. В результате анализа распределения напряжений предложены варианты разрезки и развития горных работ с низким уровнем геомеханического риска для условий месторождения. Выбор наиболее безопасного порядка выемки запасов позволит в том числе уменьшить простои, связанные с проявлениями горного давления в динамической форме, а также снизить затраты на разгрузочные мероприятия и крепление горных выработок.

Ключевые слова: тектонические напряжения, скальный массив горных пород, удароопасное месторождение, напряженно-деформированное состояние, подземные горные работы, численное моделирование, разломные структуры.

Для цитирования: Семенова И. Э., Аветисян И. М. Обоснование безопасной отработки подземных запасов рудного месторождения с учетом крупных тектонических нарушений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10. – С. 90–99. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_90.

Validation of safe underground ore mining with regard to large tectonic faults

I.E. Semenova¹, I.M. Avetisian¹

¹ Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia,
e-mail: i.semenova@ksc.ru

Abstract: The stress-strain modeling and analysis results are presented as a case-study of underground mining in Oleny Ruchei apatite-nepheline deposit in the southeast of the Khibiny Massif. The modeling took into account the mountainous terrain, parameters of ore bodies and

large faults, as well as the in-situ data on stresses and strains. The Massif is composed of strong and brittle rocks, and is subjected to high tectonic stresses, which conditions the rockburst hazard of the deposit. The authoring model enables forecasting geomechanical situations at different stoping configurations for a few years ahead. The multivariate stress-strain analysis in step-by-step mining is implemented in application Sigma GT using 3D finite element method. As a result of the stress pattern examination, alternatives of access cutting and mining advance at low geomechanical risk are proposed for the conditions of the test deposit. The safest mining sequence chosen can eliminate work stoppage because of confining pressure-induced dynamic events, as well as can cut down expenses connected with destressing activities and support installation in underground openings.

Key words: tectonic stresses, strong rock mass, rockburst-hazardous deposit, stress-strain behavior, underground mining, numerical modeling, faults.

For citation: Semenova I. E., Avetisian I. M. Validation of safe underground ore mining with regard to large tectonic faults. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(10):90-99. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_90.

Введение

В настоящее время большинство исследователей геомеханических и геодинамических процессов при разработке полезных ископаемых придерживаются концепции иерархично-блочного строения массивов скальных пород. Характер НДС иерархично-блочных массивов необходимо учитывать при обеспечении безопасности горных работ [1 – 7]. Особенности структурного строения и параметров поля напряжений апатит-нефелиновых месторождений Хибин в настоящее время достаточно хорошо изучены [8 – 10]. Одним из наименее изученных участков Хибинской апатитовой дуги является ее западная часть, где расположено месторождение «Олений ручей». В отличие от других месторождений отработка запасов здесь начата относительно недавно (в 2010 г.) акционерным обществом «Северо-Западная Фосфорная Компания». По глубине залегания рудных тел месторождение разделено на верхний и нижний ярусы, между которыми расположен слой вмещающих пород мощностью 200 – 300 м. Верхний ярус месторождения обрабатывается карьером, добыча руды из нижне-

го яруса ведется подземным способом с 2017 г. Основными геомеханическими факторами, определяющими устойчивость выработок и конструктивных элементов систем разработки на месторождении «Олений ручей», является высокая тектоническая напряженность массива пород и наличие крупных взаимно пересекающихся тектонических нарушений, разделяющих массив на блоки [11]. Для отработки верхних горизонтов подземных запасов применяется система разработки с открытым очистным пространством с дальнейшим переходом к системе с обрушением подработанных пород.

По результатам натурных исследований, выполненных на месторождении в конце 80-х годов XX в., предполагалось действие значительных по величине субгоризонтальных напряжений по простиранию рудной залежи с величинами 20 – 40 МПа на глубине отработки подземных запасов месторождения. Эти данные были взяты за основу при формировании первой геомеханической модели месторождения «Олений ручей» и принятии проектных решений по применяемым системам разработки и их параметрам [12].

Результаты натуральных геомеханических и геологических исследований

По мере развития горных работ проводилось исследование массива комплексом натуральных методов [13], а также обследование горных выработок с выявлением местоположения и параметров разрушений на их контуре, в том числе и в динамической форме (рис. 1).

Результаты измерений напряжений методом разгрузки на горизонтах +240 м, +100 м и +40 м в период 2012 – 2018 гг. подтвердили их уровень ($\sigma_{\max} = 21 - 42$ МПа) и уточнили соотношение действующих тектонических напряжений, а также показали преимущественно диагональное направление максимальной компоненты главных напряжений (таблица). При этом отличия в углах σ_{\max} с направлением на север достигают 40° ,

то есть на данный момент затруднительно однозначно определиться с генеральным направлением действующих тектонических напряжений на месторождении.

К основным геологическим особенностям нижнего яруса месторождения, выявленным за последние годы, можно отнести отсутствие выдержанных по содержанию полезной компоненты рудных тел, а также наличие крупных структурных нарушений с различными углами падения [14]. Разломными структурами, существенным образом влияющими на формирование поля напряжений в районе ведения подземных горных работ, являются Главный разлом, расположенный в висячем боку рудной залежи, и Разлом 1, секущий рудное тело и разделяющий обрабатываемый участок на два блока. Эти разломы (зоны шпреуштей-

Данные измерений напряжений методом разгрузки на месторождении «Олений ручей» Stress measurement by relaxation method at Oleny Ruchey deposit

Дата проведения измерений	№ станции	Глубина от дневной поверхности (м)	Главные напряжения			Az σ_{\max}
			σ_{\max}	$\sigma_{\text{пр}}$	σ_{\min}	
декабрь 2012 г.	1	220	36,2	10,1	2	75
декабрь 2013 г.	2	260	30,1	16	11,9	90
март 2018 г.	3	505	21,1	10,6	4,6	110,8
март 2018 г.	4	570	41,9	25,8	14,1	71,7



Рис. 1. Пример разрушений приконтурного массива горной выработки в динамической форме на руднике «Олений ручей» (фото А.В. Пантелеева)

Fig. 1. Dynamic fracture in rock mass surrounding underground opening in Oleny Ruchey Mine (picture by A. V. Panteleev)

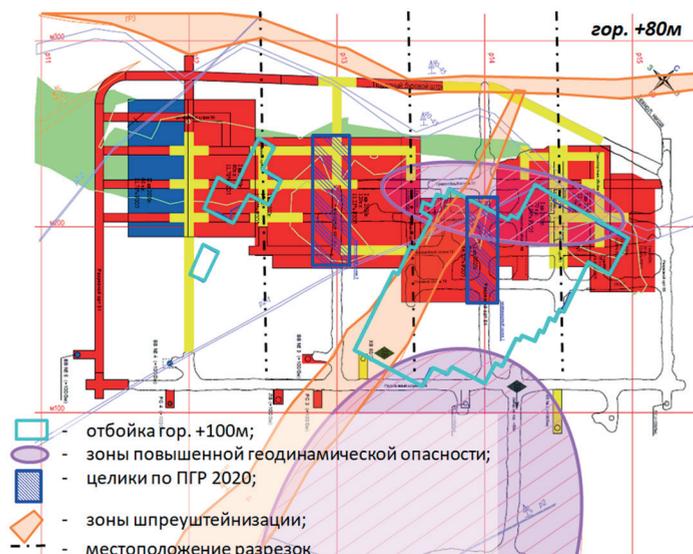


Рис. 2. Ситуационный план развития горных работ
Fig. 2. General plan of mining operations

низации) в существенной мере определяют и положение зон повышенной геодинамической опасности, выявленных службой прогноза и предупреждения горных ударов рудника (рис. 2).

В связи с получением новых данных о геомеханических и геологических условиях и особенностях его иерархиче-

ски блочного строения возникла необходимость генерации уточненной модели месторождения «Олений ручей».

Разработка уточненной конечно-элементной модели

Основным методом проведенных исследований является численное моде-

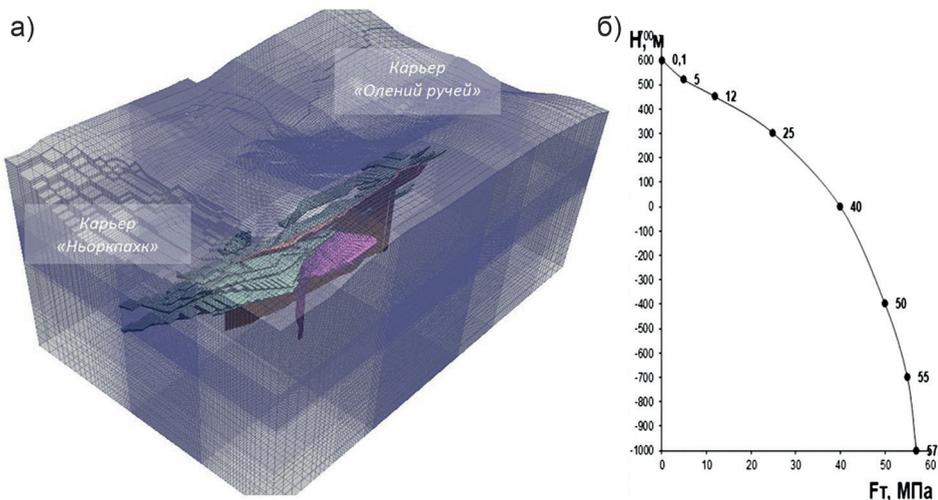


Рис. 3. Объемный вид разработанной модели (а) и изменение величин заданных тектонических сил с глубиной (б)
Fig. 3. 3D model view (a) and change in preset tectonic forces with depth (b)

лирование напряженно-деформированного состояния (НДС) массива методом конечных элементов в объемной постановке. Формирование модели и расчеты НДС выполнены в приложении Sigma GT, разработанном в Горном институте КНЦ РАН. При постановке задачи и определении граничных условий придерживались методики последовательных приближений [15].

В процессе разработки модели были учтены актуальные параметры рудной зоны, разломные структуры (Главный разлом и Разлом 1) и фактическая и проектная геометрия открытых и подземных горных работ. Область максимального сгущения сетки с размерами элемента $5 \times 5 \times 5 \text{ м}^3$ расположена в зоне ведения подземных горных работ и охватывает область, позволяющую прогнозировать геомеханическую ситуацию на разных этапах освоения месторождения на несколько десятилетий вперед (рис. 3). Расчеты НДС проводились в условиях гравитационно-тектонического нагружения модели на основе данных измерений напряжений методом разгрузки. Характер изменения тектонических напряжений на больших глубинах задавали исходя из опыта отработки и натурных определений параметров поля напряжений для других месторождений Хибинской апатитовой дуги, где отработка запасов ведется с 30-х гг. прошлого века.

Направление максимального горизонтального сжатия варьировалось. Результаты моделирования, максимально коррелирующие с фактическим состоянием горных выработок, были получены при действии σ_{\max} вкрест простирания рудной зоны и соотношении $\sigma_{\text{пр}} / \sigma_{\max} = 0,5$.

Итоговая размерность объемной конечно-элементной модели составила около 6 млн элементов, размеры в плане — $3040 \times 2000 \text{ м}$, верхняя граница

совпадает с рельефом дневной поверхности, дно модели располагается на отметке — 1000 м. Модель вместе с ПО SigmaGT используется не только для научных исследований, но и внедрена на АО «СЗФК» в качестве одного из методов прогнозной геомеханической оценки планов горных работ и обоснования мероприятий по разгрузке и креплению горных выработок.

Результаты исследований

В соответствии с действующим проектом на отработку запасов на месторождении предусмотрено применение двух систем разработки: с открытым выработанным пространством и подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды. Очистная выемка производится с оставлением междуканальных целиков (МКЦ). С увеличением глубины геомеханические условия ухудшаются, поэтому при планировании горных работ на нижележащих горизонтах необходимо обоснование порядка ведения работ; места разрезки; а в случае дополнительных разрезов — размеров МКЦ.

Формируемые целики при имеющихся фактических обнажениях не выполняют функцию поддержки, так как находятся на 80% под очистной выемкой, кроме того, они являются концентраторами сжимающих субгоризонтальных напряжений. Опирающие подработанные массива на целики висячем боку рудной залежи препятствует частичному обрушению подработанных пород в очистное пространство и созданию предохранительной породной подушки.

Расчеты НДС с использованием разработанной 3D геомеханической модели подтвердили, что данный порядок горных работ ведет к повышению безопасности участков массива между сближающимися фронтами. В целике 1 наблюдается постепенная пригрузка до величин $\sigma_{\max} \geq 0,5 \sigma_{\text{ск}}$, следовательно,

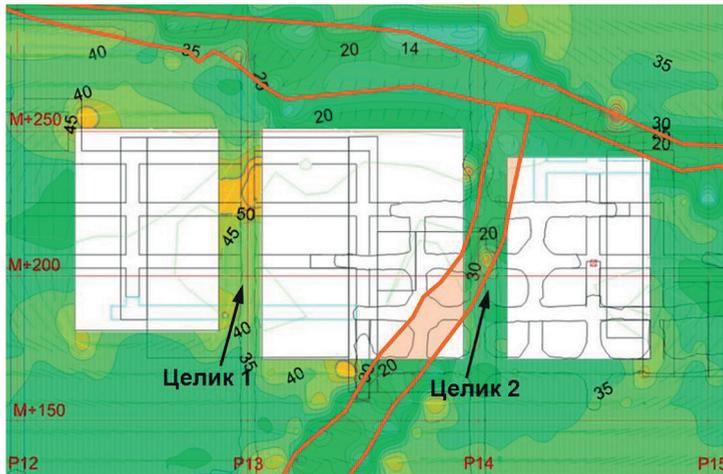


Рис. 4. Распределение напряжений σ_{\max} на гор. +80 м при моделировании ситуации в соответствии с рудничным планом горных работ

Fig. 4. Pattern of stresses σ_{\max} on Level +80 m in modeling in accordance with general mining plan

высока вероятность проявлений горного давления в динамической форме (рис. 4). НДС целика 2 осложняется наличием разломной зоны, диагонально пересекающей формируемый целик. Между данной структурой и подвигающимся фронтом работ от разрезки наблюдается концентрация напряжений с величинами σ_{\max} до 55 МПа. Чем ниже отметка подэтажа, тем выше вероятность реализа-

ции динамических событий в создаваемых целиках, вплоть до горных ударов.

Для сравнения рассмотрен вариант с развитием работ расходящимися фронтами от единой разрезки в районе Разлома 1. При этом поле напряжений в окрестности создаваемых обнажений более однородное, без дополнительных концентраторов сжимающих напряжений (рис. 5).

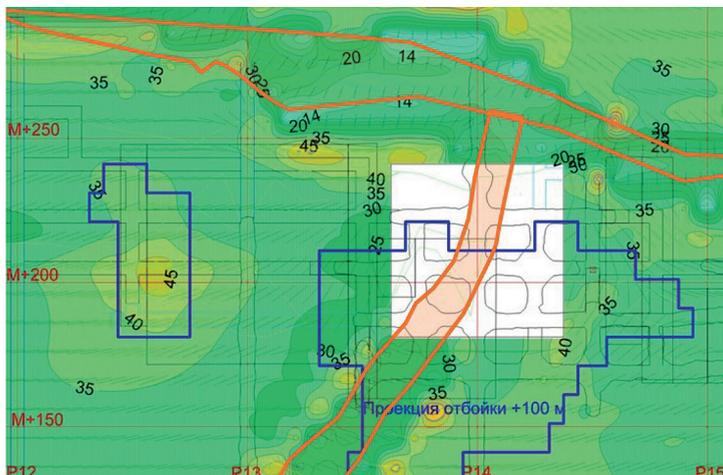


Рис. 5. Распределение напряжений σ_{\max} на гор. +80 м при моделировании ситуации для предлагаемого порядка горных работ с одной разрезкой в районе Разлома 1

Fig. 5. Pattern of stresses σ_{\max} on Level +80 m in modeling of proposed mining sequence with a single access cut in the zone of Fault 1

Наличие в массиве двух крупных разломных структур существенным образом влияет на формирование поля напряжений в районе ведения подземных горных работ. В общем случае, особенно если для разломной структуры характерно вертикальное падение, горные работы следует вести от нее расходящимися фронтами. Иначе при приближении к разломной зоне предприятие вынуждено вести работы на уменьшающийся целик, что приводит к концентрации напряжений в целике и негативно влияет на безопасность горных работ.

Для рассматриваемого участка месторождения поле напряжений имеет более сложный характер за счет взаимного влияния нескольких разломных

структур. Рассмотрим геомеханическую ситуацию при двух вариантах разрезки относительно Разлома 1 (Р 1) и последующем развитии горных работ:

- I вариант — разрезка в районе разлома Р 1;
- II вариант — разрезка на определенном удалении 40–80 м от Р 1.

Для каждого из вариантов просчитаны две стадии развития очистной выемки — непосредственно разрезка и продвижение от нее очистных работ приблизительно на 40 м в каждую сторону.

Рассмотрим результаты моделирования НДС на горизонте, где симитирована разрезка. Как видно на рис. 6, для варианта I при продвижении восточного фронта работ за разлом значения на-

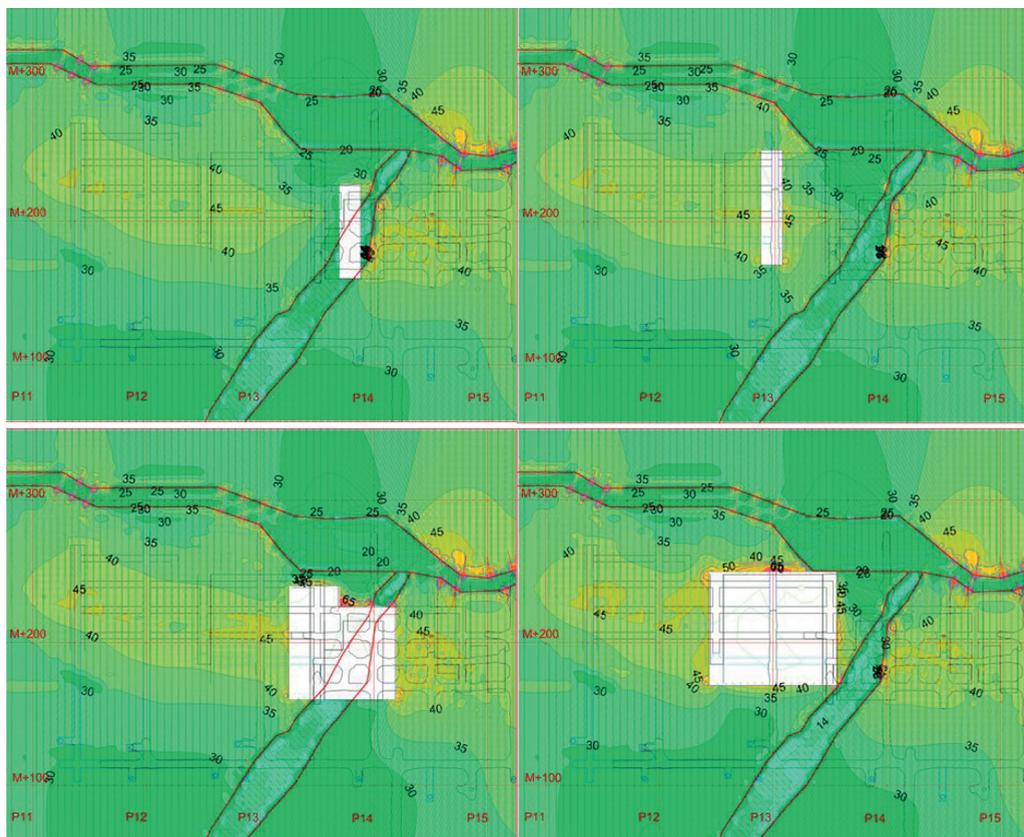


Рис. 6. Распределение напряжений σ_{\max} при разных положениях разрезки относительно разлома Р 1

Fig. 6. Pattern of stresses σ_{\max} at different positions of access cut relative to Fault 1

пряжений σ_{\max} вблизи него составляют около 45 МПа при исходных величинах в этом районе 40–45 МПа (в среднем 42,5 МПа). То есть пригрузка массива составляет около 5%.

Для варианта II значения σ_{\max} у фронта работ, приблизившегося к Р1, составляют 40–50 МПа (в среднем 45 МПа) при исходных величинах 30–35 МПа (в среднем 32,5 МПа), то есть прирост составляет более 35%. При этом в теле разлома и в породах между фронтом работ и разломом формируется зона растягивающих напряжений по минимальной компоненте главных напряжений σ_{\min} . То есть имеет место усиление контрастности поля напряжений у фронта горных работ, что может негативно сказываться на устойчивости горных пород и способствовать их разрушению. Кроме того, в данном случае больше площадь зоны концентрации σ_{\max} .

Важным является также тот факт, что при реализации I варианта быстрее растёт зона растягивающих напряжений σ_{\min} в подработанных породах всяческого бока, что будет способствовать частичному обрушению подработанной толщи пород и заполнению создаваемых обнажений обрушенными породами.

Таким образом, несмотря на нелинейный характер поля напряжений, можно сделать вывод о более предпочтитель-

ных условиях при проведении разрезки в теле разломной структуры Р1.

Выводы

Таким образом, на основе новых геологических данных о параметрах рудной зоны и крупных тектонических нарушений, результатов последних натурных исследований поля напряжений месторождения «Олений ручей» и обследования горных выработок, а также с учетом опыта сопровождения горных работ на удароопасных месторождениях Хибинского массива разработана объемная конечно-элементная модель, позволяющая прогнозировать геомеханическую ситуацию при различных порядке и технологии ведения горных работ. Результаты многовариантных расчетов НДС показали целесообразность:

- перехода на систему с поэтажным обрушением руды и развития работ от единой разрезки к флангам ниже нулевой отметки;
- осуществление разрезки на подэтажах по разломной структуре Р1.

Предлагаемый вариант развития горных работ позволит минимизировать геомеханические и геодинамические риски, что обеспечит планомерную добычу полезного ископаемого и снизит затраты на разгрузочные мероприятия и крепление горных выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сашурин А. Д. Формирование напряженно-деформированного состояния иерархически блочного массива горных пород // Проблемы недропользования. — 2015. — № 1 (4). — С. 38–44.
2. Brun J.-P., Sokoutis D. Core complex segmentation in North Aegean, a dynamic view // Tectonics. 2018, vol. 37, no. 6, pp. 1797–1830. DOI: 10.1029/2017TC004939.
3. Семинский К. Ж., Кожевников Н. О., Черемных А. В., Поспеева Е. В., Бобров А. А., Оленченко В. В., Тугарина М. А., Потапов В. В., Бурзунова Ю. П. Межблоковые зоны земной коры: внутренняя структура и геофизические поля / Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы Всероссийского семинар-совещания. — М.: ГЕОС, 2010. — С. 300–309.
4. Wenli Yao, Mostafa Sharifzadeh, Zhen Yang Assessment of block size distribution in fractured rock mass and its influence on rock mass mechanical behavior // AIP Advances. 2020, vol. 10, no. 3, article 035124.

5. Stavropoulou M. Discontinuity frequency and block volume distribution in rock masses // *International Journal of Rock Mechanics and Minings Sciences*. 2014, vol. 65, pp. 62–74. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2013.11.003.

6. Singgih Saptono, M. Rahman Yulianto, Vega Vergiagara, Herry Sofyan Rock mass classification for sedimentary rock masses in Indonesia coal mining areas // *AIP Conference Proceedings*. 2020, vol. 2245, no. 1, article 090012. DOI: 10.1063/5.0007049.

7. Хачай О. А., Хачай О. Ю. Новые системы мониторинга для обоснования шахтной сейсмичности с учетом иерархичной гетерогенности горного массива // *Проблемы недропользования*. — 2017. — № 4 (15). — С. 89–95.

8. Пожиленко В. И., Гавриленко Б. В., Жиров Д. В., Жабин С. В. Геология рудных районов Мурманской области. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. — 359 с.

9. Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах. Ч. 1. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1996.

10. Каспарьян Э. В., Савченко С. Н. Оценка напряженно-деформированного состояния массивов горных пород на основе иерархично-блочных представлений о строении земной коры / *Theory and Practice of Geomechanics for Effectiveness the Mining Production and the Construction. Proceedings of the IV-th International Geomechanics Conference*. — Varna, 2010. — С. 183–191.

11. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (месторождение «Олений ручей»). — Апатиты: Горный институт КНЦ РАН, АО «СЗФК», 2015. — 101 с.

12. Козырев А. А., Семенова И. Э., Земцовский А. В. Геомеханическое обоснование безопасных параметров системы разработки и последовательности ведения подземных горных работ на перспективном месторождении «Олений ручей» // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2010. — № 9. — С. 289–296.

13. Семенова И. Э., Земцовский А. В., Павлов Д. А. Комплексное геомеханическое исследование массива горных пород удароопасного месторождения «Олений ручей» при ведении подземных горных работ // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2014. — № 4. — С. 46–55.

14. Жиров Д. В. Тектоника фойдолитового комплекса Хибин и потенциал открытия новых апатитовых месторождений / *Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы III Тектонического совещания*. — М.: ГЕОС, 2020. — С. 223–228.

15. 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: КНЦ РАН, 2005. — С. 52–56. **ПАБ**

REFERENCES

1. Sashurin A. D. Generation of stresses and strains in structural hierarchies of blocks in rock masses. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2015, no. 1 (4), pp. 38–44. [In Russ].

2. Brun J.-P., Sokoutis D. Core complex segmentation in North Aegean, a dynamic view. *Tectonics*. 2018, vol. 37, no. 6, pp. 1797–1830. DOI: 10.1029/2017TC004939.

3. Seminskiy K. Zh., Kozhevnikov N. O., Cheremnykh A. V., Pospeva E. V., Bobrov A. A., Olenchenko V. V., Tugarina M. A., Potapov V. V., Burzunova Yu. P. Interblock zones in the crust: Internal structure and geophysical fields. *Triggernye efekty v geosistemakh. Materialy Vserossiyskogo seminar-soveshchaniya* [Trigger Effects in Geosystems: Russian Conference Proceedings], Moscow, GEOS, 2010, pp. 300–309. [In Russ].

4. Wenli Yao, Mostafa Sharifzadeh, Zhen Yang Assessment of block size distribution in fractured rock mass and its influence on rock mass mechanical behavior. *AIP Advances*. 2020, vol. 10, no. 3, article 035124.

5. Stavropoulou M. Discontinuity frequency and block volume distribution in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Minings Sciences*. 2014, vol. 65, pp. 62–74. [In Russ]. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2013.11.003.

6. Singgih Saptono, M. Rahman Yulianto, Vega Vergiagara, Herry Sofyan Rock mass classification for sedimentary rock masses in Indonesia coal mining areas. *AIP Conference Proceedings*. 2020, vol. 2245, no. 1, article 090012. DOI: 10.1063/5.0007049.

7. Khachay O. A., Khachay O. Yu. New monitoring systems for mine seismicity validation with regard to hierarchical heterogeneity of rock masses. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2017, no. 4 (15), pp. 89–95. [In Russ].

8. Pozhilenko V. I., Gavrilenko B. V., Zhirov D. V., Zhabin S. V. *Geologiya rudnykh rayonov Murmanskoy oblasti* [Geology of ore fields in the Murmansk Region], Apatity, Izd-vo KNTS RAN, 2002. 359 p.

9. *Upravlenie gornym davleniem v tektonicheski napryazhennykh massivakh*. Ch. 1 [Ground control in rock masses under tectonic stresses], Apatity, Izd-vo KNTS RAN, 1996. [In Russ].

10. Kaspar'yan E. V., Savchenko S. N. Stress–strain behavior assessment in rock mass based on the concept of structural hierarchy of blocks in the crust. *Theory and Practice of Geomechanics for Effectiveness the Mining Production and the Construction. Proceedings of the IV-th International Geomechanics Conference*. Varna, 2010, pp. 183–191.

11. *Ukazaniya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na mestorozhdeniyakh, sklonnykh i opasnykh po gornym udaram (mestorozhdenie «Oleniy ruchej»)* [Guideline on safe mining in rockburst-hazardous conditions (Oleny Ruchei deposit)], Apatity, Gornyy institut KNTS RAN, AO «SZFK», 2015. 101 p. [In Russ].

12. Kozyrev A. A., Semenova I. E., Zemtsovskiy A. V. Geomechanical validation of safe parameters and sequence for underground mining in promising field of Oleny Ruchei. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 9, pp. 289–296. [In Russ].

13. Semenova I. E., Zemtsovskiy A. V., Pavlov D. A. Integrated geomechanical survey of rockburst-hazardous deposit Oleny Ruchei subjected to underground mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no. 4, pp. 46–55. [In Russ].

14. Zhirov D. V. Khibiny foidolite zone tectonics and discovery potential of new apatite deposits. *Fundamental'nye problemy tektoniki i geodinamiki. Materialy LII Tektonicheskogo soveshchaniya* [Basic Problems of Tectonics and Geodynamics: LII Tectonic Conference Proceedings], Moscow, GEOS, 2020, pp. 223–228. [In Russ].

15. Kozyrev A. A., Enyutin A. H., Mal'tsev V. A., Semenova I. E. Regional rockburst hazard and rock mass condition forecast procedure and selection of engineering solutions for safe and efficient mining. *Innovatsionnyy potentsial Kol'skoy nauki* [Innovative Potential of Kola Science], Apatity, KNTS RAN, 2005, pp. 52–56. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Семенова Инна Эриковна¹ – канд. техн. наук,

зав. сектором, e-mail: i.semenova@ksc.ru,

Аветисян Иван Михайлович¹ – канд. техн. наук,

старший научный сотрудник,

¹ Горный институт КНЦ РАН.

Для контактов: Семенова И.Э., e-mail: i.semenova@ksc.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.E. Semenova¹, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, e-mail: i.semenova@ksc.ru,

I.M. Avetisian¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,

¹ Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia.

Corresponding author: I.E. Semenova, e-mail: i.semenova@ksc.ru.

Получена редакцией 24.02.2021; получена после рецензии 13.05.2021; принята к печати 10.09.2021.

Received by the editors 24.02.2021; received after the review 13.05.2021; accepted for printing 10.09.2021.