

ISSN 1999-4125 (Print)

**ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД, РУДНИЧНАЯ  
АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА  
GEOMECHANICS, DESTRUCTION OF ROCKS BY EXPLOSION,  
MINE AEROGASDYNAMICS AND MINING THERMOPHYSICS**

Научная статья

УДК 622.8

DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-56-70

**ВЫБОР ТИПОВ И ПАРАМЕТРОВ КРЕПЕЙ В УСЛОВИЯХ ПОДЗЕМНОЙ  
ОТРАБОТКИ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ****Онуприенко Вячеслав Сергеевич<sup>1</sup>, Еременко Андрей Андреевич<sup>2</sup>,  
Шапошник Юрий Николаевич<sup>2</sup>, Копытов Александр Иванович<sup>3</sup>,**<sup>1</sup>КФ АО «Апатит»<sup>2</sup>Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН<sup>3</sup>Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

\*для корреспонденции: ushakovkju@kuzstu.ru

**Информация о статье**

Поступила:

23 марта 2023 г.

Одобрена после  
рецензирования:

10 мая 2023 г.

Принята к публикации:

25 мая 2023 г.

Опубликована:

15 июня 2023 г.

**Ключевые слова:**руда, месторождение,  
система разработки,  
выработка, крепь,  
трещиноватость, анкер,  
сдвиг, напряжение.**Аннотация.**

В связи с ростом добычи руды и глубины горных работ вопросы поддержания выработок в условиях действия высоких напряжений приобретают большое значение, т.к. это связано с ростом объемов проведения капитальных, подготовительных и очистных выработок как в зоне, так и вне зоны очистных работ. Устойчивость выработок обеспечивается за счет применения железобетонной и монолитной бетонной крепи, а также облегченными типами крепей. Однако на выбор типа крепи оказывают влияние горно-геологические и геомеханические особенности пород, технологии разработки, особенно на Кировском руднике, который отрабатывает два месторождения апатит-нефелиновых руд. Целью настоящего исследования является выбор типов и параметров крепей при отработке апатит-нефелиновых руд с обеспечением безопасности горных работ. По данным численного моделирования и экспериментальных исследований в горнотехнической системе Кировского рудника ГИ КНЦ РАН определены величины наибольших напряжений, которые оказывают значительное влияние по вопросам выбора типа крепи выработок. Рассчитаны параметры крепи с определением размера нарушенной зоны вокруг выработки. Рассмотрены параметры облегченных типов крепей: выявлены их рациональное количество, длина, сечение, характеристики материала и др. в зависимости от трещиноватости массива, параметров выработки, категории состояния выработок и т.п. Дана рейтинговая система, разработанная Н. Бартоном, которая оценивает влияние таких факторов, как прочность, глубина разработки, сечение выработок и напряженное состояние массива, количество и состояние трещин. Приведена номограмма по выбору типа и параметров крепи относительно Q-рейтинга и пролета выработки. Приведен показатель качества породы RQD.

*Для цитирования:* Онуприенко В.С., Еременко А.А., Шапошник Ю.Н., Копытов А.И. Выбор типов и параметров крепей в условиях подземной отработки апатит-нефелиновых месторождений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 2 (156). С. 56-70. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-56-70, EDN: JHCIL

В связи с ростом добычи руды на больших глубинах в условиях действия высоких тектонических напряжений и нарушенности массива горных пород вопросы поддержания горных выработок приобретают все большее значение [1, 2]. Развитие горных работ связано с ростом объемов проведения и крепления капитальных, подготовительных и очистных выработок, которые расположены в зоне и вне зоны очистных работ [3, 4]. До определенного времени устойчивость выработок в большинстве случаев обеспечивалась за счет применения железобетонной, монолитной бетонной и металлической рамной из профиля СВП крепей. Однако бетонная крепь не всегда обеспечивает их надежное поддержание. На сегодняшний день назрела необходимость при креплении выработок в неустойчивых вмещающих породах перехода от тяжелых и трудоемких в установке металлических рамных крепей из спецпрофиля к более дешевому и технологически более легковозводимому (без снижения несущей способности крепей) армированному торкретбетону с армокаркасами [5]. Особая роль отводится облегченным типам крепей. В этом случае возникает необходимость детального исследования влияния горно-геологических и геомеханических особенностей пород, а также технологии разработки на особенности крепления выработок в условиях Кировского рудника, который отрабатывает два месторождения апатит-нефелиновых руд: Кукисвумчоррское и Юкспорское. Данные месторождения являются частями единой апатитовой залежи юго-западного рудного поля Хибинского массива [6]. Залежь имеет сложную пласто-линзообразную форму и распространяется на 12 км. Размеры месторождений по простиранию около 2,4-3,35 км, по падению более 1,5 км. Апатит-нефелиновые руды месторождений Кукисвумчорр и Юкспор состоят в основном из апатита (20-90%), нефелина (10-70%), эгирина (5-20%), полевого шпата (0,5-4%), сфена (до 5%) и титаномагнетита (2-3%) [7].

По данным численного моделирования и экспериментальных исследований в горнотехнической системе Кировского рудника КФ АО «Апатит» на глубине 550 м величина наибольшего напряжения составляет около 20-30 МПа, а на глубине 550 м – около 40 МПа, что оказывает влияние на выбор типа крепи выработок [6, 8].

На рудниках КФ АО «Апатит» определение параметров крепи осуществляется с установления размера нарушенной зоны ( $h_n$ ) вокруг выработки [9]:

$$h_n = 0,02(7,5 + l_t + 2K_c + 6,5B) K_y, \quad (1)$$

где  $l_t$  – интенсивность трещиноватости, шт./м;  $K_c$  – показатель, характеризующий категорию состояния выработки,  $B$  – ширина выработки, м;  $K_y$  – показатель, характеризующий условия эксплуатации выработки и геометрические особенности сопряжений выработок (вне и в зоне влияния очистных работ, соответственно, 1-2 и 1,6-3,2).

Рассмотрим параметры некоторых облегченных типов крепей, а именно:

анкерная крепь, длина которой  $l_a$  определяется по формуле:

$$l_a = h_n + l_3 + l_B, \quad (2)$$

где  $h_n$  – длина замка или закрепляющая часть анкера, м;  $l_B$  – выступающая в выработку часть анкера, м.

В зависимости от структуры и прочности пород параметры анкерной крепи для подготовительных выработок определяются принятой схемой работы крепи [10]. При этом целесообразно рассчитывать параметры анкерной крепи по двум наиболее распространенным схемам:

- подвешивание – «подшивка», когда замки анкеров или закрепляющие части анкеров располагаются за пределами возможного свода обрушения пород или в основной кровле;
- формирование несущей породной балки – «сшивка».

Количество анкеров в сечении выработки равно:

$$h_n = \frac{1,3B - a}{a}, \text{ шт.}, \quad (3)$$

где  $B$  – ширина выработки, м;  $a$  – шаг расстановки анкерной крепи, на 1 м.

Параметры железобетонных (ЖБИ), сталеполимерных (СПА), композитобетонных (КБА) и композитополимерных (КПА) включают величину  $l_3 = 0,5$  м, где минимальный диаметр стержня анкера ( $d_a^{1 \times 1}$ ) при квадратной сетке  $1 \times 1$  м определяется по формуле:

$$d_a^{1 \times 1} = 192 \sqrt{\frac{h_n}{R_{cm}}}, \quad (4)$$

где  $R_{cm}$  – нормативное сопротивление материала стержня на растяжение на пределе упругости, 300-1670 МПа.

Параметры трубчатых гидрораспорных анкеров (ТГРА) и забивных фракционных анкеров (ЗФА) состоят из определения необходимой длины анкера при сетке  $1 \times 1$  м не менее 0,5 м заделки:

$$l_3 = l_a^{1 \times 1} \cdot a^2, \text{ м}, \quad (5)$$

где  $a$  – шаг расстановки анкерной крепи, м.

Для клинораспорных анкеров (КРА) величина заделки определяется из выражения:

$$a = 0,12 \sqrt{\frac{N_3}{h_n}}, \text{ м}, \quad (6)$$

где  $N_3$  – несущая способность замка анкера, кН, при этом минимальный размер стержня анкера составляет:

$$d_a = 30 \sqrt{\frac{N_3}{R_{cm}}}, \text{ мм}. \quad (7)$$

Состояние массивов горных пород определяется тремя составляющими – свойствами горных пород, слагающих их; структурными особенностями и естественным напряженным состоянием, что определяет их существенную неоднородность.

Накопленный опыт по изучению устойчивости массивов горных пород в различных горно-геологических и горнотехнических условиях был применен при составлении различных их классификаций. Исходя из принадлежности горной породы к тому или иному классу, определяют способы поддержания горных выработок, проводимых в данных породах.

В настоящее время существует огромное разнообразие классификации устойчивости горных массивов. Так, устойчивость выработок характеризуют коэффициентом устойчивости  $K_y$ , который определяется по формуле [11]:

$$K_y = \frac{\sigma_n \cdot K_\sigma}{\sigma_{сж} \cdot K_{co} \cdot K_\delta}, \quad (8)$$

где  $\sigma_n$  – величина напряжений в нетронутом массиве по заданному направлению, МПа (рекомендуется принимать при неизвестном соотношении сил  $\sigma_n = \gamma \cdot H$ , где  $\gamma$  – объемный вес пород, МН/м<sup>3</sup>;  $H$  – глубина расположения выработки, м);  $K_\sigma$  – коэффициент концентрации напряжений на контуре выработки (в зависимости от формы сечения одиночной выработки коэффициент концентрации напряжений имеет следующие значения: арочная – 2,5; сводчатая – 3; прямоугольная – 3,5);  $\sigma_{сж}$  – прочность пород на сжатие, МПа;  $K_{co}$  – коэффициент структурного ослабления пород в массиве;  $K_\delta$  – коэффициент, учитывающий влияние времени стояния на устойчивость пород (при сроке службы выработок до 1 года  $K_\delta = 0,85-0,9$ ; до 5 лет  $K_\delta = 0,75-0,8$ ; более 5 лет  $K_\delta = 0,65-0,7$ ).

На основе критерия ( $K_y = 0,2-3,0$  и более) определено пять категорий устойчивости выработок.

В нормативном документе [12] рекомендован расчет устойчивости пород и нагрузок на крепь, выбор типа крепи для горизонтальных и наклонных горных выработок на основе величины смещения пород на контуре поперечного сечения выработки за весь срок ее службы без крепи. Устойчивость руд и пород согласно [13] зависит от их крепости, трещинной и тектонической нарушенности, степени серицитизации, хлоритизации и окремненности. На

Таблица 1. Классификация руд и пород по устойчивости  
Table 1. Classification of ores and rocks by stability

Категория	Степень устойчивости	Допустимая площадь обнажения и необходимость крепления	Горизонтальный пролет, м
I	весьма устойчивые	не требуют крепления при обнажении и длительном стоянии на площади 1000 м <sup>2</sup> и более	>22
II	устойчивые	допускают обнажение без крепления до 600 м <sup>2</sup> , при длительном стоянии требуют крепления только в ослабленных местах	17
III	средней устойчивости	допускают обнажение без крепления до 100 м <sup>2</sup> , но требуют крепления при длительном стоянии	7
IV	неустойчивые	допускают обнажение без крепления до 10 м <sup>2</sup> , но требуют крепления при длительном стоянии	2
V	весьма неустойчивые	исключают обнажение без крепления	-

Таблица 2. Выбор типа крепи по категориям устойчивости пород  
Table 2. Selection of the type of support by categories of rock stability

Категория устойчивости и пород	Тип крепи	Характер взаимодействия с породами	Требуемые виды крепления
I	Без крепи	Отсутствие нагрузок на крепь	-
II	Без крепи и изолирующая при породах, склонных к выветриванию	Отсутствие нагрузок на крепь, возможны местные локальные разрушения пород	Тонкое изолирующее покрытие из набрызгбетона при продолжительном существовании выработки в породах, склонных к выветриванию
III	Упрочняющая	Упрочнение окружающих выработку пород, обеспечение совместных смещений нарушенных пород	Набрызгбетон. Различные виды анкерной (штанговой) крепи. Комбинированная (анкер+ набрызгбетон или сетка)
IV	Поддерживающая	Работа в режиме вывалообразования и отслоения пород	Арочная металлическая. Монолитная бетонная. Комбинированная (различные виды анкеров+ сетка+ усиленный набрызгбетон). Деревянная
V	Подпорная в системе «крепь-порода»	Работа в режиме совместного деформирования с массивом, режим «взаимовлияющей деформации»	Требуется применение специальных методов проходки для перевода пород в более высокую категорию устойчивости, т.е. применение податливых крепей в комбинации с опережающими и предохранительными крепями, либо необходимо инъецирование пород

устойчивость пород также влияет форма и размеры обнажений, время их существования, взрывные работы, расстояние до очистного пространства и др. факторы. Выбор типов крепи выработок, расположенных вне зоны влияния очистных работ, производится по категориям устойчивости руд и пород (Табл. 1).

Выбор типа крепи по категориям устойчивости пород приведен в Табл. 2. Недостатком данной классификации является сложность определения категории устойчивости горных пород. Категории устойчивости массива устанавливаются в зависимости от ранее полученного опыта. Таким образом, для установления категории устойчивости согласно данной классификации требуется выполнить ряд промышленных испытаний с различными размерами обнаженной кровли. Данная классификация не применима на этапе проектирования горных выработок, когда нет информации о степени устойчивости обнаженного массива горных пород.

Таблица 3. Классификация массивов по рейтингу *RMR*  
 Table 3. Classification of arrays by *RMR* rating

Рейтинг массива <i>RMR</i>	Класс скального массива	Оценка устойчивости	Среднее время устойчивости	Сцепление в массиве, МПа	Угол внутреннего трения, град.
100 - 81	I	весьма устойчивые породы	20 лет при пролете 15 м	> 0,4	> 45
80 - 61	II	Устойчивые породы	1 год при пролете 10 м	0,3÷0,4	35 - 45
60 - 41	III	породы средней устойчивости	1 неделя при пролете 5 м	0,2÷0,3	25 - 35
40 - 21	IV	Неустойчивые породы	10 ч при пролете 2,5 м	0,1÷0,2	15 - 25
< 21	V	Весьма неустойчивые породы	30 мин при пролете 1 м	< 0,1	< 15

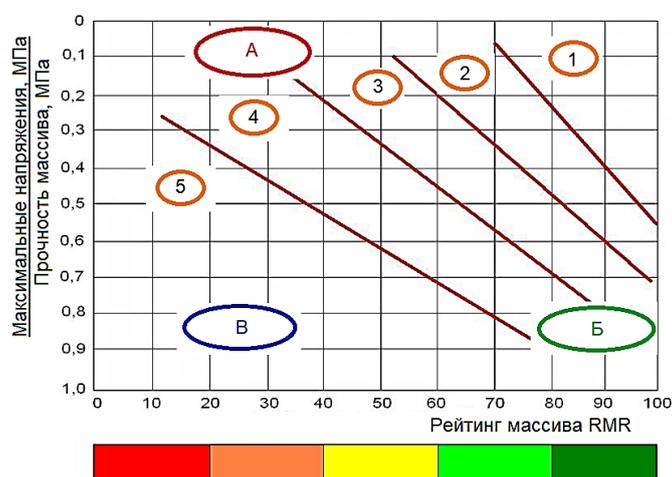


Рис. 1. Графики зависимости времени устойчивости выработок от пролета обнажения по системе *RMR*: типы крепи 1 – без крепления; 2 – легкая крепь (торкретбетон, анкерная); 3 – крепь средней тяжести (усиленная комбинированная); 4 – тяжелая крепь (металлическая анкерная, монолитная железобетонная); 5 – поддержание постоянных выработок нецелесообразно; формы неустойчивых пород в выработках А – вывалы, отслоения по поверхностям ослабления под действием собственного веса; Б – разрушения горных пород в зонах концентрации напряжений; В – сдавливание выработок на большой глубине

Fig. 1. Graphs of the dependence of the stability time of workings on the exposure span according to the *RMR* system: types of support 1 – without fastening; 2 – light support (shotcrete, anchor); 3 – medium-weight support (reinforced combined); 4 – heavy support (metallic anchor, monolithic reinforced concrete); 5 – maintenance of permanent workings is impractical; forms of unstable rocks in the workings А – fallout, foliation on the surfaces of weakening under the action of its own weight; Б – destruction of rocks in stress concentration zones; В – compression of workings at great depth

Существующий на сегодняшний день подход к выбору типов и параметров крепления выработок основан на результатах исследований, проведенных в конце XX века. За прошедшее время существенно изменились условия разработки месторождений, в том числе повысилась глубина ведения горных работ, появились новые конструкции крепи, разработаны современные подходы оценки устойчивости массива. Как показывает опыт проведения горных выработок, при проектировании крепи необходимо дополнительно учитывать следующие факторы: геологические условия месторождения; физико-механические свойства горных пород; обводненность выработки; напряженно-деформированное состояние массива; трещиноватость массива и др.

Применяемая до недавнего времени методика выбора типов и параметров крепления выработок имеет ряд вышеописанных недостатков, которые не позволяют достаточно полно оценивать устойчивость массива горных пород. Более точный выбор рациональных видов и параметров крепления горных выработок может осуществляться на основе определения рейтинговых оценок свойств и качества трещиноватого массива – рейтинга, анализа накопленных данных по устойчивости массивов горных пород и руд и выделения геомеханических доменов горных пород и руд.

Свойства массивов горных пород достаточно разнообразны, и для описания их характеристик возникла необходимость систематизации и сведения к общему числовому показателю. Классификации массивов являются основой эмпирического подхода к проектированию различных сооружений в скальных массивах и нашли в этой области широкое распространение. Инженеры предпочитают численные значения качественным описаниям, и поэтому количественные классификации являются полезными при проведении изысканий и проектировании горных работ.

Данные системы оценки качества были с большим успехом использованы при проектировании в Австрии, Южной Африке, Соединенных Штатах, Индии и Европе. Разработкой классификаций массивов горных пород занимались такие ученые, как М.М. Протодяконов, Дир (*RQD*), Мюллер, Франклин, Терцаги, Бартон, З. Бениявски (*RMR*), Романа (*SMR*), Лобшир (*MRMR*), Булычев Н.С. и др. [14].

История классификаций массивов горных пород насчитывает уже более 100 лет. Одной из первых была классификация Риттера. В России, а также на постсоветском пространстве, широко известна классификация горных пород М.М. Протодяконова по коэффициенту крепости, которая широко используется до настоящего времени. Особой популярностью за рубежом при выборе крепления выработок используют два критерия по устойчивости массивов: классификация Бениявски (*RMR*) и критерий Бартона (*Q*) [15].

Геомеханическая классификация или рейтинг массива горных пород *RMR* ((*Rock Mass Rating*)) была разработана З. Бениявски в Южно-Африканском совете по научным и промышленным исследованиям (*CSIR*) [16-18]. В систему вносили изменения по мере поступления новых данных, полученных в ходе исследований. Одна из последних версий *RMR* была принята в 1989 году.

Для оценки устойчивости массива применим рейтинг массива горных пород *RMR*. В нем для оценки склонности горных пород к вывалам, отслоениям при их обнажении в кровле выработок (Рис. 1) используются шесть параметров, определяющих устойчивость горных выработок. К ним относятся: прочность породы на одноосное сжатие, качество массива по выходу керна *RQD*, расстояния между трещинами, характеристика трещин, обводненность выработки, ориентация трещин.

Для каждого параметра заданы градации (интервалы) его изменения, из которых необходимо выбрать соответствующую характеристику оцениваемого массива. Обычно эти границы совпадают с основными геологическими структурами или характеризуются изменением типов пород. Для каждой градации каждого параметра предложена шкала оценки данного параметра в баллах. Каждый параметр оценивается в баллах независимо от других показателей. В зависимости от рейтинга *RMR* принимается следующая классификация массивов по устойчивости (Табл. 3). На основе классификации и эмпирических данных были созданы графики зависимости времени устойчивости выработок от пролета обнажения по системе *RMR* (Рис. 1).

В сложных горно-геологических условиях и в условиях высокого горного давления, повышенной трещиноватости пород и др. способы крепления корректируются с учетом проведения геотехнической оценки состояния массива и уточняются с использованием программ численного моделирования *Map3D* и *Rocscience*. [19]. Съёмка трещиноватости массива в горных выработках выполняется линейным методом массовых замеров (*ScanlineMapping*). Инструментально (горным компасом) измеряется угол и азимут падения трещин (*Dip & Dip Direction*).

Трещиноватость пород Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений Кировского рудника представлена четырьмя системами трещин: 60% составляют пологопадающие и наклонные трещины 1-й системы, около 40% – крутопадающие трещины 2-4 систем. В натуральных

условиях редко имеется возможность определить выраженный тип сети трещин, чаще всего происходит смешение нескольких типов систем и наложение искусственной трещиноватости [20].

Показатель качества породы *RQD* (Rock Quality Designation), предложенный Диром в 1967

Таблица 4. Значение *RQD* и объемная трещиноватость массива

Table 4. *RQD* value and volume fracturing of the array

Классы	Описание состояния массива	Количество трещин на 1 м <sup>3</sup>	Значение <i>RQD</i>
A	весьма слабое	> 27	0-25
B	слабое	20-27	25-50
C	среднее	13-19	50-75
D	хорошее	8-12	75-90
E	отличное	0-7	90-100

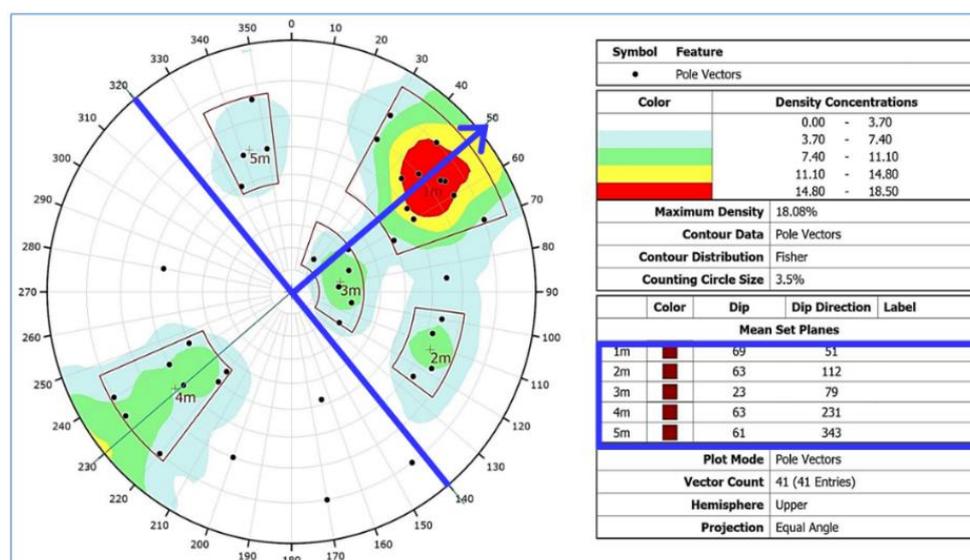


Рис. 2. Обработка съемки трещиноватости массива на месторождении

Fig. 2. Processing of the fracturing survey of the massif at the field

году, определяется соотношением общей длины сохранных кусков керна длиной более 10 см (или два диаметра керна) к длине пробуренного интервала в скважине. Используя значения *RQD*, выделяют пять классов горных пород, которые приведены в Табл. 4.

Расчет значений *RQD* может также производиться по формуле Хадсона:

$$RQD = 100 \times (0,1 \times FF + 1) \times \exp(-0,1 \times FF), \quad (9)$$

где *FF* – количество трещин на 1 м.

Обработка результатов съемки проводится с помощью программ Dips и Unwedge компании RocScience (Canada). В качестве примера приведена круговая диаграмма трещиноватости массива на одном из рудников ТОО «Корпорация «Казахмыс» (Рис. 2).

По результатам моделирования в программе Unwedge устанавливаются критические направления по существующим системам трещин, по которым образуются максимальные клинья, то есть направления проходки в данных азимутах будет сопровождаться риском больших клиновидных обрушений. На Рис. 3 показаны возможные вывалы в выработках со средним азимутом проходки 70° (орт) и 160° (штрек). Далее устанавливаются наиболее опасные направления проходки выработок по условию вывалообразования при определенной комбинации систем трещин.

Использование того или иного программного обеспечения зависит от горных условий и механизмов вывалов [21]: при вывалах блоков пород по трещинам – программа Unwedge; раздавливание пород большим давлением в зонах концентрации – программа Examine; при сдавливании выработок на большой глубине – программа RockSupport.

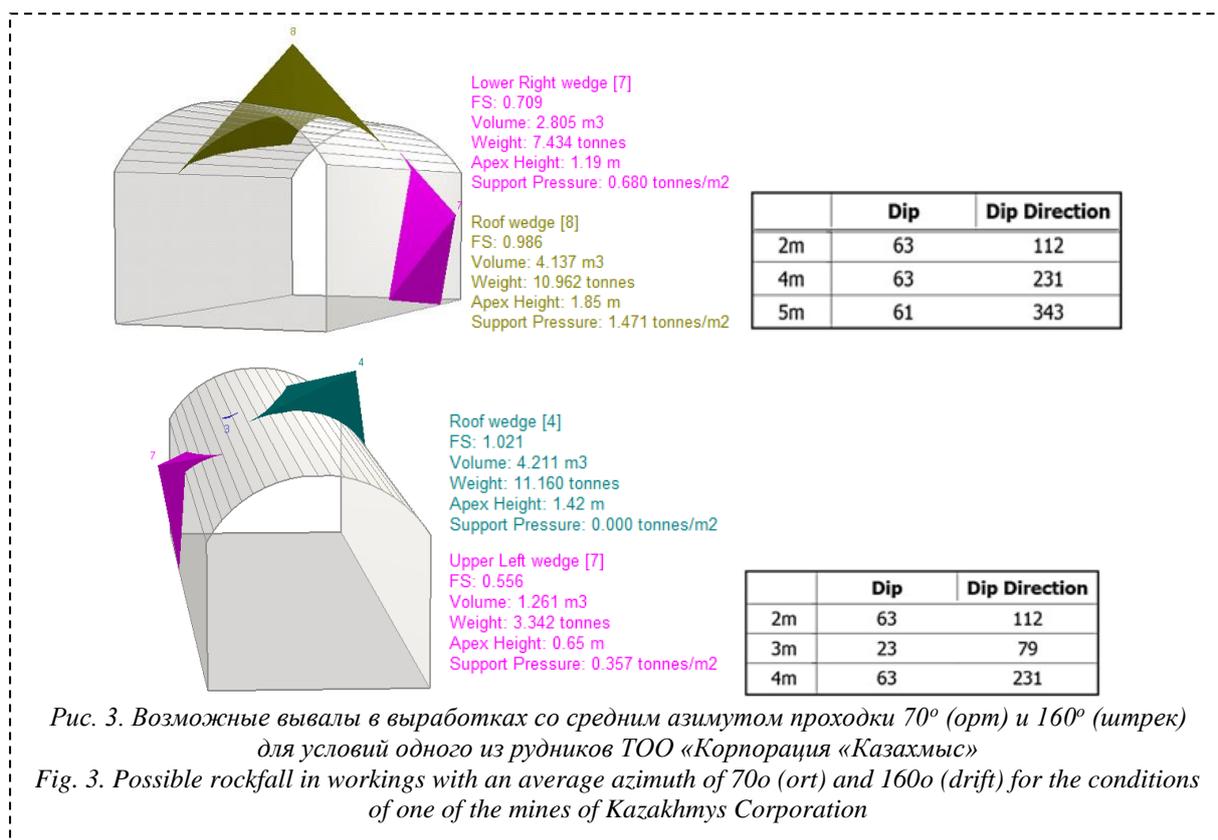


Рис. 3. Возможные вывалы в выработках со средним азимутом проходки 70° (орт) и 160° (штрек) для условий одного из рудников ТОО «Корпорация «Казакхмыс»

Fig. 3. Possible rockfall in workings with an average azimuth of 70° (ort) and 160° (drift) for the conditions of one of the mines of Kazakhmys Corporation

В результате выявления деформационно-прочностных свойств пород и проведенных расчетов обосновываются геомеханические домены руд и пород месторождений по совокупным признакам. Диагностика исходного поля напряжений породных массивов как важнейшее условие правильных проектных решений необходима при выборе и обосновании рациональной технологии добычи полезных ископаемых, обеспечивающей безопасность горных работ на шахтах и рудниках, при строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений, других объектов технического назначения, находящихся во взаимодействии с прилегающим (вмещающим) массивом. В настоящее время в практике изучения параметров исходного поля напряжений распространение получил метод гидроразрыва скважин, успешно освоенный и применяемый в ИГД СО РАН.

В мировой практике широкое распространение получила рейтинговая система, разработанная Бартоном, Лиеном и Люндом. Данный рейтинг широко используется рудниками во всем мире и применяется в качестве основной системы оценки устойчивости массива (комплексное обоснование характеристик горных пород) [22]. Классификация горных пород по Q-рейтингу имеет 9 категорий, что позволяет более гибко выбирать тип крепи горных выработок (в отличие от 5 категорий устойчивости горных пород по «Правилам технической эксплуатации...»).

Устойчивость обнажений руд и пород определяется эмпирическим методом Бартона (Q-рейтинг), оценивающим влияние таких факторов, как прочность, глубина разработки, сечение выработок и напряженное состояние во вмещающем массиве, количество и состояние трещин, в том числе степень их изменения. Система Бартона применяется в методах эмпирического проектирования при оценке устойчивости массива горных пород и крепления горных выработок. Численное значение Q определяется [23]:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \tag{10}$$

где RQD – показатель качества породы; J<sub>n</sub> – показатель количества систем трещин; J<sub>r</sub> – показатель шероховатости поверхности трещин; J<sub>a</sub> – показатель изменчивости (сцепления) трещин; J<sub>w</sub> – водный фактор; SRF – фактор снижения напряжений.

Таблица 5. Классификация массива горных пород по устойчивости относительно интервалов Q-рейтингов

Table 5. Classification of rock mass by stability relative to Q-rating intervals

Категория горного массива по Q-рейтингу	Значение Q-рейтинга	Степень устойчивости горного массива	Категория по ПТЭ
G	0,001-0,01	исключительно слабый	V
F	0,01-0,1	весьма слабый	
E	0,1-1,0	очень слабый	
D	1-4	слабый	IV
C	4-10	средний	III
B	10-40	крепкий	II
A3	40-100	очень крепкий	I
A2	100-400	весьма крепкий	
A1	400-1000	исключительно крепкий	



Рис. 4. Номограмма по выбору типа и параметров крепи относительно Q-рейтинга и пролета выработки

Fig. 4. Nomogram for choosing the type and parameters of the support relative to the Q-rating and the span of the development

Фактор релаксации напряжений  $SRF$  создан для подсчета напряжений в горном массиве. Могут быть некоторые трудности в определении величины  $SRF$  для подземных горных работ, так как напряжения, индуцированные горными работами, могут изменяться очень существенно с развитием очистных работ.  $SRF$  рассчитывается по описательной шкале напряжений от ограниченно низких к средним и высоким напряженным состояниям. Отношение прочности на одноосное сжатие ( $UCS$ ) к максимальному главному напряжению, возникающему вокруг выработки, может быть также использовано для оценки  $SRF$ . Интервалы Q-рейтингов относительно описаний горного массива и их соответствие степени устойчивости приведены в Табл. 5.

Выбор типа и параметров крепи следует принимать в зависимости от рейтинговой классификации массива  $Q$  и исходя из показателя  $Пролет / ESR$ , который зависит от типа выработки, где «Пролет» — пролет выработки,  $ESR$  — коэффициент типа выработки. Области со штриховыми границами не имеют экспериментального подтверждения.

Расшифровка номограммы производится следующим образом. В нижней части номограммы по абсциссе отображена шкала значения  $Q$ . В верхней части номограммы описано качество массива. В ординате номограммы отображена шкала пролета выработки (слева) и длина анкеров (справа). Номограмма разделена на девять зон по параметрам крепи с соответствующей нумерацией слева направо. После определения Q-рейтинга, зная проектный или фактический пролет выработки, строим две прямые. Точка пересечения прямых определяет область типа

крепи выработок. Интерпретировать диаграмму по типам крепления (Рис. 4) необходимо следующим образом:

- 1 – без крепления или анкерование в отдельных местах;
- 2 – анкерование в отдельных местах, SB;
- 3 – систематическое анкерование + набрызг-бетон с фиброволокном 5-6 см, B+Sfr;
- 4 – систематическое анкерование + набрызг-бетон с фиброволокном 6-9 см, B+Sfr (E500);
- 5 – систематическое анкерование + набрызг-бетон с фиброволокном 9-12 см, B+Sfr (E700);
- 6 – систематическое анкерование + набрызг-бетон с фиброволокном 12-15 см + армокаркас 1 категории с набрызг-бетоном, B+Sfr (E700) + RRS1;
- 7 – систематическое анкерование + набрызг-бетон с фиброволокном >15 см + армокаркас 2 категории с набрызг-бетоном, B+Sfr (E1000) + RRS2;
- 8 – монолитный бетон или систематическое анкерование + набрызг-бетон с фиброволокном > 25 см, ССА или B+Sfr (E1000) + RRS3;
- 9 – необходима специальная оценка.

В работе [19] для подземных рудников ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» значения коэффициента ESR для выработок в процессе эксплуатации принимались равными: для сопряжений всех выработок – 1; для горно-капитальных и горно-подготовительных выработок – 1,4; для нарезных и очистных выработок – 1,6.

Q- и RMR классификации широко используются во всем мире, в последние годы также в России и Республике Казахстан. Q-система широко используется в Австралии, Канаде и Скандинавии, RMR – в Южной Африке и США. Вследствие того, что разные системы классификаций делают различные ударения на определенные параметры, рекомендуется использовать несколько систем на ранних стадиях проектирования. Лучшей практикой является оценка массива горных пород обеими системами независимо [15].

Обе системы имеют большое сходство, но и некоторые различия. Общее между ними состоит в учете идентичных или очень похожих параметров для оценки качества массива. Отличие заключается в различных весовых коэффициентах этих параметров и в использовании различных параметров в одной и той же схеме. Одним из наиболее существенных отличий в системах Q и RMR можно считать расстояние между трещинами. Если система RMR достаточно чувствительна к данному показателю, то при наличии более трех систем трещиноватости с большим расстоянием между ними, в системе Бартона достаточно сложно отобразить их влияние на массив. Считается, что оценку массива горных пород целесообразно проводить независимо Q и RMR системами (Табл. 6).

Таблица 6. Категории устойчивости массива горных пород по рейтингу RMR и индексу Q  
Table 6. Rock mass stability category by RMR rating and Q index

Рейтинг массива RMR	Индекс качества Q	Категория устойчивости массива	
< 20	< 1	весьма неустойчивый	V
20 ÷ 40	1 ÷ 4	неустойчивый	IV
40 ÷ 60	4 ÷ 10	средней устойчивости	III
60 ÷ 80	10 ÷ 40	устойчивый	II
80 ÷ 100	> 40	весьма устойчивый	I

Для перехода из одной системы в другую можно пользоваться формулой

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \quad (11)$$

Массив горных пород, обычно высоко анизотропный материал, может быть оценен более чем одним классификационным рейтингом [24].

На сегодняшний день в мировой практике наиболее многофункциональной и практичной является рейтинговая классификация Д. Лобшира (MRMR – Mining Rock Mass Rating). Рейтинговая классификация Лобшира применяется для следующих целей: составление проекта крепления, составление диаграмм зон обрушения, расчет устойчивости целиков, определение степени обрушаемости и дробимости при самообрушении, обоснование порядка ведения горных работ и т.д. Рейтинг MRMR складывается из частных рейтингов (IRMR), учитывающих прочностные характеристики массива, количественные и качественные характеристики трещиноватости, которая, в свою очередь, домножается на поправочные коэффициенты,

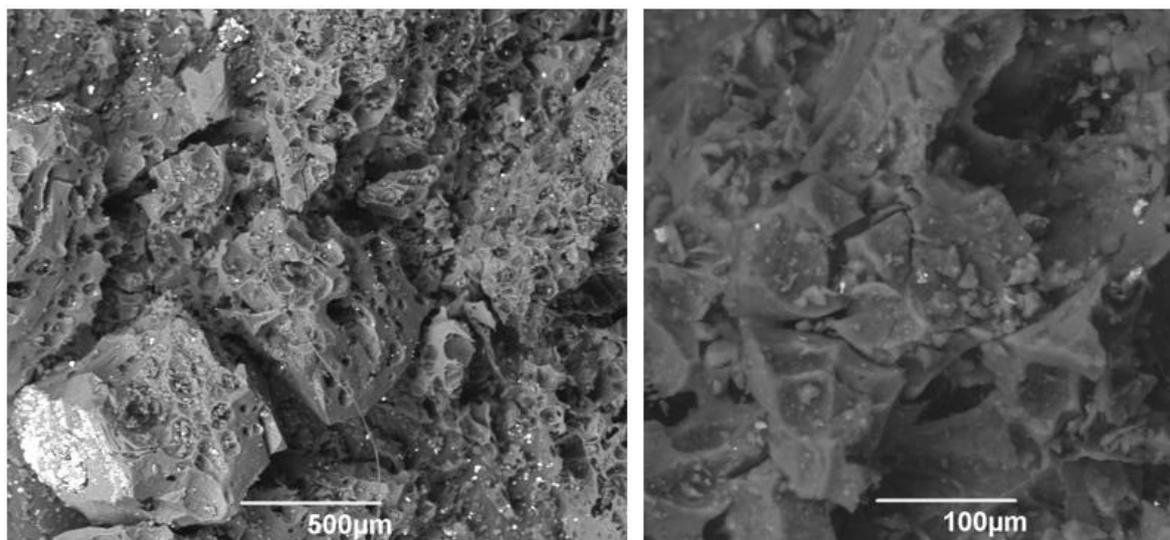


Рис. 4. Микроскопия образца T5 (ТУО после пиролиза и газификации при температуре 980°C)  
 Fig. 4. Microscopy of the sample T5

отражающие степень выветрелости пород, ориентацию трещин в массиве, параметры напряженного состояния, гидрогеологические условия и др. [25-27].

Также рейтинг  $MRMR$  можно выразить формулами:  $MRMR = RMR \times \kappa$ ;  $RMR = RRBS + J_s + J_c$ , где  $RRBS$  – прочность породного блока;  $J_s$  – рейтинг по количеству трещин;  $J_c$  – рейтинг условий трещиноватости;  $\kappa$  – коэффициенты, учитывающие выветривание, ориентацию трещин, напряжения в массиве, взрывание, наличие подземных водопритоков.

#### ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены параметры облегченных типов крепей, включающие длину анкеров, их количество, сечение, сетку расположения, материал, ширину и высоту выработок и т.п. с учетом размера нарушенной зоны вокруг выработки для условий горнотехнической системы Кировского рудника.

Для выбора типов и параметров крепей при отработке апатит-нефелиновых месторождений в условиях, когда имеется возможность определения сети трещин горного массива, предложена рейтинговая система и методика, разработанные Н. Бартоном, которые включают определение прочности пород, глубину разработки, сечение выработок и напряженное состояние вмещающего массива, количество трещин и др. Дана номограмма по выбору типа и параметров крепи относительно  $Q$ -рейтинга и пролеты выработки. Выявлено влияние показателя качества породы (Rock Quality Designation,  $RQD$ ) на выбор крепи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еременко А. А., Федоренко А. И., Копытов А. И. Проведение и крепление горных выработок в удароопасных зонах железорудных месторождений. Новосибирск : Наука, 2008. 236 с.
2. Серяков В. М., Красновский А. А. Напряженное состояние крепи подготовительной выработки в неустойчивом массиве горных пород // ФТПРПИ. 2022. № 6. С. 43-53.
3. Лукичев С. В., Онуприенко В. С., Семенова И. Э., Белгородцев О. В. Увеличение производственной мощности подземного рудника при освоении запасов глубоких горизонтов // Горный журнал. 2019. № 10. С. 85-88.
4. Семенова И. Э., Аветисян И. М., Журавлева О. Г., Белгородцев О. В. Актуальные вопросы процессов обрушения подработанных пород на Хибинских апатитовых рудниках // ФТПРПИ. 2022. № 6. С. 133-141.
5. Жирнов А. А., Абдрахманов С. У., Шапошник Ю. Н., Конури А. И. Оценка устойчивости массива горных пород и выбор типа и параметров крепления выработок на Орловском полиметаллическом месторождении // Горный журнал. 2018. № 3. С. 51-57.
6. Козырев А. А., Савченко С. Н., Панин В. И., Семенова И. Э., Рыбин В. В., Федорова Ю. В. [и др.] Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками: монография. Апатиты: КНЦ РАН, 2019. 431 с.

7. Дудкин О. Б., Козырева Л. В., Померанцев Н. Г. Минералогия апатитовых месторождений Хибинских тундр. Л. : Наука, 1964. 237 с.
8. Семенова И. Э., Жукова С. Н., Журавлева О. Г. Развитие зон сейсмической активности в подработанной толще пород при комбинированной отработке месторождений Кировского рудника // ФТПРПИ. 2022. № 6. С. 104-112.
9. Инструкция по креплению и управлению кровлей горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит» (положение по креплению и поддержанию горных выработок) и КФ 19-2019 выпуск 1. Кировск, 2019. 62 с.
10. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи / ВНИМИ, ВНИИОМШС Минуглепрома СССР. М. : Стройиздат, 1983. 272 с.
11. Иванчин Е. А., Федюков А. А., Борисова Т. А. Оценка устойчивости горных выработок // Известия вузов. Горный журнал. 2014. №5. С. 18-22.
12. СП 91.13330.2012. Подземные горные выработки. Актуализированная редакция СНиП II-94-80. 13. Правила технической эксплуатации рудников, приисков и шахт, разрабатывающих месторождения цветных, редких и драгоценных металлов. М. : Недра, 1981. 109 с.
14. Козырев А. А., Губинский Р. О. Определение рейтинга вмещающих пород и руд алмазного месторождения в соответствии с классификацией Д. Лобшира // ГИАБ. 2011. № 8. С. 89-99.
15. Зенько Д. К., Узбекова А. Р. Основные факторы, влияющие на устойчивость массивов в критериях Бенявского (RMR) и Бартон (Q) // ГИАБ, 2004. С. 273-275.
16. Bieniawski Z. T. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. Trans. S. African Inst. Civil Engrs 15, 1973. Pp. 335-342.
17. Bieniawski Z. T. Engineering Rock Mass Classifications: a complete Manual for engineers and geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. John Wiley & Sons, 1989. 249 p.
18. Bieniawski Z. T. Classification of Rock Masses for Engineering: The RMR System and Future Trends // Rock Testing and Site Characterization Principles, Practice and Projects, 1993. Pp. 553-573.
19. Еременко В. А., Айнбиндер И. И., Марысюк В. П., Наговицин Ю. Н. Разработка инструкции по выбору типа и параметров крепи выработок рудников Талнаха на основе количественной оценки состояния массива горных пород // Горный журнал. 2018. № 10. С. 101-106.
20. Мельницкая М. Е. Разработка методов прогноза удароопасности блочного массива на основе деформационного мониторинга. Диссер. ... канд. техн. наук, Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2018. 116 с.
21. Макаров А. Б. Практическая геомеханика: пособие для горных инженеров. М. : Горная книга, 2006. 391 с.
22. Laubscher D. N. A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design // Journal South African Inst. of Mining and Metallurgy, 1990, №10. Pp. 257-273.
23. Barton, N. R., Lien, R. and Lunde, J. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mechanics, 4, 1974. 189-239.
24. Неверов С. А., Шапошник Ю. Н., Неверов А. А., Конуринов А. И. Об интеграции отечественных и зарубежных классификаций устойчивости массива пород для обоснования крепления горных выработок // Горный журнал. 2022. № 1. С. 56-61.
25. Jacubec J., Laubscher D. N. The MRMR rock mass rating classification system in mining practice // Brisbane. 2000. P. 413-421.
26. Laubscher D. N., Jacubec J. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses. Foundations for Design // Brisbane. 2000. P. 475-481.
27. Губинский Н. О. Определение рейтинга массива горных пород по геомеханической классификации Д. Лобшира для условий алмазного месторождения // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12. № 4. С. 694-701.

© 2023 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*Об авторах:*

Онуприенко Вячеслав Сергеевич, главный инженер, КФ АО «Апатит», (184250, Россия, г. Кировск Мурманской области, ул. Ленинградская, д. 1), e-mail: Oslava79@mail.ru

Еременко Андрей Андреевич, главный научный сотрудник, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, (630091, Новосибирск, Красный проспект, 54), e-mail: eremenko@ngs.ru

Шапошник Юрий Николаевич, ведущий научный сотрудник, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, (630091, Новосибирск, Красный проспект, 54), e-mail: shaposhnikyury@mail.ru

Копытов Александр Иванович, профессор кафедры, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, (650000, г. Кемерово, Весенняя, 28), e-mail: L01BDV@yandex.ru

*Заявленный вклад авторов:*

Онуприенко Вячеслав Сергеевич — постановка исследовательской задачи, сбор и анализ данных, написание текста.

Еременко Андрей Андреевич — постановка исследовательской задачи, выводы, написание текста.

Шапошник Юрий Николаевич — обзор соответствующей литературы, научный менеджмент, выводы.

Копытов Александр Иванович — постановка исследовательской задачи, выводы.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Original article

### SELECTION OF TYPES AND PARAMETERS OF SUPPORTS IN THE CONDITIONS OF UNDERGROUND MINING OF APATITE-NEPHELINE DEPOSITS

Vyatcheslav S. Onuprienko<sup>1</sup>, Andrey A. Eremenko<sup>2</sup>,  
Yuri N. Shaposhnik<sup>2</sup>, Alexander I. Kopytov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kirovsk Branch of Apatit

<sup>2</sup>Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

<sup>3</sup>T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

\*for correspondence: ushakovkju@kuzstu.ru



#### Article info

Received:

23 March 2023

Accepted for publication:

10 May 2023

Accepted:

25 May 2023

Published:

15 June 2023

**Keywords:** ore, deposit, development system, mine working, support, fracturing, anchor, shear, stress

#### Abstract.

*Due to the increase in ore production and the depth of mining operations, the issues of maintaining workings under high stress conditions are becoming of great importance, since it is also associated with an increase in the volume of capital, preparatory and extraction workings both in and outside the extraction zone. The stability of the workings is ensured through the use of reinforced concrete and monolithic concrete slabs, as well as lightweight types of supports. However, the choice of the type of support is influenced by mining-geological and geomechanical features of rocks, development technologies, especially at the Kirovsky ore mine, which works out two deposits of apatite-nepheline ores. The purpose of this study is to select the types and parameters of supports during the processing of apatite-nepheline ores to ensure the safety of mining operations. Using the numerical modeling and experimental studies of the mining engineering system of the Kirovsky ore mine, the State Research Institute of the Russian Academy of Sciences has determined the values of the greatest stresses that have a significant impact on the choice of the type of workings support. The parameters of the support are calculated with the determination of the size of the disturbed zone around the workings. The parameters of the light types of supports are considered: their rational number, length, cross-section, material characteristics, etc. are revealed, depending on the fracturing of the array, the parameters of the workings, the category of the state of the workings, etc. A rating system developed by N. Barton is given, which evaluates the influence of factors such as strength, depth of development, cross-section of workings and the stressed state of the array, the number and condition of cracks. A nomogram is given for choosing the type and parameters of the support relative to the Q-rating and the span of the development. The indicator of the rock quality RQD is given.*

**For citation:** Onuprienko V.S., Eremenko A.A., Shaposhnik Yu.N., Kopytov A.I. Selection of types and parameters of supports in the conditions of underground mining of apatite-nepheline deposits. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2023; 2(156):56-70. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-56-70, EDN: JIHCIL

## REFERENCES

1. Eremenko A.A., Fedorenko A.I., Kopytov A.I. Provedenie i kreplenie gornyh vyrabotok v udaroopasnyh zonah zhelezorudnyh mestorozhdenij. Novosibirsk : Nauka; 2008.
2. Seryakov V.M., Krasnovskij A.A. Napryazhennoe sostoyanie krepri podgotovitel'noj vyrabotki v neustojchivom massive gornyh porod. *FTPRPI*. 2022; 6:43-53.
3. Lukichev S.V., Onuprienko V.S., Semenova I.E., Belogorodcev O.V. Uvelichenie proizvodstvennoj moshchnosti podzemnogo rudnika pri osvoenii zapasov glubokih gorizontov. *Gornyj zhurnal*. 2019; 10:85-88.
4. Semenova I. E., Avetisyan I. M., Zhuravleva O. G., Belogorodcev O. V. Aktual'nye vo-prosy processov obrusheniya podrobotannyh porod na Hibinskih apatitovyh rudnikah. *FTPRPI*. 2022; 6:133-141.
5. Zhirnov A.A., Abdrahmanov S.U., Shaposhnik Yu.N., Konurin A.I. Ocenka ustojchivosti massiva gornyh porod i vybor tipa i parametrov krepreniya vyrabotok na Orlovskom polimetallicheskom mestorozhdenii. *Gornyj zhurnal*. 2018; 3:51-57.
6. Kozyrev A.A., Savchenko S.N., Panin V.I., Semenova I.E., Rybin V.V., Fedorova Yu.V. [i dr.] Geomekhanicheskie processy v geologicheskoy srede gornotekhnicheskikh sistem i upravlenie geodinamicheskimi riskami: monografiya. Apatity: KNC RAN; 2019.
7. Dudkin O.B., Kozyreva L.V., Pomerancev N.G. Mineralogiya apatitovyh mestorozhdenij Hibinskih tundr. L.: Nauka; 1964.
8. Semenova I.E., Zhukova S.N., Zhuravleva O.G. Razvitie zon sejsmicheskoy aktivnosti v podrobotannoj tolshche porod pri kombinirovannoj otrabotke mestorozhdenij Kirovskogo rudnika. *FTPRPI*. 2022; 6:104-112.
9. Instrukciya po krepreniyu i upravleniyu krovlej gornyh vyrabotok na rudnikah KF AO «Apatit» (polozhenie po krepreniyu i podderzhaniyu gornyh vyrabotok) i KF 19-2019 vypusk 1. Kirovsk; 2019.
10. Rukovodstvo po proektirovaniyu podzemnyh gornyh vyrabotok i raschetu krepri / VNIMI, VNIOMSHS Minugleproma SSSR. M.: Strojizdat; 1983.
11. Ivanchin E.A., Fedyukov A.A., Borisova T.A. Ocenka ustojchivosti gornyh vyrabotok. *Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal*. 2014; 5:18-22.
12. SP 91.13330.2012. Podzemnye gornye vyrabotki. Aktualizirovannaya redakciya SNiP II-94-80. 13. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii rudnikov, priiskov i shaht, razrabatyvayushchih mestorozhdeniya cvetnyh, redkih i dragocennyh metallov. M.: Nedra; 1981.
14. Kozyrev A.A., Gubinskij R.O. Opredelenie rejtinga vmeshchayushchih porod i rud al-maznogo mestorozhdeniya v sootvetstvii s klassifikaciej D. Lobshira. *GIAB*. 2011; 8:89-99.
15. Zen'ko D.K., Uzbekova A.R. Osnovnye faktory, vliyayushchie na ustojchivost' massivov v kriteriyah Benyavskogo (RMR) i Bartona (Q). *GIAB*. 2004; 273-275.
16. Bieniawski Z.T. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. Trans. S. African Inst. Civil Engrs 15. 1973:335-342.
17. Bieniawski Z.T. Engineering Rock Mass Classifications: a complete Manual for engineers and geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. John Wiley & Sons, 1989.
18. Bieniawski Z.T. Classification of Rock Masses for Engineering: The RMR System and Future Trends // Rock Testing and Site Characterization Principles, Practice and Projects, 1993. 553-573.
19. Eremenko V.A., Ajnbinder I.I., Marysyuk V.P., Nagovicin Yu.N. Razrabotka instrukcii po vyboru tipa i parametrov krepri vyrabotok rudnikov Talnaha na osnove kolichestvennoj ocenki sostoyaniya massiva gornyh porod. *Gornyj zhurnal*. 2018; 10:101-106.
20. Mel'nickaya M.E. Razrabotka metodov prognoza udaroopasnosti blochnogo massiva na osnove deformacionnogo monitoringa. Dissert. ... kand. tekhn. nauk, Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gornyj universitet, 2018.
21. Makarov A.B. Prakticheskaya geomekhanika: posobie dlya gornyh inzhenerov. M.: Gornaya kniga; 2006.
22. Laubscher D.N. A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design // Journal South African Inst. of Mining and Metallurgy, 1990; 10:257-273.
23. Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J. Engineering Classification of Rock Masses for the De-sign of Tunnel Support. *Rock Mechanics*. 1974; 4:189-239.
24. Neverov S.A., Shaposhnik Yu.N., Neverov A.A., Konurin A.I. Ob integracii otechestvennyh i zarubezhnyh klassifikacij ustojchivosti massiva porod dlya obosnovaniya krepreniya gornyh vyrabotok. *Gornyj zhurnal*. 2022; 1:56-61.
25. Jacubec J., Laubscher D.N. The MRMR rock mass rating classification system in mining practice. *Brisbane*. 2000. P. 413-421.
26. Laubscher D.N., Jacubec J. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses. *Foundatins for Design. Brisbane*. 2000. P. 475-481.
27. Gubinskij N.O. Opredelenie rejtinga massiva gornyh porod po geomekhanicheskoy klassifikacii D. Lobshira dlya uslovij almaznogo mestorozhdeniya. *Vestnik MGTU*. 2009; 12:4:694-701.

© 2023 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*The authors declare no conflict of interest.*

*About the authors:*

Vyatcheslav S. Onuprienko, Chief Engineer, Kirovsk Branch of Apatit, (1 Leningradskaya Street, Kirovsk, Murmansk Region, 184250, Russian Federation), e-mail: Oslava79@mail.ru

Andrey A. Eremenko, chief researcher, Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, (54 Krasny prospect, Novosibirsk, 630091, Russian Federation), e-mail: eremenko@ngs.ru

Yuri N. Shaposhnik, leading researcher, Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, (54 Krasny prospect, Novosibirsk, 630091, Russian Federation), e-mail: shaposhnikyury@mail.ru

Alexander I. Kopytov, Professor of the Department, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: L01BDV@yandex.ru

*Contribution of the authors:*

Vyatcheslav S. Onuprienko — setting a research task, collecting and analyzing data, writing a text.

Andrey A. Eremenko — formulation of a research problem, conclusions, writing a text.

Yuri N. Shaposhnik — review of relevant literature, scientific management, conclusions.

Alexander I. Kopytov — statement of the research problem, conclusions.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

