

## ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КРЕПИ КОМПЛЕКСА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК, ПРОВОДИМЫХ В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

В.Л. Трушко<sup>1</sup>, Е.К. Баева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург, Россия. e-mail: loka2708@rambler.ru

**Аннотация:** Неотъемлемой частью подземной разработки месторождений является формирование комплекса горных выработок больших сечений. В частности, проведение камеры дробильно-дозаторного комплекса обуславливает необходимость определения рациональных параметров крепей, обеспечивающих устойчивость горных выработок на весь период эксплуатации рудника. Представлено обоснование рациональных параметров крепи подземных горных выработок дробильно-дозаторного комплекса Ведугинского золоторудного месторождения. Разработана геомеханическая модель месторождения и выполнено численное моделирование изменения напряженно-деформированного состояния горного массива при проведении комплекса сопряжения выработок методом конечных элементов. Расчеты выполнены в программном комплексе Simulia Abaqus CAE с применением критериев оценки устойчивости породных обнажений. В исследовании приведено сравнение двух критериев устойчивости массива для условий Ведугинского месторождения: критерия напряженности элементов выработки и Q-индекса. В зависимости от расчетной категории устойчивости выбраны и обоснованы рациональные параметры крепей для комплекса подземных горных выработок. Подбор крепи проведен для этапа эксплуатации дробильно-дозаторного комплекса. Выполнен сравнительный анализ рассмотренных подходов к оценке устойчивости горных выработок и предложено развить дальнейшие исследования в направлении изучения влияния пространственного расположения выработок на их устойчивость.

**Ключевые слова:** устойчивость породных обнажений, классификация, критерий, геомеханическая модель, объемная задача, напряженно-деформированное состояние, комплекс выработок, большое сечение, численный анализ, параметры крепи.

**Для цитирования:** Трушко В. Л., Баева Е. К. Обоснование рациональных параметров крепи комплекса горных выработок, проводимых в сложных горно-геологических условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12. – С. 55–69. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_12\_0\_55.

### Substantiation of rational parameters of mine support system for underground roadways in difficult geological conditions

V.L. Trushko<sup>1</sup>, E.K. Baeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,  
e-mail: loka2708@rambler.ru

---

**Abstract:** An integral part of underground mineral mining is construction of a system of large cross-section underground openings. In particular, the construction of batching-and-crushing rooms requires determining rational parameters of mine support systems to ensure stability of the underground openings for the whole service life of a mine. This article presents the substantiation of the mine support system parameters for underground openings for a batching-and-crushing system at Veduga gold deposit. The geomechanical model of the deposit is build, and the numerical modeling of change in the stress–strain behavior of rock mass at junctions of underground openings is performed using the finite element method. The modeling in Simulia Abaqus CAE uses the stability criteria for the exposed rock surfaces. In terms of Veduga deposit, two stability criteria are compared: the stress intensity criterion and the Q-index. Depending on the calculated category of stability, the rational parameters of mine support systems for a set of underground openings are selected and substantiated. The mine support system for the operational phase of the batching-and-crushing facility is selected. The chosen approaches to the stability estimation of underground openings are compared, and it is proposed to continue the research in the line of the analysis of influence exerted by the spatial arrangement of underground openings on their stability.

**Key words:** exposed rock surface stability, classification, criterion, geomechanical model, 3D problem, stress–strain behavior, system of underground openings, large cross-section, numerical analysis, mine support system parameters.

**For citation:** Trushko V. L., Baeva E. K. Substantiation of rational parameters of mine support system for underground roadways in difficult geological conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12):55-69. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_12\_0\_55.

---

## Введение

В настоящее время добыча золота в России характеризуется стабильным ростом [1]. В период с 2009 по 2020 гг. золотодобыча увеличилась с 235,1 до 428,4 т (82%) [34]. Лидером по добыче золота является Красноярский край, где располагаются уникальные (Олимпиадинское [2]) и крупные (Ведугинское, Попутнинское, Удереysкое) золото-сульфидные месторождения [3]. На текущий момент наблюдается тенденция перехода на комбинированный (открыто-подземный) способ разработки рудных месторождений [4], связанная со значительной глубиной залегания рудных залежей и сложной формой рудных тел [5–7].

Примером месторождения, обработка которого предполагается комбинирован-

ным последовательным открыто-подземным способом, является золоторудное месторождение Ведугинское, расположенное в центральной части Енисейского кряжа.

Ведугинское месторождение является типичным представителем месторождений золото-сульфидной рудной формации. Рудовмещающие породы сложены кварцсерицит-хлоритовыми сланцами, кварцитами и кварцевыми песчаниками [8]. Общий структурный план месторождения позволяет выделить следующие участки: Западный, Промежуточный, Центральный, Восточный и Юго-Восточный. Физико-механические свойства пород с глубиной для каждого из участков месторождения различны. Плотность пород месторождения в среднем составляет 2800 кг/м<sup>3</sup> [9].

Таблица 1

**Физико-механические свойства горных пород Ведугинского месторождения [9]**  
**Physical and mechanical properties of the Veduga deposit rock [9]**

Наименование	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность, МПа		Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, ГПа
		на сжатие	на растяжение				
Кварц-хлорит-серицитовые сланцы	2800	75	$\frac{10}{5}$	$\frac{14,1}{7,8}$	$\frac{39}{44}$	$\frac{0,2}{0,2}$	7,7
Метаалевролиты	2800	90	$\frac{17}{7}$	$\frac{20,8}{11,4}$	$\frac{43}{53}$	$\frac{0,14}{0,18}$	8,7
Метапесчаники кварцевые	2800	150	$\frac{20}{12}$	$\frac{31,8}{24,5}$	$\frac{55}{57}$	$\frac{0,14}{0,16}$	13
Черные углеродистые сланцы	2800	110	$\frac{20}{12}$	$\frac{24,4}{14,9}$	$\frac{45}{42}$	$\frac{0,19}{0,2}$	7,7

Примечание: в числителе – максимальное значение, в знаменателе – среднее.

Разработка Центральной и Юго-Восточной рудных зон месторождения планируется подземным способом [9].

Физико-механические свойства горных пород представлены в табл. 1.

**Постановка задачи и методика исследований**

В последнее время для анализа устойчивости породных обнажений большое значение приобрели численные ме-

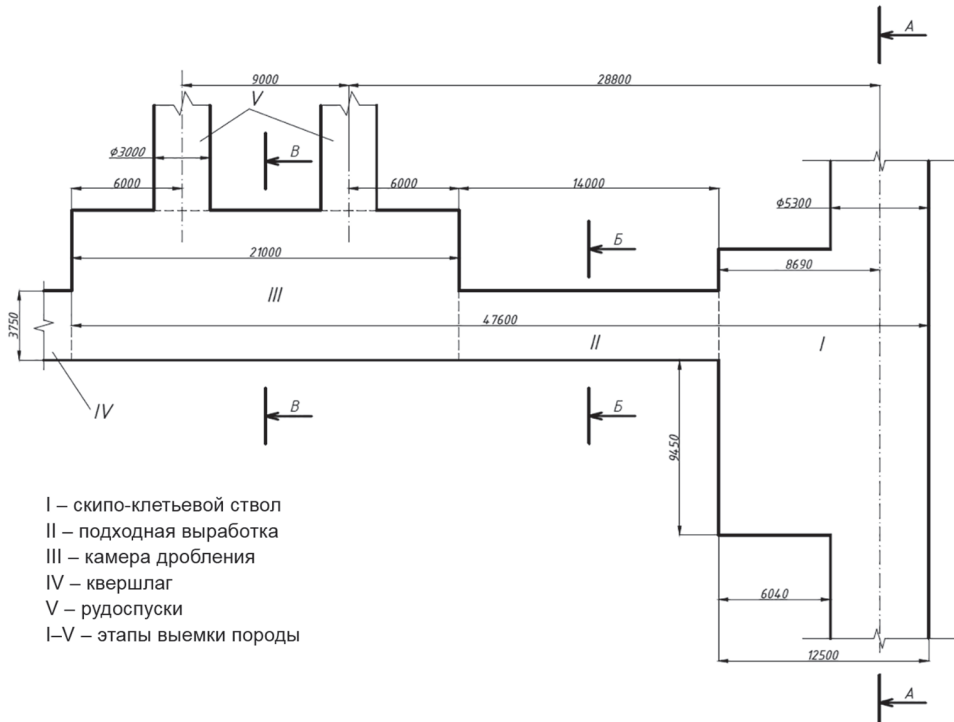


Рис. 1. Вертикальный разрез модели сопряжения с указанием этапов выемки породы

Fig. 1. Vertical section of the coupling model indicating the stages of rock excavation

Таблица 2

**Этапы выемки породы**  
**Rock excavation stages**

Этап	Описание этапа
I	Проходка скипо-клетевого ствола
II	Проходка подходной выработки
III	Проходка камеры дробления
IV	Проходка квершлага

тоды исследований [10 – 12]. Они позволяют учесть сложные технологические факторы [13], форму поперечного сечения выработки [14] и структурные особенности породного массива [15, 16]. Одним из наиболее эффективных численных методов решения является метод конечных элементов (МКЭ) [17, 18], реализованный в программных комплексах PLAXIS 2D [19], PLAXIS 3D [20, 21], Simulia Abaqus CAE [22] и других. Таким образом, для оценки устойчивости породных обнажений сети горных выработок дробильно-дозаторного комплекса (ДДК) участка Центрального

рудника Ведугинского месторождения в программном комплексе Simulia Abaqus CAE была создана модель сети выработок камеры дробления, а также ее сопряжение со скипо-клетевым стволом. Вертикальный разрез сопряжения представлен на рис. 1. Поперечные сечения выработок представлены на рис. 2. Выемка пород ведется поэтапно, в последовательности, указанной на рис. 1 (номера выработок и этапов на рисунке совпадают).

В модели предусматривается четыре расчетных этапа, представленные в табл. 2.

Для задания физико-механических свойств модели был сделан переход от свойств породы в образце к свойствам горного массива в соответствии с критерием перехода Хоека-Брауна [23], также по методике, предложенной Хоеком и Брауном [23], был определен модуль деформации горного массива. В результате модели были присвоены следующие физико-механические свойства: принято,

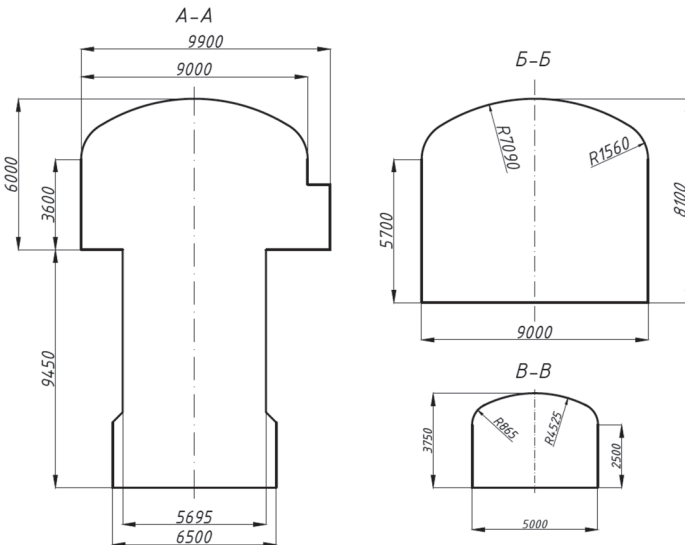


Рис. 2. Поперечное сечение: А-А – сопряжения со скипо-клетевым стволом; Б-Б – камеры дробления; В-В – подходной выработки и квершлага

Fig. 2. Cross-section of: А-А – interface with the skip-cage shaft; Б-Б – crushing chamber; C-C – approach drift and crosscut

что камера ДДК расположена в кварц-хлорит-серицитовых сланцах, плотность пород  $2800 \text{ кг/м}^3$ , модуль упругости  $5720 \text{ МПа}$ , коэффициент Пуассона  $0,2$ . Глубина заложения выработки  $500 \text{ м}$ .

Для формирования естественного напряженного состояния массива главные напряжения приняты  $\sigma_{\min} = 1,6\gamma H = 22,2 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\max} = 2,0\gamma H^{\min} = 28,3 \text{ МПа}$ . Поле действующих напряжений относится к гравитационно-тектоническому типу. Сеть выработок располагается перпендикулярно направлению максимальных горизонтальных напряжений.

Размеры модели горного массива  $120 \times 110 \times 200 \text{ м}$  были подобраны с учетом зоны влияния выработок, принятой равной пяти значениям ширины, высоты и глубины выработки соответственно. Общий вид модели с граничными условиями показан на рис. 3.

На сегодняшний день разработано большое количество методик оценки устойчивости горных выработок. Известно, что устойчивость породных обнажений определяется напряженно-деформированным состоянием (НДС) массива горных пород и геологическими факторами [24]. Выявлено, что чаще всего критерий устойчивости горных выработок определяется в зависимости от величины смещения пород, их прочностных свойств [25] либо трещиноватости окружающего массива [26]. Кроме того, широкое применение получили методы, основанные на рейтинговых показателях массива [27, 28].

При определении устойчивости и типа крепи подземных горных выработок в настоящее время применяются зарубежные системы: классификация Бенявского (RMR) [35] и критерий Бартона (Q) [29, 30]. Эти системы классификации массива горных пород широко применяются в мировой практике при проектировании и эксплуатации горных выработок [31].

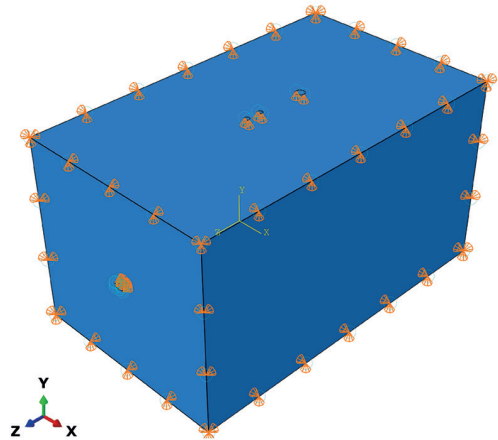


Рис. 3. Модель сети выработок с граничными условиями

Fig. 3. Model of the workings network with boundary conditions

Для сравнительного анализа критериев устойчивости массива для условий Ведугинского месторождения были выбраны: критерий напряженности элементов выработки, предложенный В.Л. Трушко [32], и Q-индекс Н. Бартона. Это обусловлено тем, что критерий применяется в «Инструкции...» [36], которая разработана для условий, схожих с условиями Ведугинского месторождения, в свою очередь Q-индекс применяется при проектировании крепи горных выработок и был выбран в качестве альтернативы.

Выбор типа крепи определяется категорией устойчивости выработок, параметры крепи горных выработок определяются по «Инструкции...» для отечественной методики и по номограмме [29] для зарубежной.

В «Инструкции...» для оценки состояния породных обнажений незакрепленной горной выработки применяется критерий напряженности кровли и боков выработки ( $\Pi_b$ ), отражающий соотношение между величинами расчетных напряжений, действующих на элементы выработки, и расчетной прочностью пород:

$$\Pi_b = \sigma K_1 K_2 K_3 / (R K_c \xi_d) \quad (1)$$

где  $\sigma$  — напряжение в нетронутом массиве по нормали к продольной оси выработки, МПа;  $K_1$  — коэффициент концентрации напряжений вследствие проведения выработки;  $K_2$  — коэффициент изменения напряжений: в результате влияния других выработок — ( $K'_2$ ), тектонических нарушений (ТН) — ( $K''_2$ ) и очистных работ — ( $K'''_2$ ):

$$K_2 = K'_2 K''_2 K'''_2 \quad (2)$$

$K_3$  — коэффициент дополнительной концентрации напряжений при динамических явлениях в массиве;  $R$  — среднее значение сопротивления пород в образце одноосному сжатию при кратковременном нагружении;  $K_c$  — коэффициент структурного ослабления массива за счет трещиноватости и слоистости;  $\xi_d$  — коэффициент, учитывающий снижение сопротивления породы при многократных динамических нагружениях за счет ослабления связей по трещинам и усталостных явлений.

Расчетное значение показателя напряженности характеризует НДС выработки и определяет категорию устойчивости породных обнажений. В «Инструкции...» выделено четыре категории устойчивости, которые в т.ч. учитывают динамические формы проявления гор-

ного давления. С учетом категории устойчивости обнажений, геометрических параметров и типа горной выработки в «Инструкции...» даны рекомендации для выбора типа и параметров крепей.

Система классификации породного массива  $Q$  была разработана Н. Бартоном [29, 33] и широко используется для проектирования крепи горных выработок. Характеристики крепи разделены на девять категорий в зависимости от показателя  $Q$ , учитывающего основные параметры массива.

Численные значения  $Q$  определяется по формуле [29]:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}, \quad (3)$$

где  $RQD$  — показатель качества породы;  $J_n$  — показатель количества систем трещин;  $J_r$  — показатель шероховатости поверхности трещин;  $J_a$  — показатель измененности трещин;  $J_w$  — водный фактор;  $SRF$  — фактор снижения напряжений.

### Результаты моделирования и оценки устойчивости породных обнажений

В результате моделирования были получены значения максимальных сжимающих напряжений, представленные

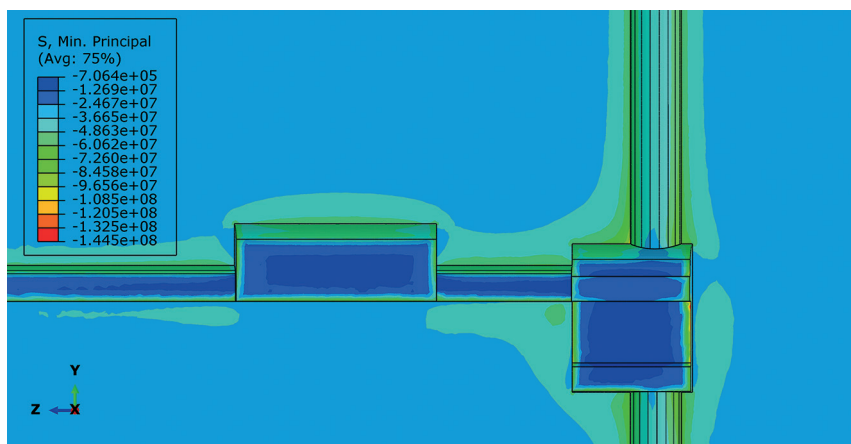


Рис. 4. Максимальные сжимающие напряжения в массиве

Fig. 4. Maximum compressive stress in the rock mass

Таблица 3

**Результаты расчета критерия напряженности**  
**Results of tension criterion calculation**

Выработка	№ этапа	Категория устойчивости	
		кровля	бока
Сопряжение со скипо- клетевым стволом	I	III категории (средне- устойчивое состояние)	I категории (весьма устойчивое состояние)
Подходная выработка	II	III категории (средне- устойчивое состояние)	II категории (предельное состояние)
Камера дробления	III	III категории (средне- устойчивое состояние)	II категории (предельное состояние)
Квершлаг	IV	III категории (средне- устойчивое состояние)	II категории (предельное состояние)

на рис. 4. Согласно (1) показатель кри-  
 терия напряженности

$$П_{в} = \sigma K_1 K_2 K_3 / (R K_c \xi_d)$$

где  $R$  – среднее значение сопротивле-  
 ния пород в образце одноосному сжа-  
 тию при кратковременном нагружении,  
 $R = 75$  МПа;  $K_c$  – коэффициент струк-

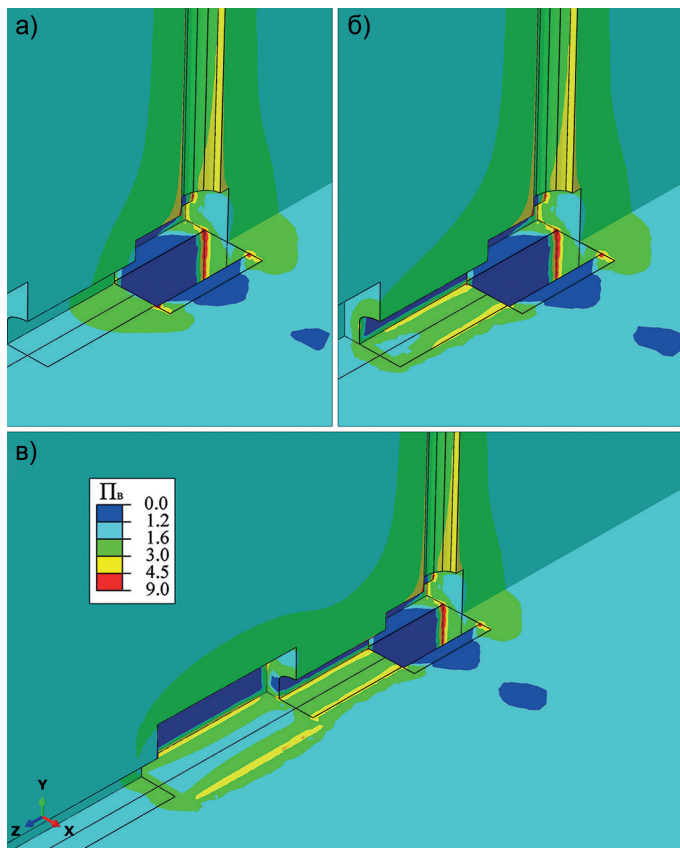


Рис. 5. Значения критерия напряженности: на I этапе (а); на II этапе (б); на III этапе (в)

Fig. 5. Tension criterion values: at stage I (a); at stage II (b); at stage III (v)

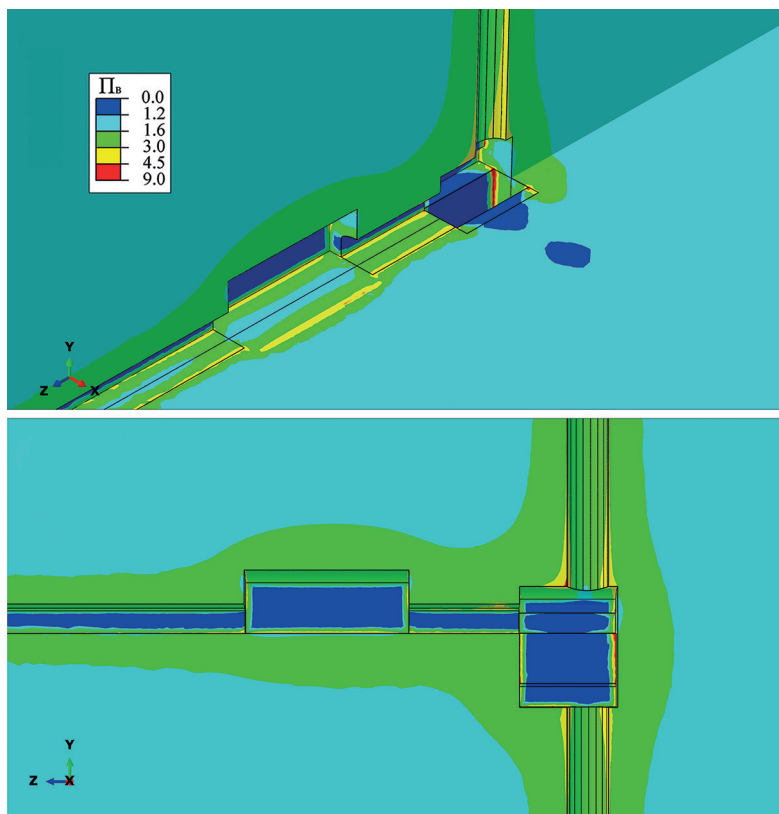


Рис. 6. Значения критерия напряженности на IV этапе  
 Fig. 6. Tension criterion values at stage IV

турного ослабления массива за счет трещиноватости и слоистости,  $K_c = 0,4$ ;  $\xi_d$  — коэффициент, учитывающий снижение сопротивления породы при многократных динамических нагружениях за счет ослабления связей по трещинам и усталостных явлений,  $\xi_d = 0,7$ .

Тогда

$$\begin{aligned} P_b &= \sigma K_1 K_2 K_3 / (75 \cdot 0,4 \cdot 0,7) = \\ &= \sigma K_1 K_2 K_3 / 21 \end{aligned} \quad (4)$$

С помощью инструмента программного комплекса Simulia Abaqus CAE в числитель выражения были подставлены значения максимальных сжимающих напряжений. На рис. 5, 6 представлены значения критерия напряженности, полученные для каждого этапа.

На каждом этапе НДС массива изменяется. Подбор крепи осуществлен для наихудших условий эксплуатации ДДК после проходки всех выработок (IV этап). Результаты расчета критерия напряженности в программном комплексе Simulia Abaqus CAE представлены в табл. 3.

В табл. 4 представлены рекомендуемые типы и параметры крепей, определенные по «Инструкции...». Далее представлена методика определения типа и параметров крепей выработок ДДК в соответствии с  $Q$ -индексом Н. Бартона. Так как напрямую определить значение  $Q$ -индекса в программном комплексе Simulia Abaqus CAE не представляется возможным, в первую очередь было определено значение критерия  $SRF$ , который зависит от отношения  $\sigma_c / \sigma_1$ .



Таблица 4

**Рекомендуемые тип и параметры крепи**  
**Recommended support type and parameters**

Выработка	Тип крепи					
	крылья			бока		
	длина анкеров, м	шаг анкеров, м	толщина торкрет-бетона, см	длина анкеров, м	шаг анкеров, м	толщина торкрет-бетона, см
Сопряжение со скипо-клетевым стволом*	1,8	1,0	5	1,8	1,0	3
Подходная выработка	1,8	1,0	5	1,35	1,0	3
Камера дробления	1,8	1,0	5	1,8	1,0	3
Квершлаг	1,8	1,0	5	1,35	1,0	3

\*Анкерная крепь сопряжения усиливается опорными плитками 0,3×0,3 м.

Результаты моделирования отношения  $\sigma_c / \sigma_1$  представлены на рис. 7.

Определение коэффициента *SRF* осуществляется по табл. 5 [29].

По полученным данным было определено значение *SRF*, а также рассчитан *Q*-индекс для кровли и боков по форму-

ле (3), полученные данные сведены в табл. 6.

Для определения типа крепи сети подземных горных выработок использована номограмма [29] (рис. 8). Искомый горный массив относится к классу D (плохое состояние). По показателю *ESR*

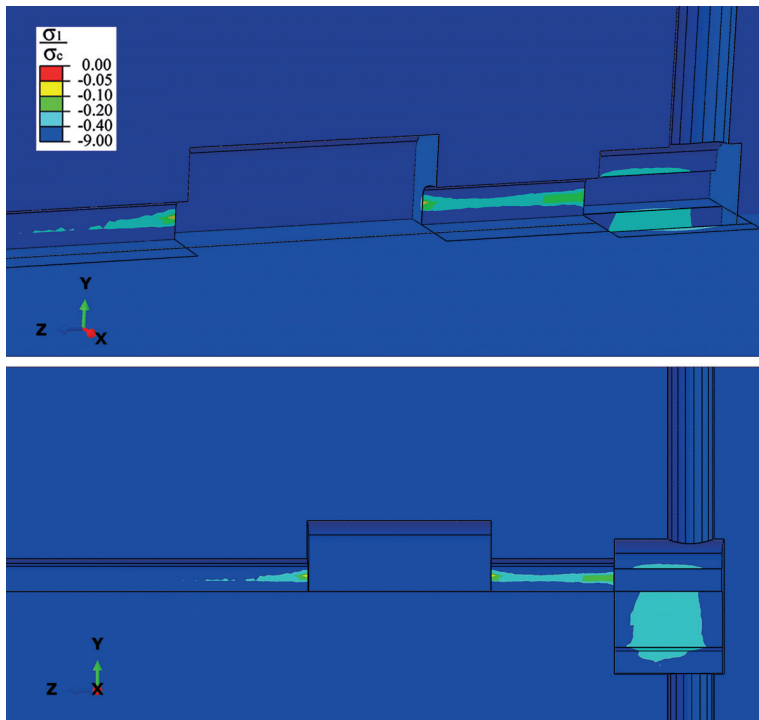


Рис. 7. Результаты моделирования отношения  $\sigma_1 / \sigma_c$  на IV этапе  
 Fig. 7. Modeling results of  $\sigma_1 / \sigma_c$  ratio at stage IV

выработки относятся к подземным сооружениям,  $ESR = 1,3$ .

Рекомендуемые по  $Q$ -индексу виды крепи представлены в табл. 7.

### Заклучение

В результате проведенного исследования для горных выработок ДДК Ведугинского золоторудного месторождения были подобраны следующие типы крепей: по методике, указанной в «Ин-

Таблица 5

### Определение коэффициента SRF [29] Determination of the SRF factor [29]

$\sigma_c / \sigma_1$	SRF
> 200	2,5
200 – 10	1
10 – 5	2
5 – 2,5	10
< 2,5	20

Таблица 6

### Значения SRF и индекса Q для сети выработок SRF and Q-value for the workings network

Выработка	№ этапа	SRF		Q	
		кровля	бока	кровля	бока
Сопряжение со скипо-клетевым стволом	I	20	10	1,83	3,65
Подходная выработка	II	20	10	1,83	3,65
Камера дробления	III	20	20	1,83	1,83
Квершлаг	IV	20	20	1,83	1,83

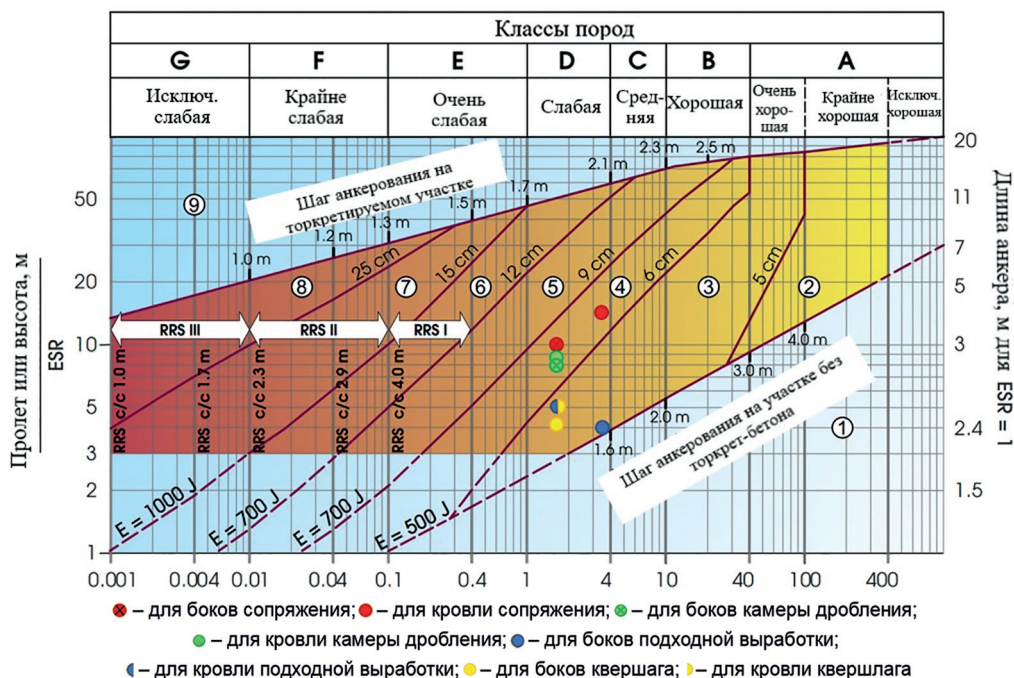


Рис. 8. Рекомендации по предварительному выбору параметров крепи

Fig. 8. Recommendations for pre-selection of support parameters

Таблица 7

**Рекомендации по характеристикам крепи**  
**Recommendations for support characteristics**

Выработка	№ этапа	Тип крепи					
		кровля			бока		
		комбинированная крепь (анкера + торкретбетон)					
		длина анкеров, м	шаг анкеров, м	толщина торкретбетона <sup>*</sup> , см	длина анкеров, м	шаг анкеров, м	толщина торкретбетона <sup>*</sup> , см
Сопряжение со скипо-клетевым стволом	I	5	1,8	6	3,9	2,0	6
Подходная выработка	II	3,3	1,8	5	3,0	2,0	5
Камера дробления	III	3,8	1,8	6	3,9	1,8	6
Квершлаг	IV	3,3	1,8	5	3,0	1,8	5

<sup>\*</sup> Класс по энергии разрушения торкретбетона не менее E500

струкции...», подобраны полноконтактные сталеполимерные анкера и элементы усиления крепи, параметры которых указаны в табл. 4, по методике Н. Бартона подобрана комбинированная крепь (анкера + торкретбетон), характеристики которой представлены в табл. 7.

В итоге при сравнении полученных результатов выявлено, что расчет по критерию напряженности согласно «Инструкции...» является более оптимистичным по сравнению с расчетом по Q-индексу Н. Бартона, так как в целом характеризует всю сеть выработок как более устойчивую.

Различие полученных результатов можно объяснить коэффициентами, учитываемыми при определении устойчи-

вости породных обнажений, а именно их количеством и характером свойств горного массива, которые они отражают. Так, критерий  $P_v$  учитывает изменения НДС массива в зоне влияния выработок, трещиноватость и слоистость пород, а также снижение сопротивления породы при многократных динамических нагружениях, в то время как Q-индекс включает в себя большее количество коэффициентов, которые характеризуют количество и тип трещин, их шероховатость, измененность, а также учитывают действие подземных вод.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение влияния пространственного расположения выработок на их устойчивость.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Литературу с п. 1 по п. 7 и с п. 10 по п. 14 смотри в REFERENCES.

8. Абросимова Н. А., Бортникова С. Б., Еделев А. В. Формы нахождения потенциально токсичных элементов в отвальных породах Ведугинского месторождения золота // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2013. — № 5. — С. 35–42.

9. Шапошник Ю. Н., Неверов С. А., Неверов А. А., Конуринов А. И. Рейтинговая оценка массива горных пород Ведугинского месторождения // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2020. — Т. 7. — № 1. — С. 202–208. DOI: 10.15372/FPVGN2020070131.

15. Казанин О. И., Ильинец А. А. Обеспечение устойчивости выемочных выработок при подготовке выемочных участков пологих угольных пластов тремя выработками // Записки Горного института. — 2022. — Т. 253. — С. 41–48. DOI: 10.31897/PMI.2022.1.

16. Кириенко Ю. А. Расчет крепи сопряжений стволов в породах, склонных к ползучести // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 8. — С. 142—153. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_8\_0\_142.

17. Протосеня А. Г., Алексеев А. В., Вербилло П. Э. Прогноз напряженно-деформированного состояния и устойчивости лба забоя тоннеля при пересечении нарушенных зон грунтового массива // Записки Горного института. — 2022. — Т. 254. — С. 252—260. DOI: 10.31897/PMI.2022.26.

18. Протосеня А. Г., Катеров А. М. Развитие напряженно-деформированного состояния комбинированной крепи вертикального ствола, пройденного в соляном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-1. — С. 100—113. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_61\_0\_100.

19. Demenkov P. A., Goldobina L. A., Trushko O. V. Geotechnical barrier options with changed geometric parameters // GEOMATE Journal. 2020, vol. 19, no. 75, pp. 58—65. DOI: 10.21660/2020.75.78558.

20. Shammazov I. A., Batyrov A. M., Sidorkin D. I., Van Nguyen T. Study of the effect of cutting frozen soils on the supports of above-ground trunk pipelines // Applied Sciences. 2023, vol. 13, article 3139. DOI: 10.3390/app13053139.

21. Волохов Е. М., Мукминова Д. З. Оценка деформаций при строительстве эскалаторных тоннелей метрополитена способом искусственного замораживания грунтов для стадии формирования ледопородного ограждения // Записки Горного института. — 2021. — Т. 252. — С. 826—839. DOI:10.31897/PMI.2021.6.5.

22. Беляков Н. А., Беликов А. А. Прогноз целостности водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении калийных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-2. — С. 33—46. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_33.

23. Hoek E., Brown E. T. The Hoek-Brown failure criterion — a 1988 update / Proceedings of the 15th Canadian Rock Mechanics Symposium, Civil Engineering Department, University of Toronto, Toronto. 1988, pp. 31—38.

24. Potemkin D. A., Popov M. G., Trushko O. V. Examination and analysis of actual stability of mine workings at the Yakovlevsky iron ore deposit // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018, vol. 13, no. 7, pp. 2490—2499.

25. Karasev M. A., Katerov A. M., Petrushin V. V. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone // Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik. 2022, vol. 37, no. 1, pp. 151—162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.

26. Игнатъев С. А., Сударииков А. Е., Имашев А. Ж. Современные математические методы прогноза условий поддержания и крепления горных выработок // Записки Горного института. — 2019. — Т. 238. — С. 371—375. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.371.

27. Zhang Q., Huang X., Zhu H., Li J. Quantitative assessments of the correlations between rock mass rating (RMR) and geological strength index (GSI) // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019, vol. 83, pp. 73—81. DOI: 10.1016/j.tust.2018.09.015.

28. Бушков В. К., Шеметов Р. С. Определение устойчивости и обоснование систем крепления горных выработок при переходе к отработке Олимпиадинского месторождения подземным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 9. — С. 40—54. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-40-54.

29. Barton N., Lien R., Lunde K. Engineering classification of rock masses for the design of rock support // Rock Mechanics. 1974, vol. 6, pp. 189—236. DOI: 10.1007/BF01239496.

30. Barton N. Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2013, vol. 5, no. 4, pp. 249—261. DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.05.008.

31. Rehman H., Naji A. M., Kim J. J., Yoo H. Extension of tunneling quality index and rock mass rating systems for tunnel support design through back calculations in highly stressed jointed rock mass: An empirical approach based on tunneling data from Himalaya // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019, vol. 85, pp. 29—42. DOI: 10.1016/j.tust.2018.11.050.

32. Трушко В. Л., Протосеня А. Г., Очкуров В. И. Прогнозирование геомеханически безопасных параметров очистных забоев при разработке богатых железных руд в сложных горно-геологических условиях // Международный журнал прикладных инженерных исследований. — 2016. — № 11(22). — С. 11095–11103.

33. Barton N. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2002, vol. 39, no. 2, pp. 185–216. DOI: 10.1016/S1365-1609(02)00011-4.

34. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году», [http://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye\\_doklady/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resurs](http://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resurs) (обращение 12.07.2022).

35. Bieniawski Z. T. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons, 1989, 272 p.

36. Трушко В. Л., Огородников Ю. Н., Микулин Е. И., Широков А. В., Лохнев А. С. Инструкция по выбору крепи для подготовительных и горно-капитальных выработок шахт ОАО «Севералюбхимруд». — Североуральск, 2010. — 55 с. **ГИАБ**

## REFERENCES

1. Maus V., Giljum S., da Silva D. M., Gutschlhofer J., da Rosa R. P., Luckeneder S. L. B., Gass S., Lieber M., McCallum I. An update on global mining land use. *Scientific Data*. 2022, vol. 9, no. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1038/s41597-022-01547-4.

2. Silyanov S. A., Sazonov A. M., Naumov E. A., Lobastov B. M., Zvyagina Y. A., Artemyev D. A., Nekrasova N. A., Pirajno F. Mineral Paragenesis, formation stages and trace elements in sulfides of the Olympiada gold deposit (Yenisei Ridge, Russia). *Ore Geology Reviews*. 2022, vol. 143, article 104750. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104750.

3. Zhang H., Liu J. C., Xu Q., Wang J. Y. Geochronology, isotopic chemistry, and gold mineralization of the black slate-hosted Haoyaoerhudong gold deposit, northern North China Craton. *Ore Geology Reviews*. 2020, vol. 117, article 103315. DOI: 10.1111/rge.12302.

4. Li X., Li Q., Hu Y., Teng L., Yang S. Evolution characteristics of mining fissures in overlying strata of stope after converting from open-pit to underground. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021, vol. 14, pp. 1–18. DOI: 10.1007/s12517-021-08978-0.

5. Afum B. O., Ben-Awuah E. A review of models and algorithms for surface-underground mining options and transitions optimization: some lessons learnt and the way forward. *Mining*. 2021, vol. 1, no. 1, pp. 112–134. DOI: 10.3390/mining1010008.

6. King B., Goycoolea M., Newman A. Optimizing the open pit-to-underground mining transition. *European Journal of Operational Research*. 2017, vol. 257, no. 1, pp. 297–309. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.07.021.

7. Whittle D., Brazil M., Grossman P. A., Rubinstein J. H., Thomas D. A. Combined optimisation of an open-pit mine outline and the transition depth to underground mining. *European Journal of Operational Research*. 2018, vol. 268, no. 2, pp. 624–634. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.02.005.

8. Abrosimova N. A., Bortnikova S. B., Edelev A. V. Forms of finding potentially toxic elements in dump rocks of the Veduginsky gold deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2013, no. 5, pp. 35–42. [In Russ].

9. Shaposhnik Yu. N., Neverov S. A., Neverov A. A., Konurin A. I. Rating evaluation of the rock mass of the Veduginsky deposit. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornyh nauk. Mining sciences: fundamental and applied issues*. 2020, vol. 7, no. 1, pp. 202–208. [In Russ]. DOI: 10.15372/FPVGN2020070131.

10. Zang C., Chen M., Zhang G., Wang K., Gu D. Research on the failure process and stability control technology in a deep roadway: numerical simulation and field test. *Energy Science & Engineering*. 2020, vol. 8, no. 7, pp. 2297–2310. DOI: 10.1002/ese3.664.

11. Protosenya A. G., Lebedev M. O., Karasev M. A., Belyakov N. A. Geomechanics of low-subsidence construction during the development of underground space in large cities and

megalopolises. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2019, vol. 9, no. 5, pp. 1005 – 1014. DOI: 10.24247/ijmperdoct201989.

12. Sepehri M., Apel D. B., Adeb S., Leveille P., Hall R. A. Evaluation of mining-induced energy and rockburst prediction at a diamond mine in Canada using a full 3D elastoplastic finite element model. *Engineering Geology*. 2020, vol. 266, article 105457. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105457.

13. Zhang F., Damjanac B., Maxwell S. Investigating hydraulic fracturing complexity in naturally fractured rock masses using fully coupled multiscale numerical modeling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019, vol. 52, no. 12, pp. 5137 – 5160. DOI: 10.1007/s00603-019-01851-3.

14. Nguyen T. T., Do N. A., Karasev M. A., Kien D. V., Dias D. Influence of tunnel shape on tunnel lining behaviour. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*. 2021, vol. 174, no. 4, pp. 355 – 371. DOI: 10.1680/jgeen.20.00057.

15. Kazanin O. I., Ilinets A. A. Ensuring the excavation workings stability when developing excavation sites of flat-lying coal seams by three workings. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 41 – 48. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.1.

16. Kirienko Y. A. Support system design for shaft junctions in creeping rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 8, pp. 142 – 153. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_8\_0\_142.

17. Protosenya A. G., Alekseev A. V., Verbilo P. E. Prediction of the stress-strain state and stability of the front of tunnel face at the intersection of disturbed zones of the soil mass. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 252 – 260. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.26.

18. Protosenya A. G., Katerov A. M. Development of stress and strain state of combined support for a vertical shaft driven in salt massif. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-1, pp. 100 – 113. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_61\_0\_100.

19. Demenkov P. A., Goldobina L. A., Trushko O. V. Geotechnical barrier options with changed geometric parameters. *GEOMATE Journal*. 2020, vol. 19, no. 75, pp. 58 – 65. DOI: 10.21660/2020.75.78558.

20. Shammazov I. A., Batyrov A. M., Sidorkin D. I., Van Nguyen T. Study of the effect of cutting frozen soils on the supports of above-ground trunk pipelines. *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, article 13139. DOI: 10.3390/app13053139.

21. Volokhov E. M., Mukminova D. Z. Deformations assessment during subway escalator tunnels construction by the method of artificial freezing of soil for the stage of ice wall formation. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 252, pp. 826 – 839. [In Russ]. DOI:10.31897/PMI.2021.6.5.

22. Belyakov N. A., Belikov A. A. Prediction of the integrity of the water-protective stratum at the Verkhnekamskoye potash ore deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 33 – 46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_33.

23. Hoek E., Brown E. T. The Hoek-Brown failure criterion – a 1988 update. *Proceedings of the 15th Canadian Rock Mechanics Symposium*. Civil Engineering Department, University of Toronto, Toronto. 1988, pp. 31 – 38.

24. Potemkin D. A., Popov M. G., Trushko O. V. Examination and analysis of actual stability of mine workings at the Yakovlevsky iron ore deposit. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018, vol. 13, no. 7, pp. 2490 – 2499.

25. Karasev M. A., Katerov A. M., Petrushin V. V. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*. 2022, vol. 37, no. 1, pp. 151 – 162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.

26. Ignatyev S. A., Sudarikov A. E., Imashev A. Z. Modern mathematical forecast methods of maintenance and support conditions for mining tunnel. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 238, pp. 371 – 375. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.371.

27. Zhang Q., Huang X., Zhu H., Li J. Quantitative assessments of the correlations between rock mass rating (RMR) and geological strength index (GSI). *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 83, pp. 73 – 81. DOI: 10.1016/j.tust.2018.09.015.

28. Bushkov V. K., Shemetov R. S. Stability estimation and justification of support systems in transition to underground mining in the Olimpiada deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 9, pp. 40 – 54. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-40-54.

29. Barton N., Lien R., Lunde K. Engineering classification of rock masses for the design of rock support. *Rock Mechanics*. 1974, vol. 6, pp. 189 – 236. DOI: 10.1007/BF01239496.

30. Barton N. Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013, vol. 5, no. 4, pp. 249 – 261. DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.05.008.

31. Rehman H., Naji A. M., Kim J. J., Yoo H. Extension of tunneling quality index and rock mass rating systems for tunnel support design through back calculations in highly stressed jointed rock mass: An empirical approach based on tunneling data from Himalaya. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 85, pp. 29 – 42. DOI: 10.1016/j.tust.2018.11.050.

32. Trushko V. L., Protosenya A. G., Ochukurov V. I. Prediction of the geomechanically safe parameters of the stopes during the rich iron ores development under the complex mining and geological conditions. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2016, no. 11(22), pp. 11095 – 11103. [In Russ].

33. Barton N. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2002, vol. 39, no. 2, pp. 185 – 216. DOI: 10.1016/S1365-1609(02)00011-4.

34. Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2020 godu», available at: [http://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye\\_doklady/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resurs](http://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resurs) (accessed 12.07.2022).

35. Bieniawski Z. T. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons, 1989, 272 p.

36. Trushko V. L., Ogorodnikov Yu. N., Mikulin E. I., Shirokov A. V., Likhnev A. S. *Instruktsiya po vyboru krep'i dlya podgotovitel'nykh i gorno-kapital'nykh vyrabotok shakht OAO «Sevuralboksitruda»* [Instructions for the selection of supports for preparatory and mining-capital workings of the mines of JSC «Sevuralboxitruda»], Severoural'sk, 2010, 55 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Трушко Владимир Леонидович<sup>1</sup> – д-р техн. наук,  
профессор, e-mail: Trushko\_VL@pers.spmi.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-9742-1076,

Баева Елена Константиновна<sup>1</sup> – аспирант,  
e-mail: loka2708@rambler.ru,  
ORCID ID: 0000-0003-4213-6849,

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

**Для контактов:** Баева Е.К., e-mail: loka2708@rambler.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.L. Trushko<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
e-mail: Trushko\_VL@pers.spmi.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-9742-1076,

E.K. Baeva<sup>1</sup>, Graduate Student,  
e-mail: loka2708@rambler.ru,  
ORCID ID: 0000-0003-4213-6849,

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

**Corresponding author:** E.K. Baeva, e-mail: loka2708@rambler.ru.

Получена редакцией 07.03.2023; получена после рецензии 06.07.2023; принята к печати 10.11.2023.

Received by the editors 07.03.2023; received after the review 06.07.2023; accepted for printing 10.11.2023.