

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УГЛА ПАДЕНИЯ ЛИТОЛОГИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОЙ ПРОСЛОЙКИ ПОРОД НА УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ ПРИ ЕЕ ПРОХОДКЕ

П.В. Басалаева¹, А.Д. Куранов²

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: basalaeva_pv@pers.spmi.ru

² АО «Гипроцветмет», Москва, Россия

Аннотация: Рассмотрены условия литологического строения Хибинского массива, включая расположение и строение комплекса даек. Представлены результаты исследования изменения напряженно-деформированного состояния массива на контуре одиночной горизонтальной выработки, пройденной на глубине 300 м в тектонически напряженном массиве горных пород, с включением литологической неоднородности. Анализ напряженно-деформированного состояния производился в зависимости от угла падения, а также физико-механических свойств пород дайки. Исследование напряженно-деформированного состояния отслеживалось до пересечения дайки, непосредственно в дайке и при удалении от нее по трем контрольным точкам: в кровле выработки, пяте свода, боку выработки. Кроме этого, были определены коэффициент концентрации напряжений до и после полной проходки выработки, а также деформации контура выработки. Задача была решена в объемной постановке с помощью численного моделирования методом конечных элементов в программном комплексе Abaqus CAE. Сделаны выводы о наиболее благоприятном направлении проходки выработки при подсечке литологической неоднородности, а также вынесено предположение о наличии зоны влияния дайки на устойчивость горной выработки.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, литология, численное моделирование, деформации, устойчивость, удароопасность, дайка, проходка выработки, тектонически напряженный массив.

Для цитирования: Басалаева П. В., Куранов А. Д. Оценка влияния угла падения литологически неоднородной прослойки пород на устойчивость горизонтальной горной выработки при ее проходке // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 3. – С. 17–30. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_17.

Influence of dip angle of lithologically nonuniform interburden on horizontal mine opening stability during driving

P. Basalaeva¹, A.D. Kuranov²

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,

² JSC «Giprotsvetmet», Moscow, Russia

Abstract: The lithological structure of the Khibiny Massif includes a set of dikes, the location and morphology of which are studied. This article describes the change in the stress–strain behavior of rock mass at the boundary of a single horizontal opening driven at a depth of 300 m in rock mass with a lithological discontinuity and under the action of the tectonic stresses. The stress–strain analysis took into account the dip angle and the physical and mechanical properties of the dike. The stresses and strains were traced to the intersection with the dike, directly in the dike and at a distance from it at 3 check points: in the roof of the mine opening, in the springing block and in the sidewall of the opening. Moreover, the stress concentration factor was determined before and after drivage of the opening. The deformations of the boundary of the mine opening were also found. The problem was solved using 3D finite element-based modeling in the Abaqus CAE environment. The most favorable direction of driving under the lithological discontinuity is defined, and a supposition on the zone of influence of the dike on the stability of the mine opening is put forward.

Key words: stress–strain behavior, lithology, numerical modeling, deformations, stability, rock-burst hazard, dike, drivage, tectonic stresses in rock mass.

For citation: Basalaeva P., Kuranov A. D. Influence of dip angle of lithologically nonuniform interburden on horizontal mine opening stability during driving. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(3):17-30. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_17.

Введение

Проектирование горных выработок в тектонически напряженном массиве — сложная геомеханическая задача. Одним из факторов потери устойчивости является сложное литологическое строение [1]. Исследованием вопросов тектоники и геологического строения массива [2, 3], а также оценкой устойчивости горных выработок в сложных горно-геологических условиях занимались многие ученые [4–6].

Вопросы, связанные со строением и формированием напряженно-деформированного состояния массива Хибинских месторождений (рис. 1), достаточно подробно описаны в работах Онохина [7], Турчанинова [8, 9], Козырева [10, 11] и других. Однако изучение геомеханических особенностей этих месторождений продолжается. К ним можно отнести направления исследований, связанные с деформированием и разрушением горных пород, а также обеспечением устойчивости горных выработок [12, 13]. Кроме этого, особое внимание уделяет-

ся вопросам геодинамики, затрагивающим тектоническое и геологическое строение массива. Одной из важнейших особенностей Хибинского массива является развитая тектоника и сложная литология, обуславливающая наличие тектонических напряжений [14, 15], в разы превышающих вертикальные.

Как показывает практика разработки рудных месторождений, при подсечке горной выработкой дайки в условиях тектонически напряженного массива горных пород происходит потеря его устойчивости. При этом отмечается, что характер разрушения приконтурного слоя пород связан не только с пространственными условиями залегания дайки и ее прочностными свойствами, но и с технологическими особенностями проведения примыкающих к дайке участков выработки. В этой связи исследования, направленные на определение наиболее благоприятного расположения горной выработки относительно дайки с учетом ее проходки, являются актуальными и позволяют повысить безопасность веде-

ния горных работ. Целью данной работы является исследование напряженно-деформированного состояния массива, вмещающего горную выработку с учетом влияния пересекающей ее литологической нарушенности в виде дайки, выполненное на основе численного моделирования.

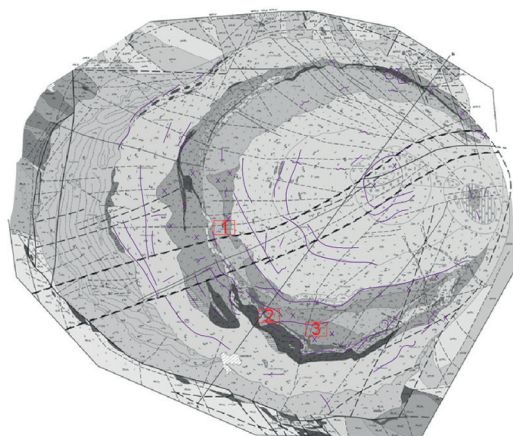
Влияние литологически неоднородного массива горных пород на напряженно-деформированное состояние в окрестности горной выработки учитывается при решении прикладных задач геомеханики. Оценка устойчивости незакрепленной выработки сводчатой формы, расположенной в неоднородном трещиноватом массиве, рассматривалась в [16]. Дженком и Диасом выполнена оценка смещений поверхности над незакрепленной выработкой в слоистом массиве вблизи расположенного на поверхности объекта [17].

Достаточно много исследований связано с более жесткими и слабыми прослойками пород и их влиянием на НДС как на закрепленных выработках различного сечения [18], так и на незакрепленных [19]. В работе [20] было проведено исследование по обеспечению устойчивости незакрепленной горной выработки, расположенной в слое пес-

чаника, лежащим и висячим боком которого являются мощные слои аргиллита. В статье Нунеса и Мегуда [21] было проанализировано влияние тонкого слоя прочных пород, залегающих над тоннелем, на напряженно-деформируемое состояние обделки с помощью численного моделирования с верификацией на эквивалентных материалах, также в работе [22] исследован случай, когда раздел пород пересекает поперечное сечение выработки.

В настоящее время численное моделирование является одним из наиболее распространенных инструментов решения задач геомеханики, связанных с изменением напряженно-деформируемого состояния массива на контуре выработки. Используются различные программные комплексы, реализующие метод конечных элементов, метод дискретных элементов, метод конечных разностей, а также их комбинации [23].

В статье [24] было исследовано влияние ослабленного типа руд на устойчивость незакрепленной горной выработки. В работе была рассмотрена численная модель массива, состоящего из двух типов пород. Методом конечных элементов были выявлены закономерности изменения напряжений и деформаций



- 1 – месторождение Кукисвумчорр
- 2 – месторождение Юкспор
- 3 – месторождение Расвумчорр
- фиолетовый контур – дайки различных конфигураций

Рис. 1. Геологическая схема Хибинского массива с учетом даек

Fig. 1. Geological scheme of the Khibiny massif taking into account dikes

при пересечении незакрепленной выработкой сводчатой формы, пройденной заходками вкрест зоны ослабления. Предложенная автором модель может быть использована для оценки напряженно-деформированного состояния при пересечении неоднородных участков массива.

В [25] проведено исследование геомеханического состояния массива осадочных пород, вмещающего выработку и дизъюнктивное нарушение. В данной работе трасса выработки и простирание нарушения параллельны. Модель была реализована с помощью двух методов: фиктивных нагрузок и разрывных смещений, описывающих граничные условия модели. В результате было выявлено, что зоны нарушения сплошности зависят от углов конфигурации нарушения.

В [26] рассмотрено формирование естественного НДС в массиве, сложенном различными слоями пород, и его изменение при проведении горной выработки. В результате методом конечных элементов были выявлены закономерности формирования напряженного состояния неоднородного массива при различных углах залегания контакта пород.

Методы. Численное моделирование влияния угла падения и физико-механических свойств дайки относительно массива вмещающих пород

Прогноз развития напряженно-деформированного состояния незакрепленной горной выработки, расположенной в литологически неоднородном массиве на

глубине 300 м, выполнялся в пространственной постановке с учетом азимута падения дайки. Апробирование предложенного подхода было выполнено для случаев проявления горного давления в динамической форме для выработок, пройденных в массиве апатит-нефелиновых руд. Хибинский массив характерен наличием крутопадающих даек с различными деформационными и прочностными характеристиками, отличающимися до 5 раз. Мощность данных литологических неоднородностей варьируется от сантиметров до первых метров. В качестве примера на рис. 2 отображены участки горных выработок, на которых были отмечены проявления горного давления в виде стреляний и шелушений.

При разработке численной модели учитывалось следующее: горная выработка имела арочную форму поперечного сечения, рудный массив заменялся линейно деформируемой средой. Проходка выработки заходками по 2 м осуществлялась путем удаления из модели элементов, попадающих в сечение выработки. Мощность дайки принималась равной 1 м и описывалась отличными от основной части модели упругими константами. На рис. 3 представлена расчетная схема модели. Сама дайка представлена материалами мончикита и эгирина, а вмещающие породы — рудным массивом.

Переход от физико-механических свойств образцов горной породы (см. табл. 1), полученных при лабораторных испытаниях, к действительным расчетным характеристикам горного массива

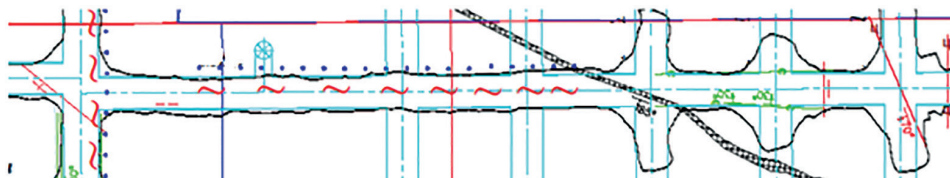


Рис. 2. Участок плана горных выработок

Fig. 2. Section of the mine plan

(табл. 2) выполнен в соответствии со следующими зависимостями.

Модуль упругости с учетом структурного ослабления определяется по формуле Бенявского [27]:

$$E_m = E \cdot \left(\frac{RMR - 100}{36} \right), \quad (1)$$

где E – модуль общей деформации пород по результатам испытаний; RMR – рейтинг массива горных пород.

Коэффициент Пуассона с учетом структурного ослабления можно определить из соотношения [27]:

$$\nu_M = 0,5 - 0,2 \cdot \frac{RMR}{RMR + 0,2(100 - RMR)} \quad (2)$$

По боковым граням модели запрещались перемещения по оси Z , нижней и верхней – по оси Y , торцевым – по оси X . Дайка располагалась в центре модели, что давало, благодаря размеру модели ($60 \times 60 \times 80$ м), возможность оценивать изменение напряжений на контуре выработки.

Напряженное состояние массива задавалось, исходя из расположения выработки на глубине 300 м и наличия тектонической составляющей среды.

Величины вертикальных (σ_y) и горизонтальных (σ_x, σ_z) составляющих напряжений определялись по следующим формулам:

$$\sigma_y = \gamma H, \quad (3)$$

$$\sigma_x = \sigma_z = \lambda \gamma H, \quad (4)$$

где λ – коэффициент бокового давления, принят равным 3; γ – удельный вес пород; H – глубина заложения выработки.

Согласно расчетам, вертикальные напряжения в верхней точке модели были приняты $\sigma_y = 13,02$ МПа, в нижней $\sigma_y = 14,76$ МПа, а горизонтальные $\sigma_x = \sigma_z = 39,06$ МПа и 44,28 МПа соответственно.

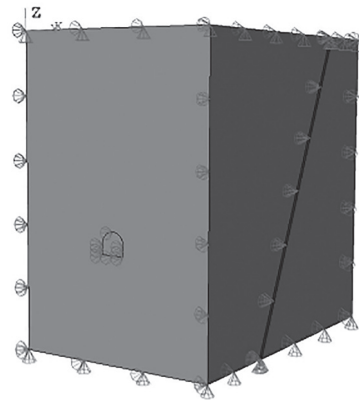


Рис. 3. Расчетная схема модели

Fig. 3. Calculation scheme of the model

Таблица 1

Физико-механические свойства горных пород, полученные по результатам лабораторных испытаний
Physical and mechanical properties of rocks obtained from laboratory tests

Прочность на одноосное сжатие, МПа	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
Мончикит		
312	76 000	0,27
Эгирин		
26	29 400	0,19
Руда		
120	35 000	0,33

Таблица 2

Физико-механические свойства горных пород, принятые при моделировании
Physical and mechanical properties of rocks assumed in modeling

Модуль деформации, ГПа	Коэффициент Пуассона
Мончикит (дайка)	
21,8	0,33
Эгирин (дайка)	
8,4	0,33
Руда	
10	0,33

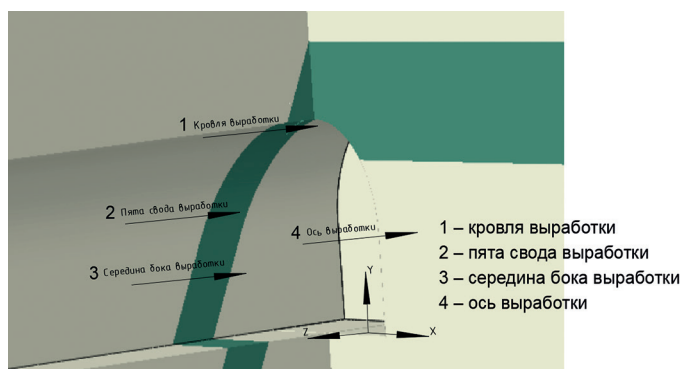


Рис. 4. Направления снятия напряжений

Fig. 4. Stress relief directions

Модели были разбиты на 10-узловые квадратичные элементы таким образом, что на контуре выработки размер элементов не превышал 0,2 м, а на границе модели — 2 м.

Результаты исследования

В результате численного моделирования были получены данные по распределению напряжений в массиве горных пород в трех положениях: до пересечения дайки, при пересечении и после пересечения дайки с изменением угла на 5° в диапазоне от 65° до 90° залегания дайки. На рис. 4 можно увидеть направления снятия напряжений относительно поперечного сечения выработки, по которым производился анализ НДС массива.

По оси аппликат откладывается участок перед забоем, затем плоскость забоя (пунктирная линия) и нетронутый массив горных пород. На графиках на рис. 5 изображены нормальные тангенциальные напряжения до пересечения дайки, при ее пересечении и после ее пересечения. Расстояние откладывается согласно эквивалентному радиусу выработки круглого очертания той же площади, что и арочного:

$$R_0 = \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (5)$$

где S — площадь выработки арочного очертания, m^2 .

При расположении забоя до пересечения дайки нормальные тангенциальные напряжения в кровле выработки равны $\sigma_M = \sigma_3 = 107$ МПа при любом угле падения. При приближении к груди забоя напряжения уменьшаются на расстоянии, равном $1R_0$, достигая своего минимума на расстоянии $0,1 - 0,3 R_0$ от груди забоя, затем резко увеличиваются в плоскости забоя и достигают своего максимума (см. рис. 3) при угле 65° , $\sigma_M = 113$ МПа, $\sigma_3 = 112,7$ МПа; при угле 70° , $\sigma_M = 113$ МПа, $\sigma_3 = 117$ МПа; при угле 75° , $\sigma_M = 119$ МПа, $\sigma_3 = 125$ МПа; при угле 80° , $\sigma_M = 125$ МПа, $\sigma_3 = 125,5$ МПа; при угле 85° , $\sigma_M = 119,3$ МПа, $\sigma_3 = 121,5$ МПа; при угле 90° , $\sigma_M = 119,3$ МПа, $\sigma_3 = 121,5$ МПа.

При продвижении в массив значения нормальных тангенциальных напряжений по трассе выработки падают, и на расстоянии $0,3R_0$ за плоскостью забоя напряжения уменьшаются и стремятся к значениям в ненарушенном массиве.

В боку выработки в зоне дайки нормальные тангенциальные напряжения на расстоянии $0,8R_0$ от забоя составляют $\sigma_M = \sigma_3 = 23$ МПа вне зависимости от угла падения и пород дайки. Однако на расстоянии $0,3R_0$ они резко возрастают в плоскости забоя, а затем так же стремятся к значениям напряжений в не-

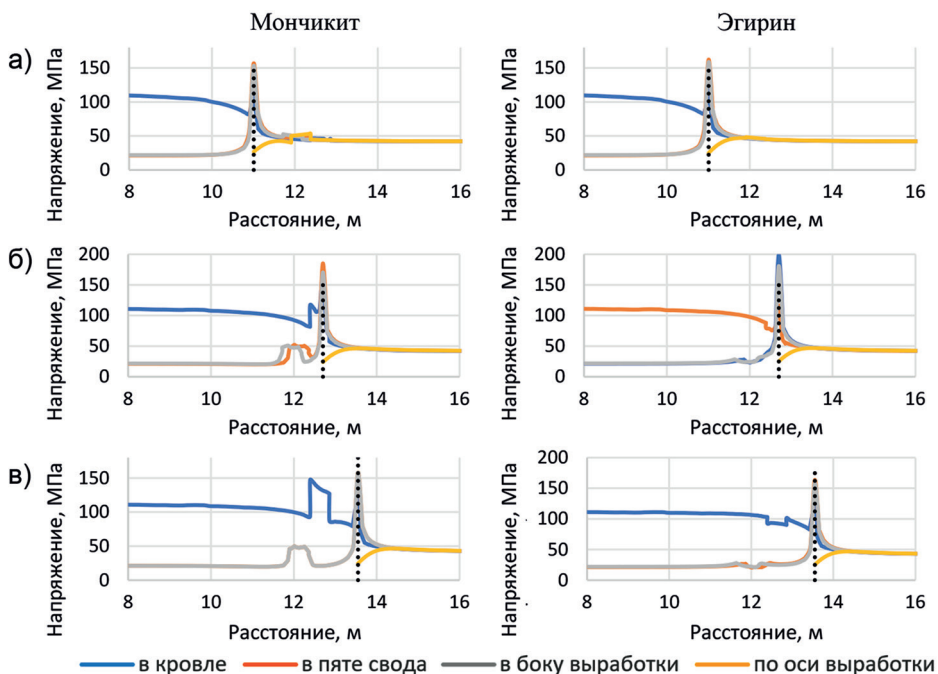


Рис. 5. Характерное распределение напряжений на контуре выработки вблизи дайки модели: забой расположен за 2 м до дайки (а); забой пересекает дайку (б); забой расположен через 2 м после дайки (в)
 Fig. 5. Characteristic stress distribution on the excavation contour near the model dike: the face is located 2 m before the dike (a); the face crosses the dike (b); the face is located 2 m after the dike (v)

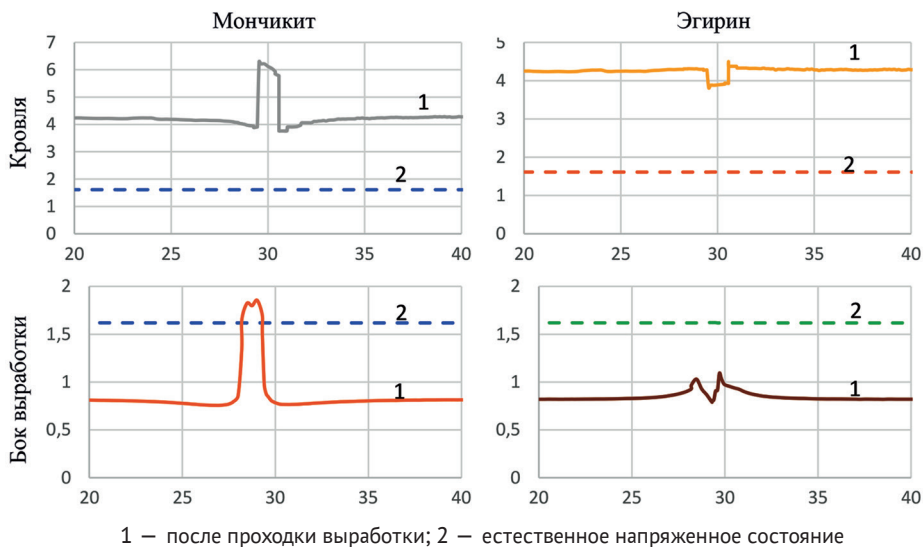


Рис. 6. Коэффициент концентрации максимальных нормальных тангенциальных напряжений в кровле и боку выработки при различных типах заполнителя дайки и угле падения 65° модели
 Fig. 6. Coefficient of concentration of maximum compressive stresses in the roof and side of the excavation at different types of dike filler and dip angle of 65° model

тронутом массиве. Распределение напряжений в пяте свода имеет аналогичное распределение, как и в боку выработки.

По оси выработки сжимающие напряжения в плоскости забоя составляют $\sigma_m = \sigma_3 = 25$ МПа, затем постепенно возрастают и на расстоянии $0,9R_0$ приходят к значениям напряжений в нетронутым массиве.

В ходе анализа распределения напряжений на контуре выработки было выявлено, что максимальные нормальные тангенциальные напряжения формируются в кровле выработки и достигают 50–70% от прочности горных пород на одноосное сжатие. Как следствие, это может привести к шелушению и динамическому заколообразованию в кровле выработки.

Рассмотрим распределение напряжений в массиве после проведения выработки. На рис. 6 изображены изменения коэффициентов концентрации напряжений в естественном напряженном состоянии и после проходки выработки на всю длину.

Коэффициент концентрации напряжений рассчитывался по формуле

$$k = \frac{\sigma}{\lambda \gamma H}, \quad (6)$$

где σ — предел прочности на сжатие, МПа.

Коэффициенты концентрации нормальных тангенциальных напряжений

в нетронутым массиве имеют практически линейный вид, в то время как после проходки выработки происходит перераспределение напряжений, приводящее к скачкообразному распределению в зоне дайки. Распределение концентраций напряжений имеют локальные минимумы (при меньшей прочности заполнителя) и максимумы (при более прочных породах дайки) в одних и тех же зонах в пределах литологической неоднородности. Однако максимальные напряжения достигаются в кровле выработки вне зависимости от свойств заполнителя.

Вблизи литологической неоднородности, представленной более прочными породами, при приближении к ней на расстоянии около 2 м происходит разгрузка массива, а далее — резкое увеличение концентрации; в случае же с дайкой, имеющей меньшую прочность, чем вмещающие породы, происходит небольшое увеличение концентрации напряжений на расстоянии 2 м, а далее — скачкообразное уменьшение напряжений. Изменение угла падения дайки не влияет на характер изменения графиков, а только на их численные значения.

Исходя из полученных коэффициентов концентрации напряжений, представленных в табл. 2 и 3, можно предположить, что наиболее благоприятным является угол падения крутопадающей дайки, залегающей под углом, близким к 65° , а также близким к 90° .

Таблица 3

Коэффициенты концентраций нормальных тангенциальных напряжений в кровле выработки

Coefficients of stress concentration in the roof of excavation

Среда	Коэффициенты концентрации напряжений в верхняке при углах залегания дайки					
	65°	70°	75°	80°	85°	90°
Руда	4,20	4,23	4,29	4,29	4,26	4,23
Эгирин	3,91	3,92	3,92	3,93	3,92	3,92
Мончикит	5,87	5,95	5,95	5,93	5,92	5,94

Таблица 4

Коэффициенты концентрации нормальных тангенциальных напряжений в боку выработки
Stress concentration coefficients in the side of the excavation

Среда	Коэффициенты концентрации напряжений в боку выработки при углах залегания дайки					
	65°	70°	75°	80°	85°	90°
Руда	0,82	0,82	0,82	0,82	0,81	0,82
Эгирин	0,78	0,76	0,74	0,71	0,72	0,70
Мончикит	1,86	1,96	1,96	1,88	1,91	1,90

Таблица 5

Значения деформаций в кровле при пересечении выработки модели
Values of deformations in the roof at the intersection of the model excavation

	ε_p	ε_r при пересечении дайки в кровле					
		65°	70°	75°	80°	85°	90°
Мончикит	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,49 \cdot 10^{-3}$	$1,51 \cdot 10^{-3}$	$1,68 \cdot 10^{-3}$	$1,71 \cdot 10^{-3}$	$1,64 \cdot 10^{-3}$	$1,34 \cdot 10^{-3}$
Эгирин	$4 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,68 \cdot 10^{-3}$	$2,89 \cdot 10^{-3}$	$2,98 \cdot 10^{-3}$	$2,76 \cdot 10^{-3}$	$2,64 \cdot 10^{-3}$
Руда	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^{-3}$	$1,37 \cdot 10^{-3}$

Наряду с этим для оценки возможности динамических форм разрушения горных пород в приконтурной зоне по деформационному критерию [28] было выполнено сравнение величин деформаций растяжения, полученных в результате моделирования, с их предельными значениями (табл. 4 и 5).

Предельная величина деформации разрушения при одноосном растяжении рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E}, \quad (7)$$

где σ_p — предел прочности образца горной породы на растяжение, МПа, E — модуль деформации, МПа.

При сравнении результатов значений деформаций, представленных в табл. 5 и 6, можно предположить, что при углах падения дайки наибольшую опасность представляют дайки, залегающие в пределах 75–80°, что подтверждается полученными выше результатами.

Обсуждения результатов

Коэффициент концентрации напряжений в массиве в естественном состоянии в боку выработки и в кровле практически одинаков и составляет 1,61. После проходки выработки в зоне дайки при перераспределении напряженно-деформированного состояния наблюда-

Таблица 6

Значения деформаций в кровле после пересечения выработки модели
Values of deformations in the roof after crossing the model excavation

	ε_p	ε_r после пересечения дайки в кровле					
		65°	70°	75°	80°	85°	90°
Мончикит	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$1,93 \cdot 10^{-3}$	$1,56 \cdot 10^{-3}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$
Эгирин	$4 \cdot 10^{-3}$	$3,13 \cdot 10^{-3}$	$3,16 \cdot 10^{-3}$	$3,26 \cdot 10^{-3}$	$3,26 \cdot 10^{-3}$	$3,21 \cdot 10^{-3}$	$3,18 \cdot 10^{-3}$
Руда	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,47 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$1,47 \cdot 10^{-3}$	$1,47 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^{-3}$

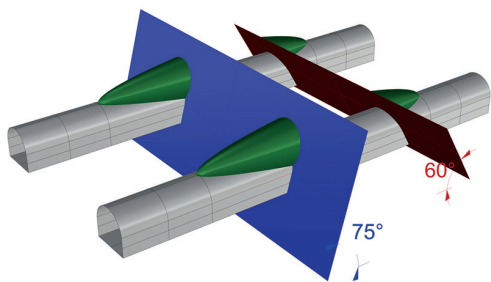


Рис. 7. Предполагаемые зоны влияния неоднородностей

Fig. 7. Estimated zones of influence of inhomogeneities

ется рост напряжений в зоне мончииковой дайки на 56% в боку выработки и 41% в кровле и уменьшение в зоне эгириновой дайки на 5% и 9% соответственно. Напряжения стремятся к значениям напряжений в нетронутом массиве на расстоянии $1,3R_0$.

Полученные в результате моделирования напряжения и деформации на контуре выработки позволяют сделать вывод, что при увеличении угла падения значения определяемых величин достигают максимума при углах $75 - 80^\circ$, а далее, при приближении к вертикали, — уменьшаются. Можно предположить, что это связано с перераспределением напряжений от висячего и лежачего бока пород относительно дайки.

Также стоит отметить, что величина радиальных деформаций растяжения в кровле в наиболее напряженных зонах меньше, из чего можно сделать вывод о том, что в данных случаях возможны локальные динамические проявления в виде стреляний.

Кроме этого, по результатам исследования можно предположить, что зона

влияния дайки будет зависеть от угла ее падения. Наибольшая зона будет при углах $75 - 80^\circ$, однако ее требуется учитывать при проходке выработки и при меньших углах, так как напряжения в дайке значительно превышают устоявшиеся напряжения на контуре выработки, особенно в кровле.

В дальнейших исследованиях планируется изучение размера зон влияния неоднородностей, а также уточнение модели с учетом переходной зоны и изменения ее физико-механических свойств (рис. 7).

Заключение

В рамках данного исследования авторами было изучено влияние угла залегания дайки на напряженно-деформированное состояние на контуре выработки, расположенной на глубине 300 м в тектонически напряженном массиве. По результатам исследования можно заметить, что прослойка (дайка) пород может являться как зоной с концентрацией напряжений, так и зоной разгрузки, в зависимости от соотношения физико-механических свойств непосредственно самой дайки и вмещающих ее пород.

Сделан вывод о возможности проявления динамических форм горного давления, а также выявлен наиболее благоприятный угол падения крутопадающей дайки для ее подсечки. Представленные результаты могут быть использованы при обосновании выбора и определении параметров мероприятий по обеспечению устойчивости горных выработок на участках с литологической неоднородностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Korchak P. Investigation of regularities of brittle fracture formation around mine workings in overstressed rocks at the mines of Kirovsk branch of JSC «Apatit» // E3S Web of Conferences. 2018, vol. 56, article 02023. DOI: 10.1051/e3sconf/20185602023.

2. Вербилло П. Э., Вильнер М. А. Изучение анизотропии прочности и масштабного эффекта трещиноватого массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-2. — С. 47–59. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_47.

3. Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., Petrushin V. V. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone // Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik. 2022, vol. 12, pp. 151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.

4. 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.

5. Petrov D. N., Zubkov V. P. Influence of stope sill design on the loss from freezing of muck during ore drawing in conditions of negative temperatures in the working excavation // Russian Mining Industry. 2023, vol. 2, pp. 57–61. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-2-57-61.

6. Корчак П. А. Геомеханический прогноз развития зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжения горных выработок в перенапряженном породном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5. – С. 85–98. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_85.

7. Онохин Ф. М. Особенности структуры Хибинского массива и апатит-нефелиновых месторождений. – Л.: Наука, 1975. – 106 с.

8. Турчанинов И. А., Воларович М. П., Бондаренко А. Т., Ковалева Г. А., Медведев Р. В., Томашевская И. С., Тюремнов В. А. Атлас физических свойств минералов и пород Хибинских месторождений. – Л.: Наука, 1975. – 71 с.

9. Турчанинов И. А., Марков Г. А., Иванов В. И., Козырев А. А. Тектонические напряжения и устойчивость горных выработок. – Л.: Наука, 1978. – 256 с.

10. Козырев А. А., Жиров Д. В., Климов С. А., Семенова И. Э., Аветисян И. М., Савченко С. Н. 3D-моделирование структурных неоднородностей породных массивов центрального типа фенноскандинавского кристаллического щита / Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах. Т. 2 – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019. – 543 с. DOI: 10.15372/GEOMECHANICAL2019OVN.

11. Козырев А. А., Земцовский А. В., Кулькова М. С., Соннов М. А. Опыт применения САЕ Fidesys при разработке численных геомеханических моделей Ждановского месторождения // Горная промышленность. – 2021. – № 6. – С. 94–98. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-6-94-98.

12. Корчак П. А., Карасев М. А. Геомеханическое обоснование формирования зон хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок рудников АО «Апатит» // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. – № 1. – С. 67–80. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-67-80.

13. Марысюк В. П., Шиленко С. Ю., Андреев А. А., Шабаров А. Н. Методика расчета межскважинных целиков для формирования защищенных зон в условиях удароопасных месторождений Талнаха // Горный журнал. – 2023. – № 1. – С. 106–112. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.18.

14. Беляков Н. А., Морозов К. В., Емельянов И. А. Методика обработки данных полевых испытаний по оценке естественного напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки // Горный журнал. – 2023. – № 5. – С. 89–96. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.13.

15. Сабянин Г. В., Алборов А. Э., Андреев А. А., Румянцев А. Е. Выбор оптимального месторасположения скважины для оценки напряженного состояния геомеханическим методом по дисквированию керна // Горный журнал. – 2022. – № 10. – С. 58–63. DOI: 10.17580/gzh.2022.10.09.

16. Jingyuan W., Xianghui D., Weiping C. Numerical analysis on the stability of layered surrounding rock tunnel under the conditions of different inclination angle and thickness // American Journal of Traffic and Transportation Engineering. 2019, vol. 4, no. 2, pp. 67–74. DOI: 10.11648/j.ajtte.20190402.14.

17. Jenck O., Dias D. Analyse tridimensionnelle en différences finies de l'interaction entre une structure en béton et le creusement d'un tunnel à faible profondeur // Geotechnique. 2004, vol. 54, no. 8, pp. 519–528. DOI: 10.1680/geot.2004.54.8.519.

18. Zhang J., Kuang M., Zhang Y., Feng T. Evaluation and analysis of the causes of a landslide and treatment measures during the excavation of a tunnel through a soil-rock interface // Engineering Failure Analysis. 2021, vol. 130, article 105784. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105784.

19. Ngoc Anh Do, Daniel Dias, van Diep Dinh, Tien Tung Tran, van Canh Dao, Dao Viet Doan, Phuc Nhan Nguyen Behavior of noncircular tunnels excavated in stratified rock masses – Case of underground coal mines // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019, vol. 11, no. 1, pp. 99–110. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.05.005.

20. Sun X., Feng Chen, Miao Ch., Song P., Li G., Zhao Ch., Xia X. Physical modeling of deformation failure mechanism of surrounding rocks for the deep-buried tunnel in soft rock strata during the excavation // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 74, pp. 247–261. DOI: 10.1016/j.tust.2018.01.022.

21. Nunes M. A., Meguid M. A. A study on the effects of overlying soil strata on the stresses developing in a tunnel lining // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2009, vol. 24, pp. 716–722. DOI: 10.1016/j.tust.2009.04.002.

22. Zhang D., Huang H., Hu Q., Jiang F. Influence of multi-layered soil formation on shield tunnel lining behavior // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015, vol. 47, pp. 123–135. DOI: 10.1016/j.tust.2014.12.011.

23. Деменков П. А., Романова Е. Л., Котиков Д. А. Исследование формирования напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола и вмещающего массива горных пород в условиях неравномерности его контура // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2023. – № 11. – С. 33–48. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_33.

24. Попов М. Г. Прогнозирование устойчивости выработок при пересечении нарушенных зон породного массива // *Записки Горного института*. – 2012. – Т. 199. – С. 51–54.

25. Черданцев Н. В. Исследование состояния анизотропного массива горных пород в окрестности выработки, пройденной вблизи дизъюнктивного нарушения // *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. – 2017. – № 2. – С. 34–40.

26. Петров Д. Н., Моисеев В. И., Ларионов Р. И. Напряженно-деформированное состояние пород вокруг одиночной выработки в неоднородном массиве // *Записки Горного института*. – 2006. – Т. 168. – С. 231–234.

27. Vásárhelyi B., Kovács D. Empirical methods of calculating the mechanical parameters of the rock mass // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2017, vol. 61, no. 1, pp. 39–50. DOI: 10.3311/PPci.10095.

28. Заславский Ю. З. Исследование проявлений горного давления в капитальных выработках глубоких шахт Донецкого бассейна. – М.: Недра, 1966. – 180 с.

29. Verbilo P., Karasev M., Belyakov N., Iovlev G. Experimental and numerical research of jointed rock mass anisotropy in a three-dimensional stress field // *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*. 2022, vol. 37, no. 2, pp. 109–122. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.10.

30. Protosenya A., Vilner M. Assessment of excavation intersections' stability in jointed rock masses using the discontinuum approach // *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*. 2022, vol. 37, no. 2, pp. 137–147. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.12. **MIAB**

REFERENCES

1. Korchak P. Investigation of regularities of brittle fracture formation around mine workings in overstressed rocks at the mines of Kirovsk branch of JSC «Apatit». *E3S Web of Conferences*. 2018, vol. 56, article 02023. DOI: 10.1051/e3sconf/20185602023.

2. Verbilo P. E., Vilner M. A. Study of the jointed rock mass uniaxial compression strength anisotropy and scale effect. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 47–59. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_47.

3. Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., Petrushin V. V. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*. 2022, vol. 12, pp. 151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.

4. 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.

5. Petrov D. N., Zubkov V. P. Influence of stope sill design on the loss from freezing of muck during ore drawing in conditions of negative temperatures in the working excavation. *Russian Mining Industry*. 2023, vol. 2, pp. 57–61. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-2-57-61.

6. Korchak P. A. Geomechanical prediction of growth of brittle fracture zones in the vicinity of underground excavations in over-stress rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5, pp. 85–98. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_85.

7. Onokhin F. M. *Osobennosti struktury Khibinskogo massiva i apatit-nefelinovykh mestorozhdeniy* [Features of the structure of the Khibiny massif and apatite-nepheline deposits], Leningrad, Nauka, 1975, 106 p.

8. Turchaninov I. A., Volarovich M. P., Bondarenko A. T., Kovaleva G. A., Medvedev R. V., Tomashchinskaya I. S., Tyuremnov V. A. *Atlas fizicheskikh svoystv mineralov i porod Khibinskikh mestorozhdeniy* [Atlas of physical properties of minerals and rocks of the Khibiny deposits], Leningrad, Nauka, 1975, 71 p.

9. Turchaninov I. A., Markov G. A., Ivanov V. I., Kozyrev A. A. *Tektonicheskie napryazheniya i ustoychivost' gornyykh vyrabotok* [Tectonic stresses and stability of mine workings], Leningrad, Nauka, 1978, 256 p.

10. Kozyrev A. A., Zhirov D. V., Klimov S., Semenova I. E., Avetisyan I. M., Savchenko S. N., Semenova I. E., Avetisyan I. M., Savchenko S. N. 3D-modeling of structural heterogeneities of rock massifs of the central type of the Fennoscandinavian crystalline shield. *Geomekhanicheskie polya i protsessy: eksperimental'no-analiticheskie issledovaniya formirovaniya i razvitiya ochagovykh zon katastroficheskikh sobyitij v gornotekhnicheskikh i prirodnykh sistemakh*. T. 2 [Geomechanical fields and processes: experimental and analytical studies of the formation and development of focal zones of catastrophic events in mining and natural systems, vol. 2], Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2019, 543 p. DOI: 10.15372/GEOMECHANICAL2019OVN.

11. Kozyrev A. A., Kagan M. M., Konstantinov K. N., Zhirov D. V. Changes in strain and slope geo-structural block in the preparation and realization of technogenic earthquake. *Russian Mining Industry Journal*. 2021, no. 6, pp. 94 – 98. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-6-94-98.

12. Korchak P. A., Karasev M. A. Geomechanical prediction of the brittle fracture zones in rocks in the vicinity of the excavation junction of Ltd «Apatit» mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 67 – 80. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-67-80.

13. Marysyuk V. P., Shilenko S. Yu., Andreev A. A., Shabarov A. N. Interwell area design procedure to generate safe zones in rockburst-hazardous conditions of Talnakh deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 1, pp. 106 – 112. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.18.

14. Belyakov N. A., Morozov K. V., Emelyanov I. A. Data processing in full-scale in-situ stress testing by overcoring. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 89 – 96. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.13.

15. Sabyanin G. V., Alborov A. E., Andreev A. A., Rummyantsev A. E. Optimizing borehole location for stress state assessment by geomechanical method of core discing. *Gornyi Zhurnal*. 2022, no. 10, pp. 58 – 63. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.10.09.

16. Jingyuan W., Xianghui D., Weiping C. Numerical analysis on the stability of layered surrounding rock tunnel under the conditions of different inclination angle and thickness. *American Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2019, vol. 4, no. 2, pp. 67 – 74. DOI: 10.11648/j.ajtte.20190402.14.

17. Jenck O., Dias D. Analyse tridimensionnelle en différences finies de l'interaction entre une structure en béton et le creusement d'un tunnel à faible profondeur. *Geotechnique*. 2004, vol. 54, no. 8, pp. 519 – 528. DOI: 10.1680/geot.2004.54.8.519.

18. Zhang J., Kuang M., Zhang Y., Feng T. Evaluation and analysis of the causes of a landslide and treatment measures during the excavation of a tunnel through a soil-rock interface. *Engineering Failure Analysis*. 2021, vol. 130, article 105784. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105784.

19. Ngoc Anh Do, Daniel Dias, van Diep Dinh, Tien Tung Tran, van Canh Dao, Dao Viet Doan, Phuc Nhan Nguyen Behavior of noncircular tunnels excavated in stratified rock masses – Case of underground coal mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019, vol. 11, no. 1, pp. 99 – 110. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.05.005.

20. Sun X., Feng Chen, Miao Ch., Song P., Li G., Zhao Ch., Xia X. Physical modeling of deformation failure mechanism of surrounding rocks for the deep-buried tunnel in soft rock strata during the excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 74, pp. 247 – 261. DOI: 10.1016/j.tust.2018.01.022.

21. Nunes M. A., Meguid M. A. A study on the effects of overlying soil strata on the stresses developing in a tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2009, vol. 24, pp. 716 – 722. DOI: 10.1016/j.tust.2009.04.002.

22. Zhang D., Huang H., Hu Q., Jiang F. Influence of multi-layered soil formation on shield tunnel lining behavior. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015, vol. 47, pp. 123 – 135. DOI: 10.1016/j.tust.2014.12.011.

23. Demenkov P. A., Romanova E. L., Kotikov D. A. Stress-strain analysis of vertical shaft lining and adjacent rock mass under conditions of irregular contour. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 11, pp. 33 – 48. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_33.

24. Popov M. G. Prediction of the mine working stability in the massif which are crossing zone of weakening. *Journal of Mining Institute*. 2012, vol. 199, pp. 51 – 54. [In Russ].
25. Cherdantsev N. V. Investigation of the state of anisotropic rock massif in the vicinity of the excavation near the disjunctive disturbance. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2017, no. 2, pp. 34 – 40. [In Russ].
26. Petrov D. N., Moiseev V. I., Larionov R. I. Stress-strain state of rocks around a single mine in an inhomogeneous massif. *Journal of Mining Institute*. 2006, vol. 168, pp. 231 – 234. [In Russ].
27. Vásárhelyi B., Kovács D. Empirical methods of calculating the mechanical parameters of the rock mass. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2017, vol. 61, no. 1, pp. 39 – 50. DOI: 10.3311/PPci.10095.
28. Zaslavskiy Yu. Z. *Issledovanie proyavleniy gornogo davleniya v kapital'nykh vyrabotkakh glubokikh shakht Donetskogo basseyna* [Study of manifestations of rock pressure in capital workings of deep mines of Donetsk basin], Moscow, Nedra, 1966, 180 p.
29. Verbilo P., Karasev M., Belyakov N., Iovlev G. Experimental and numerical research of jointed rock mass anisotropy in a three-dimensional stress field. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*. 2022, vol. 37, no. 2, pp. 109 – 122. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.10.
30. Protosenya A., Vilner M. Assessment of excavation intersections' stability in jointed rock masses using the discontinuum approach. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*. 2022, vol. 37, no. 2, pp. 137 – 147. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.12.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Басалаева Полина Вячеславовна – аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,

e-mail: basalaeva_pv@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-6473-9926,

Куранов Антон Дмитриевич – канд. техн. наук,
директор по науке и инновационной деятельности,
АО «Гипроцветмет», e-mail: a.kuranov@g-cm.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2032-4446.

Для контактов: Басалаева П.В., e-mail: basalaeva_pv@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

P. Basalaeva, Graduate Student,
Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia,

e-mail: basalaeva_pv@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-6473-9926,

A.D. Kuranov, Ph.D.,
Director of Science and Innovation,
JSC «Giprotsvetmet», Moscow, 129075, Russia,

e-mail: a.kuranov@g-cm.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2032-4446.

Corresponding author: P. Basalaeva, e-mail: basalaeva_pv@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 06.09.2023; получена после рецензии 25.12.2023; принята к печати 10.02.2024.
Received by the editors 06.09.2023; received after the review 25.12.2023; accepted for printing 10.02.2024.

