

Геотехническое обоснование первоочередной разрезки залежей богатых руд шахты «Глубокая» методами пошагового численного моделирования в условиях гравитационно-тектонического поля напряжений

А.А. Давыдов¹✉, М.А. Соннов², А.Е. Румянцев³, Ю.Ю. Головченко³, А.В. Трофимов³

¹ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», г. Москва, Российская Федерация

²ООО «Фидесис», г. Москва, Российская Федерация

³ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ DavydovAA@nornik.ru

Резюме: В связи с разработкой месторождений на больших глубинах особую актуальность приобретают проблемы обеспечения устойчивости камер, выбор их ориентации и подбор крепи ещё на стадии проектирования объекта. На больших глубинах вблизи крупных тектонических нарушений фактор природного горного давления начинает играть определяющую роль в устойчивости подземных сооружений, а постоянный рост требований к повышению безопасности подземных сооружений предопределяет необходимость применения современных подходов по определению напряженно-деформированного состояния с применением численного моделирования.

Принятие проектных решений без проведения моделирования может приводить к снижению экономической эффективности и безопасности производства, а иногда невозможности полноценного извлечения запасов.

В исследовании конечно-элементное моделирование было использовано как один из основных методов определения оптимального варианта разрезки и отработки рудного тела богатых руд, расположенного в непосредственной близости от крупномасштабного тектонического нарушения, что провоцирует сложное напряженное состояние самого рудного тела.

На практике метод конечных элементов может быть дискредитирован, а потому требуется описание последовательности методики построения и калибровки конечно-элементных моделей разрезов (вариантов отработки) для верного определения наиболее подходящего варианта отработки, что и сделано в настоящей работе. Комплексный подход включает в себя: формирование сложной пространственной геометрической модели рудных тел с учётом морфологических особенностей залегания; разделение модели на этапы отработки и формирование разных вариантов отработки; определение граничных условий для верного задания тензора Коши; определение модели деформирования и присвоение физико-механических параметров; проведение верификационных расчётов; расчёт всех вариантов моделей, их анализ и выбор наиболее оптимального способа отработки рудной залежи; интерполяцию данных в геомеханическую блочную модель для возможности выбора и обоснования параметров крепей и расчёта устойчивости камер по аналитическим методикам.

Ключевые слова: горные породы, литология, тектоника, целики, опорное давление, богатые руды, вкрапленные руды, закладочный массив, запас прочности, тензор

Для цитирования: Давыдов А.А., Соннов М.А., Румянцев А.Е., Головченко Ю.Ю., Трофимов А.В. Геотехническое обоснование первоочередной разрезки залежей богатых руд шахты «Глубокая» методами пошагового численного моделирования в условиях гравитационно-тектонического поля напряжений. *Горная промышленность*. 2022;(5):83–91. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-83-91>

Geotechnical justification of primary cutting of the ore body of rich ore deposits of “Glubokaya” mine using methods of stepwise numerical simulation under gravitational-tectonic stress field conditions

A.A. Davydov¹✉, M.A. Sonnov², A.Ye. Rumyantsev³, Yu.Yu. Golovchenko³, A.V. Trofimov³

¹PJSC MMC Norilsk Nickel, Moscow, Russian Federation

²Fidesis LLC, Moscow, Russian Federation

³Gipronickel Institute LLC, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ DavydovAA@nornik.ru

Abstract: With regard to mining at depths the issues of ensuring the chambers stability, the choice of their orientation and the support selection still at the design stage are particularly relevant. At depths, near large tectonic disturbances, the factor of natural rock pressure starts to play a defining role in the underground structures stability, and the constant growth of requirements for improving safety of underground structures predetermines the need to incorporate modern approaches to identify the stress-strain state using numerical simulation.

Making design decisions without simulation can lead to a decrease in economic performance and production safety, and sometimes entail the impossibility of full recovery of reserves.

The finite element simulation used in this work as one of the main methods for determining the optimal option for primary cutting of the ore body and mining a rich ore body located in close proximity to large-scale tectonic disturbance that provokes a complex stress state of the ore body itself.

On a practical level, the finite element method can be discredited, and therefore a description of the sequence of techniques for constructing and calibrating finite element models of primary cutting of the ore body (mining options) is required for correct identification of the most suitable mining option, that is done in this work. The integrated approach includes: formation of complex spatial geometric model of ore bodies, taking into account the morphology of bedding; separation of the model into stages of development and forming different variants of development; determination of borderline conditions for Cauchy tensor correct task; determination of deformation model and assignment of physical and mechanical parameters; carrying out verification calculations; calculation of all model variants, their analysis and selection of the most optimal ore deposit mining technique; interpolation of data into geomechanical block model for the possibility of selecting and substantiating the supports parameters and calculating the stability of chambers using analytical tools.

Keywords: rocks, lithology, tectonics, pillars, abutment pressure, rich ores, impregnated ores, backfill, factor of safety, tensor

For citation: Davydov A.A., Sonnov M.A., Rumyantsev A.Ye., Golovchenko Yu.Yu., Trofimov A.V. Geotechnical justification of primary cutting of the ore body of rich ore deposits of “Glubokaya” mine using methods of stepwise numerical simulation under gravitational-tectonic stress field conditions. *Russian Mining Industry*. 2022;(5):83–91. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-83-91>

Введение

При разработке полезных ископаемых на большой глубине особое внимание следует уделять проблеме устойчивости камер, выбору их ориентации и подбору крепи еще на стадии проектирования. Подобные работы заведомо сопряжены с достаточно большими рисками ввиду значительного горного давления. Однако при отработке залежей вблизи крупных тектонических нарушений данный фактор начинает играть решающую роль [1; 2]. Сложное напряженно-деформированное состояние (НДС) массива в подобных зонах должно быть обязательно учтено при проектировании подземных сооружений и ведении очистных работ. Использование моделирования методом конечных элементов помогает получить НДС массива с учетом тектонических нарушений, литологии и даже предварительно заданного природного поля напряжений.

Численное моделирование само по себе не является чем-то новым в сфере решения подобных задач, однако его постоянное развитие помогает учитывать различные особенности поведения скальных массивов, что нашло отражение в работе [3], где приведена разработка новой упруго-пластической модели материала, или же в статье [4], где приводится методология численного моделирования с учетом напряжений, которые возникают в процессе очистных работ.

Ввиду своей универсальности метод конечных элементов в численном моделировании используется сегодня для решения разнообразных задач. Так, в работе [5] рассматривается методика определения НДС трещиноватого массива методом конечных элементов. В статье [6] приводится методика прогноза физико-механических характеристик блочного скального массива при помощи численного моделирования. В исследовании [7] приведена нетривиальная методика оценки сжимаемости порового объема пористых горных пород, для чего была использована конечно-элементная модель на основе данных компьютерной томографии.

Использование численного моделирования дает возможность получить представление о различных процессах, протекающих в скальных массивах, и выяснить взаимосвязь между ними, что нашло отражение в работе [8].

При разработке численных конечно-элементных моделей особое внимание следует уделять построению сеток [9], поскольку от качества и количества конечных элемен-

тов напрямую зависит точность результатов проводимого моделирования. Использование адаптивных сеток позволяет решить проблему перегруженности модели и сохранить точность получаемого решения для интересующих областей [10].

Однако, стоит отметить, что численные методы – это в первую очередь инструмент, использование которого сопряжено с рядом допущений и проблем, что всегда должно учитываться при анализе полученных результатов и моделировании в целом [11]. При расчете скальных массивов это особенно актуально ввиду большой сложности моделируемых структур и широкого спектра моделируемых задач [12].

Моделирование

Для отработки части месторождения, залегающего в непосредственной близости к крупномасштабному тектоническому нарушению, необходимо выполнить предварительное геомеханическое обоснование вариантов разрезки и отработки руд месторождения с применением конечно-элементного моделирования.

Численная модель разработана в программном обеспечении CAE Fidesys с целью оценки напряженно-деформированного состояния массива Октябрьского месторождения в поле шахты «Глубокая» рудника «Скалистый».

Для корректного моделирования напряженно-деформируемого состояния массива необходимо воссоздать историю его нагружения. Иными словами, массив перед началом отработки находится в преднапряженном состоянии, которое вызвано по большей мере действием горного давления от веса породной толщи и тектоническими нарушениями. Для получения корректного распределения напряжений принципиально важными являются следующие аспекты:

1. Задание в геометрии модели сложного пространственного залегания;
2. Учет сложной геометрии интрузии;
3. Введение в модель тектонических нарушений, являющихся зонами ослаблений, по которым происходит смещение блоков пород друг относительно друга.

На первом этапе для формирования объемной твердотельной модели залежей богатых руд шахты «Глубокая» рудника «Скалистый» литологические разности в виде каркасов импортированы из блочной геомеханической моде-

ли, созданной в программе ГИС Micromine. Ввиду особых требований программ конечно-элементного моделирования к качеству триангуляции и по причине того, что при импорте из ГИС систем частыми являются различные артефакты геометрии в виде разрывов полигональной сети, взаимного наложения поверхностей или их пересечения, для создания сложной морфологии геологических структур на основе импортированных каркасов проводилась их регуляризация и упрощение топологии, а для определения пересечения поверхностей создан авторский скрипт, написанный на языке программирования Python с использованием библиотек ezdxf, pandas, scipy.

После перестроения геометрии рудные тела имеют равномерную триангуляцию (рис. 1), при этом полностью повторяют морфологию первоначальных каркасов и имеют значительно меньшее количество треугольников.

Моделирование геометрии производилось с рядом допущений. В частности:

- 1) из опыта эксплуатации моделируемый массив должен иметь минимальную толщину в 5 м;
- 2) тела, находящиеся достаточно близко (менее метра) друг к другу, объединены в единые;
- 3) тектоническим нарушениям, заданным в виде плоскости, придавалась мощность 10 м.

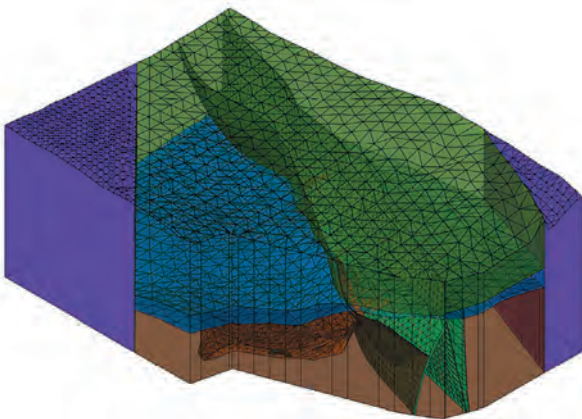


Рис. 1
Общий вид модели каркасов в программе AutoCad после обработки каркасов

Fig. 1
General view of an AutoCad wireframe model after processing the wireframes

На втором этапе геотехниками совместно с технологами сформированы 5 различных вариантов отработки рассматриваемых рудных тел, представлены на рис. 2.

На третьем этапе в программе Autocad производилась разрезка модели в соответствии с вариантами отработки. Пример разрезки богатых руд представлен на рис. 3.

В дальнейшем полученные тела были последовательно импортированы в САЕ Fidesys и разнесены по отдельным группам. Далее были импортированы тектонические нарушения. После импорта всех необходимых тел были произведены булевы операции вычитания.

Модель строилась до земной поверхности с повторением рельефа. Для исключения влияния краевых эффектов и выполнения принципа Сен-Венана рудные тела помещались в объём большого размера (рис. 4), размер объёма с юга на север (ось Y) – 6200 м, с запада на восток (ось X) – 4000 м, по абсолютному значению глубины (ось Z) – 2500 м. Модель строилась в координатах блочной модели с целью возможности дальнейшего экспорта результатов моделирования в блочную геомеханическую модель.

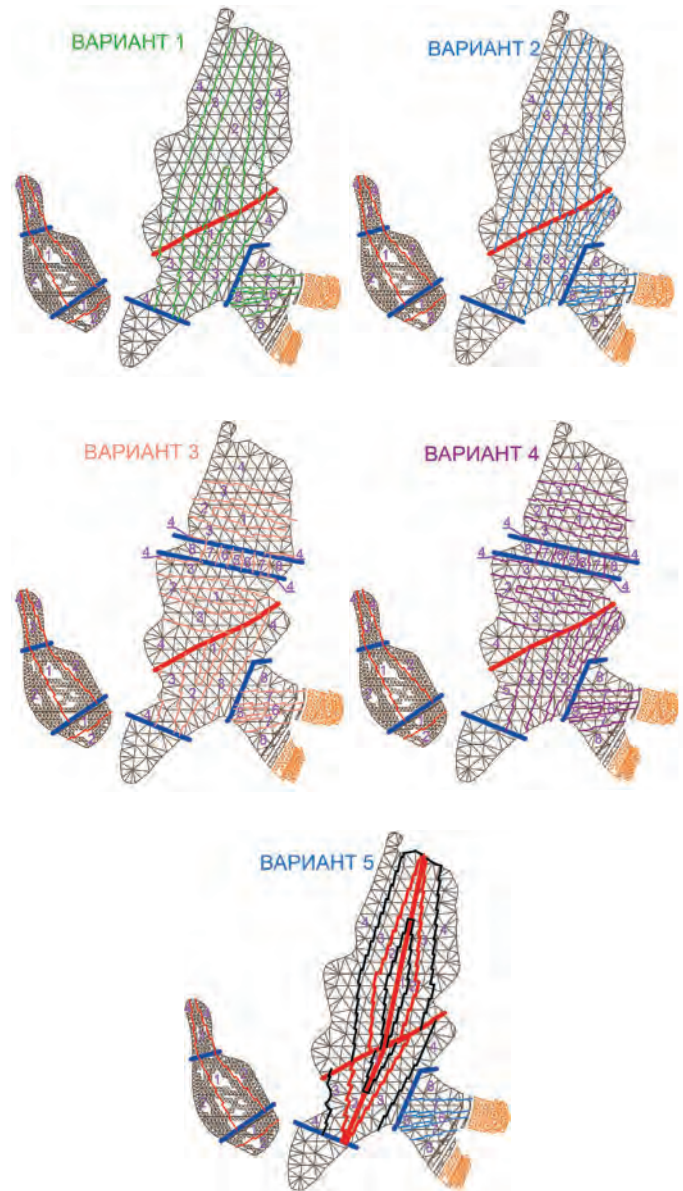


Рис. 2
Варианты отработки при различной ориентации очистных камер:
вариант 1 и 2 – субмеридиональная разрезка от тектонического нарушения с субширотным направлением движения фронтов, отличаются друг от друга только южной частью в залежи С-6; вариант 3 и 4 – субширотная разрезка с оставлением разделительного массива с субмеридиональным направлением движения фронтов, отличаются друг от друга только южной частью в залежи С-6; вариант 5 – субмеридиональная разрезка от центра запасов

Fig. 2
Mining options with different stope orientations:
Options 1 and 2: submeridional splitting from a tectonic disturbance with sublatitudinal front advancement; the two options are only different in the southern part in the C-6 deposit; Options 3 and 4: sublatitudinal splitting while keeping a separating rock mass with submeridional front advancement; the two options are only different in the southern part in the C-6 deposit; Option 5: submeridional splitting from the centre of the deposits

На четвёртом этапе задавалась логика пошагового расчёта с присвоением физико-механических свойств всем литологическим разностям.

Физико-механические параметры для численной модели приняты на основе распределения показателей в блочной геомеханической модели Октябрьского месторождения в поле рудника «Скалистый» и представлены в табл. 1.



Рис. 3
Разрезка рудного тела богатых руд (вариант 1)

Fig. 3
Splitting of a rich ore body (Option 1)

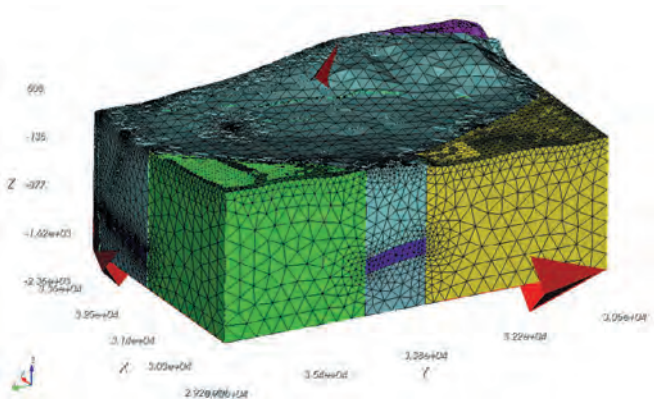


Рис. 4
Общее представление моделей

Fig. 4
General representation of the models

Таблица 1
Физико-механические параметры, принятые для расчёта модели

Table 1
Physical and mechanical parameters adopted for the model calculations

Домен	E _m , ГПа	ν, ед.	Dens, кг/м ³	σ _m , МПа	φ _i , град
Дополненный массив (отсутствует в литолого-структурной модели)	36,7	0,22	2796	6,94	30,18
Мергели	38,2	0,23	2873	3,6	32,57
Песчаники	18,37	0,19	2590	5,49	27,85
Базальты	37,31	0,2	2770	10,29	28,65
Интрузия габбро-долериты+роговики	53	0,26	2950	8,38	31,65
Богатая руда	52,9	0,21	4424	8	33,05
Тектонические нарушения	8	0,25	2750	1,7	20,2
Тектонические нарушения по руде	8	0,25	4424	1,7	20,2
Закладка*	0,5	0,2	1700	2,1	36
Разгруженный от напряжений массив богатой руды	13,2	0,21	4424	8	33,05

* Кадастр физико-механических свойств горных пород месторождений Норильского промышленного района, ООО «Институт Гипроникель». СПб.: 2018.

Следует отметить, что применена идеально-упругопластическая модель грунта с критерием Друкера-Прагера с пересчётом на промежуточный конус относительно пирамиды Кулона-Мора (среднее между вписанным и описанным конусом).

Промежуточный конус Друкера-Прагера:

$$A_{\Pi} = \frac{6 \cdot C \cdot \cos \varphi}{3\sqrt{3}}, B_{\Pi} = \frac{2 \cdot \sin \varphi}{3\sqrt{3}}, \quad (1)$$

где A_Π и B_Π – параметры Друкера-Прагера (для промежуточного конуса).

Моделирование подразумевает последовательное ведение отработки путём замены физико-механических свойств в блоках с обнулением полученных на предыдущих шагах расчёта напряжений путём присвоения нулевого тензора физико-механическим характеристикам закладочного массива. Пример задания физико-механическим характеристикам нулевого тензора приведён на рис. 5.

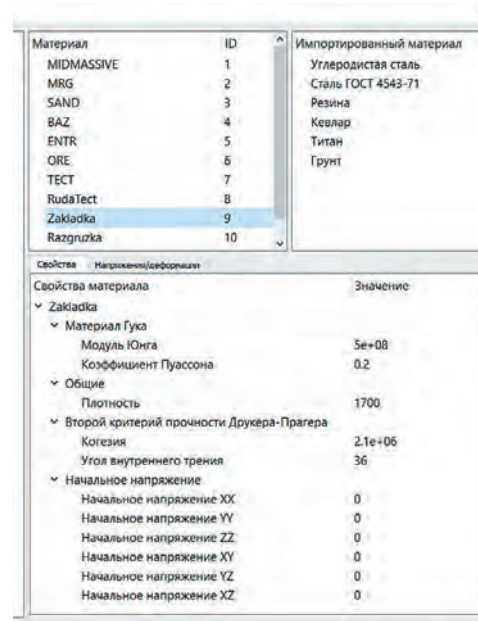


Рис. 5
Задание начального нулевого тензора закладочному массиву

Fig. 5
Setting the initial zero tensor to the backfill mass

Пошаговое моделирование осуществляется за 10 шагов:

- Шаг 1: моделируется исходное состояние массива до отработки (природное напряжённо-деформированное состояние);
- Шаг 2: моделируется разгрузка массива от повышенных напряжений;
- Шаг 3: моделируются выемка и закладка богатых руд, и разгрузка массива, подлежащего отработке, от повышенных напряжений;
- Шаги 4–10: осуществляются последовательная отработка, закладка и разгрузка массива богатых руд в соответствии с вариантами разрезов (всего 5 вариантов, см. рис. 2).

На пятом этапе для моделирования напряженно-деформированного состояния массива заданы граничные условия, которые включали в себя:

- исключение перемещений: по вертикальной оси Z для нижней плоскости модели и для двух боковых граней по нормальям к поверхностям (рис. 6);
- оценка природного тензора напряжений по дискованию ядра, пример представлен на рис. 7;

– поворот тензора напряжений в координаты модели;
– нагрузками в модели является собственный вес пород до поверхности, который реализован через присвоение гравитации всем узлам модели и задание компонент тензора напряжений для оставшихся двух боковых граней, а именно XX, YY, XY (рис. 8), соответствующих направлениям X и Y.

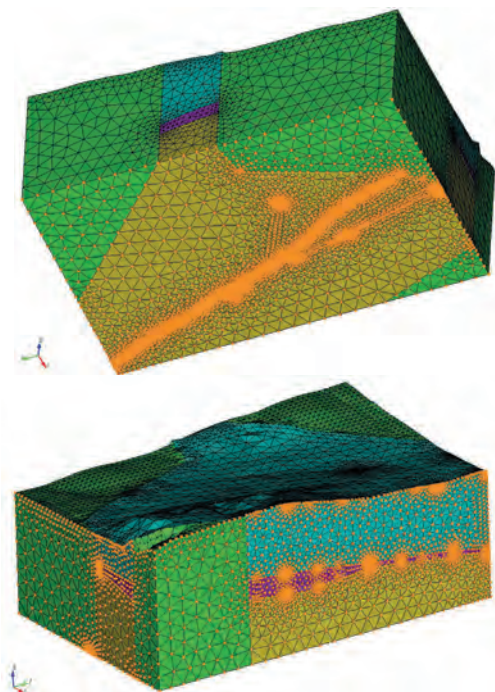


Рис. 6
Исключение перемещений: по оси Z для нижней грани модели и для двух боковых граней в модели

Fig. 6
Displacement exclusion: along the Z-axis for the lower boundary of the model and for the two lateral boundaries in the model

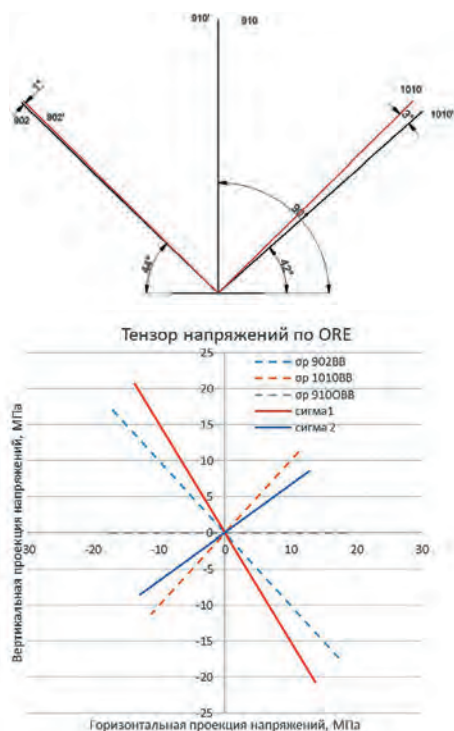


Рис. 7
Распределение напряжений относительно радиальных напряжений, вызывающих дискование керна

Fig. 7
Stress distribution in relation to radial stresses that cause the rock core slicing

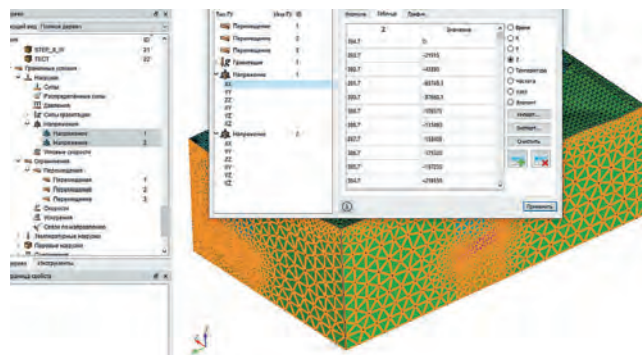


Рис. 8
Задание напряжений на боковые грани модели по оставшимся плоскостям X и Y

Fig. 8
Stress assignment to the lateral faces of the model in the remaining X and Y planes

Поворот природного тензора напряжений в координаты моделей

Ориентация природного тензора напряжений в модели представлена на рис. 9. Необходимо повернуть тензор в плоскости модели для задания напряжений на границы модели.

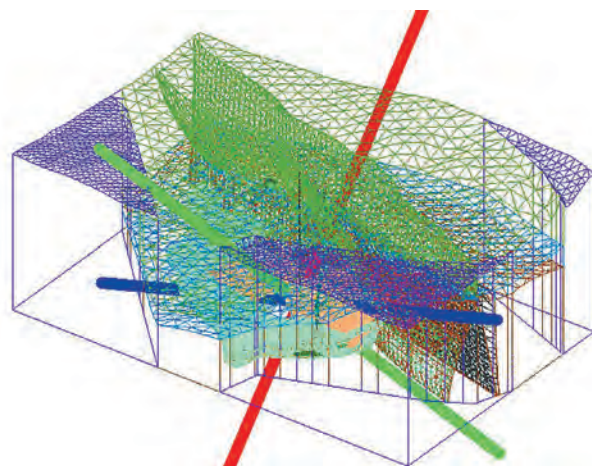


Рис. 9
Ориентация тензора главных напряжений в модели

Fig. 9
Orientation of the principal stress tensor in the model

На рис. 9 красным цветом указаны главные максимальные напряжения, зелёным – промежуточные главные напряжения, синим – минимальные главные напряжения.

По результатам дискования керна установлено, что максимальные главные напряжения по значениям соответствуют давлению от высоты столба горных пород, поэтому поворот тензора происходит следующим образом:

σ_3 – максимальное напряжение означает вертикальное напряжение в массиве;

σ_2 – минимальное горизонтальное напряжение равно $0.45 \cdot \sigma_3$ (по результатам дискования керна);

σ_1 – максимальное горизонтальное напряжение равно $0.7 \cdot \sigma_3$ (по результатам дискования керна).

Вычислим тензор для заданных начальных условий:

– глубина $h = 2144$ м;

– приведенная плотность (вес) породы $\gamma = 2744,3$ кг/м³ (определялась как среднее для базальтов, песчаников и мергелей).

Тогда:

$$\sigma_3 = -g \cdot \gamma \cdot h = -9,81 \cdot 2744,3 \cdot 2144 = -57719874 \text{ Па;}$$

$$\sigma_2 = 0,45 \cdot \sigma_1 = 0,45 \cdot (-57719874) = -25973943 \text{ Па;}$$

$$\sigma_1 = 0,68 \cdot \sigma_1 = 0,7 \cdot (-57719874) = -40403912 \text{ Па.}$$

Запишем полученный тензор:

$$T = \begin{pmatrix} -40403912 & 0 & 0 \\ 0 & -25973943 & 0 \\ 0 & 0 & -57719874 \end{pmatrix}$$

Получим углы из тензора в AutoCAD. Общий вид тензора и необходимых осей показан на рис. 10.

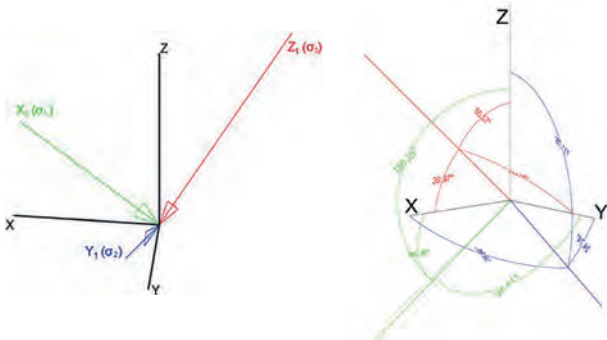


Рис. 10
Тензор напряжений

Fig. 10
Stress tensor

Поворот тензора выполняется в соответствии со следующей формулой:

$$T_1 = C \cdot T \cdot C^T$$

Запишем матрицу C для данной задачи:

$$C = \begin{pmatrix} \cos(56,28) & \cos(114,35) & \cos(136,25) \\ \cos(78,84) & \cos(24,74) & \cos(111,78) \\ \cos(39,97) & \cos(84,51) & \cos(50,57) \end{pmatrix}$$

Тогда тензор T_1 будет равен:

$$T_1 = \begin{pmatrix} -46985799,723 & -10085453,433 & 10316750,873 \\ -10085453,433 & -30884861,722 & 5352313,652 \\ 10316750,873 & 5352313,652 & -47252559,393 \end{pmatrix}$$

На шестом шаге после предварительного расчёта происходит верификация модели путём сравнения напряжений в модели и ориентации тензора напряжений.

Верификация природного поля напряжений в рудном теле и направление векторов представлены на рис. 11

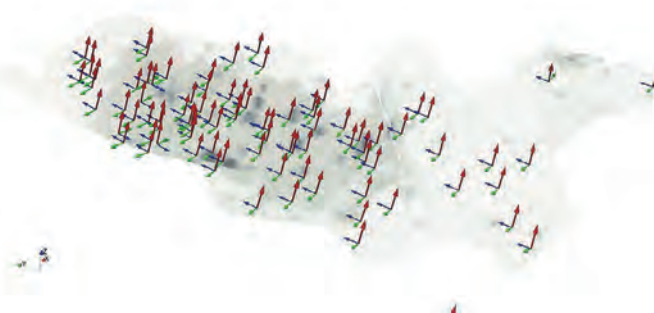


Рис. 11
Природное поле напряжений в виде векторов главных напряжений

Fig. 11
Natural stress field represented by principal stress vectors

(красным, зелёным и синим цветами, что соответствует максимальному, промежуточному и минимальному векторам напряжений).

На седьмом шаге осуществлён расчёт всех моделей, проведён их анализ и выбран наиболее безопасный с точки зрения геомеханических рисков.

В качестве критерия обеспечения прочности массива принят критерий удароопасности¹: $\sigma_{1(max)} \geq 0,7 \cdot \sigma_{сж}$. При таком уровне напряжённости необходим инструментальный контроль удароопасности.

Запас прочности оценивался по критерию Кулона–Мора по следующей зависимости:

$$n = \frac{c}{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \cos\phi + \text{tg}\phi \cdot \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \left[\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right] \cdot \sin\phi \right)}, \quad (2)$$

где c – сцепление, МПа; σ_1 и σ_3 – первое и третье главные напряжения, МПа; ϕ – угол внутреннего трения, град. При $n < 1$ фиксируется неустойчивое состояние.

На рис. 12 представлены расстояния, на которых рекомендуется строить оконтуривающие выработки, чтобы минимизировать влияние горного давления на них. При этом минимальное расстояние не должно быть ближе 26 м к контурам рудных тел, так как на указанном расстоянии максимальные главные напряжения находятся на границе величин, которые способны приводить к разрушению выработок. Рекомендуемое расстояние размещения оконтуривающих выработок 50 м, так как на указанном расстоянии напряжения снижаются до безопасных величин, но, необходимо отметить, что величины напряжений не достигают природных и превышают их на 15–30%.

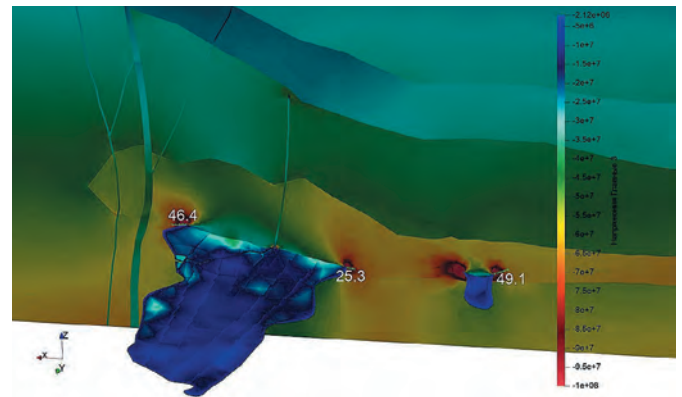


Рис. 12
Расстояния, на которых рекомендуется строить оконтуривающие выработки

Fig. 12
Recommended distances to drive the contour drifts

Пример анализа одного из шагов расчёта модели с субмеридиональной разрезкой и субширотной разрезкой представлен на рис. 13. Как видно, при субширотной разрезке формируется целик, напряжения в котором превышают $0,7\sigma_{сж}$, т.е. целик находится в удароопасном состоянии, отработка такого массива будет весьма затруднительна, субмеридиональная разрезка на этом фоне выглядит значительно предпочтительнее ввиду отсутствия необходимости формировать разделительные массивы для под-

1 Указания по безопасному ведению горных работ на Октябрьском месторождении, склонном и опасном по горным ударам. Норильск; Санкт-Петербург; 2021; Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых», от 8 декабря 2020 г. № 505.

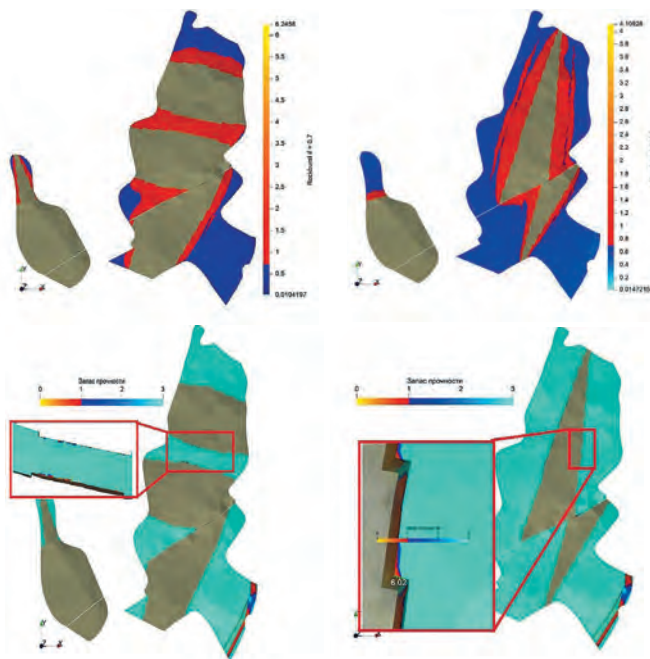


Рис. 13
Анализ одного из шагов расчёта модели с субмеридиональной разрезкой и субширотной разрезкой

Fig. 13
Analysis of one of the calculation steps for the models with submeridional splitting and with sublatitudinal splitting

держания интенсивности отработки руды. Ввиду большой глубины ведения работ и высоких компонент напряжений разгрузочные мероприятия необходимо проводить во всех вариантах разрезов. Негативное влияние компонент горизонтальных напряжений для субмеридиональных разрезов не так велико из-за компенсации деформаций тектоническими нарушениями.

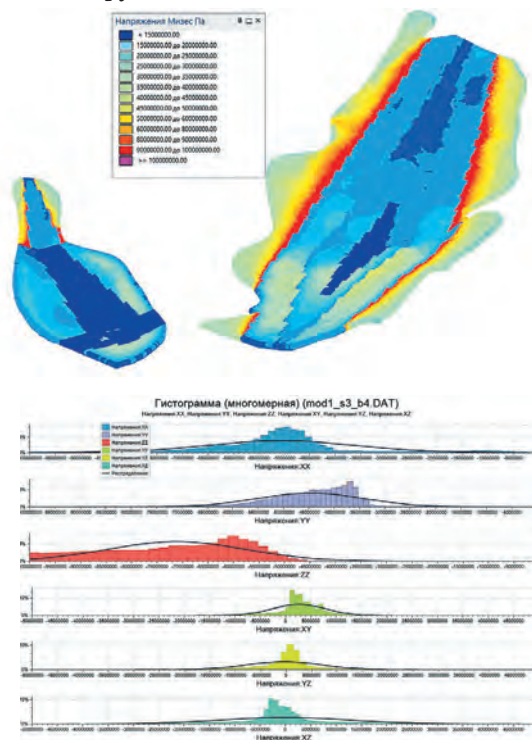


Рис. 14
Пример процесса оценки напряжений и построения гистограмм в ГГСИ Micromine

Fig. 14
An example of the stress assessment process and bar chart plotting in the Micromine Mining Software

На восьмом шаге значения полей напряжений в каждом расчётном узле экспортируются в csv файл для импорта значений в блочную геомеханическую модель в ГГИС Micromine, в которой осуществлён расчёт рейтинга Q-Бартона с учётом действующих напряжений. Результатом такой интерполяции является возможность подбора крепления с высокой точностью ещё на стадии проектирования выработок. На рис. 14 представлен пример процесса оценки напряжений и построения гистограмм в ГГСИ Micromine.

Заключение

1. В статье представлена методология формирования и расчёта глобальной численной модели в САЕ Fidesys с использованием дополнительных инструментов в виде специальной авторской программы написанной на языке Python, программы ГГИС Micromine, CAD AutoCad;

2. До начала ведения работ максимальные главные напряжения достигают 56 МПа в центральной части залежи С-6 (как раз в области возможного целика). Минимальные главные напряжения сконцентрированы в зонах тектонических нарушений, приуроченных к НХР, и составляют 15 МПа. Это связано с тем, что физико-механические характеристики рудного массива, пересекаемого тектоникой, значительно ниже, чем у основной части рудного массива. Однако именно в тектонически нарушенных рудных зонах коэффициент запаса даже до начала ведения очистных работ ниже 1. До начала ведения работ массив не склонен к горным ударам;

3. Расстояния, на которых рекомендуется строить оконтуривающие выработки, чтобы минимизировать влияние горного давления на них: минимальное расстояние не должно быть ближе 26 м к контурам рудных тел, так как на указанном расстоянии максимальные главные напряжения находятся на границе величин, которые способны приводить к разрушению выработок. Рекомендуемое расстояние размещения оконтуривающих выработок – 50 м, так как на указанном расстоянии напряжения снижаются до безопасных величин, но, необходимо отметить, что величины напряжений не достигают природных и превышают их на 15–30%;

4. Наилучшим вариантом разрезки с точки зрения возникающих геомеханических рисков является вариант 1, поскольку являет собой равномерную отработку в северном и южном направлениях. При этом вариант 5 тоже может применяться, однако необходимо соблюдение непревышения опережения фронта работ в южной части залежи С-6, что обуславливает более позднее введение его в работу. Вариант субмеридиональной разрезки со смещенным южным фронтом менее предпочтительный. Следует отметить, что необходимо формировать равномерные фронты отработки с учётом потребности бизнеса в объёмах добычи руды;

5. Варианты с субширотной разрезкой равнозначны между собой. В них особое внимание следует уделить последовательности отработки, чтобы не формировались зоны опорного давления в виде клина. Формирующийся целик в северной части залежи С-6 в обоих вариантах идентичен и на данном этапе изученности массива не рекомендуется к применению с точки зрения геомеханических рисков;

6. По результатам моделирования установлено, что ориентация тензора напряжений не оказывает значительного влияния на устойчивость камер, что подтверждается

коэффициентом запаса устойчивости, так как разрушению подвержены сугубо угловые части модели вне зависимости от ориентации камер. Однако при формировании целика в северной части залежи С-6 зоны с коэффициентом запаса ниже 1 формируются на всей его протяженности вглубь до 4 м;

7. Разрезка юго-восточной части залежи С6 в субширотном направлении является верным решением, так как работы приближаются к тектоническим нарушениям, опережающим НХР. Видно, что из-за перераспределения напряжений от заложенного пространства осложнения могут возникать в северной части рассматриваемой области, что и подтверждается увеличенной зоной, склонной к потенциальным горным ударам;

8. Следует отметить, что нельзя в полной мере по указанным моделям говорить об объемах разрушений, поскольку модели глобальные и отражают лишь качественную картину поведения массива. Результаты, полученные при их расчёте, являются отправной точкой для формирования локальных моделей. Несмотря на предполагаемую ориентацию тензора напряжений, где максимальное горизонтальное напряжение направлено в субширотном направлении, вариант разрезки в субширотном направлении двумя фронтами с оставлением разделительного массива считать наиболее опасным по сравнению с разрезками в субмеридиональном направлении;

9. Если указать последовательность вариантов от наилучшего к наихудшему, то будет 1, 5(2), 3(4). Субмеридиональная разрезка наиболее предпочтительна;

10. Отработку необходимо начинать после приведения массива в неудароопасное состояние, а сами работы вести в защищённых зонах в соответствии с действующими нормативными документами. Отработку вблизи тектонических нарушений необходимо вести в соответствии с указаниями;

11. Использование единой системы координат при создании геомеханической блочной модели и пошаговой численной модели позволило оценить изменение напряженно-деформированного состояния при отработке всех запасов богатых руд с применением ГИС Micromine, в которой осуществлён расчёт рейтинга Q-Бартона с учётом действующих напряжений. Результатом такой интерполяции является возможность подбора крепления с высокой точностью ещё на стадии проектирования выработок. А полученные компоненты тензора напряжений могут применяться в качестве граничных условий при решении локальных численных задач.

Список литературы

1. Соннов М.А., Румянцев А.Е., Трофимов А.В., Вильчинский В.Б. Геотехническое обоснование отработки залежей, ограниченных тектоническими нарушениями на основе применения конечно-элементного моделирования. *Горная промышленность*. 2018;(5):107–110. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-5-141-107-110>
2. Федотова Ю.В., Каспарьян Э.В., Кузнецов Н.Н. Влияние активных разломов на напряженное состояние неоднородных массивов скальных пород. В кн.: Адушкин В.В., Кочарян Г.Г. (ред.) *Триггерные эффекты в геосистемах: материалы IV Всероссийской конференции с международным участием, г. Москва, 6–9 июня 2017 г.* М.: ГЕОС; 2017. С. 318–326.
3. Zhou X.-P., Zhang T., Qian Q.-H. A two-dimensional ordinary state-based peridynamic model for plastic deformation based on Drucker-Prager criteria with non-associated flow rule. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021;146:104857. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104857>
4. Wang Y., Huang J., Wang G. Numerical analysis for mining-induced stress and plastic evolution involving influencing factors: high in situ stress, excavation rate and multilayered heterogeneity. *Engineering Computations*. 2022;39(8):2928–2957. <https://doi.org/10.1108/EC-10-2021-0614>
5. Конури А.И., Неверов С.А., Неверов А.А., Шукин С.А. К проблеме численного моделирования напряженно-деформированного состояния и устойчивости трещиноватого массива. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2019;6(2):144–150. <https://doi.org/10.15372/FPVGN2019060225>
6. Вербилло П.Э. Численное моделирование блочного горного массива при различных схемах нагрузки. *Процессы в геосредах*. 2015;4(4):5–11.
7. Moosavi S.A., Goshtasbi K., Kazemzadeh E. An evaluation method of rock pore volume compressibility determination using a computed tomography scanned-based finite element model. *Acta Geophysica*. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00874-9>
8. Feng F., Chen S., Zhao X., Li D., Wang X., Cui J. Effects of external dynamic disturbances and structural plane on rock fracturing around deep underground cavern. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2022;9(1):15. <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00487-z>
9. Нестеров И.В., Мерзлякова А.Д. Особенности формирования адаптивных сеток МКЭ для решения задач геотехники. В кн.: Власов А.Н., Карнет Ю.Н., Муковникова И.И. (ред.) *Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: сборник трудов 11-й Всероссийской научной конференции с международным участием, г. Москва, 23–25 ноября 2021 г.* М.; 2021. С. 356–361. https://doi.org/10.33113/conf.mkmk.ras.2021.356_361.42
10. Zhang Z., Mei G., Xu N. A geometrically and locally adaptive remeshing method for finite difference modeling of mining-induced surface subsidence. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022;14(1):219–231. <https://doi.org/10.1016/j.jrme.2021.11.001>
11. Сеттиев Ш.Р. Численный расчет: проблемы и методы их решения. *Потенциал современной науки*. 2016;(6):6–10.
12. Конури А.И., Неверов С.А., Неверов А.А. Особенности построения параметрической модели геосреды для численного моделирования напряженного состояния массива пород. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2018;6:89–99.

References

1. Sonnov M.A., Rumyantsev A.E., Trofimov A.V., Vilchinskiy V.B. Finite-element modeling-based geotechnological grounding of the development of mineral deposits confined to tectonic faults. *Russian Mining Industry*. 2018;(5):107–110. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-5-141-107-110>
2. Fedotova Yu.V., Kaspariyani E.V., Kuznetsov N.N. Impact of active faults on the stress state of non-uniform rock masses. In: *Adushkin V.V., Kocharyan G.G. (eds) Trigger effects in geosystems: Proceedings of the IV All-Russian Conference with international participation, Moscow, June 6–9, 2017*. Moscow: GEOS; 2017, pp. 318–326. (In Russ.)
3. Zhou X.-P., Zhang T., Qian Q.-H. A two-dimensional ordinary state-based peridynamic model for plastic deformation based on Drucker-Prager criteria with non-associated flow rule. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021;146:104857. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104857>
4. Wang Y., Huang J., Wang G. Numerical analysis for mining-induced stress and plastic evolution involving influencing factors: high in situ stress, excavation rate and multilayered heterogeneity. *Engineering Computations*. 2022;39(8):2928–2957. <https://doi.org/10.1108/EC-10-2021-0614>
5. Konurin A.I., Neverov S.A., Neverov A.A., Shchukin S.A. Problem of numerical modeling of stress-strain state and stability of fractured rock mass. *Fundamental and Applied Issues of Mining*. 2019;6(2):144–150. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FPVGN2019060225>
6. Verbilo P.E. Numerical modelling of jointed rock mass under different load schemes. *Process in Geomedia*. 2015;(4):5–11. (In Russ.)
7. Moosavi S.A., Goshtasbi K., Kazemzadeh E. An evaluation method of rock pore volume compressibility determination using a computed tomography scanned-based finite element model. *Acta Geophysica*. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00874-9>
8. Feng F., Chen S., Zhao X., Li D., Wang X., Cui J. Effects of external dynamic disturbances and structural plane on rock fracturing around deep underground cavern. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2022;9(1):15. <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00487-z>
9. Nesterov I.V., Merzlyakova A.D. Specific features of forming the adaptive FEM grids for solving geotechnical problems. In: *Vlasov A.N., Karnet Yu.N., Mukovnikova I.I. (eds) Mechanics of composite materials and structures, complex and heterogeneous media: Proceedings of the 11th All-Russian Scientific Conference with international participation, Moscow, November 23–25, 2021*. Moscow; 2021, pp. 356–361. (In Russ.) https://doi.org/10.33113/conf.mkmk.ras.2021.356_361.42
10. Zhang Z., Mei G., Xu N. A geometrically and locally adaptive remeshing method for finite difference modeling of mining-induced surface subsidence. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022;14(1):219–231. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.11.001>
11. Settiev Sh.R. Numerical calculation: problems and methods of their solving. *Potential of Modern Science*. 2016;(6):6–10. (In Russ.)
12. Konurin A.I., Neverov S.A., Neverov A.A. Constructing features of the parametric model of geo-environment for numerical modeling of the rock mass stress state. *Interexpo GEO-Siberia*. 2018;6:89–99. (In Russ.)

Информация об авторах

Давыдов Андрей Александрович – руководитель проектного офиса комплексного развития рудника «Скалистый», ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: DavydovAA@nornik.ru

Соннов Максим Александрович – действительный член Академии горных наук, заместитель генерального директора по продажам, ООО «Фидесис», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Sonnov@cae-fidesys.com

Румянцев Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, главный специалист лаборатории геотехники, ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2204-961X; e-mail: Rumyantsevae@nornik.ru

Головченко Юрий Юрьевич – младший научный сотрудник лаборатории геотехники, ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2980-2173; e-mail: GolovchenkoYuYu@nornik.ru

Трофимов Андрей Викторович – действительный член Академии горных наук, кандидат технических наук, заведующий лабораторией геотехники, ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-7557-9801; e-mail: Trofimovav@nornik.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.09.2022

Поступила после рецензирования: 28.09.2022

Принята к публикации: 29.09.2022

Information about the authors

Andrei A. Davydov – Head of the Project Office of the Integrated Development of the «Skalistsyi» mine, Polar Branch of PJSC MMC Norilsk Nickel, Moscow, Russian Federation; e-mail: DavydovAA@nornik.ru

Maksim A. Sonnov – Full Member of the Academy of Mining Sciences, Deputy General Director for Sales, Fidesis LLC, Moscow, Russian Federation; e-mail: Sonnov@cae-fidesys.com

Alexander Ye. Rumyantsev – Cand. Sci. (Eng.), Senior Specialist, Geotechnical Laboratory, Gipronickel Institute LLC, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2204-961X; e-mail: Rumyantsevae@nornik.ru

Yury Yu. Golovchenko – Junior Research Worker, Geotechnical Laboratory, Gipronickel Institute LLC, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2980-2173; e-mail: GolovchenkoYuYu@nornik.ru

Andrey V. Trofimov – Full Member of the Academy of Mining, Cand. Sci. (Eng.), Chief of Geotechnical Laboratory, Gipronickel Institute LLC, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7557-9801; e-mail: Trofimovav@nornik.ru

Article info

Received: 11.09.2022

Revised: 28.09.2022

Accepted: 29.09.2022