

Прогнозная оценка устойчивости борта карьера в тектонически напряженном массиве

И.Э. Семенова✉, И.М. Аветисян

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
✉ i.semenova@ksc.ru

Резюме: В статье приведен подход к определению устойчивости бортов и уступов карьеров с применением комплекса методов. Представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности одного из карьеров Хибинской апатитовой дуги. Расчеты проведены в упругой постановке для трехмерной конечно-элементной модели, учитывающей основные геологические, горнотехнические и геомеханические данные. Показано влияние гравитационно-тектонического поля напряжений на устойчивость борта и уступов карьера при его углублении. Определены потенциально неустойчивые области в борту и уступах проектного контура карьера. Выявленные особенности напряженно-деформированного состояния массива в окрестности борта карьера позволяют повысить уровень обоснованности технических решений по развитию открытых горных работ, а также разработать профилактические мероприятия по обеспечению устойчивости конструктивных элементов карьера.

Ключевые слова: устойчивость борта карьера, тектонически напряженные массивы горных пород, напряженно-деформированное состояние, открытые горные работы, численное моделирование

Для цитирования: Семенова И.Э., Аветисян И.М. Прогнозная оценка устойчивости борта карьера в тектонически напряженном массиве. *Горная промышленность*. 2023;(5S):93–99. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-93-99>

Predictive assessment of pit wall stability in a tectonically stressed rock mass

I.E. Semenova✉, I.M. Avetisyan

Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science; Apatity, Russian Federation
✉ i.semenova@ksc.ru

Abstract: The article presents an approach to determining the stability of the pit walls and benches using a set of methods. The results of numerical modeling of the stress-and-strain state are presented for the rock mass in vicinities of one of the quarries in the Khibiny Apatite Arc. Calculations were made using elastic approach to a three-dimensional finite-element model which incorporates basic geological, mining engineering and geomechanical data. The impact of gravitational and tectonic stress field is demonstrated on the stability of the pit wall and benches during its development. Potentially unstable areas have been determined in the wall and benches of the open pit design contour. The identified features of the stress-and-strain state of the rock mass in vicinities of the pit wall make it possible to increase the justification level of technical solutions for the development of surface mining operations and to design preventive measures that would ensure the stability of structural elements of the open pit.

Keywords: pit wall stability, tectonically stressed rock masses, stress-and-strain state, surface mining, numerical modelling

For citation: Semenova I.E., Avetisyan I.M. Predictive assessment of pit wall stability in a tectonically stressed rock mass. *Russian Mining Industry*. 2023;(5S.):93–99. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-93-99>

Введение

На протяжении последних десятилетий в мире наблюдается устойчивая тенденция к истощению приповерхностных запасов месторождений полезных ископаемых. Наряду с этим многие горнодобывающие предприятия в настоящее время стремятся вести все более интенсивную разработку месторождений. Вследствие этого глубина ведения горных работ с каждым годом планомерно увеличи-

вается. Разработка месторождений полезных ископаемых на больших глубинах неизбежно влечет за собой ухудшение геомеханических условий, связанное с увеличением действующих в массиве напряжений [1–3]. В таких условиях на предприятиях, обрабатывающих месторождения открытым способом, рано или поздно встает вопрос выбора способа дальнейшей отработки месторождения, когда карьер достигает своей проектной глубины. Обычно при

этом рассматриваются два варианта – либо переход к подземному способу отработки, либо углубление существующего карьера [4].

Углубление карьера, вставшего на конечный контур, зачастую является весьма затратным вследствие значительного увеличения объемов вскрыши. Одним из путей минимизации затрат является изменение конструкции борта, в частности, увеличение углов наклона борта карьера, так как при этом значительно уменьшаются объемы вскрышных работ. Однако в данном случае обостряется проблема обеспечения устойчивости борта и уступов карьера, поэтому при углублении карьера необходимо выполнять геомеханическое обоснование параметров карьерной выемки и ее конструктивных элементов [5]. Данная задача становится особенно актуальной при оценке устойчивости карьеров Хибинской апатитовой дуги, что обусловлено действием в массиве гравитационно-тектонического поля напряжений, сложным геологическим строением массива, а также склонностью основных типов пород к хрупкому разрушению [6].

Методы

В Горном институте КНЦ РАН давно и успешно занимают проблемами устойчивости бортов и уступов карьеров. При этом как с развитием теоретических основ проводимых исследований, так и с получением новых практических результатов, видоизменялись и совершенствовались методы исследований. Немаловажную роль в развитии методов исследований играет применение современных цифровых технологий и увеличение вычислительных мощностей компьютеров. В настоящее время в Горном институте КНЦ РАН применяется комплексный подход к определению устойчивости бортов и уступов карьеров, который можно разделить на два крупных блока.

К блоку №1 относятся методы предельного равновесия, решаемые как в плоской, так и в объемной постановке [7]. С помощью данных методов определяют коэффициент запаса устойчивости борта карьера и устанавливают положение и форму наиболее критических поверхностей ослабления. Проведение расчетов с использованием методов предельного равновесия является обязательным при проектировании бортов и уступов карьеров и регламентируется действующими нормативными документами [8]. Основным недостатком данной группы методов является неучет гравитационно-тектонического поля напряжений. При этом действие в массиве пород тектонических напряжений зачастую оказывает весьма существенное влияние на устойчивость бортов и уступов карьеров.

С целью устранения вышеуказанного недостатка и повышения надежности результатов определения устойчивости борта и уступов карьера применяется блок №2 – численное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород. Данный метод в настоящее время широко применяется по всему миру [9; 10]. В Горном институте КНЦ РАН метод реализован в программном комплексе Sigma GT, который позволяет проводить численное моделирование НДС массива методом конечных элементов в объемной постановке с учетом основных горно-геологических и горнотехнических факторов. Достоинствами данного метода являются: учет гравитационно-тектонического поля напряжений и его изменений с глубиной; определение возможных областей разрушений в динамической форме; определение возможных областей разрушений вследствие действия растягива-

ющих напряжений; многовариантность расчетов НДС на основе одной модели [11]. В настоящей статье представлены результаты применения метода численного моделирования для оценки устойчивости борта и уступов одного из карьеров Хибинской апатитовой дуги.

Разработка численной модели

При генерации численной модели массива в окрестности карьера руководствовались многолетними накопленными знаниями об НДС в окрестности Хибинской апатитовой дуги. В соответствии с методикой последовательных приближений первоначальные данные о распределении напряжений на исследуемом участке массива можно получить при проведении мелкомасштабного регионального моделирования. В качестве такой мелкомасштабной модели была взята разработанная ранее в Горном институте КНЦ РАН модель НДС Хибинского массива [12]. Таким образом, было получено исходное поле напряжений, которое использовалось при постановке граничных условий для создания более детальной крупномасштабной модели НДС массива в окрестности карьера. Граничные условия задавались в виде узловых перемещений при «вырезании» из мелкомасштабной модели участка, на котором проводили детальное моделирование НДС в окрестности карьера.

При определении размеров крупномасштабной модели исходили из необходимости учета геометрии углубленного карьера совместно с геологическими особенностями вмещающего массива пород, на который распространяется влияние карьерной выемки. Необходимое расстояние до границ позволяет соблюдать корректность расчетов при максимальном планируемом объеме карьерной выемки.

Параметры разработанной трехмерной модели составляют 211 сечений с 21 828 элементами, в общей сложности 4 605 708 элементов. Линейные размеры: 7600 м по простиранию; 4500 м вкост простирания рудной залежи. Дно модели располагается на отметке –1000 м. Верхняя граница модели ограничена рельефом дневной поверхности. Максимальное сгущение сетки приурочено к зоне фактического и проектного ведения открытых горных работ. Минимальный размер ячейки 12 м×20 м×12 м. Общий вид трехмерной модели представлен на рис. 1.

Модель сформирована с возможностью учета нескольких породных разностей с усредненными характеристиками: вмещающие породы, рудные тела, морена, выветрелые породы. Задаваемые свойства приведены в табл. 1.

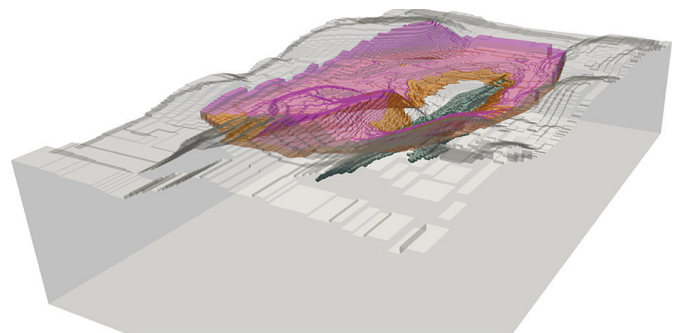


Рис. 1
Общий вид трехмерной численной модели напряженно-деформированного состояния карьера

Fig. 1
A general view of a 3D numerical model of the stress-and-strain state of the open-pit mine

Таблица 1
Физико-механические свойства для горных пород при моделировании НДС

Показатели	Вмещающие породы	Рудные тела	Морена	Выветрелые породы
Модуль упругости, ГПа	70	40	7	35
Коэффициент Пуассона	0,2	0,2	0,2	0,2
Плотность, т/м ³	2,65	3,00	1,97	2,65

Table 1
Physical and mechanical properties of rocks in modelling the stress-and-strain state

Исходные данные о геометрии фактического и проектных контуров карьера, а также рельефе и геологии получены из объемной модели карьера, построенной в ГИС MINEFRAME [13].

Результаты численного моделирования в окрестности борта карьера

С использованием разработанной модели проведена серия расчетов НДС массива в окрестности карьера. Просчитан ряд вариантов с последовательным учетом различных типов пород и различных конфигураций борта карьера. В данной статье представлены результаты расчетов НДС при учете всех четырех типов пород для трех вариантов конфигурации борта карьера: фактической (вариант 1), проектной по варианту проектной организации (вариант 2) и проектной по варианту ГоИ КНЦ РАН (вариант 3). Расчетные распределения главных напряжений для всех трех вариантов представлены на рис. 2 и 3.

Результаты расчетов показали, что в целом диапазон действующих напряжений близок к параметрам близлежащих месторождений. Максимальная компонента глав-

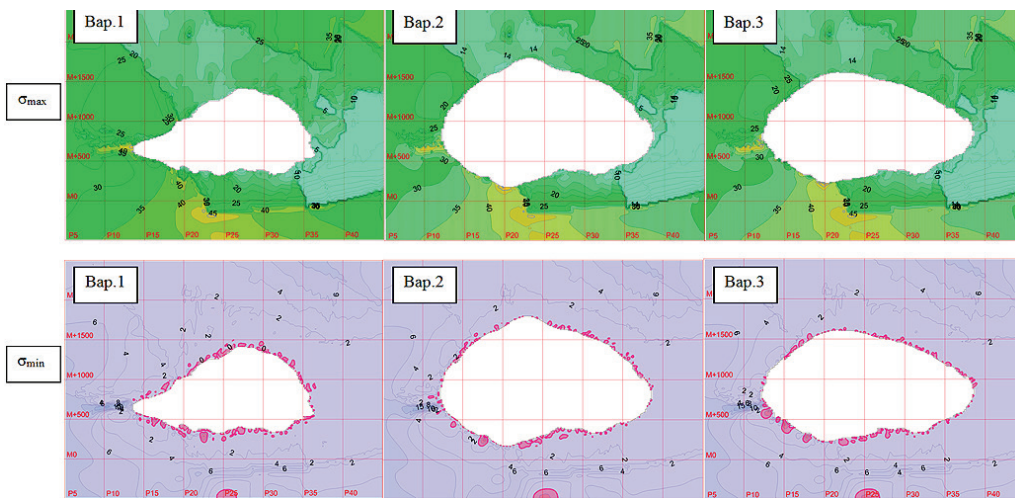


Рис. 2
Распределение главных напряжений σ_{max} и σ_{min} в плане по отм.+210 м для расчетных вариантов 1, 2, 3

Fig. 2
Distribution of the principal stresses σ_{max} and σ_{min} in plan view at the +210 m level for design options 1, 2, 3

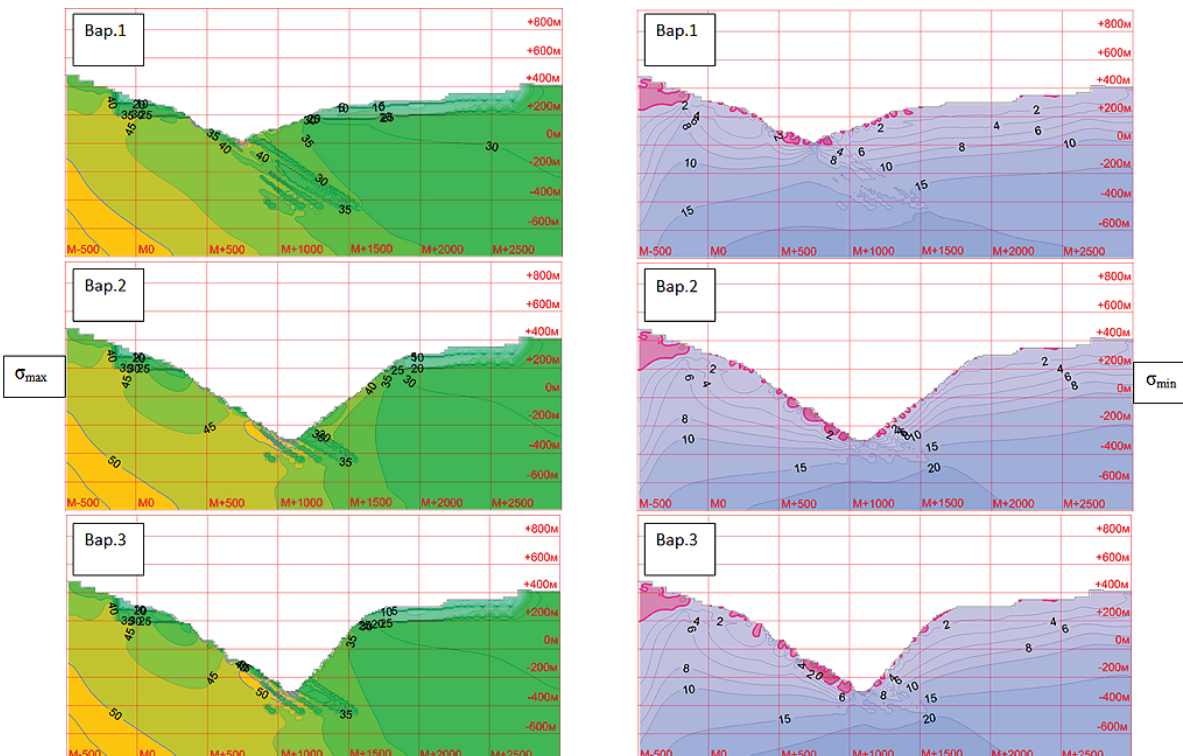


Рис. 3
Распределение главных напряжений σ_{max} и σ_{min} по разрезу P24 для расчетных вариантов 1, 2, 3

Fig. 3
Distribution of the principal stresses σ_{max} and σ_{min} along cross-section P24 for design options 1, 2, 3

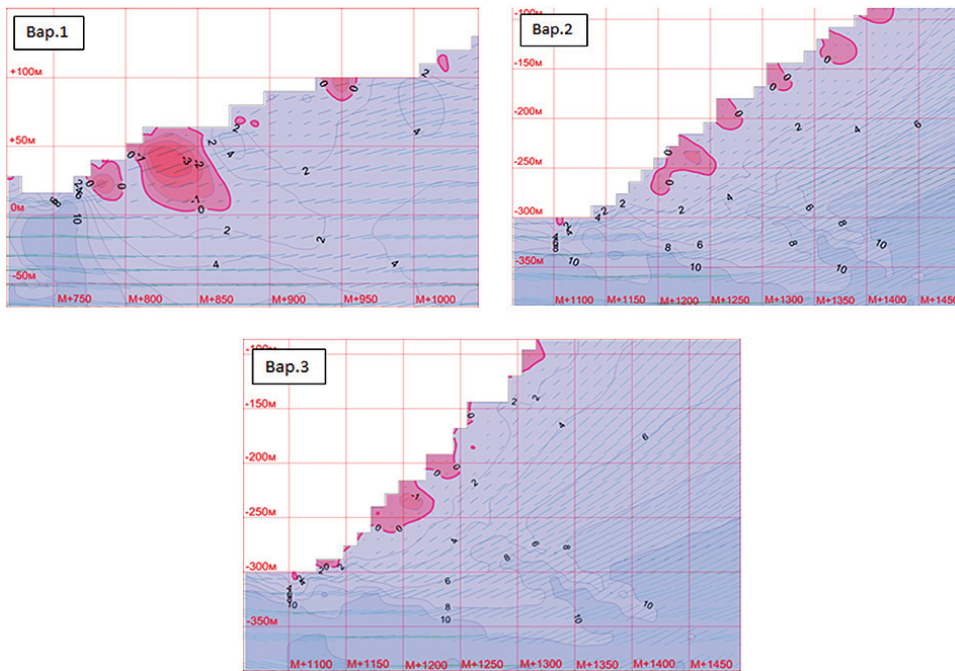


Рис. 4
Распределение площадок σ_{\min} на участке северного борта карьера по разрезу P24

Fig. 4
Distribution of σ_{\min} sites in the section of the northern pit wall along cross-section R24

ных напряжений – сжимающая с общим фоном от 10 до 50 МПа (увеличивается с глубиной) и генеральным направлением, близким к простиранию рудной залежи. Более высокие значения во вмещающем массиве характерны для восточной и южной части месторождения, что связано с особенностями рельефа и радиальными разломами Хибинского массива. Соотношение промежуточной компоненты и максимальной в среднем составляет 0,5–0,7. Минимальная компонента соответствует собственному весу пород.

Поле напряжений в окрестности фактической карьерной выемки (вариант 1) имеет следующие особенности. Зоны концентрации напряжений σ_{\max} слабо выражены, приурочены в основном к дну карьера, где на локальных участках достигают 50 МПа. В борту карьерной выемки значения σ_{\max} составляют от 10 МПа в нагорных частях у дневной поверхности и постепенно увеличиваются до 40 МПа. Включение в модель моренных отложений и выветрелых пород приводит к заметному снижению сжимающих напряжений в приповерхностных зонах. По минимальной компоненте σ_{\min} имеют место зоны растягивающих напряжений со значениями, не превышающими по абсолютной величине 3 МПа, то есть не превышающие $0,5 \sigma_p$ – половины предела прочности пород на растяжение. При этом следует отметить, что такие участки в уступах борта формируются по всему его протяжению, что при условии снижения прочности пород, в том числе вследствие обводненности, может приводить к формированию трещин отрыва и способствовать локальным обрушениям.

При имитации проектных положений карьерной выемки (варианты 2 и 3) существенно повышается уровень сжимающих напряжений σ_{\max} . Под дном карьера величины σ_{\max} достигают 70 МПа, что может приводить к разрушению пород в динамической форме. В моренных отложениях и выветрелых породах уровень сжатия остается практически неизменным по сравнению с состоянием при фактической геометрии карьера. Зоны растягивающих напряжений по площади, особенно на глубоких участках борта. Если рассматривать более детально борт со стороны висячего бока, то можно сделать вывод о некотором повышении устойчи-

вости при моделировании проектных вариантов карьерной выемки, что объясняется высоким уровнем сжатия при углублении карьера и более округлой формой борта.

При анализе площадок σ_{\min} выявлено, что их направление близко к углу наклона борта для всех трех вариантов (рис. 4). Данный факт может негативно сказаться на устойчивости отдельных уступов в случае наличия разломных структур и ослабленных зон, совпадающих по направлению с такими площадками.

Результаты локального численного моделирования в окрестности группы уступов карьера

На заключительном этапе численного моделирования исследовали поле напряжений в окрестности отдельных групп уступов проектного контура карьера по варианту ГоИ КНЦ РАН (вариант 3). Для создания локальных моделей выбраны два участка северного борта карьера вблизи профиля 1. Модель 1 расположена в средней части борта карьера в окрестности отм. 0 м, модель 2 расположена вблизи дна карьера в окрестности отм. –300 м (рис. 5).

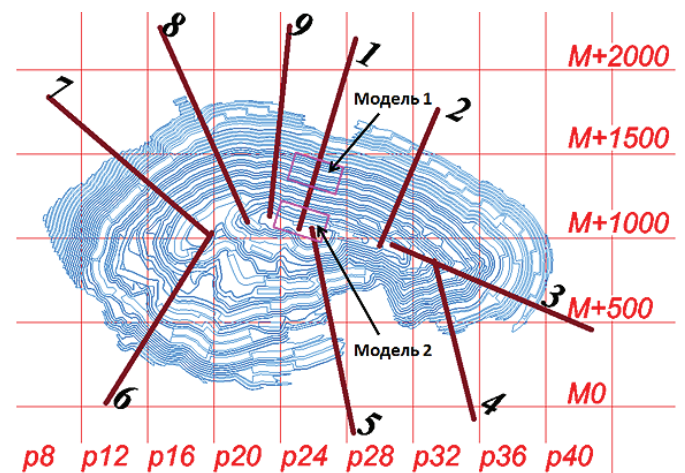


Рис. 5
Положение участков локального численного моделирования

Fig. 5
Locations of sites for local numerical modeling

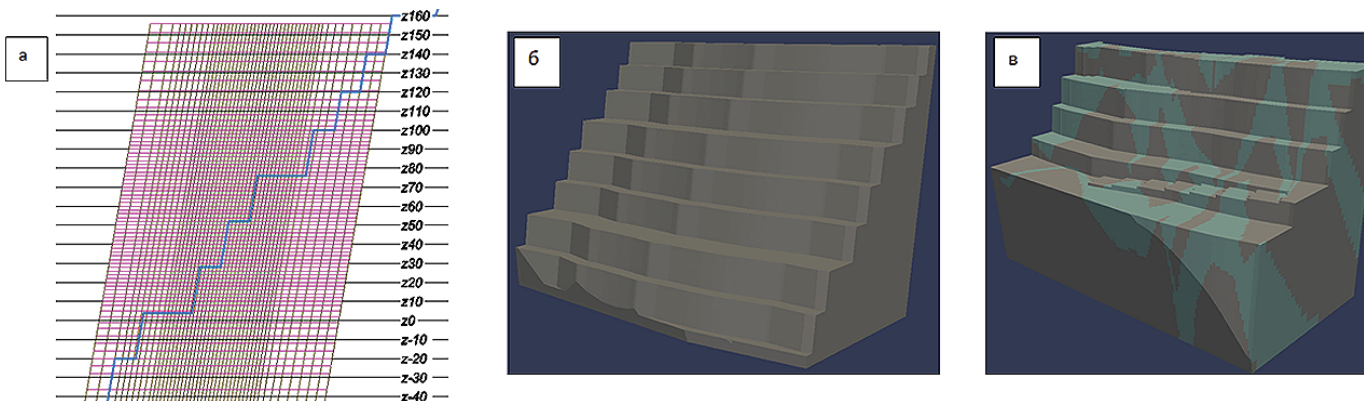


Рис. 6
Модель участка массива в окрестности группы уступов карьера:
 а – типовое вертикальное сечение; б – 3D вид модели 1;
 в – 3D вид модели 2

Fig. 6
Model of the rock mass section in vicinities of the pit bench group:
 а – a typical vertical cross-section; б – a 3D view of Model 1;
 в – a 3D view of Model 2

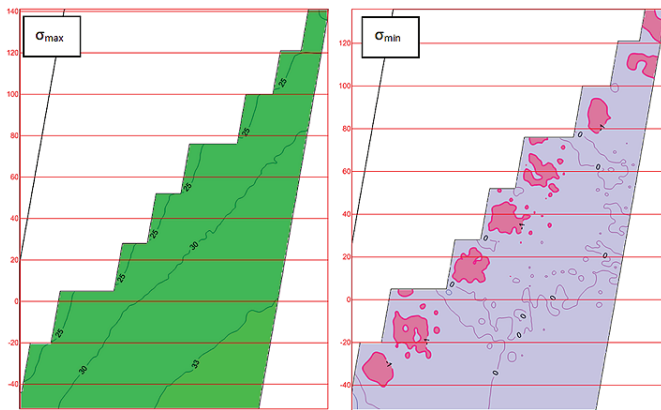


Рис. 7
Распределение главных напряжений σ_{\max} и σ_{\min} в модели 1 по профилю 1

Fig. 7
Distribution of the principal stresses σ_{\max} and σ_{\min} in Model 1 along cross-section 1

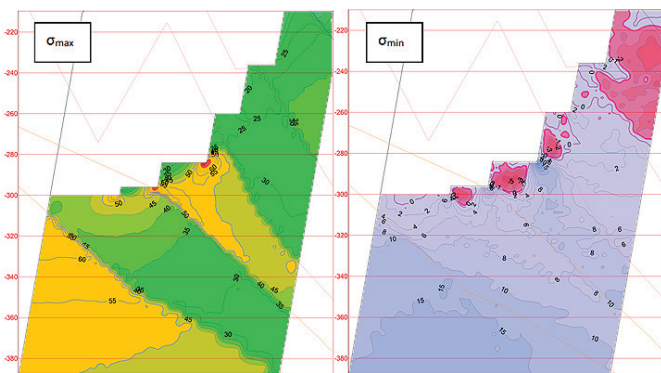


Рис. 8
Распределение главных напряжений σ_{\max} и σ_{\min} в модели 2 по профилю 1

Fig. 8
Distribution of the principal stresses σ_{\max} и σ_{\min} in Model 2 along cross-section 1

Сетка конечных элементов была построена таким образом, чтобы адекватно промоделировать уступы борта с углом наклона 80° и искривленные поверхности берм в плане. Размер моделей составляет $300 \text{ м} \times 128 \text{ м} \times 208 \text{ м}$. Минимальный размер конечного элемента в зоне сгущения сетки составляет $2 \times 2 \times 2 \text{ м}$. Размерность моделей $150 \times 72 \times 46 = 496\,800$ конечных элементов. Типовое вертикальное сечение и общий вид моделей представлены на рис. 6.

результаты расчетов НДС на участке борта вблизи отметки $+0 \text{ м}$ (модель 1) показали, что уровень максимальных сжимающих напряжений σ_{\max} умеренный и составляет $25\text{--}35 \text{ МПа}$. В некоторых уступах возникают локальные зоны растяжения, которые не превышают 1 МПа , что ниже $0,5 \sigma_p$ (рис. 7). Следует отметить, что достаточно высокий уровень субгоризонтального сжатия пород будет препятствовать формированию техногенных трещин отрыва в областях растягивающих напряжений σ_{\min} .

Анализ результатов расчетов НДС в окрестности дна карьерной выемки (модель 2) показал, что поле напряжений в данной области является неоднородным, что связано со сложным геологическим строением рудных тел. Значения максимальной компоненты напряжений σ_{\max} в рудных телах составляют $20\text{--}45 \text{ МПа}$, достигая 70 МПа в зонах концентрации на сопряжении нижнего уступа и дна карьерной выемки. Во вмещающих породах значения σ_{\max} изменяются от 30 до 60 МПа , достигая в зонах концентрации 100 МПа (рис. 8). При таком высоком уровне сжимающих напряжений могут возникать локальные разрушения пород в динамической форме на сопряжениях откосов и берм нижних уступов, а также на сопряжении откоса нижнего уступа и дна карьера. Анализ минимальной компоненты напряжений σ_{\min} показал, что в нижних уступах возникают высокие растягивающие напряжения со значениями, достигающими $5\text{--}6 \text{ МПа}$. Такие значения напряжений будут способствовать локальным формированиям техногенных трещин в уступах, однако высокий уровень сжатия будет препятствовать развитию этих трещин. Таким образом, возможное снижение прочности пород за счет действия растягивающих напряжений в нижних уступах будет иметь локальный характер и не окажет существенного влияния на устойчивость борта карьера в целом.

Выводы

Таким образом, с помощью разработанной численной геомеханической модели НДС массива в окрестности одного из карьеров Хибинской апатитовой дуги проведены оценка и прогноз устойчивости борта и уступов карьера при его углублении.

Результаты численного моделирования НДС массива в окрестности карьера показали следующее:

- проектный борт карьера по варианту ГоИ КНЦ РАН в целом устойчив;
- возможно формирование трещин отрыва и локальных разрушений на выпуклых участках борта при условии

снижения прочности пород, в том числе на обводненных участках;

– возможны локальные разрушения пород в динамической форме на сопряжениях откосов и берм нижних уступов, а также на сопряжении откоса нижнего уступа и дна карьера;

– возможны локальные формирования техногенных трещин в нижних уступах без их развития в условиях высокого уровня сжимающих напряжений.

Список литературы

1. Xie H., Li C., Gao M., Zhang R., Gao F., Zhu J. Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao = Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2021;40(2):217–232. (In Chinese) <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2020.0317>
2. Wojtecki L., Konicek P., Mendecki M.J., Gołda I., Zuberek W.M. Geophysical evaluation of effectiveness of blasting for roof caving during longwall mining of coal seam. *Pure and Applied Geophysics*. 2020;177(2):905–917. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02321-1>
3. Козырев А.А., Панин В.И., Семенова И.Э., Журавлева О.Г. О геодинамической безопасности горных работ в удароопасных условиях на примере Хибинских апатитовых месторождений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2018;(5)33–44. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20180504>
4. Flores G., Catalan A. A transition from a large open pit into a novel “macroblock variant” block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019;11(3):549–561. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.010>
5. Рыбин В.В. Совершенствование геомеханического обоснования рациональных конструкций бортов карьеров в скальных, тектонически напряженных породах. *Горный журнал*. 2019;(5):25–29. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.05.04>
6. Турчанинов И.А., Марков Г.А., Иванов В.И., Козырев А.А. *Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок*. Л.: Наука; 1978. 256 с.
7. Калюжный А.С. Анализ результатов оценки устойчивости борта карьера при плоском и объемном вариантах расчета. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(10):123–133. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_10_0_123
8. Козлов Ю.С., Мочалов А.М., Пушкарев В.И., Сапожников В.Т., Фисенко Г.Л. (сост.) *Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров*. Л.: ВНИМИ; 1972. 165 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/13499>
9. Lianheng Z., Dongliang H., Shuaihao Z., Xiao C., Yibo L., Min D. A new method for constructing finite difference model of soil-rock mixture slope and its stability analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021;138:104605. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104605>
10. Durán M., Godoy E., Catafau E.R., Toledo P.A. Open-pit slope design using a DtN-FEM: Parameter space exploration. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2022;149:104950. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104950>
11. Семенова И.Э., Аветисян И.М. Развитие концепции геомеханического обоснования горных работ в удароопасных условиях. *Горный журнал*. 2022;(1):28–33. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.01.05>
12. Семенова И.Э. Создание трехмерной геомеханической модели Хибинского горнорудного района. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(S6):263–277.
13. Лукичев С.В., Наговицын О.В. Цифровое моделирование при решении задач открытой и подземной горной технологии. *Горный журнал*. 2019;(6):51–55. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.06.06>

References

1. Xie H., Li C., Gao M., Zhang R., Gao F., Zhu J. Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao = Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2021;40(2):217–232. (In Chinese) <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2020.0317>
2. Wojtecki L., Konicek P., Mendecki M.J., Gołda I., Zuberek W.M. Geophysical evaluation of effectiveness of blasting for roof caving

- during longwall mining of coal seam. *Pure and Applied Geophysics*. 2020;177(2):905–917. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02321-1>
3. Kozyrev A.A., Panin V.I., Semenova I.E., Zhuravleva O.G. Geodynamic safety of mining operations under rockburst-hazardous conditions in the Khibiny apatite deposits. *Journal of Mining Science*. 2018;54(5):734–743. <https://doi.org/10.1134/S1062739118054832>
4. Flores G., Catalan A. A transition from a large open pit into a novel “macroblock variant” block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019;11(3):549–561. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.010>
5. Rybin V.V. Improving geomechanical validation of efficient pitwall designs in rocks under high tectonic stresses. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(5):25–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.05.04>
6. Turchaninov I.A., Markov G.A., Ivanov V.I., Kozyrev A.A. *Tectonic stresses in the crust and the stability of excavation*. Leningrad: Nauka; 1978. 256 p. (In Russ.)
7. Kalyuzhny A.S. Analysis of 2D and 3D estimates of pit wall stability. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(10):123–133. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_10_0_123
8. Kozlov Yu.S., Mochalov A.M., Pushkarev V.I., Sapozhnikov V.T., Fisenko G.L. (eds) *Methodological guidelines for determining slope angles of walls, benches and waste dumps in open pits under construction and in operation*. Leningrad: ВНИМИ; 1972. 165 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/13499>
9. Lianheng Z., Dongliang H., Shuaihao Z., Xiao C., Yibo L., Min D. A new method for constructing finite difference model of soil-rock mixture slope and its stability analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021;138:104605. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104605>
10. Durán M., Godoy E., Catafau E.R., Toledo P.A. Open-pit slope design using a DtN-FEM: Parameter space exploration. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2022;149:104950. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104950>
11. Semenova I.E., Avetisyan I.M. Geomechanical foundation for mining in rockburst-hazardous conditions: Concept development. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(1):28–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.01.05>
12. Semenova I.E. Creation of a 3D geomechanical model of the Khibiny mining district. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011;(S6):263–277. (In Russ.)
13. Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V. Digital simulation in solving problems of surface and underground mining technologies. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(6):51–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.06.06>

Информация об авторах

Семенова Инна Эриковна – кандидат технических наук, зав. лабораторией прогноза удароопасности рудных месторождений, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: i.semenova@ksc.ru

Аветисян Иван Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

Information about the authors

Inna E. Semenova – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Sector of Prediction of rockburst hazard of rock deposits, Mining Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: i.semenova@ksc.ru

Ivan M. Avetisyan – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Associate, Mining Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

Article info

Received: 25.09.2023

Revised: 07.11.2023

Accepted: 13.11.2023

Информация о статье

Поступила в редакцию: 25.09.2023

Поступила после рецензирования: 07.11.2023

Принята к публикации: 13.11.2023