

УДК 622.271.3 + 622.833.5.004.942

А.А. Козырев, И.Э. Семенова, И.М. Аветисян

**ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В БОРТУ
ГЛУБОКОГО КАРЬЕРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ***

Представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива в окрестности глубокого карьера рудника «Железный» АО Ковдорский ГОК. Выявлены характерные особенности изменения поля напряжений в борту карьера при его углублении. Определены потенциально неустойчивые зоны в борту карьера. Оценена возможность формирования техногенных трещин в восточном борту карьера с последующим прорастанием за контур карьера. Расчеты выполнены методом конечных элементов в объемной постановке с использованием программного комплекса SigmaGT.

Ключевые слова: механика горных пород, напряженно-деформированное состояние, устойчивость бортов карьеров, численное моделирование, разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом

В настоящее время проектная глубина некоторых карьеров в России и в мире превышает 500 м и даже может достигать 1000 м и более, а углы наклона бортов в конечном положении могут достигать 50–70° [1–3]. Увеличение глубины карьера делает еще более актуальной задачу прогноза напряженно-деформированного состояния и оценки риска потери устойчивости борта в целом, отдельных участков и уступов. Ее решение должно проводиться с учетом комплекса основных геологических и горнотехнических факторов.

Горный институт КНЦ РАН с начала 1990-х годов проводит исследования в этой области с учетом фактического напряженно-деформированного состояния (НДС) вмещающего массива горных пород и параметров нарушенной зоны в приконтурной области карьера рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» [4,5]. Особен-

* Исследования выполнены в рамках гранта по приоритетному направлению деятельности РФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» № 14-17-00751 (научн. рук. проф. А.А. Козырев).

ностями данного объекта являются: действие в массиве тектонических напряжений, вытянутая форма карьера в плане по одной из его осей, значительная проектная глубина карьерной выемки (около 1000 м), наличие разломных структур разных порядков.

Для прогноза устойчивости борта карьера в отечественной и зарубежной практике успешно применяются методы численного моделирования, учитывающие геологические и горнотехнические факторы и дающие возможность оценки геомеханического состояния массива пород при различных вариантах развития работ в пространстве и времени [6, 7].

На основе анализа горно-геологической и геомеханической информации разработаны численные модели для расчета НДС массива горных пород в окрестности карьера рудника «Железный» на нескольких масштабных уровнях. Расчеты выполнены методом конечных элементов в объемной постановке с использованием программного комплекса SigmaGT, разработанного в Горном институте КНЦ РАН [8].

Геомеханическая модель расположенных на территории АО «Ковдорский ГОК» бадалеит-апатит-магнетитовых, апатит-штаффелитовых и апатит-карбонатных месторождений, включает в себя рельеф местности, объекты геологической среды (рудные тела, тектонические нарушения, ослабленные зоны), поле тектонических напряжений, фактические и проектные карьерные выемки и подземные очистные пространства.

Для обоснования физической модели среды выполнен анализ имеющихся данных о прочностных и упругих характеристиках руд и пород, слагающих Ковдорский массив. На основании анализа как абсолютных значений показателей, так и их изменений при нагрузке, для большинства пород можно сделать вывод об упругом их деформировании вплоть до разрушения. Исходя из этого, в качестве модели среды принята упругая модель.

Граничные условия в модели задавались с учетом проведенных на месторождении натурных измерений напряжений методом разгрузки, а также исследований искривления длинных геолого-разведочных скважин [9]. Результаты данных исследований свидетельствуют о наличии в массиве Ковдорского месторождения тектонических сил, действующих в направлении, субпараллельном длинной оси карьера.

Анализ распределения напряжений для варианта с проектной карьерной выемкой (глубина от 850 до 950 м) показал, что в верхней части коротких участков борта (северного и южного) форми-

руется зона разгрузки, в которой значения u_{\max} уменьшаются на 5–10 МПа по сравнению с исходным состоянием. С увеличением глубины сжимающие напряжения растут и достигают 65 МПа на сопряжении борта и дна карьера (рис. 1, а). На длинных участках борта градиент сжимающих напряжений по высоте борта небольшой, абсолютные величины u_{\max} составляют 30–35 МПа в западной части и 40–45 МПа в восточной. На сопряжении длинных участков борта с дном карьера значения u_{\max} достигают 50 МПа (рис. 1, б). При таком уровне сжимающих напряжений ($u_{\max} > 0.3u_{сж}$, где $u_{сж}$ – предел прочности пород на одноосное сжатие) возможны проявления горного давления в динамической форме ниже отметки –400 м.

Минимальная компонента u_{\min} является в основном сжимающей и принимает значения от 1 МПа вблизи поверхности до 20 МПа на сопряжении борта и дна карьера. Растягивающие напряжения u_{\min} возникают лишь в локальных областях с абсолютными значениями, не превышающими 1 МПа (рис. 1, в, г). На длинных участках борта напряжения u_{\min} направлены перпендикулярно борту, то есть возможные трещины отрыва на данных участках ориентированы субпараллельно борту. Такое направление является неблагоприятным с точки зрения обеспечения устойчивости борта карьера, так как в случае раскрытия трещин существует опасность обрушения участков борта. Однако следует учесть, что прогнозные величины растягивающих напряжений на порядок меньше предела прочности на растяжение в образце, а участок борта находится в зоне умеренных сжимающих напряжений величиной 35–45 МПа, которые будут препятствовать процессу трещинообразования.

В целом можно констатировать, что при углублении карьера до отметки –660 м практически не наблюдается увеличения площади зон и абсолютных значений растягивающих напряжений u_{\min} , то есть вероятность формирования и раскрытия трещин отрыва с увеличением глубины карьерной выемки при действии в массиве гравитационно-тектонического поля напряжений не повышается.

На следующем этапе оценивали возможность разрушений массива пород под объектами промплощадки, а также влияния подсекающих разломных структур на устойчивость борта карьера, в частности разлома 1-го порядка R2, имеющего наклонное падение и подсекающего уступы карьера [10]. Для решения поставленной задачи была создана локальная модель восточного борта карьера с уплотненной сеткой, позволяющей учесть разломные структуры. Автоматическое задание граничных условий осуществлялось

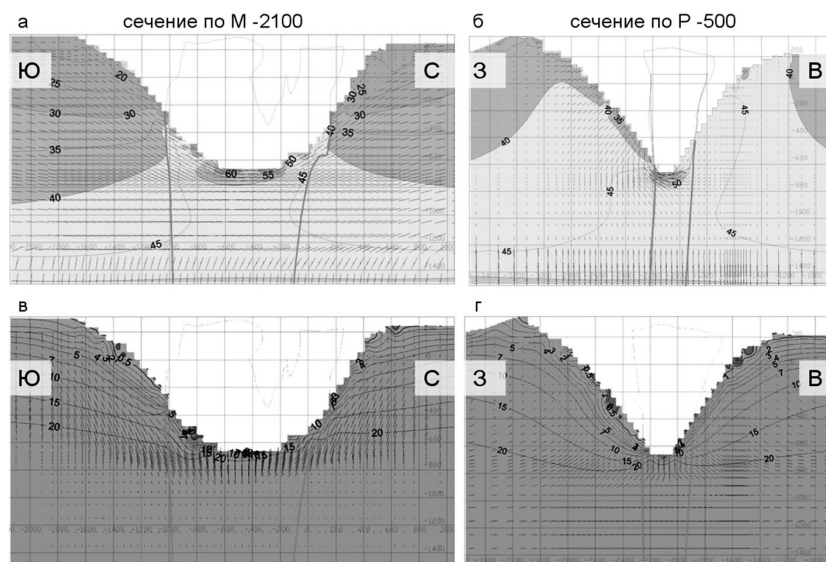


Рис. 1. Распределение напряжений в окрестности проектного карьера рудника «Железный» до отметки -660 м в вертикальных сечениях: а, б – σ_{max} ; в, г – σ_{min}

путем интерполяции расчетных значений перемещений из предыдущего (мелкомасштабного) этапа моделирования и их задания на всех гранях модели, кроме свободной поверхности.

Результаты численного моделирования показали, что при учете разлома R2 полученные значения растягивающих напряжений в уступах, подсекаемых данным разломом, увеличиваются до 2–3 МПа (рис. 2, а). Направление площадок σ_{min} субпараллельно наклону борта, что является неблагоприятным для устойчивости подсекаемых уступов и может привести к их обрушению. Кроме этого на участке борта, подсекаемого разломом, образуются зоны высоких касательных напряжений (рис. 2, б). Рассчитанный коэффициент запаса устойчивости в области массива, подсекаемого разломом, равен 0,6. Такие высокие растягивающие напряжения и высокие касательные напряжения могут являться причиной обрушения уступов или групп уступов, что уже после выдачи данных прогнозов несколько наблюдалось на исследуемом участке (последний эпизод 24 августа 2015 года). В тоже время следует отметить, что в приповерхностной зоне возможные нарушения сплошности массива по данным численного моделирования распространяются на расстояние не более 25 м от разломной структуры.

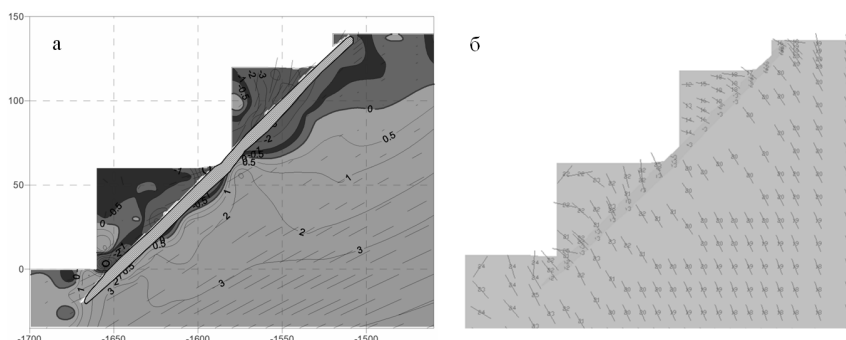


Рис. 2. Распределение напряжений на участке восточного борта карьера рудника «Железный», подсеченного разломом R2: а – σ_{\min} , б – ϕ_{\max}

Еще одной задачей проведенных исследований было определение параметров НДС массива пород в районе промплощадки АО «Ковдорский ГОК» и их изменение по мере углубления горных работ. В частности, оценивалась возможность формирования техногенных трещин в восточной части борта карьера с последующим прорастанием за контур карьера в район промплощадки.

Промплощадка с основными зданиями и сооружениями расположена в непосредственной близости от восточного борта Ковдорского карьера. В ходе проектирования глубокого карьера перед руководством предприятия встал вопрос о сохранении объектов промплощадки, рассматривались варианты по ее переносу.

Результаты расчета НДС массива глубокого карьера в районе промплощадки показали, что растяжениям подвержены лишь локальные участки в борту карьера, которые не распространяются вглубь массива (рис. 3, а, б). Значения σ_{\min} не превышают 1 МПа. В районе расположения наземных объектов на востоке от карьера при выемке запасов открытым способом, изменения абсолютных величин напряжений не превышают 5 %; зоны растяжений в приповерхностном слое по данным модельных расчетов приурочены непосредственно к границе карьерной выемки. Таким образом, можно сделать вывод о том, что при существующих знаниях о строении массива Ковдорского карьера можно полагать, что углубление карьерной выемки до 1000 м не окажет существенного негативного влияния на устойчивость пород в районе промплощадки.

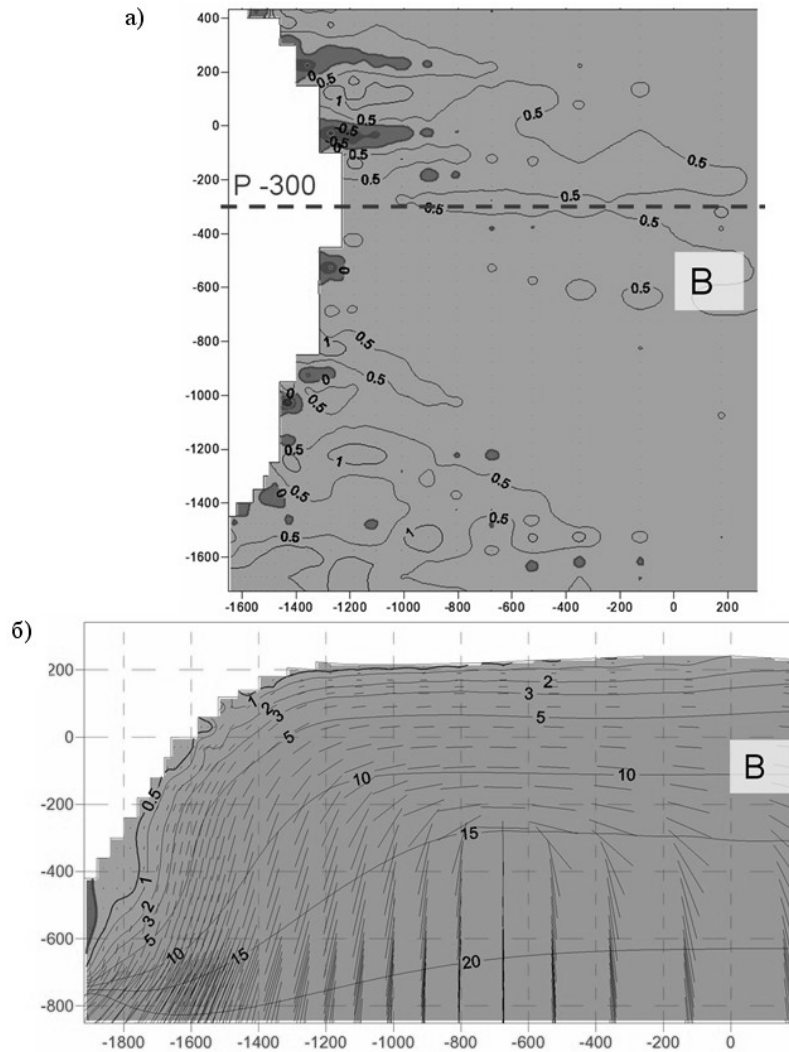


Рис. 3. Распределение напряжений σ_{min} в восточном борту карьера:
 а – в плане на уровне дневной поверхности; б – в вертикальном сечении по P-300

По результатам проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

- Потенциально опасными по динамическому разрушению будут являться уступы, находящиеся ниже отметки -400м, причем,

более высокий уровень сжимающих напряжений σ_{max} фиксируется на этих глубинах в восточной части борта.

- Не отмечается существенного увеличения зон и абсолютных значений растягивающих напряжений σ_{min} с глубиной, то есть вероятность формирования и раскрытия трещин отрыва не повышается.

- В районе расположения наземных объектов на востоке от карьера при углублении выемки до 1000м изменения абсолютных величин напряжений не превышают 5 %, зоны растяжений в приповерхностном слое приурочены непосредственно к границе карьера.

- Моделирование разломной структуры R2, подсекающей участок борта, показало, что наличие разлома обуславливает развитие обширных зон растягивающих напряжений в подсеченных уступах; при этом абсолютные величины y_{min} близки к критическим, а направление вероятных трещин отрыва параллельно наклону борта. Здесь же формируются зоны высоких касательных напряжений, что может привести к потере устойчивости подсекаемых уступов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Епифанова М.В., Федоров С.А., Козырев А.А., Рыбин В.В., Волков Ю.И. Инженерно-геологические аспекты проектирования глубокого карьера Ковдорского ГОКа // Горный журнал. 2007. — № 9. — С. 30-33.

2. Sjöberg J., Notstrom U. Slope Stability at Aitik // Slope stability in Surface Mining — Littleton, Colorado, USA, Publ. by SME. — 2001 — Chapter 22. — P. 203-212.

3. Stewart A., Wessels F., Bird B. Design, Implementation, and Assessment of Open Pit Slopes at Palabora over the Last 20 Years // Slope stability in Surface Mining—Littleton. — Colorado, USA, Publ. by SME, 2001. — Chapter 20. — P. 177-181.

4. Мельников Н.Н., Козырев А.А., Решетняк С.П., Каспарьян Э.В., Рыбин В.В., Свинин В.С., Рыжков А.Н. Концепция формирования нерабочих бортов глубоких карьеров Кольского Заполярья // Горный журнал, 2004, № 9, с. 45-50.

5. Козырев А.А., Семенова И.Э., Аветисян И.М. Особенности напряженно-деформированного состояния бортов протяженной в плане карьерной выемки в тектонически напряженном массиве. // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2013, № 7. — С. 47-53.

6. Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология. — Екатеринбург: изд. УрО РАН, 2001. — 335с.

7. Stacey T.R. Slope Stability in High Stress and Hard Rock Conditions. Slope Stability 2007. pp. 187-200.

8. Козырев А.А., Семенова И.Э., Шестов А.А. Трехмерное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород как основа прогноза удароопасности на рудниках ОАО «Апатит» // Геодинамика и напряженное состояние недр земли: сб. докл. междунар. конф. — Новосибирск, 2008. — С. 272-278.

9. Рыбин В.В., Константинов К.Н., Данилов И.В., Данилкин А.А. Геомеханическое состояние массивов горных пород в бортах карьеров по данным инструментальных определений. // Глубокие карьеры: сб. докл. Всеросс. науч. — техн. конф. с междунар. участием 18-22 июня 2012 г. — Апатиты; СПб., 2012. — с. 382-388.

10. Жиров Д.В., Мелихова Г.С., Рыбин В.В., Климов С.А. Новая методика комплексных инженерно-геологических и геомеханических исследований массивов пород в целях проектирования и эксплуатации глубоких карьеров. // Глубокие карьеры: сб. докл. Всеросс. науч. — техн. конф. с междунар. участием 18-22 июня 2012 г. — Апатиты; СПб., 2012. — с. 368-381. **ГИАН**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Козырев Анатолий Александрович – доктор технических наук, профессор, зам. директора, kozar@goi.kolasc.net.ru,

Семенова Инна Эриковна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, innas@goi.kolasc.net.ru,

Аветисян Иван Михайлович – кандидат технических наук, научный сотрудник, ivanavetisyan@yandex.ru,

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук



UDC 622.271.3 + 622.833.5.004.942

SPECIFIC FEATURES OF STRESS-STRAIN STATE IN DEEP OPEN-PIT WALL ESTABLISHED BY RESULTS OF NUMERICAL MODELING

Kozyrev A.A., professor, Dr.Sci. (Eng.), deputy director, kozar@goi.kolasc.net.ru, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Russia,

Semenova I.E., Senior researcher, PhD (Eng.), innas@goi.kolasc.net.ru, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Russia,

Avetisyan I.M., researcher, PhD (Eng.), ivanavetisyan@yandex.ru, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Russia.

The results of numerical modeling of rock mass stress-strain state in the vicinity of a deep open pit in the Zhelezny mine owned by JSC «Kovdorsky GOK» have been presented. The specific features of stress field changing in a pit wall while deepening the open pit have been discovered. The potentially

unstable areas in the pit wall have been identified. The possibility of mining-induced cracks forming in the east pit wall with consequent intergrowth outside the open pit boundary has been estimated. The calculations were carried out by the finite element method with SigmaGT software.

Key words: rock mechanics, stress-strain state, pit walls stability, numerical modeling, open pit mining.

REFERENCES

1. Epifanova M.V., Fedorov S.A., Kozyrev A.A., Rybin V.V., Volkov Ju.I. *Inzhenerno-geologicheskie aspekty proektirovanija glubokogo kar'era Kovdorskogo GOKa* (Geotechnical aspects of the design of the deep pit of Kovdorskiy GOK) // *Gornyj zhurnal*. 2007. No 9. pp. 30–33.
2. Sjoberg J., Notstrom U. *Slope Stability at Aitik* (Notstrom Slope Stability at Aitik) // *Slope stability in Surface Mining – Littleton, Colorado, USA*, Publ. by SME. 2001. Chapter 22. pp. 203–212.
3. Stewart A., Wessels F., Bird B. *Design, Implementation, and Assessment of Open Pit Slopes at Palabora over the Last 20 Years* (Design, Implementation, and Assessment of Open Pit Slopes at Palabora over the Last 20 Years) // *Slope stability in Surface Mining–Littleton, Colorado, USA*, Publ. by SME, 2001. Chapter 20. pp. 177–181.
4. Mel'nikov N.N., Kozyrev A.A., Reshetnjak S.P., Kaspar'jan Je.V., Rybin V.V., Svinin V.S., Ryzhkov A.N. *Koncepcija formirovanija nerabochih bortov glubokih kar'erov Kol'skogo Zapoljar'ja* (The concept of formation outside of deep open pit mines of the Kola polar region) // *Gornyj zhurnal*, 2004, No 9, pp. 45–50.
5. Kozyrev A.A., Semenova I.Je., Avetisjan I.M. *Osobennosti naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija bortov protjazhennoj v plane kar'ernoj vyemki v tektonicheski naprjazhenom massive* (Features of the stress-strain state of the boards in a long career of excavation in the tectonically intense array) // *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'*, 2013, No 7. pp. 47–53.
6. Zubkov A.V. *Geomehanika i geotehnologija* (Geomechanics and Geotechnology). Ekaterinburg: izd. UrO RAN, 2001. 335 p.
7. Stacey T.R. *Slope Stability in High Stress and Hard Rock Conditions* (Slope Stability in High Stress and Hard Rock). *Slope Stability 2007*. pp. 187–200.
8. Kozyrev A.A., Semenova I.Je., Shestov A.A. *Trehmernoe modelirovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija massiva gornyh porod kak osnova prognoza udaropasnosti na rudnikah OAO «Apatit»* (Three-Dimensional modeling of stress-strain state of rock mass as the basis of forecasting rock burst in mines of JSC «Apatit») // *Geodinamika i naprjazhennoe sostojanie nedr zemli: sb. dokl. mezhdunar. konf. Novosibirsk, 2008*. pp. 272–278.
9. Rybin V.V., Konstantinov K.N., Danilov I.V., Danilkin A.A. *Geomechanicheskoe sostojanie massivov gornyh porod v bortah kar'erov po dannym instrumental'nyh opredelenij* (Geomechanical state of rock mass in the pit according to instrumental measurements) // *Glubokie kar'ery: sb. dokl. Vseross. nauch.-tehn. konf. s mezhdunar. uchastiem 18–22 ijunja 2012*. Apatity; SPb., 2012. pp. 382–388.
10. Zhirov D.V., Melihova G.S., Rybin V.V., Klimov S.A. *Novaja metodika kompleksnyh inzhenerno-geologicheskikh i geomechanicheskikh issledovanij massivov porod v celjah proektirovanija i jekspluatacii glubokih kar'erov* (New method of complex engineering-geological and geomechanical studies of the rocks in order to design and operation of deep open pits) // *Glubokie kar'ery: sb. dokl. Vseross. nauch.-tehn. konf. s mezhdunar. uchastiem 18–22 ijunja 2012*. Apatity; SPb., 2012. pp. 368–381.