УДК 622.831

**А.А.КОЗЫРЕВ**, *д-р техн. наук, зам. директора по научной работе, innas@goi.kolasc.net.ru*
**И.Э.СЕМЕНОВА**, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник*
**В.В.РЫБИН**, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник*
**И.М.АВЕТИСЯН**, *младший научный сотрудник*
*Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты*

**A.A.KOZYREV**, *Dr. in eng. sc., deputy director on research work, innas@goi.kolasc.net.ru*
**I.E.SEMIONOVA**, *PhD in eng. sc., senior research assistant*
**V.V.RYBIN**, *PhD in eng. sc., senior research assistant*
**I.M.AVETISYAN**, *junior research*
*Mining institute of the Kola research center of RAS, Apatity*

# ОЦЕНКА ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ОКРЕСТНОСТИ КРУПНОЙ КАРЬЕРНОЙ ВЫЕМКИ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ УЧЕТЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ, ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГОРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Представлены результаты моделирования напряженного состояния массива пород методом конечных элементов в окрестности крупной карьерной выемки. Модель позволяет учитывать влияние крупных разломов. Граничные условия заданы, исходя из результатов измерений параметров напряжений in situ. Определено положение опасных зон в прибортовом массиве.

***Ключевые слова*:** математическое моделирование, поля напряжений и деформаций, учет геологических факторов, определение опасных зон.

# NUMERICAL ASSESSMENT OF STRESS-STRAIN FIELD IN VICINITY OF LARGE OPEN PIT MINE TAKING INTO ACCOUNT GEOMECHANICAL, GEOLOGICAL AND MINING FACTORS

The results of modeling of rock mass stress state in the vicinity of large open pit mine using finite-elements method are represented. The model allows to take into account the influence of large-scale fractures. The initiation of boundary conditions is based on the results of determination of stress parameters in situ. The locations of risk areas near the slope are defined.

***Key words*:** mathematical modeling, stress-strain fields, account of geological factors, determination of hazardous zones.

Одним из эффективных путей минимизации затрат на разработку месторождений полезных ископаемых открытым способом является увеличение угла наклона бортов карьеров. Однако в этом случае остро встает проблема управления геомеханическим состоянием горно-рудной природно-технической системы, которое должно сочетать прогноз напряжений и деформаций в окрестности карьерной выемки и разработку профилактических мероприятий, снижающих риск потери устойчивости горно-технических конструкций.

Для прогнозирования напряженно-деформированного состояния (НДС) в отечественной и зарубежной практике успешно применяются численные модели, учитывающие геологические и горно-технические факторы и дающие возможность оценки геомеханического состояния массива пород при различных вариантах развития работ в пространстве и времени [1,2, 4-5].

**Параметры напряженного состояния массива пород карьера рудника «Железный»**

| Абсолютная отметка измерительной станции, время проведения измерений, место измерений | $H_{ср}$, м | Результаты измерений методом разгрузки | | | Результаты расчета исходя только из собственного веса вышележащих пород | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\sigma_{max}$, МПа | $\sigma_{min}$, МПа | $B_{\sigma max}$, град | $\sigma_{верт}^{ср}$, МПа | $\sigma_{гор}^{ср}$, МПа |
| + 10 м, 2008, северный борт | 247 | 27 | 8 | –17 | 7,4 | 2,4 |
| + 10 м, 2007, северо-восточный борт | 247 | 20 | 3 | –24° | 7,4 | 2,4 |
| + 25 м, 2007, северо-восточный борт | 232 | 24 | 14 | –15° | 7 | 2,3 |
| + 40 м, 2005, северо-восточный борт | 217 | 13 | 4 | 18° | 6,5 | 2,2 |
| + 94 м, 2000, северо-восточный борт | 163 | 20 | 4 | 18° | 5 | 1,6 |
| + 94 м, 2000, северо-восточный борт | 163 | 22 | 9 | –14° | 5 | 1,6 |
| + 118 м, 2005, северо-западный борт | 90 | 5 | –1 | 6° | 2,7 | 0,9 |
| + 142 м, 2001, северо-западный борт | 65 | 8 | –2 | 43° | 2 | 0,6 |
| + 154 м, 2005, юго-восточный борт | 52 | 11 | 3 | 88° | 1,6 | 0,5 |
| + 166 м, 2003, юго-восточный борт | 40 | 3 | –1 | 13° | 1,2 | 0,4 |

Условные обозначения: $H_{ср}$ – средняя глубина положения измерительной станции от первоначального рельефа, м; $\sigma_{max}$ – максимальная компонента напряжений, МПа; $\sigma_{min}$ – минимальная компонента напряжений, МПа; $B_{\sigma max}$ – угол наклона $\sigma_{max}$ к горизонту, град.; $\sigma_{верт}^{ср} = \gamma H$ – вертикальная компонента, МПа; $\sigma_{гор}^{ср} = \lambda\gamma H$ – горизонтальная компонента, МПа.

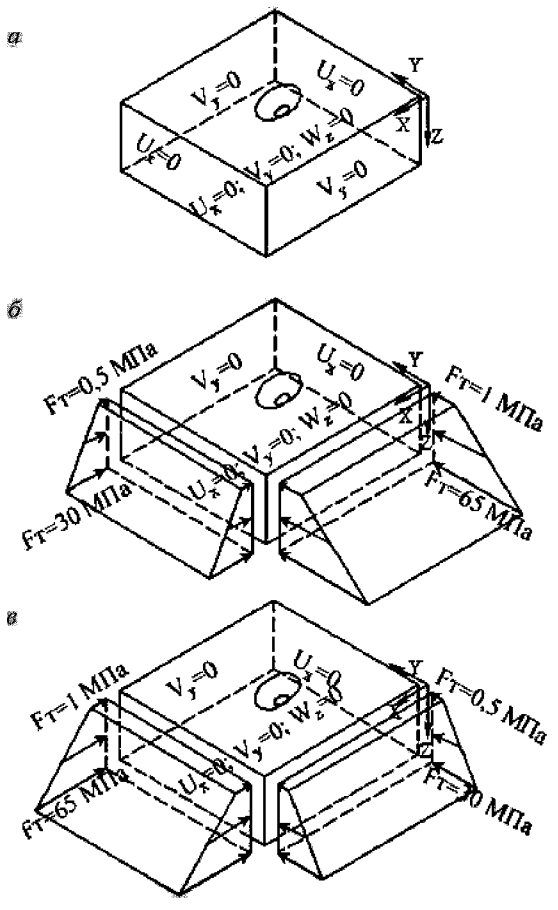



Рис.1. Схемы задания граничных условий для расчетных вариантов: *а* – гравитационная постановка; *б* – с учетом тектонических сил $F_{tx} < F_{ty}$; *в* – с учетом тектонических сил $F_{tx} > F_{ty}$

Объектом исследований является карьер рудника «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК», проектная глубина которого составляет 1000 м, а угол наклона борта 60°. Натурными исследованиями выявлено действие в массиве пород, включающем месторождение, повышенных горизонтальных напряжений (см. таблицу).

Для проведения модельных исследований НДС был выбран метод конечных элементов (МКЭ) в упругой постановке, что позволило: задать адекватные исследуемому объекту граничные условия по напряженному состоянию; учесть неоднородности различного иерархического уровня и с достаточной детальностью промоделировать геометрию очистных пространств. Расчеты выполнены в среде программного комплекса Sigma3D, разработанного в Горном институте КНЦ РАН [3].

Границы модели выбраны в соответствии с принципом Сен-Венана, согласно которому зона влияния особенности распространяется на расстояние не более трех ее характерных размеров (в нашем случае радиусов карьера по длинной $R \approx 1150$ м и по короткой оси $r \approx 830$ м, а также его максимальной проектной глубины $H_{max} = 1000$ м). В итоге размер области моделирования – $8000 \times 7500 \times 3050$ м$^3$.

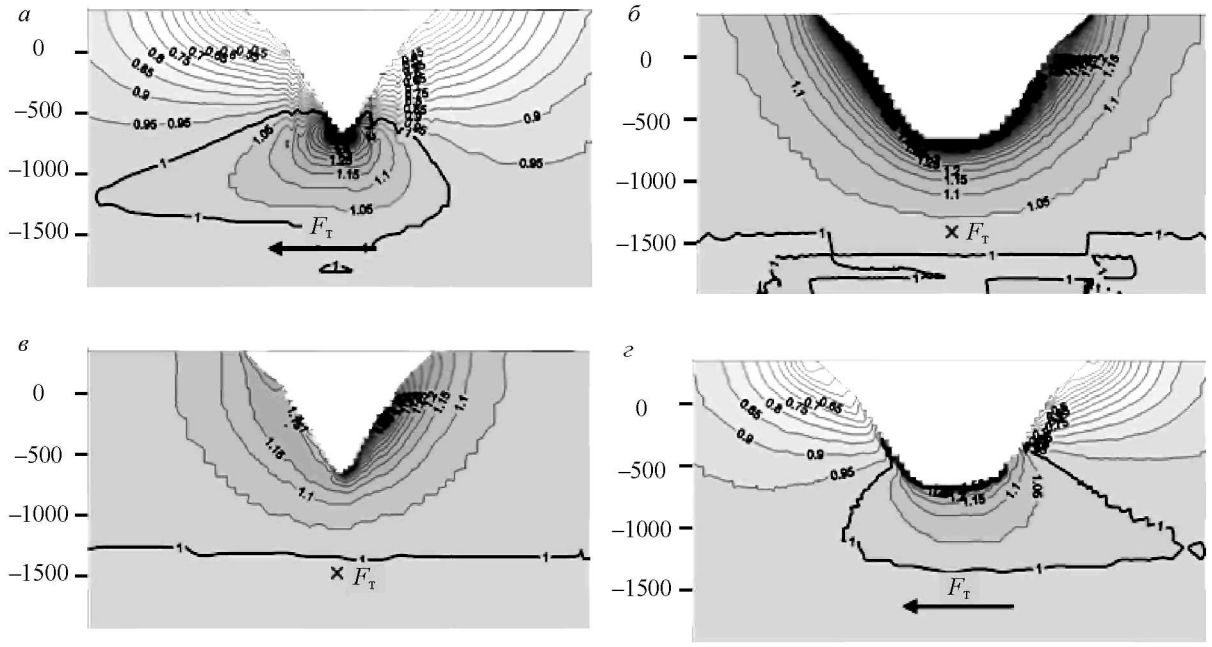



Рис.2. Коэффициенты концентрации $\sigma_{max}$ в окрестности карьерной выемки с глубиной 1000 м в вертикальных сечениях: *а*, *б* – при действии максимальной тектонической нагрузки $F_т$ по короткой оси карьера; *в*, *г* – по длинной оси карьера

С использованием разработанной модели рассчитано несколько вариантов задачи распределения параметров НДС в массиве, которые можно разделить на две группы по граничным условиям: чисто гравитационное напряженное состояние ($\sigma_1 = \gamma H$, $\sigma_2 = \sigma_3 = \lambda\gamma H$, где $\gamma$, $H$ и $\lambda$ – соответственно объемный вес, глубина и коэффициент бокового распора) и гравитационно-тектоническое напряженное состояние. Причем варианты с учетом тектонических сил были просчитаны как при условии действия их максимальной составляющей по короткой оси карьерной выемки (совпадающей с направлением оси $Y$ модели), так и по ее длинной оси (совпадающей с направлением оси $X$ модели). Схемы задания граничных условий представлены на рис.1.

Для каждого вида граничных условий рассчитывали НДС: для исходного состояния массива пород; при выемке карьерных запасов, соответствующей его реальной глубине, до абсолютной высотной отметки +10 м (глубина карьера 340 м); при проектной глубине карьерной выемки до отметки –650 м (глубина карьера 1000 м).

Заданная максимальная горизонтальная пригрузка составила на уровне дневной поверхности 1 МПа, а на уровне дна модели – 65 МПа. Коэффициент бокового отпора с учетом действия тектонической нагрузки $K_б = 0{,}5$. Учитывая общие закономерности распределения тектонических напряжений с глубиной, предположили, что на глубинах более 400-500 м зависимость $\sigma_{max} = f(H)$ будет нелинейной.

Приведем результаты расчета НДС в окрестности проектной карьерной выемки с учетом действия тектоники. Отмечено образование зон концентрации напряжений у сопряжений дна и бортов карьера. Причем при действии максимальных горизонтальных напряжений $F_т$ по короткой оси карьера значения коэффициентов концентрации ($K\sigma_{max}$) достигают 6,2. При действии максимальных горизонтальных напряжений по длинной оси карьера $K\sigma_{max} \le 2{,}2$. Уровень напряжений в окрестности верхних и средних участков соответствующих бортов, перпендикулярных заданным горизонтальным напряжениям, ниже исходного (рис.2, *а*, *г*; 3, *а*, *в*).

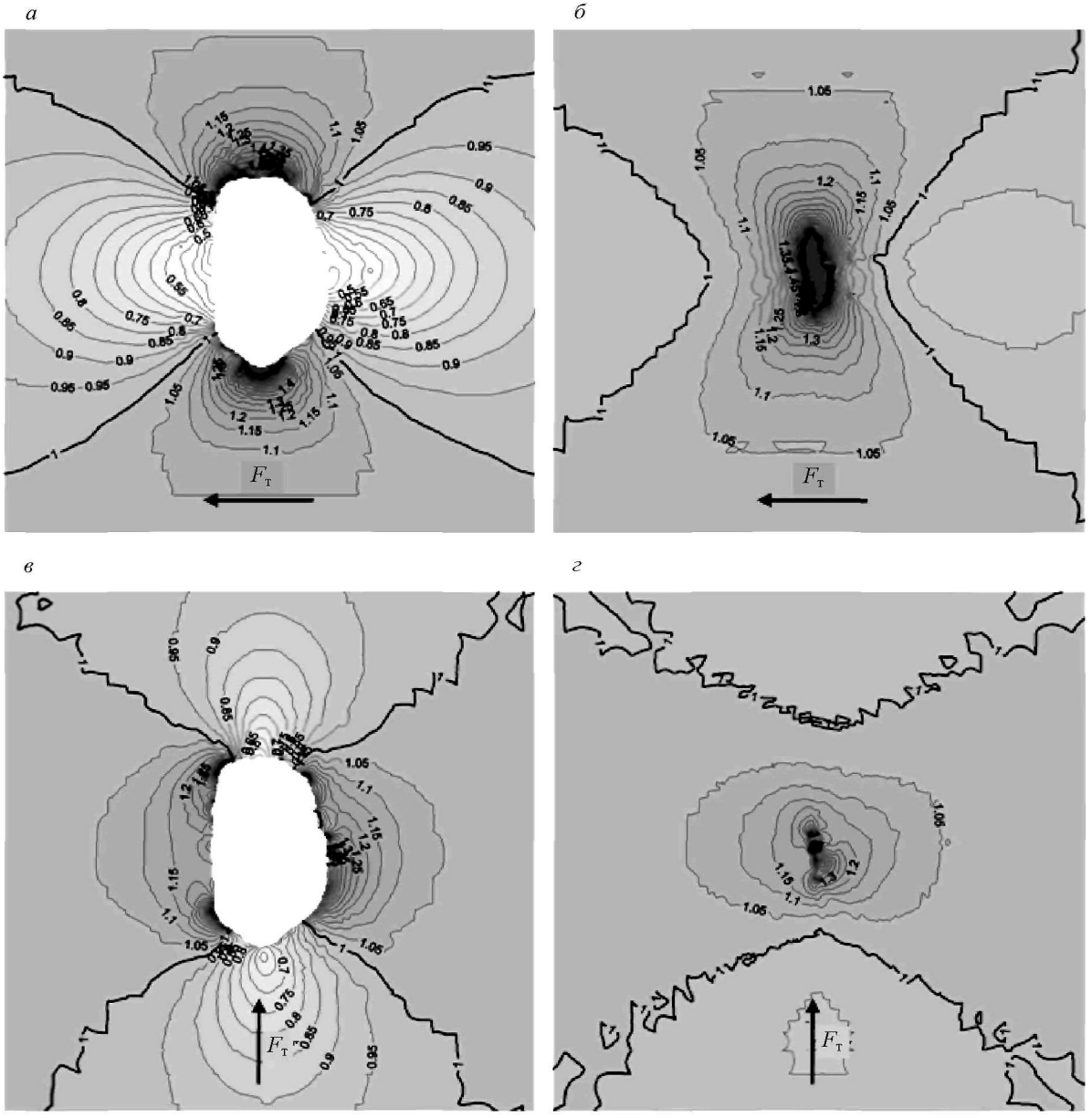



Рис.3. Коэффициенты концентрации $\sigma_{max}$ в окрестности карьерной выемки с глубиной 1000 м в горизонтальных сечениях: *а*, *б* – при действии максимальной тектонической нагрузки $F_т$ по короткой оси карьера; *в*, *г* – по длинной оси карьера; *а*, *в* – сечение по гор. –20 м; *б*, *г* – сечение под дном карьера, гор. –660 м

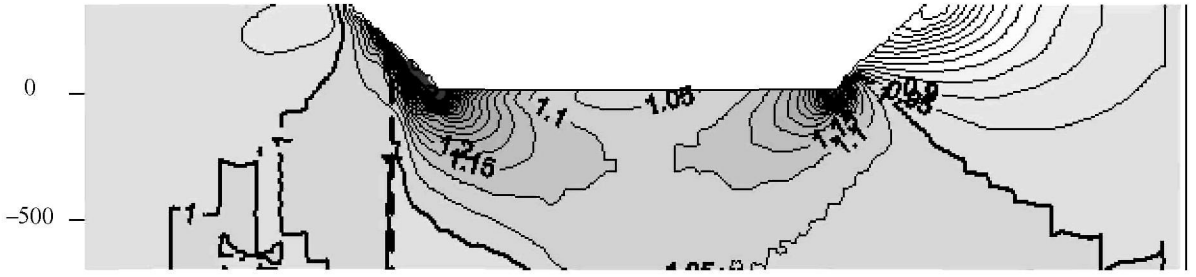



Рис.4. Коэффициенты концентрации $\sigma_{max}$ в массиве пород, включающем ослабленную зону (выделена штриховкой), в вертикальных сечениях при глубине карьера 340 м

В бортах карьера, согласных с направлением действия $F_т$ формируются зоны концентраций напряжений: при действии $F_т$ по короткой оси карьера (рис.2, *б* и 3, *а*) $K\sigma_{max}$ находится в пределах 1,2-2,6; при действии $F_т$ по длинной оси карьера (рис.2, *в* и 3, *в*) $K\sigma_{max}$ = 1,1-1,5. Причем более высокий уровень концентрации сжимающих напряжений отмечен в окрестности части борта с вертикальными уступами.

Следует заметить, что существует предположение, подкрепляемое результатами исследований искривления стволов длинных геолого-разведочных скважин, об ориентации максимальной компоненты главных напряжений в изучаемом массиве пород в направлении по длинной оси карьера, что является более благоприятным с точки зрения его устойчивости.

Следующий вариант был просчитан с учетом мощной ослабленной зоны в юго-восточном борту карьера при текущей геометрии карьерной выемки с глубиной 340 м и заданной тектонической пригрузкой по длинной оси карьера. Модуль упругости элементов ослабленной зоны задавали на порядок ниже модуля упругости вмещающего массива. В этом случае образуется зона концентрации $\sigma_{max}$ по участку борта с промоделированной зоной (рис.4), особенно на сопряжении ослабленной зоны с карьерной выемкой и во вмещающем массиве ниже по борту. Значения коэффициентов концентрации $K\sigma_{max}$ в этом случае достигают 2,6. В аналогичном варианте без учета ослабленной зоны этот участок борта был разгружен, а локальная область концентраций наблюдалась лишь на сопряжении борта с дном карьерной выемки.

Анализ распределения напряжений под дном карьерной выемки показывает увеличение как размеров области концентраций напряжений, так и абсолютных значений напряжений в массиве вмещающих пород в непосредственной близости от ослабленной зоны.

В результате выполненной работы:

1. Изучены особенности распределения напряжений в окрестности глубокой карьерной выемки, находящейся в массиве пород с гравитационно-тектоническим типом НДС, которые связаны прежде всего с тем, что борт карьера пересекает несколько зон с различным соотношением гравитационных и тектонических сил.

2. Определено местоположение зон концентраций сжимающих напряжений в зависимости от направления действующих в массиве пород тектонических сил $F_т$ при наличии и при отсутствии ослабленной зоны, расположенной в пределах юго-восточного борта карьера. Выявленные области концентраций максимальной компоненты напряжений $\sigma_{max}$ позволяют сделать вывод о меньшем уровне действующих напряжений при направлении $F_т$ по длинной оси и о большем уровне действующих напряжений при направлении $F_т$ по короткой оси выемки.

Показано, что наличие ослабленной зоны приводит к росту сжимающих напряжений в 1,7 раза и увеличению размеров области их концентрации.

Дальнейшими направлениями исследований являются: постановка и расчет вариантов с учетом наиболее крупных разломных зон; построение локальных моделей отдельных уступов борта карьера с заданием граничных условий из предыдущего этапа моделирования и уточненный анализ НДС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 07-05-13579; 06-05-64681 и 06-05-03006).

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Зубков А.В.* Геомеханика и криотехнология / УрО РАН. Екатеринбург, 2001. 335 с.

2. *Козырев А.А.* К проблеме устойчивости бортов глубоких карьеров в высоконапряженных массивах / А.А.Козырев, В.В.Павлов, В.А.Мальцев // Проблемы разработки глубоких карьеров: Материалы международного симпозиума по открытым горным работам «Мирный-91» / Удачный, 1991. С.129-134.

3. *Козырев А.А.* Трехмерное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород как основа прогноза удароопасности на рудниках ОАО «Апатит» / А.А.Козырев, И.Э.Семенова, А.А.Шестов // Сборник докладов международной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». Новосибирск, 2007.

4. *Stacey T.R.* Slope Stability in High Stress and Hard Rock Conditions. Slope Stability 2007. P.187-200.

5. *Stead D., Coggan J.S., Elmo D., Yan M.* Modelling Brittle Fracture in Rock Slopes – Experience Gained and Lessons Learned. Slope Stability 2007. P.239-252.

**REFERENCES**

1. *Zubkov A.V.* Geomechanics and Creotechnology / UrO RAS. Yekaterinburg, 2001. 335 p.

2. *Kozyrev A.A.* On slope stability of deep open-pit mines in highly-stressed rock mass / A.A.Kozyrev, V.V.Pavlov, V.A.Maltsev // Problems in mining of deep open-pit mines: Proc. Int. Symp. on open-pit mining, «Mirny-91» / Udachny, 1991, P.129-134.

3. *Kozyrev A.A.* 3D-modeling of stress-strain state of rock mass as the basis for prediction of rockburst-hazard at ore mines of the Apatit Co. / A.A.Kozyrev, I.E.Semionova, A.A.Shestov // Proc. Int. Conf. «Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior». Novosibirsk, 2007.

4. *Stacey T.R.* Slope Stability in High Stress and Hard Rock Conditions. Slope Stability 2007. P.187-200.

5. *Stead D., Coggan J.S., Elmo D., Yan M.* Modelling Brittle Fracture in Rock Slopes – Experience Gained and Lessons Learned. Slope Stability 2007. P.239-252.