

УДК 622.271.3 + 622.833.5.004.942

Исследование особенностей напряженно-деформированного состояния массива пород в окрестности крупной карьерной выемки

А.А. Козырев, В.В. Рыбин, И.Э. Семенова, И.М. Аветисян
Горный институт КНЦ РАН

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

Abstract. The results of modeling of rock mass stress state in the vicinity of a large open pit using finite-element method have been represented. The model allows to take into account the influence of large-scale geological fractures. The initialization of boundary conditions has been based on the results of determination of stress parameters *in situ*. The locations of risk areas near the slope have been defined.

Ключевые слова: геомеханика, напряжённое состояние, устойчивость бортов карьеров, математическое моделирование, разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом
Keywords: geomechanics, stress state, slope stability, mathematical simulation, surface mining

1. Введение

Увеличение угла наклона бортов карьеров является одним из наиболее радикальных путей минимизации затрат на разработку месторождений полезных ископаемых открытым способом. При этом переход к формированию бортов карьера с увеличенными углами откосов борта нельзя воспринимать как удорожающий и усложняющий производство фактор, хотя затраты на это неизбежны и значительны. Данные расходы являются инвестициями в развитие горного предприятия. Экономический эффект от повышения до предельного значения генеральных углов наклона бортов даже для среднего по масштабам карьера может быть весьма значителен за счет увеличения его глубины и уменьшения объемов вскрыши.

Учитывая высокую значимость правильного определения углов наклона бортов в предельном положении, Горный институт КНЦ РАН с начала 1990-х годов начал исследования в этой области с учетом фактического напряженно-деформированного состояния (НДС) вмещающего массива горных пород и параметров нарушенной зоны в приконтурной зоне карьера рудника "Железный" ОАО "Ковдорский ГОК". Подобные исследования проводятся также и на других карьерах Кольского полуострова (Мельников и др., 2004; 2005).

2. Данные натурных измерений и их интерпретация

Для определения граничных условий при моделировании НДС нетронутого массива была разработана комплексная методика, включающая проведение измерений напряжений и определение физико-механических свойств пород методами разгрузки, ультразвукового каротажа, контроля разрушения скважин.

В таблице представлены обобщенные данные измерений параметров напряженного состояния массива пород карьера рудника "Железный" методом разгрузки (Турчанинов и др., 1970). В таблице также приведены расчетные параметры напряженного состояния массива пород исходя только из собственного веса вышележащих пород.

Сравнение расчетных и измеренных величин напряжений в массиве показывает, что действующие значения максимальных компонент главных напряжений на всех станциях превышают максимальные расчетные напряжения от собственного веса вышележащих пород. При этом в большинстве случаев отношение $\sigma_{\max} / \sigma_{\text{верт}}^{cp} > 2$. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о соответствии напряженного состояния массива пород исследованных месторождений гравитационно-тектоническому типу.

Действие в массиве пород повышенных горизонтальных напряжений неоднозначно влияет на устойчивость бортов и уступов карьеров. С одной стороны, создается дополнительная нагрузка, нормальная граням структурных блоков, перпендикулярных контуру карьера, что увеличивает силу трения по контактам блоков пород, и как следствие, повышается устойчивость как отдельных уступов, так и бортов карьера в целом. С другой стороны, учитывая прогнозируемый уровень действующих напряжений на уровне дна карьера, сравнимый с прочностью на одноосное сжатие скальных пород борта, становится вероятным разрушение скальных пород в динамической форме.

Таблица. Параметры напряженного состояния массива пород карьера рудника "Железный"

Абсолютная отметка измерительной станции, время проведения измерений, место измерений	H_{cp} , м	Измеренные параметры напряженного состояния массива пород по результатам измерений методом разгрузки			Расчетные напряжения исходя только из собственного веса вышележащих пород	
		σ_{max} , МПа	σ_{min} , МПа	$B_{\sigma_{max}}$, °	$\sigma_{верт}^{cp}$, МПа	$\sigma_{гор}^{cp}$, МПа
+10м, 2007, северо-восточный борт	247	20	3	-24°	7.4	2.4
+25м, 2007, северо-восточный борт	232	24	14	-15°	7	2.3
+40м, 2005, северо-восточный борт	217	13	4	18°	6.5	2.2
+94м, 2000, северо-восточный борт	163	20	4	18°	5	1.6
+94м, 2000, северо-восточный борт	163	22	9	-14°	5	1.6
+118м, 2005, северо-западный борт	90	5	-1	6°	2.7	0.9
+142м, 2001, северо-западный борт	65	8	-2	43°	2	0.6
+154м, 2005, юго-восточный борт	52	11	3	88°	1.6	0.5
+166м, 2003, юго-восточный борт	40	3	-1	13°	1.2	0.4

Условные обозначения: H_{cp} – средняя глубина положения измерительной станции от первоначального рельефа, м; σ_{max} – максимальная компонента напряжений, МПа; σ_{min} – минимальная компонента напряжений, МПа; $B_{\sigma_{max}}$ – угол наклона σ_{max} к горизонту, град.; $\sigma_{верт}^{cp}$ – вертикальная компонента (γH), МПа; $\sigma_{гор}^{cp}$, горизонтальная компонента ($\lambda \gamma H$), МПа, где λ – коэффициент Пуассона.

В данных условиях особенно важной является задача прогноза геомеханического состояния массива, включающего карьерную выемку, и устойчивости его конструктивных элементов (Галустьян, 1980). Для решения этой проблемы в отечественной и зарубежной практике успешно применяются численные методы, позволяющие оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) массива пород с учетом конфигурации очистных пространств и их развития в пространстве и времени (Козырев и др., 1991; Зубков, 2001; Stacey, 2007; Stead et al., 2007).

3. Параметры трехмерной численной модели и варианты граничных условий

Для представленных в данной работе исследований был выбран метод конечных элементов (МКЭ) в упругой постановке, что позволило: во-первых, задать адекватные исследуемому объекту граничные условия по напряженному состоянию (использованы приведенные выше данные измерения напряжений); во-вторых, учесть неоднородности различного иерархического уровня и, в-третьих, с достаточной детальностью промоделировать конфигурацию рельефа и геометрию очистных пространств. Расчеты выполнены в среде программного комплекса Sigma3D, разработанного в Горном институте КНЦ РАН (Козырев и др., 2007).

Границы модели выбраны в соответствии с принципом Сен-Венана, согласно которому зона влияния особенности распространяется на расстояние не более трех ее характерных размеров. Такими характерными размерами в нашем случае являются радиусы карьера по длинной ($R \approx 1150$ м) и короткой оси ($r \approx 830$ м) и его максимальная проектная глубина ($H_{max} = 1000$ м). В итоге, размер области моделирования – $8000 \times 7500 \times 3050$ м³. Типовое горизонтальное сечение модели представлено на рис. 1а, вертикальное – на рис. 1б.

С использованием разработанной модели на данный момент рассчитано несколько вариантов 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 γ , H и λ – 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. 2.

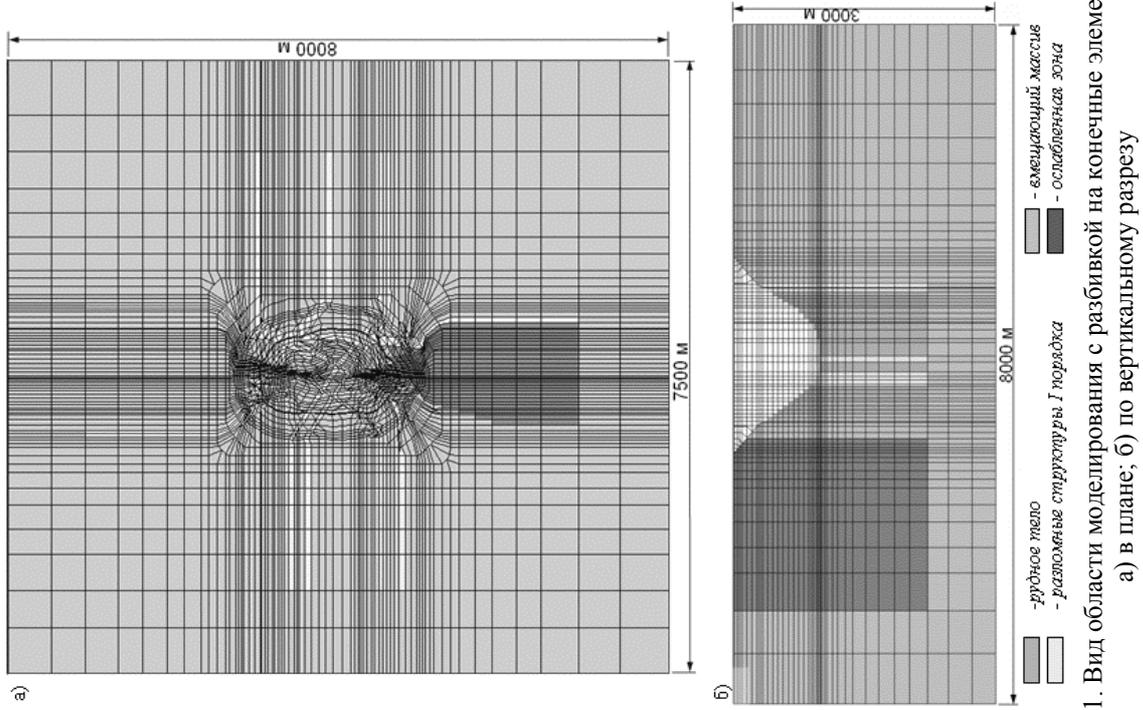


Рис. 1. Вид области моделирования с разбивкой на конечные элементы:
 а) в плане; б) по вертикальному разрезу

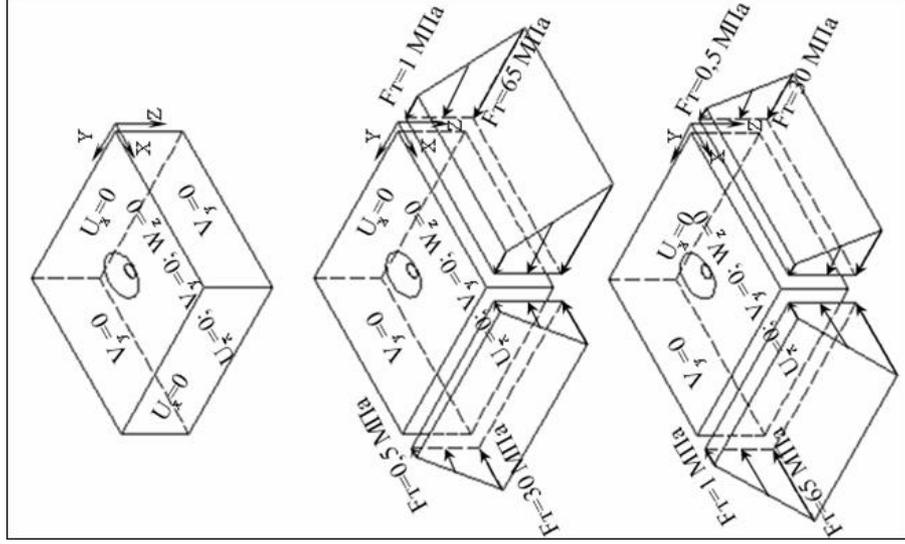


Рис. 2. Схемы задания граничных условий для расчетных вариантов:
 а) гравитационная постановка;
 б) с учетом тектонических сил $F_{TХ} < F_{TУ}$;
 в) с учетом тектонических сил $F_{TХ} > F_{TУ}$

4. Анализ результатов численного моделирования

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 $K_\sigma = 0.5$. Учитывая общие закономерности распределения тектонических напряжений с глубиной, предположили, что на глубинах более 400 ÷ 500 м зависимость $\sigma_{\max} = f(H)$ будет нелинейной. При этом рост напряжений с глубиной будет затухать.

В первую очередь для получения исходного поля напряжений и проверки корректности задания граничных условий были просчитаны варианты с исходным рельефом дневной поверхности без учета неоднородностей среды для указанных выше типов задаваемого нагружения.

При анализе расчетного варианта с тектонической пригрузкой отмечено увеличение абсолютных значений максимальной сжимающей компоненты напряжений (σ_{\max}) на глубинах, не превышающих проектной карьерной выемки. В этих же высотных отметках происходит переориентация векторов σ_{\max} , которые становятся субгоризонтальными в отличие от субвертикального направления σ_{\max} в варианте без учета тектонических сил. Под проектным карьерным пространством образуется зона, в которой гравитационная составляющая напряжений сопоставима с тектонической, с увеличением глубины направление векторов максимальной сжимающей компоненты напряжений становится все ближе к вертикальному (рис. 3).

В следующей группе вариантов была промоделирована карьерная выемка до глубины +10 м, что соответствует реальной глубине карьера, при различном задании граничных условий. При учете только собственного веса пород, как и следовало ожидать, выемка определенной массы пород снижает уровень напряжений, характерный для аналогичных высотных отметок в исходном НДС. Непосредственно на уровне дна карьерной выемки произошло снижение напряжений более чем в 2 раза.

При анализе аналогичных по параметрам карьера расчетных вариантов с тектонической пригрузкой следует отметить:

- образование зон концентрации напряжений сжатия у сопряжений дна и бортов карьера (рис. 4а и 4г), перпендикулярных заданным горизонтальным напряжениям. То есть при действии максимальных горизонтальных напряжений по короткой оси карьера более пригруженными оказываются сопряжения дна с протяженными участками борта (рис. 4а, 5б); значения коэффициентов концентрации ($K\sigma_{\max}$) в этом случае достигают 2.1. А при действии максимальных горизонтальных напряжений по длинной оси карьера образуются зоны концентраций у сопряжений дна и коротких участков бортов карьера (4г, 5г); $K\sigma_{\max} \leq 1.7$. При этом уровень напряжений в окрестности верхних и средних участков соответствующих бортов ниже исходного.
- формирование зон концентраций напряжений в бортах карьера, согласных с направлением действия F_T , с уровнем коэффициентов концентрации: при действии F_T по короткой оси карьера (рис. 4б и 5а) $K\sigma_{\max}$ находится в пределах 1.2 ÷ 1.6; при действии F_T по длинной оси карьера (рис. 4в и 5в) $K\sigma_{\max}$ в пределах 1.1 ÷ 1.2.

При выемке карьера до проектного уровня (-650 м) под действием собственного веса продолжается снижение напряжений в окрестности карьера на соответствующих высотных отметках. В непосредственной близости от бортов карьера напряжения несущественно увеличились. Под дном промоделированного проектного карьера напряжения снижаются в 6 раз по сравнению с исходным уровнем σ_{\max} для данных высотных отметок.

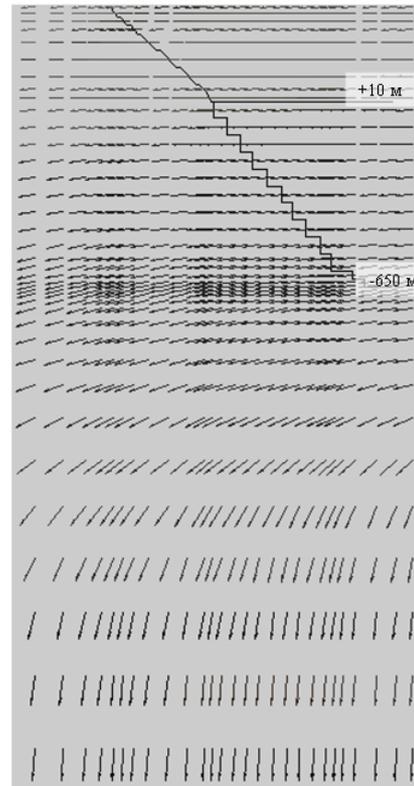


Рис. 3. Распределение векторов σ_{\max} для нетронутого массива под совместным действием собственного веса и тектоники в вертикальном сечении по оси будущего карьера

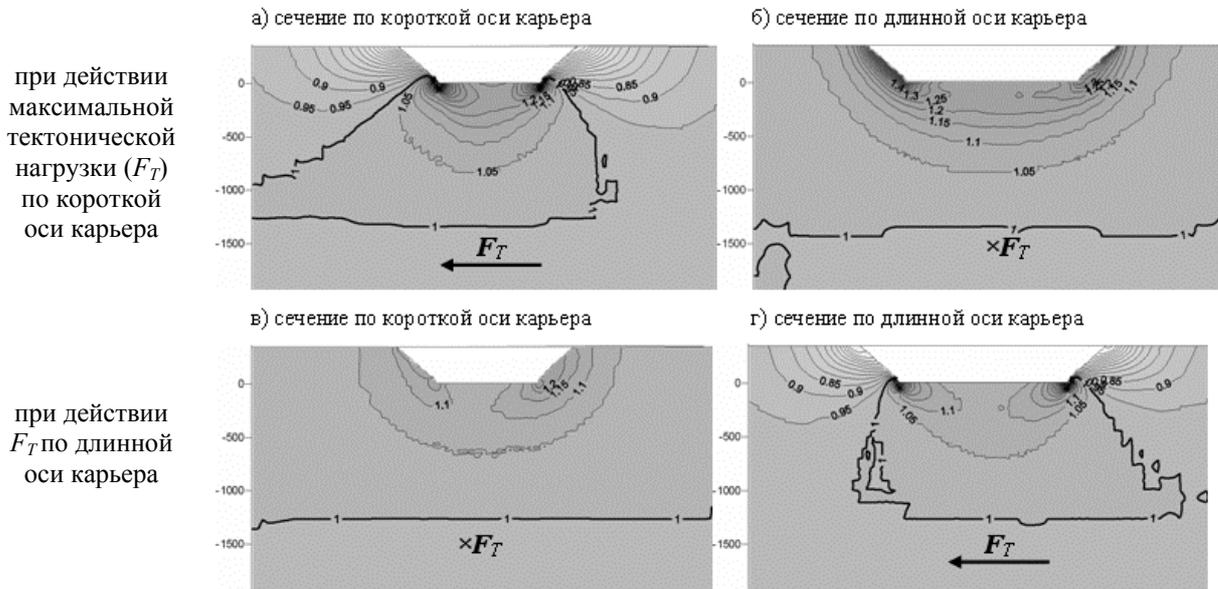


Рис. 4. Коэффициенты концентрации σ_{\max} в окрестности карьерной выемки с глубиной 340 м в вертикальных сечениях

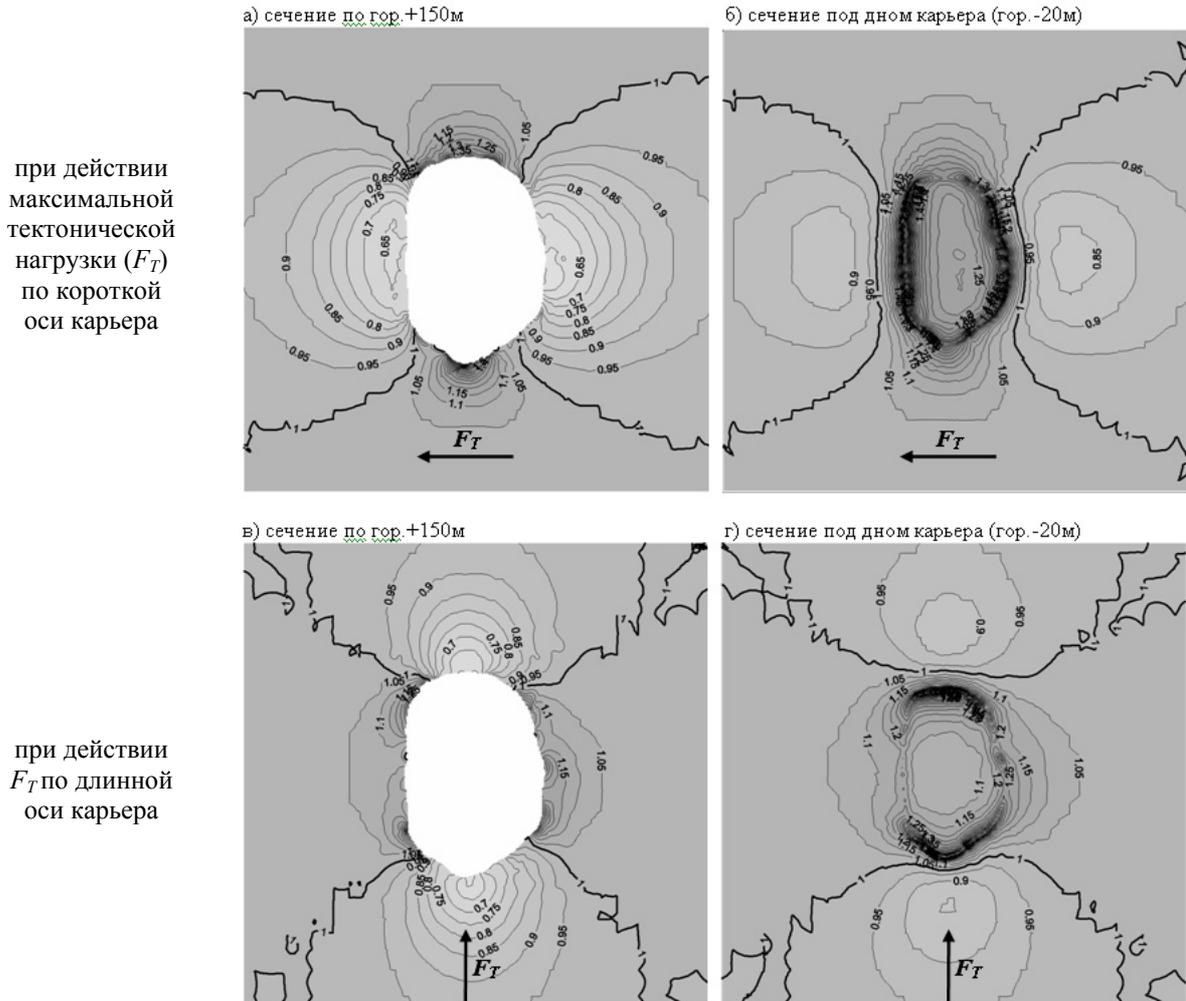


Рис. 5. Коэффициенты концентрации σ_{\max} в окрестности карьерной выемки с глубиной 340 м в горизонтальных сечениях

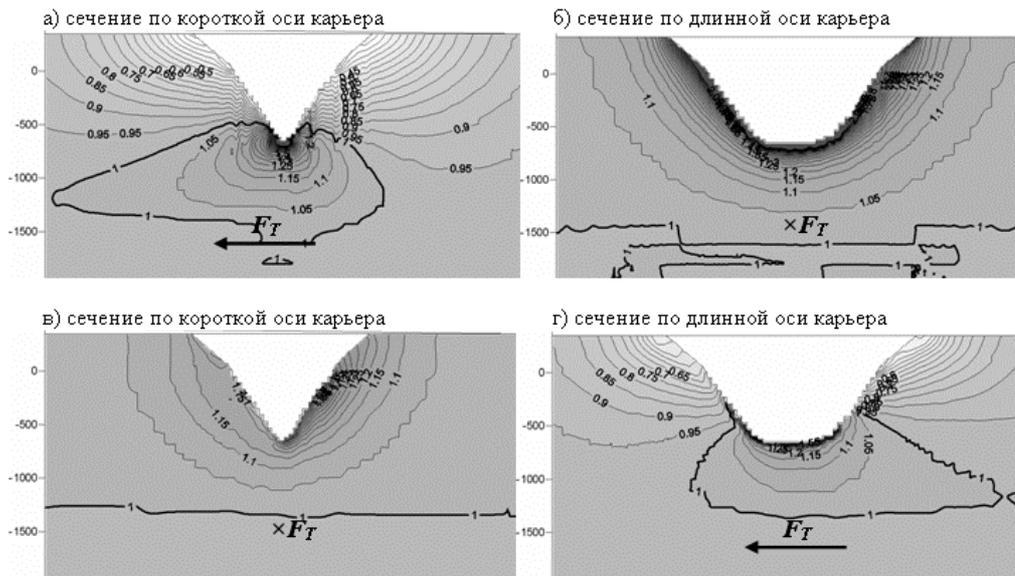


Рис. 6. Коэффициенты концентрации σ_{\max} в окрестности карьерной выемки с глубиной 1000 м в вертикальных сечениях: а) и б) при действии максимальной тектонической нагрузки (F_T) по короткой оси карьера; в) и г) при действии F_T по длинной оси карьера

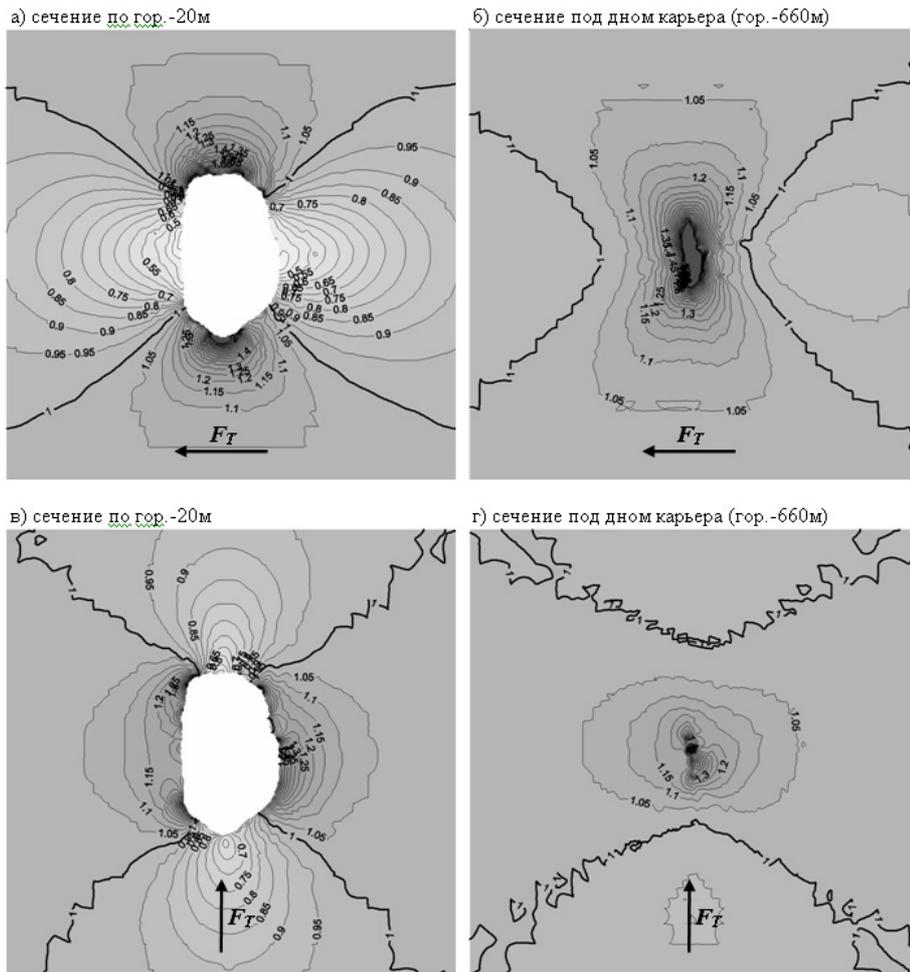


Рис. 7. Коэффициенты концентрации σ_{\max} в окрестности карьерной выемки с глубиной 1000 м в горизонтальных сечениях: а) и б) при действии максимальной тектонической нагрузки (F_T) по короткой оси карьера; в) и г) при действии F_T по длинной оси карьера

Анализ результатов расчета НДС в окрестности проектной карьерной выемки с учетом действия тектоники показал:

- образование зон концентрации напряжений у сопряжений дна и бортов карьера (рис. 6 и 7 б,г). При действии максимальных горизонтальных напряжений по короткой оси карьера, значения коэффициентов концентрации ($K\sigma_{\max}$) в этом случае достигают 6.2. При действии максимальных горизонтальных напряжений по длинной оси карьера $K\sigma_{\max} \leq 2.2$;
- уровень напряжений в окрестности верхних и средних участков соответствующих бортов, перпендикулярных заданным горизонтальным напряжениям, ниже исходного (рис. 6а,г, 7а,в);
- формирование зон концентраций напряжений в бортах карьера, согласных с направлением действия F_T , с уровнем коэффициентов концентрации: при действии F_T по короткой оси карьера (рис. 6б и 7а) $K\sigma_{\max}$ находится в пределах 1.2÷2.6; при действии F_T по длинной оси карьера (рис. 6в и 7в) $K\sigma_{\max}$ в пределах 1.1÷1.5. Причем более высокий уровень концентрации сжимающих напряжений отмечен в окрестности части борта с вертикальными уступами.

Нами также проанализировано направление площадок действия растягивающих деформаций ϵ_3 , по которым можно судить о вероятной ориентировке прорастания трещин в прибортовом массиве пород. Области значимых по абсолютным величинам растяжений формируются в гравитационно-тектоническом поле напряжений в бортах карьера, перпендикулярных действию максимальных заданных горизонтальных напряжений. В случае действия F_T по короткой оси карьера возможно прорастание трещин, субпараллельных борту карьера (рис. 8а, в). При действии F_T по длинной оси выемки могут формироваться трещины, перпендикулярные борту (рис. 8б, г).

При этом исследованиями по данным искривления стволов длинных геологоразведочных скважин, а также по измерениям методом разгрузки установлена ориентация максимальной компоненты главных напряжений в изучаемом массиве пород в направлении длинной оси карьера. В этом случае состояние борта карьера соответствует приведенному на рис. 8 б,г, что является более благоприятным с точки зрения его устойчивости.

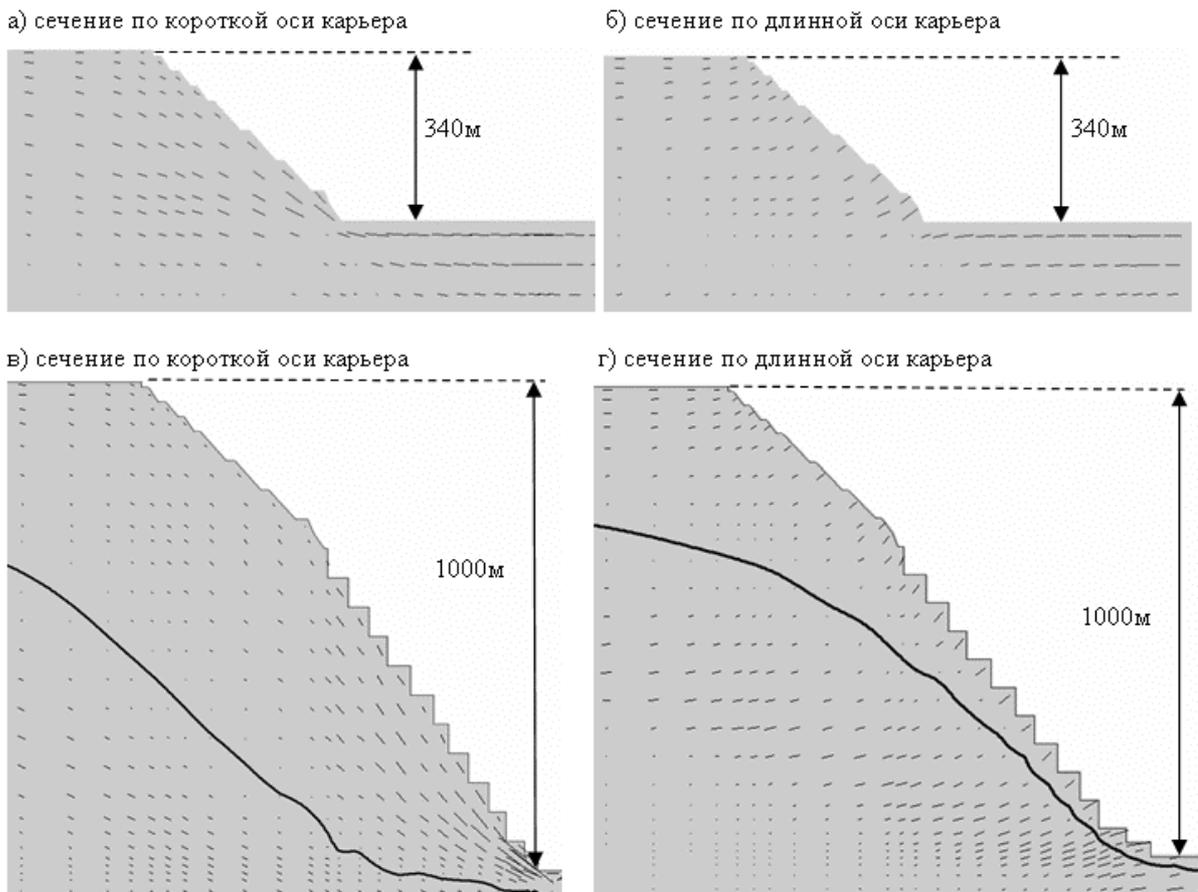


Рис. 8. Распределение проекций площадок ϵ_3 : а) и в) при действии максимальной тектонической нагрузки (F_T) по короткой оси карьера; б) и г) при действии F_T по длинной оси карьера (жирной линией отделена зона растяжений, прилегающая к борту карьера)

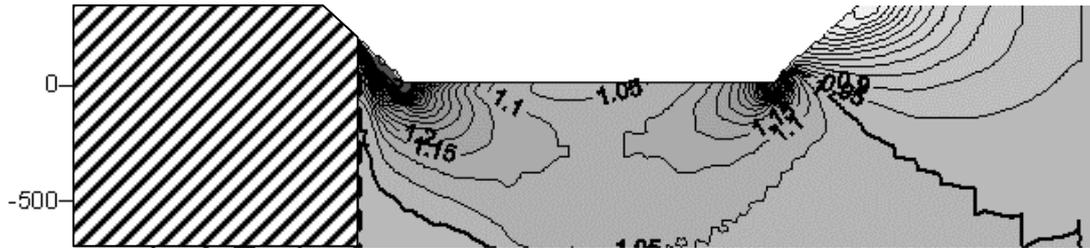


Рис. 9. Коэффициенты концентрации σ_{\max} в массиве пород, включающем ослабленную зону (ее граница показана пунктирной линией), в вертикальных сечениях при глубине карьера 340 м

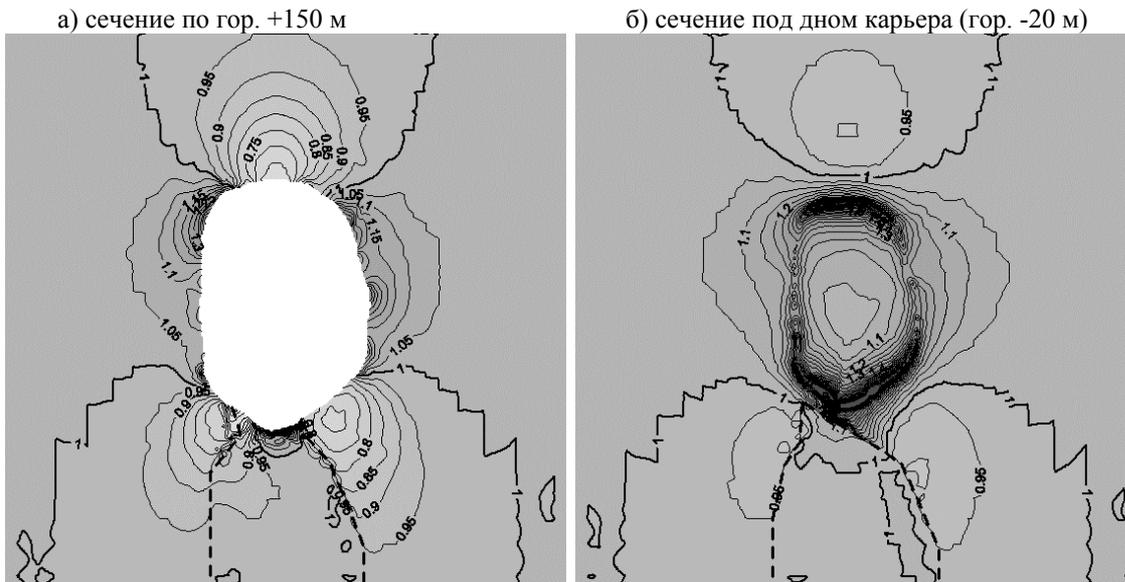
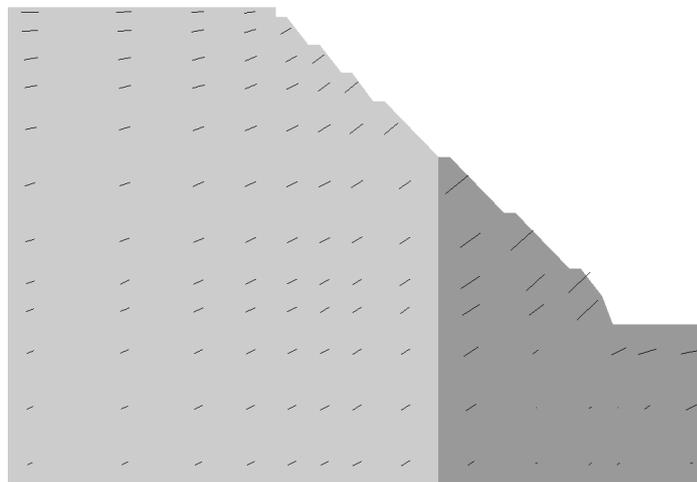


Рис. 10. Коэффициенты концентрации σ_{\max} в массиве пород, включающем ослабленную зону, в горизонтальных сечениях при глубине карьера 340 м

Рис. 11. Распределение проекций площадок ε_3 в массиве пород, включающем ослабленную зону (показана более светлым тоном) при глубине карьера 340 м



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 σ_{\max} на участке борта с промоделированной зоной (рис. 9, 10а), 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 (рис. 10б).

Наблюдается рост абсолютных значений деформаций растяжений приблизительно в 2 раза как в ослабленной зоне, так и во вмещающих породах борта, который сечет нарушенная зона. При этом ориентировка вероятных трещин отрыва практически не меняется и остается перпендикулярной борту карьерной выемки.

5. Выводы

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. Так, нижняя часть проектируемого карьерного пространства (-800 м ÷ -1000 м) находится в зоне, где гравитационная составляющая напряжений сопоставима с тектонической, а под дном проектной выемки расположена зона гидростатического действия сил.

2. Определено местоположение зон концентраций сжимающих напряжений в зависимости от направления F_T в массиве пород при наличии и при отсутствии ослабленной зоны, расположенной в пределах юго-восточного борта карьера. Выявленные области концентраций σ_{\max} позволяют сделать вывод о меньшем уровне действующих напряжений при направлении F_T по длинной оси и о большем уровне действующих напряжений при направлении F_T по короткой оси выемки. При наличии ослабленной зоны отмечено увеличение в 1,7 раза сжимающих напряжений и увеличение размеров области их концентрации.

3. Показано, что в прибортовой части карьерной выемки возможно формирование техногенных трещин отрыва, ориентировка которых зависит от направления F_T в массиве пород. При этом наличие ослабленной зоны сказывается в сторону увеличения растягивающих деформаций и соответственно большей вероятности образования техногенных трещин отрыва.

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 офиц, № 06-05-64681 и № 06-05-03006).

Литература

- Stacey T.R. Slope stability in high stress and hard rock conditions. *Slope Stability*, p.187-200, 2007.
- Stead D., Coggan J.S., Elmo D., Yan M. Modelling brittle fracture in rock slopes – experience gained and lessons learned. *Slope Stability*, p.239-252, 2007.
- Галустьян Э.Л. Управление геомеханическими процессами в карьерах. М., Недра, 237 с., 1980.
- Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург, изд. УрО РАН, 335 с., 2001.
- Козырев А.А., Павлов В.В., Мальцев В.А. К проблеме устойчивости бортов глубоких карьеров в высоконапряженных массивах. *Проблемы разработки глубоких карьеров. Мат. междунар. симпозиума по открытым горным работам "Мирный-91"*, Мирный, 25-27 июня 1991. Удачный, с.129-134, 1991.
- 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". *Сборник докладов международной конференции "Геодинамика и напряженное состояние недр земли"*, Новосибирск, 2007.
- Мельников Н.Н., Козырев А.А., Решетняк С.П., Каспарьян Э.В., Рыбин В.В., Мелик-Гайказов И.В., Свинин В.С., Рыжков А.Н. Концептуальные основы оптимизации конструкции бортов карьеров Кольского полуострова в конечном положении. *Труды 8-го междунар. симпозиума "Горное дело в Арктике". Апатиты, 20-23 июня 2005 г. СПб., "Типография Иван Федоров"*, с.2-14, 2005.
- 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*, № 9, с.45-50, 2004.
- Турчанинов И.А., Марков Г.А., Иванов В.И. Руководство по измерению напряжений в массиве скальных пород методом разгрузки (вариант торцевых измерений). *Апатиты, КФ АН СССР*, 48 с., 1970.