

УДК 622.271.3+622.833.5.004.942

**ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ГЛУБОКОГО КАРЬЕРА
РУДНИКА “ЖЕЛЕЗНЫЙ” КОВДОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

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

*Горный институт КНЦ РАН, E-mail: innas@goi.kolasc.net.ru
ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Анапиты, Россия*

Представлены данные натурных измерений исходных полей напряжений и результаты численного моделирования напряженного состояния массива пород в окрестности проектируемого глубокого карьера рудника “Железный” ОАО “Ковдорский ГОК”. Определены положения опасных зон в прибортовых массивах. Обоснованы условия сохранения устойчивости бортов карьера с вертикальными уступами.

Геомеханика, напряженное состояние, устойчивость бортов карьеров, математическое моделирование, разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом

В последние несколько десятилетий в мире наблюдается устойчивая тенденция к увеличению глубины отработки месторождений полезных ископаемых открытым способом. Проектная глубина наиболее крупных современных карьеров в скальных породах достигает 500–1200 м. Сроки существования углов бортов таких карьеров составят 50 лет и более.

Рентабельная открытая отработка запасов полезных ископаемых до таких глубин возможна только при увеличении углов бортов карьеров и снижении коэффициентов вскрыши. Подобные решения реализованы на многих отечественных и зарубежных карьерах в прочных скальных массивах: борт карьера Flintkote Mine (Канада) в гранитах под углом 70°, борт карьера Cleveland Cliffs (США) под углом 80° при высоте борта 120 м, борт карьера Westfrob Mine (Канада) глубиной 244 м с углом наклона 55° [1], карьер Palabora (ЮАР) с генеральными углами откосов бортов до 58° с использованием вертикальных уступов высотой 30 м [2], карьер Айхал (Якутия) с углами откосов бортов в глубокой части карьера 70–80° [3], карьер Целиноградского горно-химического комбината с участком борта карьера под углом 55° [4].

Подобное увеличение углов наклона борта требует соответствующего геомеханического обоснования. В настоящее время существующие теоретические подходы к обоснованию устойчивых углов бортов карьеров, как правило, не учитывают реального напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов скальных горных пород, полагая, что оно обусловлено

только собственным весом вышележащих пород. Не учитывается также иерархично-блочное строение массивов горных пород, а именно соотношение структурных нарушений различного ранга и размеров конструктивных элементов карьера (борта, уступы и т. д.).

Ряд исследований геомеханического состояния массива пород, устойчивости бортов карьеров и отдельных уступов выполнены в Горном институте КНЦ РАН и основываются на представлении массива как иерархически-блочной среды, в которой действует поле напряжений гравитационно-тектонической природы [5, 6]. Следует отметить, что в настоящее время важность учета НДС при оценке устойчивости бортов карьеров отмечается многими учеными [7–9].

Подобные исследования проведены для условий карьера рудника “Железный” ОАО “Ковдорский ГОК”. Одним из методов, позволяющих учесть совокупность геомеханических, геологических и горнотехнических факторов, является численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НДС МАССИВА ПОРОД

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

При проведении модельных расчетов применена методика последовательных приближений, предполагающая создание вложенных численных моделей различной детальности: от мелкомасштабных, позволяющих рассмотреть напряженно-деформированное состояние месторождения в целом, до крупномасштабных, рассматривающих НДС в окрестности отдельных элементов горной технологии [10].

Программный комплекс SigmaGT включает в себя три крупных блока: блок подготовки исходных данных, блок решения задачи МКЭ, блок дополнительной обработки и визуализации результатов расчета (рис. 1).

Приложение SigmaGT позволяет:

- создавать новые расчетные варианты: редактировать граничные условия, геометрию очистных пространств, уточнять положение контактов рудных тел, вводить элементы для моделирования неоднородностей второго и третьего порядка, нарушенных зон. Эти процедуры можно выполнить путем задания любому элементу в зависимости от типа породы определенного модуля упругости, коэффициента Пуассона и объемного веса; изменения местоположения отдельных узлов расчетной схемы;

- проводить пересчет напряженно-деформированного состояния;

- выполнять анализ результатов; в качестве выходной информации могут выдаваться главные компоненты напряжений и деформаций в виде карт изолиний или их векторного распределения, а также категории состояния выработок;

- автоматически формировать локальные модели с уплотненной сеткой конечных элементов и граничными условиями в виде интерполированных узловых перемещений для областей, являющихся подобластями исходной модели.

Для обоснования физической модели среды выполнен анализ имеющихся данных о прочностных и упругих характеристиках руд и пород, слагающих Ковдорское апатит-магнетит-бадделеитовое месторождение. На основании анализа как абсолютных значений показателей, так и их изменений при нагрузке для большинства пород можно сделать вывод об их упругом деформировании вплоть до разрушения. Это дало основание в качестве модели среды принять упругую модель.



Рис. 1. Блок-схема программного комплекса SigmaGT: E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; γ — объемный вес

ДААННЫЕ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НДС МАССИВА ПОРОД

Граничные условия задавались на основе данных натуральных измерений напряжений методом разгрузки [11, 12]. В таблице представлены данные измерений параметров напряженного состояния массива пород карьера рудника “Железный” методом разгрузки, а также расчетные параметры напряженного состояния массива пород с учетом собственного веса вышележащих пород, которые определялись исходя из известных зависимостей: $\sigma_{\text{верт}}^{\text{ср}} = \gamma H$ и $\sigma_{\text{гор}}^{\text{ср}} = \lambda \gamma H$, где $\lambda = \nu / (1 - \nu)$ — коэффициент бокового распора, H — расстояние до земной поверхности.

Сравнение расчетных и измеренных 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 $\sigma_{\text{max}} / \sigma_{\text{верт}}^{\text{ср}} > 2$. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о соответствии напряженного состояния массива пород месторождений гравитационно-тектоническому типу. Приведенные данные стали основой при задании граничных условий для модели карьера рудника “Железный”.

Параметры напряженного состояния массива пород карьера рудника “Железный”

Абсолютная отметка измерительной станции, время и место проведения измерений	$H_{\text{ср}}$, м	Параметры напряженного состояния массива пород по результатам измерений методом разгрузки			Расчетные напряжения с учетом собственного веса вышележащих пород	
		σ_{max}	σ_{min}	$B_{\sigma_{\text{max}}}$, град	$\sigma_{\text{верт}}^{\text{ср}}$	$\sigma_{\text{гор}}^{\text{ср}}$
		МПа			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
+ 15 м, 2009, восточный борт	191	16	12	32	6	2
+ 15 м, 2009, восточный борт	191	22	12	15	6	2
+ 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
+ 99 м, 2009, западный борт	157	23	13	-80	5	1.7
+ 109 м, 2009, западный борт	147	31	25	-89	4	1.5
+ 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

Примечание. $H_{\text{ср}}$ — средняя глубина положения измерительной станции от первоначального рельефа; σ_{max} , σ_{min} — максимальная и минимальная компоненты напряжений; $B_{\sigma_{\text{max}}}$ — угол наклона σ_{max} к горизонту; $\sigma_{\text{верт}}^{\text{ср}}$, $\sigma_{\text{гор}}^{\text{ср}}$ — вертикальная и горизонтальная компоненты напряжений.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ НДС МАССИВА ПОРОД КАРЬЕРА РУДНИКА “ЖЕЛЕЗНЫЙ” ОАО “КОВДОРСКИЙ ГОК”

Рассмотрим конечно-элементную модель и результаты расчетов НДС массива в окрестности карьера рудника “Железный”. Особенности данного объекта являются значительная проектная глубина карьерной выемки (около 1000 м), вытянутая форма карьера в плане по одной из его осей, действие в массиве пород тектонических напряжений, наличие ослабленных зон и разломных структур разных порядков, субвертикальное падение рудного тела, практически плоский рельеф дневной поверхности с перепадами высот не более 100 м. Схема разбиения модели на конечные элементы и задаваемые граничные условия приведены на рис. 2.

С помощью разработанной модели рассчитывались 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 — объемный вес, глубина и коэффициент бокового распора соответственно) и гравитационно-тектоническое напряженное состояние. Причем варианты с учетом тектонических сил рассчитаны как при условии действия максимальной составляющей F_T по короткой оси карьерной выемки, так и по ее длинной оси [13].

На основе численного моделирования распределения напряжений и деформаций в массиве пород в окрестности глубокой карьерной выемки установлено, что процессы техногенного трещинообразования и динамических проявлений горного давления в бортах карьера опреде-

ляются его положением относительно направления максимального сжатия. Большая устойчивость прибортового массива обеспечивается в случае расположения вытянутого в плане карьера ($D/d > 1$, где D и d — больший и меньший линейный размер карьера в плане) в направлении максимального сжатия.

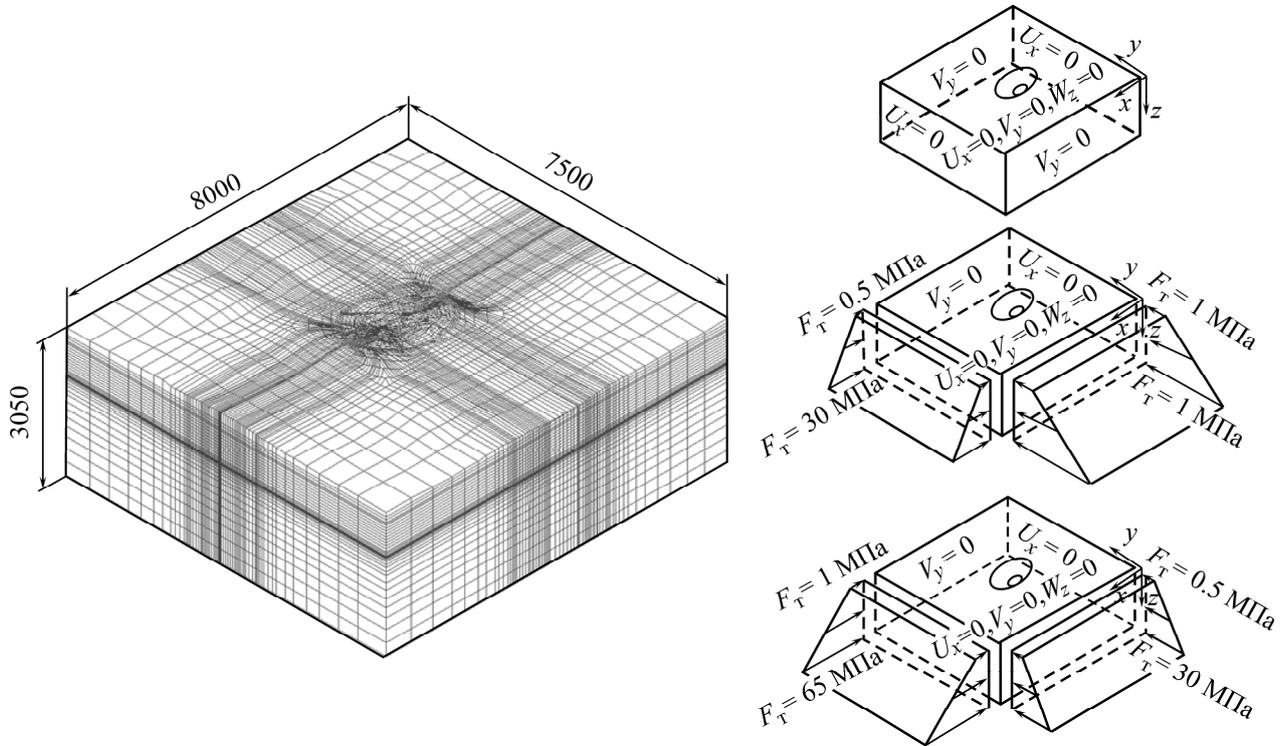


Рис. 2. Конечно-элементная модель карьера рудника “Железный” с вариантами граничных условий

Следует отметить, что по данным исследований искривления стволов и разрушения поперечного сечения геологоразведочных скважин на Ковдорском месторождении направление действия тектонических сил ориентировано по длинной оси карьера, что является благоприятным фактором с позиций обеспечения устойчивости его бортов. Дальнейшие расчеты НДС проводились с учетом данного фактора.

Было проведено сравнение распределения напряжений при фактической конфигурации карьерной выемки (глубина карьера от 300 до 400 м) и при проектной геометрии карьера (глубина от 850 до 950 м). При анализе результатов расчетов оценены величины и направления векторов максимальной компоненты главных напряжений σ_{\max} и минимальной компоненты главных напряжений σ_{\min} . Результаты представлены по двум перпендикулярным сечениям: сечению по магистрали М-2100 (длинная ось карьера) и по разрезу Р-500 (короткая ось карьера).

При фактическом положении карьерной выемки в верхней части северного и южного бортов карьера $\sigma_{\max} = 10 - 30$ МПа (рис. 3а). В нижней части этих бортов $\sigma_{\max} = 30 - 40$ МПа, достигая 50 МПа на сопряжениях бортов и дна карьерной выемки. Направления векторов σ_{\max} в районе карьерной выемки ориентированы вдоль откосов бортов.

В верхней части западного борта $\sigma_{\max} = 25 - 30$ МПа, в нижней его части 40–45 МПа (рис. 3б). Значения σ_{\max} в восточном борту карьера практически по всей высоте борта составляют 35–45 МПа. Большой градиент напряжений в массиве западного борта обусловлен выра-

женным рельефом дневной поверхности с этой стороны карьерной выемки. На сопряжении дна и длинных бортов карьера (западного и восточного) не наблюдается такой ярко выраженной концентрации напряжений, как в сопряжении дна и коротких бортов (северного и южного). Разница в расположении зон концентрации и разгрузки напряжений в бортах карьера связана с вытянутой формой карьера по одной из его осей, а также с направлением действия в массиве тектонических сил.

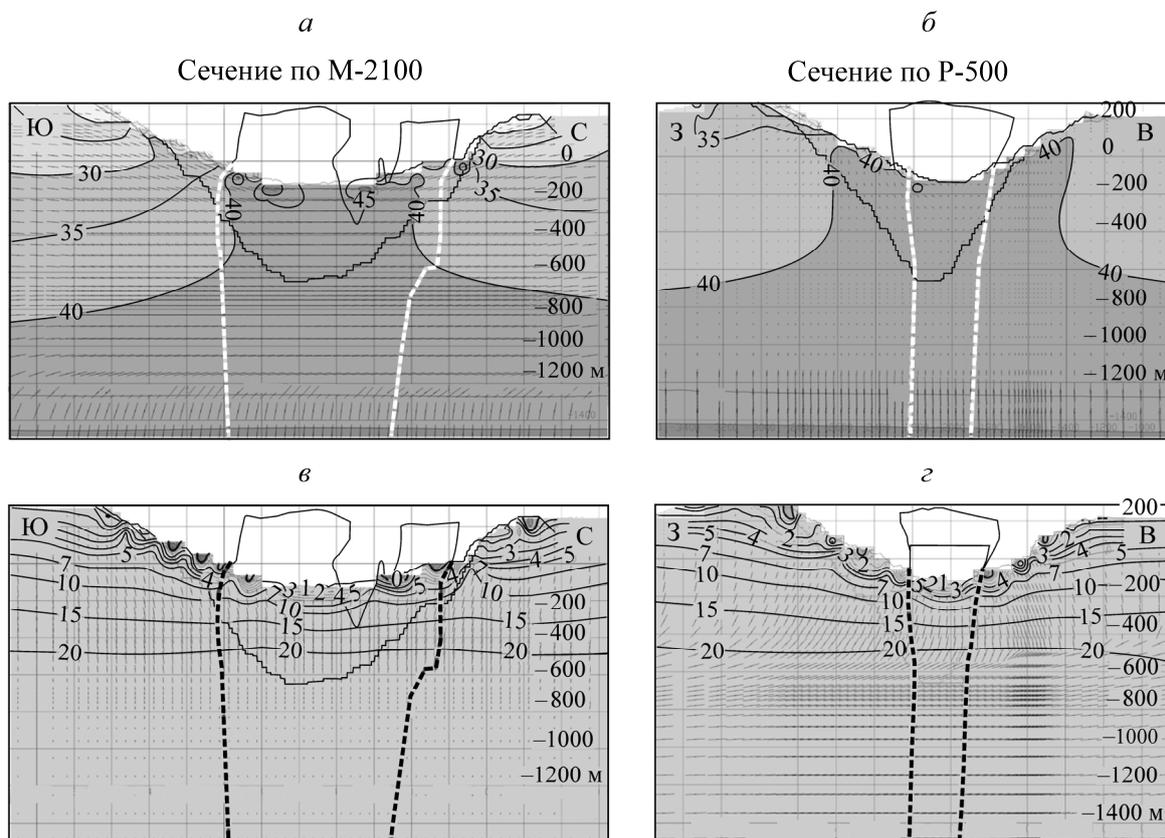


Рис. 3. Распределение напряжений (МПа) в окрестности фактической карьерной выемки в вертикальных сечениях: *а, б* — σ_{\max} ; *в, г* — σ_{\min}

Распределение минимальной компоненты напряжений σ_{\min} в бортах карьера характеризуется в основном сжимающими напряжениями со значениями 1–5 МПа. Зоны растяжений возникают лишь в локальных областях борта, причем абсолютные значения растягивающих напряжений не превышают 1 МПа (рис. 3в, г).

Анализ распределения напряжений для варианта с проектной карьерной выемкой показал, что в верхней части коротких бортов (северного и южного) возникает зона разгрузки, в которой значения σ_{\max} уменьшаются на 5–10 МПа по сравнению с исходным состоянием. С увеличением глубины напряжения растут и достигают 60 МПа на сопряжении коротких бортов и дна карьера (рис. 4а). В длинных бортах карьера напряжения σ_{\max} остаются практически постоянными по всей высоте борта и составляют 30–35 МПа в западном борту и 40–45 МПа — в восточном. На сопряжении длинных бортов и дна карьера значения σ_{\max} достигают 55 МПа (рис. 4б). Столь высокий уровень сжимающих напряжений может привести к динамическому разрушению массива пород в призабойной зоне и повышенной удароопасности пород.

Для минимальной компоненты в коротких бортах карьера растягивающие напряжения практически отсутствуют. Напряжения σ_{\min} являются сжимающими и принимают значения от 1 МПа вблизи поверхности до 20 МПа на сопряжении короткого борта и дна карьера. Растягивающие напряжения σ_{\min} возникают лишь в локальных областях коротких бортов с абсолютными значениями, не превышающими 1 МПа (рис. 4в).

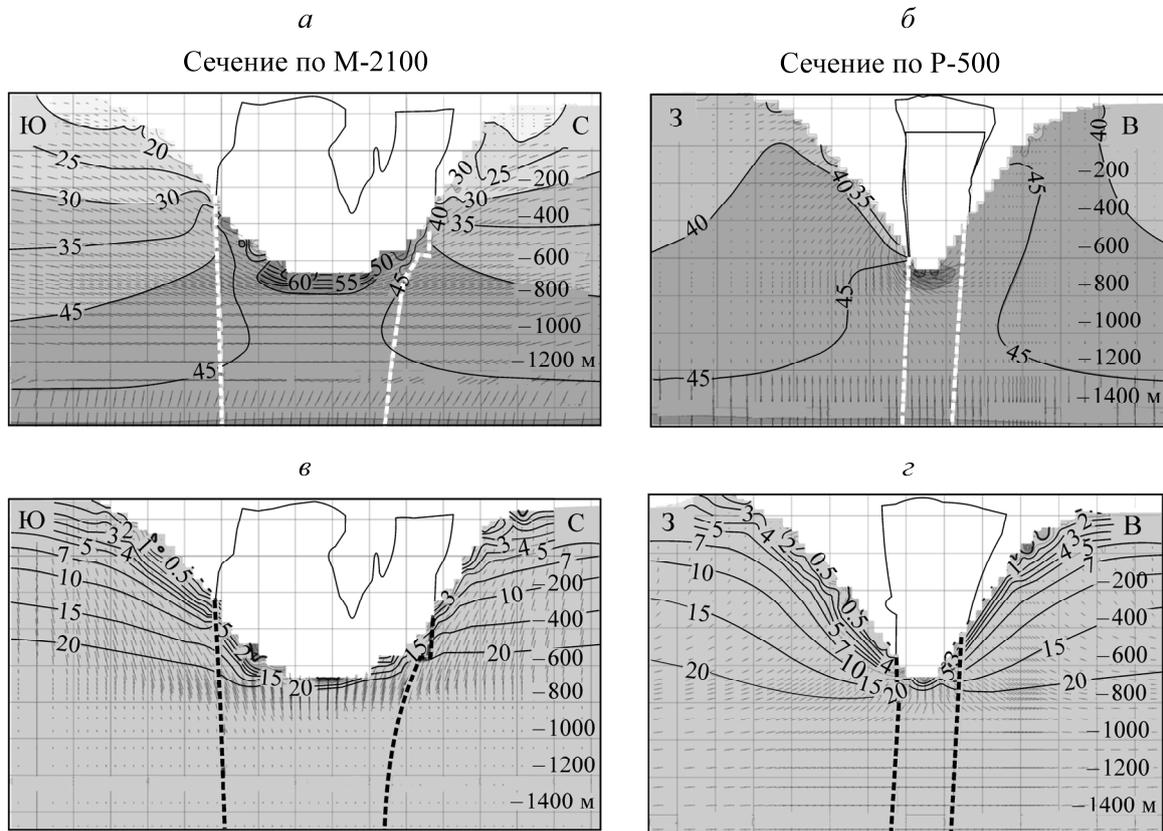


Рис. 4. Распределение напряжений (МПа) в окрестности проектной карьерной выемки до отметки –660 м в вертикальных сечениях: а, б — σ_{\max} ; в, з — σ_{\min}

В длинных бортах карьера растягивающие напряжения возникают также в локальных областях борта, их значения не превышают 1 МПа (рис. 4з). При этом следует заметить, что векторы напряжений σ_{\min} направлены перпендикулярно длинным бортам, а значит, трещины отрыва в данном случае будут формироваться субпараллельно длинному борту карьера. Такое направление возможных трещин отрыва является неблагоприятным с точки зрения обеспечения устойчивости борта карьера, так как при их раскрытии существует опасность обрушения участков борта. Однако следует учесть, что значения растягивающих напряжений малы и на порядок меньше предела прочности на растяжение в образце, также на данном участке борта действуют умеренные сжимающие напряжения 35–45 МПа, которые будут препятствовать раскрытию трещин.

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

Цель следующего этапа исследований — определение особенностей НДС в массиве отдельных уступов борта. На основе мелкомасштабной модели созданы две крупномасштабные локальные модели, представляющие собой участок борта проектного карьера с вертикальными уступами. Первая модель располагается в коротком борту карьера, вторая — в длинном. Граничные условия задавались в виде перемещений из мелкомасштабной модели.

Установлено, что растягивающие напряжения в уступах бортов не превышают 1.5 МПа, что в несколько раз ниже предела прочности пород на растяжение. Уступы находятся под действием умеренных сжимающих напряжений σ_{\max} (35–50 МПа), поэтому формирование трещин отрыва и их раскрытие маловероятно.

Анализ результатов расчетов НДС участков борта карьера позволил сделать вывод о том, что в карьере рудника “Железный” вертикальные уступы в целом будут устойчивы. Формирование трещин скола возможно в краевой части уступа на коротком борту карьера при многократном снижении прочностных характеристик массива вследствие воздействия взрывов и процессов выветривания. В уступах длинного борта могут образовываться техногенные трещины отрыва в центральной их части, однако раскрытие трещин маловероятно, поскольку вторая максимальная компонента сжимающая (рис. 5).

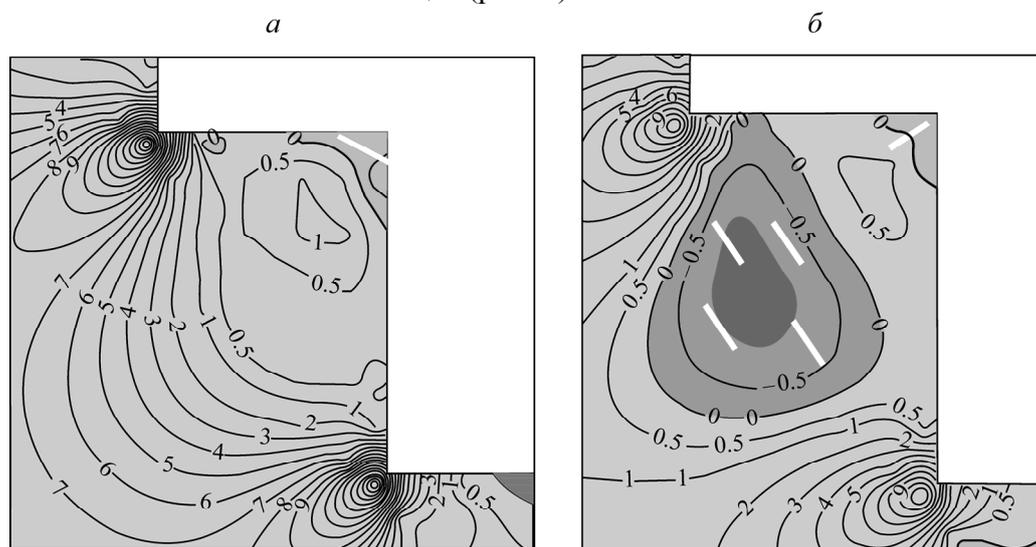


Рис. 5. Распределение минимальной компоненты главных напряжений (МПа) в вертикальном уступе: *a* — по короткому борту; *б* — по длинному борту карьера (белым цветом показано направление потенциальных трещин отрыва)

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали целесообразность геомеханического обоснования параметров глубоких карьерных выемок с использованием численных методов. Подобный подход позволяет определять особенности напряженно-деформированного состояния в окрестности проектируемых карьеров с учетом основных геологических и горнотехнических факторов, выявлять потенциально опасные участки бортов как по уровню сжимающих напряжений и проявлениям удароопасности в динамической форме, так и по вероятному разрушению уступов и участков борта вследствие действия растягивающих напряжений. Подтверждена возможность увеличения углов наклона бортов карьеров в скальных тектонически напряженных массивах.

Результаты исследований нашли применение при геомеханическом обосновании отработки Ковдорского апатит-магнетит-бадделейтового месторождения рудником “Железный”. Предложенная концепция применима и на других крупных рудных месторождениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Brawner C. O.** Recent lessons that have been learned in open-pit mine stability, *Mining Engineering*, 1986, Vol. 38, No. 8.
2. **Stewart A., Wessels F., and 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.
3. **Дюкарев В. П., Лазутин Э. С., Юрин Н. Н., Ильбульдин Д. Х.** Опыт открытой разработки кимберлитовых месторождений трубок “Айхал” и “Юбилейная” // Проблемы открытой разработки глубоких карьеров “Мирный-91”. — Удачный, 1991. — Т. 1.
4. **Галустьян Э. Л.** Совершенствование конструкции нерабочих бортов карьеров // *Горн. журн.* — 1996. — № 1–2.
5. **Козырев А. А., Рыбин В. В., Билин А. Л., Фокин В. А., Мелик-Гайказов И. В.** Обоснование конструкций устойчивых бортов карьеров в массивах скальных тектонически-напряженных пород // *Горн. журн.* — 2010. — № 9.
6. **Козырев А. А., Каспарьян Э. В., Рыбин В. В.** Основные методические положения применения бортов карьеров новой конструкции // Проблемы и тенденции рационального и безопасного освоения георесурсов: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, посвященной 50-летию Горного института КНЦ РАН. — Апатиты; СПб., 2011.
7. **Зотеев В. Г., Зотеев О. В.** О необходимости совершенствования нормативно-методической базы по геомеханическому обеспечению горных работ // *Горн. журн.* — 2010. — № 1.
8. **Яковлев А. В., Ермаков Н. И.** Устойчивость бортов рудных карьеров при действии тектонических напряжений в массиве. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2006.
9. **Еременко А. А., Серяков В. М., Филатов А. П.** Оценка напряженного состояния массива горных пород при отработке подкарьерных запасов трубки “Удачная” // *ФТПРПИ.* — 2007. — № 4.
10. **Козырев А. А., Панин В. И., Семенова И. Э.** Управление геодинамическими рисками на Хибинских апатитовых рудниках // *ГИАБ.* — 2010. — № 12.
11. **Турчанинов И. А., Марков Г. А., Иванов В. И., Козырев А. А.** Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. — Л.: Наука, 1978.
12. **Турчанинов И. А., Марков Г. А.** Аномально высокое напряженное состояние массивов горных пород и его учет при подземной разработке // *Физические условия и развитие технологии горного производства.* — Л.: Наука, 1973.
13. **Козырев А. А., Семенова И. Э., Рыбин В. В., Аветисян И. М.** Исследование напряженно-деформированного состояния массива пород численными методами на основе данных натурных измерений в окрестности крупной карьерной выемки // *ГИАБ.* — 2011. — № 11.

Поступила в редакцию 11/III 2015