

УДК 622.271.326 + 622.833.5.004.942

Геомеханическое обоснование параметров карьерной выемки перспективного месторождения им. В. Гриба

И.Э. Семенова, А.В. Земцовский

Горный институт КНЦ РАН

Аннотация. В работе представлены результаты объёмного численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород в окрестности перспективного месторождения алмазов им. В.П. Гриба при различной глубине карьерной выемки с учётом основных горно-геологических факторов. Проведена оценка НДС барьерного целика между открытыми и подземными горными работами. В результате проведенных исследований предложены оптимальные с точки зрения геомеханического состояния массива горных пород параметры проектной карьерной выемки.

Abstract. In this paper the results of numerical 3D simulation of rock mass stress-strain state in vicinity of the perspective diamond deposit have been presented. Numerical simulation has been carried out for different depths of open pit taking into account basic mining and geological factors. The stress-strain state estimation of barrier pillar between open-pit and underground mine was performed. As a result of the investigations the optimal parameters of the open-pit have been proposed.

Ключевые слова: геомеханика, напряженно-деформированное состояние, устойчивость бортов карьеров, математическое моделирование, упругая модель, разработка месторождений полезных ископаемых комбинированным способом, барьерный целик, предел прочности пород на сжатие и растяжение

Key words: geomechanics, stress-strain state, slope stability, mathematical simulation, elastic model, minerals mining by combine system, barrier pillar, compression and tension strengths of rocks

1. Введение

Сложные условия отработки запасов месторождения алмазов им. В. Гриба определяют при выборе технологических систем разработки задачу правильной и адекватной оценки напряженно-деформированного состояния рудного и вмещающего массива горных пород. Одним из эффективных методов такой оценки является математическое моделирование (Зубков и др., 2008; Козырев и др., 2005а). После создания математической модели месторождения с её помощью можно имитировать различные схемы отработки запасов полезных ископаемых, изменять параметры элементов систем разработки и выбрать из них оптимальные с точки зрения геомеханического состояния породного массива.

На основе анализа горно-геологической и геомеханической информации разработаны численные модели для расчёта НДС массива одного из перспективных месторождений на двух масштабных уровнях. Расчёты выполнялись методом конечных элементов в объёмной постановке с использованием программного комплекса *Sigma3D*, разработанного в Горном институте КНЦ РАН (Козырев и др., 2005б).

Отработка запасов месторождения будет производиться комбинированным или подземным способом. При этом комбинированный способ предполагал образование карьерной выемки до отметки –350 м или до отметки –150 м.

Прогноз напряженно-деформированного состояния производился в окрестности карьерных выемок с соответствующими параметрами.

2. Формирование конечно-элементной модели

Для проведения расчётов была выбрана упругая модель, где в отдельные слои с усреднёнными упругими и плотностными характеристиками выделены вмещающие породы, породы рудного тела, породы кратерной фракции и приповерхностный слой осадочных пород (см. табл.). При моделировании НДС массива ГП указанные слои рассмотрены как сплошная среда с заданными физико-механическими свойствами, что позволяет при определении НДС применять все методы механики сплошной среды. Безусловно, такой подход является приближением реальной ситуации: ГП являются неоднородными средами, состоящими из минералов с различными механическими свойствами, имеющими различные геометрические размеры и разнообразные условия на границах их контактов. Однако для задач горного дела, связанных с определением НДС массива и его изменением в результате выемки запасов полезных ископаемых, предположение о сплошности является вполне обоснованным и позволяет получить хорошо согласующиеся с практикой результаты.

Горизонтальное залегание вмещающих пород и отсутствие крупных тектонических нарушений позволяет отнести геомеханические условия расположения месторождения к условиям, характерным для

регионов с преобладающими исходными вертикальными напряжениями. Исходное напряженное состояние в таких регионах определяется весом пород и хорошо описывается "гипотезой Динника". Вертикальные напряжения в нетронутом горными работами массиве $\sigma_z = \gamma H$, горизонтальные σ_x и σ_y равны $H\gamma\nu/(\nu-1)$. Здесь H – расстояние от элементарного рассматриваемого объема до земной поверхности, γ – вес налегающей толщи пород, ν – коэффициент Пуассона породного массива.

При разработке математической модели оценки НДС массива величины исходных напряжений заданы в качестве краевых условий задачи.

Значения горизонтальных напряжений $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z\nu/(\nu-1)$ в механическом смысле эквивалентны условию равенства нулю горизонтальных смещений на вертикальных границах расчетной области.

Была разработана модель, учитывающая проектную геометрию бортов и уступов карьера. Размеры модели в плане составили 3500 м × 3500 м, высота – 1300 м. Объемная модель разбита на 56 826 элемента с 61 404 узлами.

Таблица. Усреднённые характеристики учтённых типов пород

Типы пород	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, г/см ³
Осадочные породы	0,01	0,40	2,00
Вмещающие породы	0,30	0,20	2,25
Породы кратерной фракции	6,73	0,19	2,16
Породы рудного тела	1,62	0,23	2,40

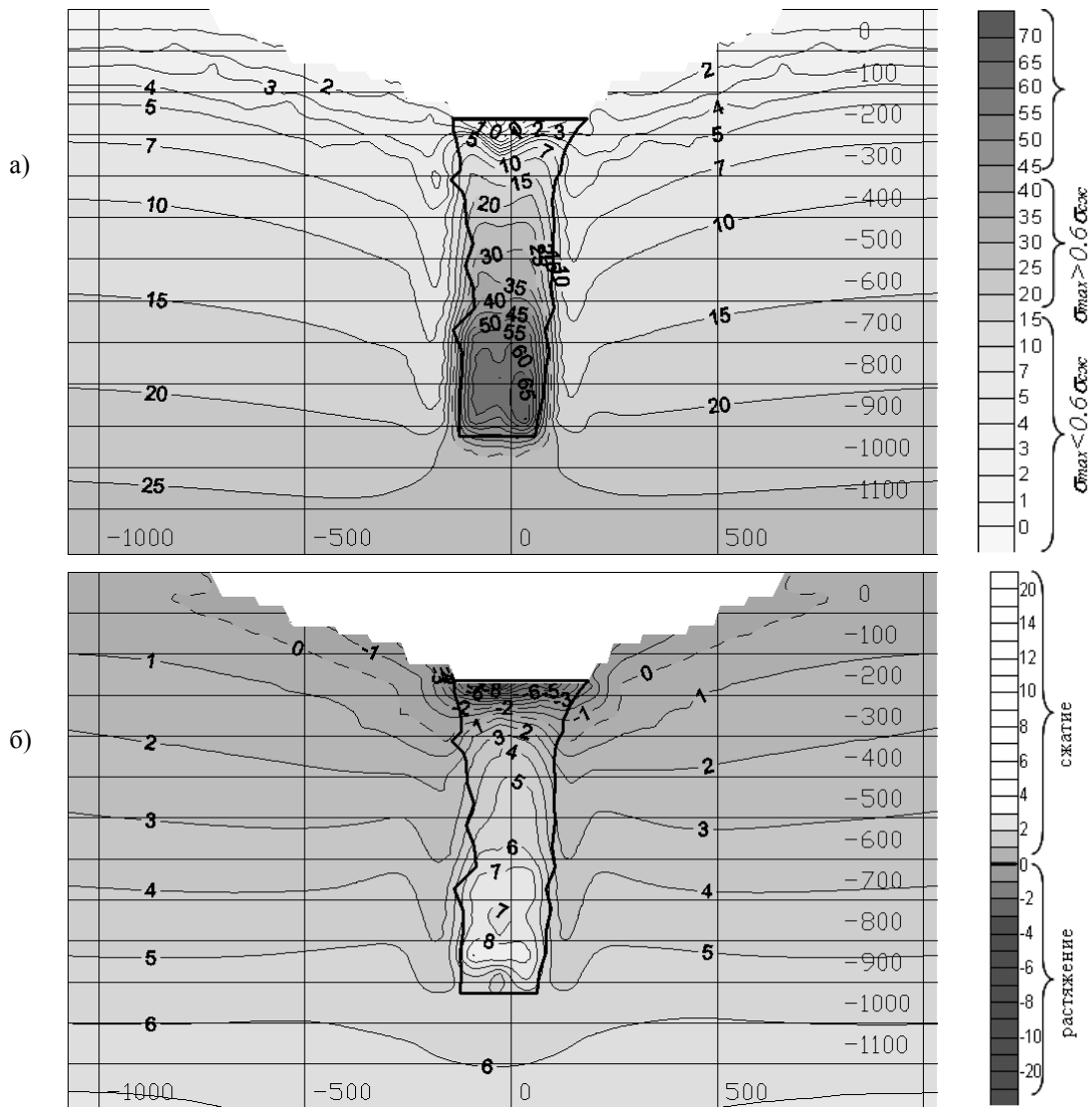


Рис. 1. Расчётное поле напряжений при моделировании карьерной выемки до отм. -150 м в вертикальном сечении по центру карьера а) σ_{max} б) σ_{min}

3. Результаты моделирования НДС в окрестности карьерной выемки

Анализировали распределение максимальной и минимальной компоненты главных напряжений (σ_{max} и σ_{min}). Для варианта с промоделированной карьерной выемкой до отметки -150 м следует отметить, что отработка подземных запасов ниже горизонта -480 м будет проходить в удароопасных условиях, так как $\sigma_{max} > 0.6\sigma_{сж}$, где $\sigma_{сж}$ – предел прочности пород на сжатие (рис. 1а). Кроме этого, негативным фактором является формирование зоны растягивающих напряжений под дном карьера (рис. 1б), уровень абсолютных значений σ_{min} достигает 10 МПа, то есть превышен максимальный предел прочности пород на разрыв (5 МПа). Это может привести к значительной нарушенности пород будущего барьерного целика между открытыми и подземными горными работами.

В горизонтальном сечении под дном карьера (гор. -175 м, рис. 2а) видно, что область растяжений охватывает все рудное тело, а максимальная концентрация растягивающих напряжений приурочена к центру кимберлитовой трубки. На удалении 225 м от дна карьера (гор. -375 м, рис. 2б) уровень напряжений σ_{max} около 20 МПа, σ_{min} также сжимающая с величинами $3-4$ МПа.

При анализе результатов моделирования карьерной выемки до отметки -350 м видно, что уровень σ_{max} снижается как в кимберлитовой трубке, так и во вмещающих породах. Зона с величинами $\sigma_{max} > 0.6\sigma_{сж}$ расположена теперь на 150 м глубже, а область со значениями $\sigma_{max} > \sigma_{сж}$ имеет локальный характер и находится ниже отметки -800 м (рис. 3а). То есть уменьшается удароопасность при отработке

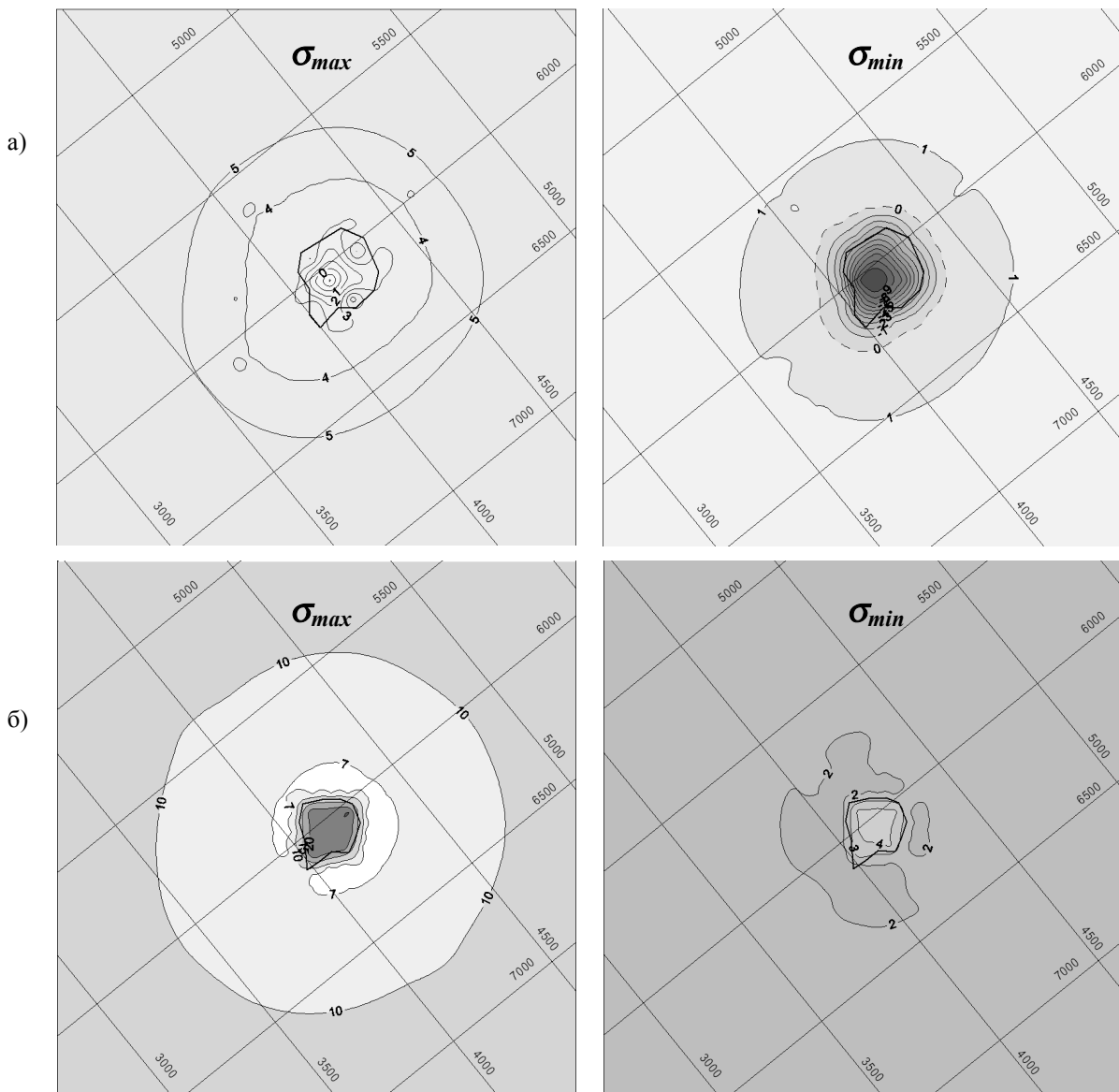


Рис. 2. Распределение напряжений при моделировании карьерной выемки до отм. -150 м в горизонтальных сечениях: а) под дном карьера (отм. -175 м); б) на уровне отм. -375 м

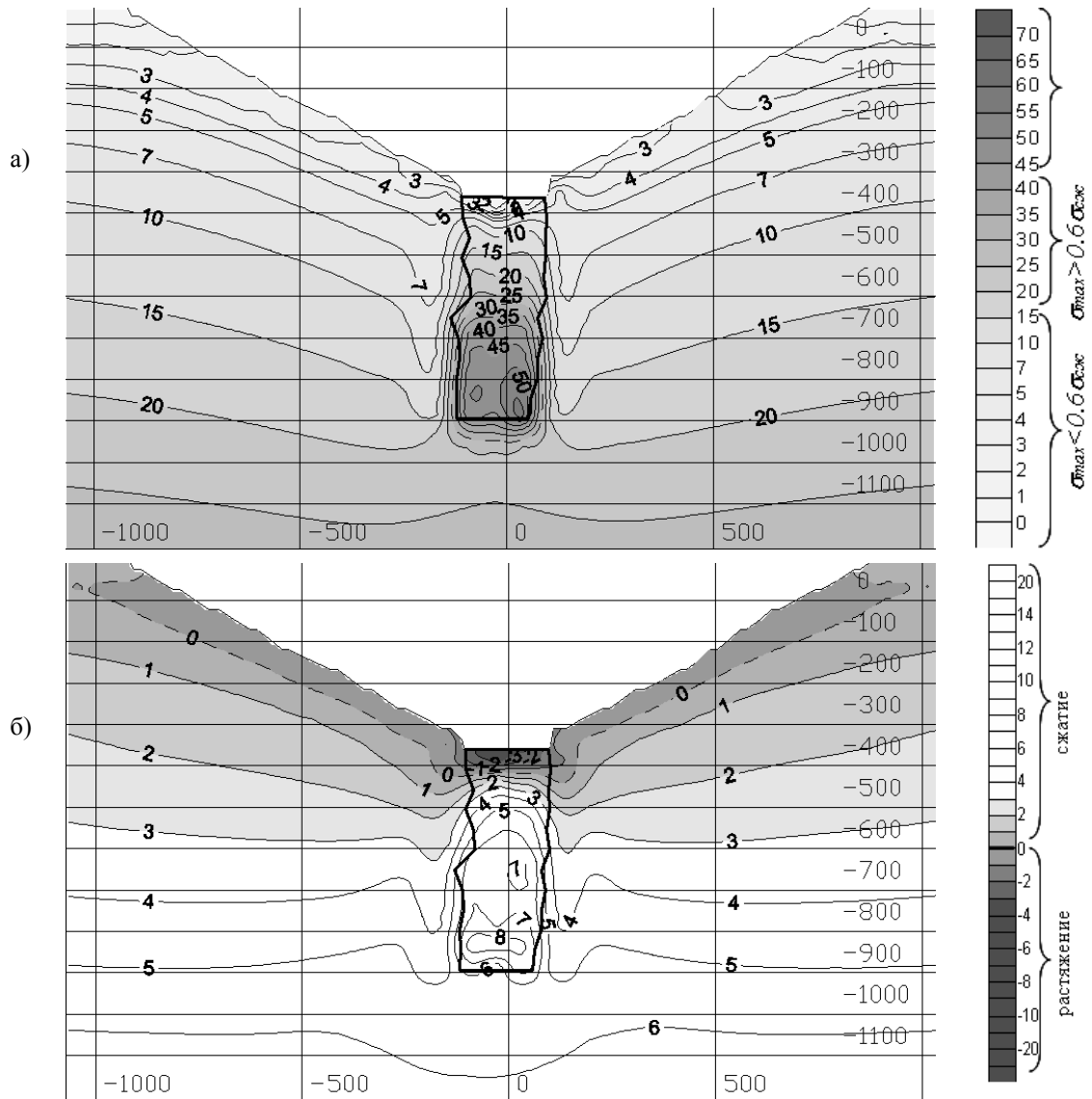


Рис. 3. Расчётное поле напряжений при моделировании карьерной выемки до отм. -350 м в вертикальном сечении по центру карьера: а) σ_{max} ; б) σ_{min}

подкарьерных запасов. В бортах карьера образуется зона растягивающих напряжений, однако по модулю они стремятся к нулю (не более 0.25 МПа). И только у сопряжений бортов и дна карьера наблюдается более высокий уровень растяжений ≈ 1.5 МПа. Абсолютные значения растягивающих напряжений под дном карьера также снижаются и не превышают предела прочности пород на разрыв (рис. 4б), что обеспечит лучшую сохранность барьерного целика между открытыми и подземными горными работами. Свойства пород рудного тела задавались усреднёнными и если анализировать вариацию прочности пород на растяжение с глубиной, то следует отметить, что эта величина для кимберлитов на уровне абсолютных отметок $-150 \div -200$ м в два раза ниже (≈ 1.5 МПа), чем на уровне $-350 \div -400$ м (≈ 3 МПа).

Таким образом, в случае образования карьерной выемки до отметки -350 м, устойчивость бортов карьера будет несколько выше, отработка подземных запасов будет проходить в более спокойных геомеханических условиях и породы барьерного целика будут в лучшей сохранности, чем при глубине карьера до отметки -150 м.

4. Исследование напряжённо-деформированного состояния барьерного целика между открытыми и подземными горными работами

Запасы трубки им. В. Гриба предполагается обрабатывать открытым способом до гор. -350 м или до гор. -150 м. Ранее было показано, что более предпочтительным по геомеханическим условиям является выемка запасов карьером до отметки -350 м.

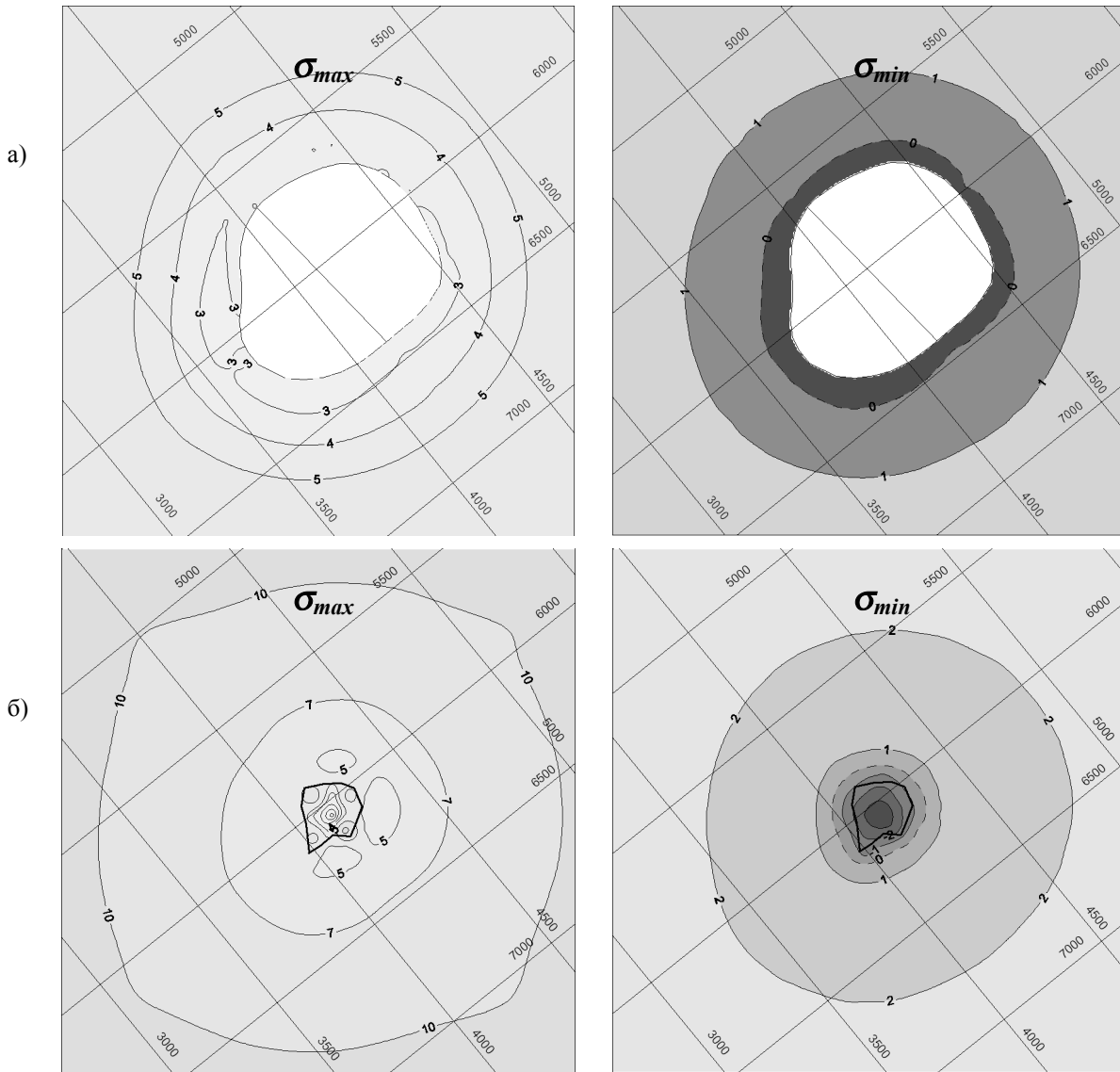


Рис. 4. Распределение напряжений при моделировании карьерной выемки до отм. –350 м в горизонтальных сечениях: а) отм. –175 м; б) под дном карьера на уровне отм. –375 м

При одновременной отработке трубки открытым и подземным способами между дном карьера и подземными горными работами необходимо оставить разделительный массив (целик). Разделительный массив должен обеспечить безопасное одновременное ведение подземных и открытых работ и может быть отработан после завершения работ в карьере.

НДС массива барьерного целика было промоделировано на более детальной сетке конечных элементов до и после отработки подкарьерных запасов. Как видно, зона растягивающих напряжений, превышающих предел прочности пород на разрыв (σ_p), до начала ведения подземных работ составляет около 20 м (рис. 5б), максимальные значения растяжений наблюдаются по центру карьерной выемки и составляют 5 МПа. В заштрихованной области возможно раскрытие естественных трещин.

Причём вероятнее всего раскрытие вертикальных трещин, так как ориентация площадок, на которые действуют растягивающие деформации в указанной зоне, – субвертикальная (рис. 5в).

После отработки большей части подкарьерных запасов (моделировали закладку в отметках –400 м ÷ –800 м) ситуация меняется. Теперь зоны, в которых $\sigma_{min} > \sigma_p$ расположены у сопряжений дна и бортов карьерной выемки, а площадки их действия подсекают нижний уступ карьера. При наличии естественных трещин данного направления можно предположить нарушение нижнего уступа карьера, а значит, потребуется проведение дополнительных мероприятий по сохранению его устойчивости. Над закладочным массивом формируется зона значений σ_{min} , близких к пределу прочности на разрыв и с вертикальной ориентировкой площадок (рис. 6).

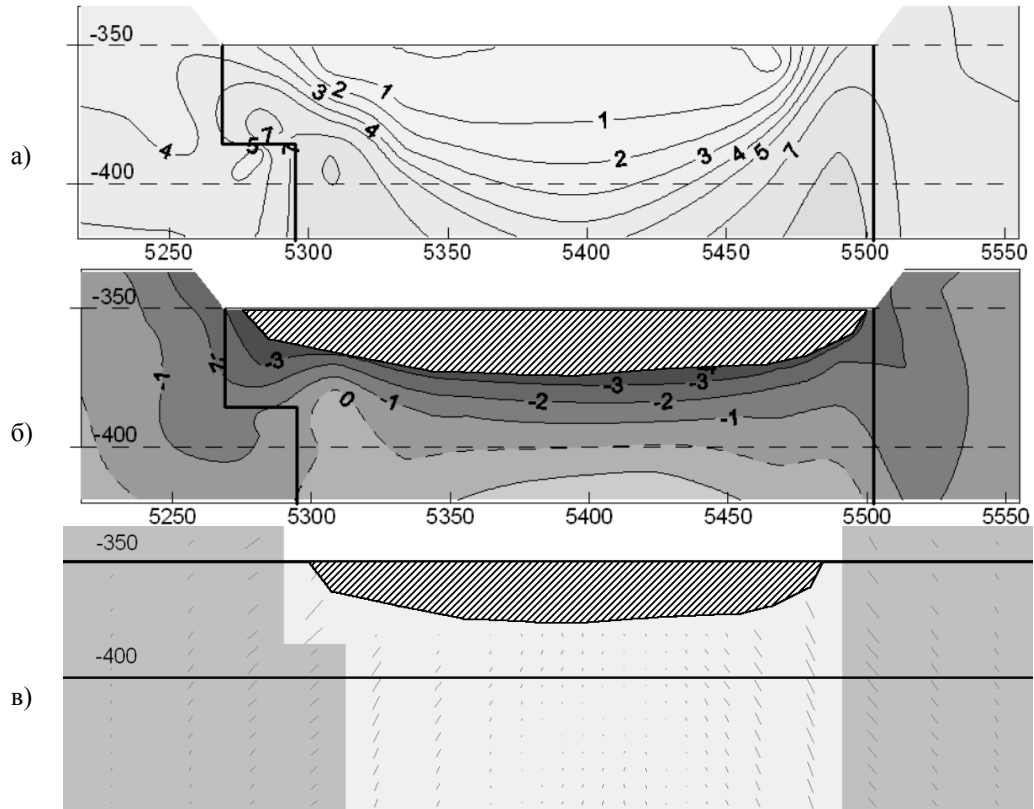


Рис. 5. Напряжённое состояние подкарьерного массива до начала подземных работ: а) σ_{max} б) σ_{min} в) ориентировка площадок действия растягивающих деформаций

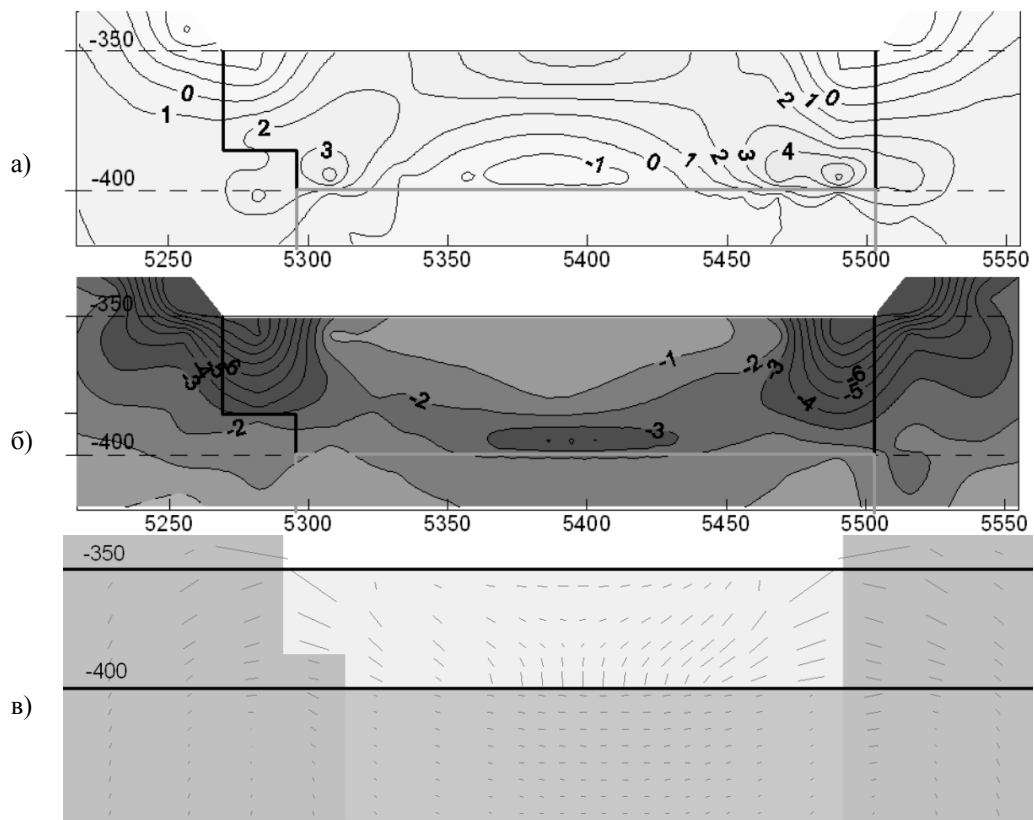


Рис. 6. Напряжённое состояние подкарьерного массива после отработки подкарьерных запасов в отметках -400 м ÷ -800 м: а) σ_{max} б) σ_{min} в) ориентировка площадок действия растягивающих деформаций

Проведение расчётов с 60-метровым целиком не показало существенных изменений в значениях и ориентировке НДС. В целом, можно считать, что создание барьерного целика высотой в 50 м является достаточным при условии выполнения мероприятий по повышению качества кровли закладочного массива и контроля за устойчивостью нижних уступов карьера.

5. Выводы

В результате проведенных исследований получено распределение напряжений и деформаций в массиве пород перспективного месторождения с учетом основных геологических факторов и его изменение при образовании карьерной выемки. На основании полученных данных сделан вывод о предпочтительной по геомеханическим условиям глубине карьера – до отметки –350 м. В этом случае:

- выше устойчивость бортов проектируемого карьера;
- формируются более спокойные геомеханические условия для отработки подкарьерных запасов;
- породы барьерного целика будут в лучшей сохранности;
- рекомендуемая мощность барьерного целика между подземными и открытыми горными работами составляет 50 м.

Литература

Зубков А.В., Смирнов О.Ю., Бирючев И.В., Лаптев М.В. Исследование закономерностей формирования напряжений в элементах этажно-камерной системы. *Известия ВУЗов. Горный журнал*, № 3, с.52-58, 2008.

Козырев А.А., Енютин А.Н., Мальцев В.А., Семенова И.Э. Методика регионального прогноза удароопасности и состояния массива пород и выбора технических решений по обеспечению безопасности и эффективности горных работ. *В сб. "Наука – производству" к 75-летию КНЦ РАН*, с.52-56, 2005а.

Козырев А.А., Мальцев В.А., Енютин А.Н., Рыбин В.В., Семенова И.Э. Геомеханическое обеспечение безопасности отработки переходных зон между подземными и открытыми горными работами. *Тр. 8-го междунар. симпозиума "Горное дело в Арктике". Санкт-Петербург*, с.35-40, 2005b.