

УДК 622.831.1

А.А. Неверов, С.А. Неверов

## ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД ПРИ ОТРАБОТКЕ МАКМАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА

### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Макмальское золоторудное месторождение расположено в Кыргызской Республике на юго-западе гор Чарташ. Поле месторождения сложено окварцованными, скарнированными известняками, скарнами, метасоматитами, относящимися к золотокварцевой формации малосульфидного типа. Рудная минерализация весьма разнообразна и представлена в основном пиритом, пирротином, арсенопиритом, кварцем, полевыми шпатами и пироксеном. Содержание золота в руде составляет 3.5 – 7.0 г/т.

Слагающие месторождение породы, представленные мраморами, гранитами и песчаниками обладают высокими прочностными и упругими свойствами с коэффициентом крепости по шкале проф. М.М Протодьяконова  $f = 14\text{--}19$ . Объемный вес руды – 2.73 т/м<sup>3</sup>, вмещающих пород – 2.7 т/м<sup>3</sup>. В морфологическом строении залежь имеет сложную форму, мощностью от 5 до 60 м. Рудная зона распространяется на глубину около 600 м с вертикальным падением.

В верхней границе месторождения локализованы две самостоятельные линзы – Северная и Южная (рис. 1), которые ниже гор. 2415 м образуют единую рудную залежь. Для визуализации

изображения на рис. 1б выработанное пространство карьера и открытых камер Северной, Южной линз представлено моделью твердого тела.

Северная линза имеет вертикальное падение и распространяется на глубину 250 м. В настоящее время она отработана до горизонта 2370 м. Южная линза имеет простую симметричную форму, параметры которой составляют: мощность 46 – 48 м, длина достигает 130 м.

Горно-складчатая область расположения месторождения предопределила его сложную структуру и неоднозначность геомеханической обстановки, которая характеризуется с одной стороны – наличием высокомодульных прочных и устойчивых пород, с другой – возможностью проявления динамических явлений вследствие ведения работ под открытым выработанным пространством камер, нависающими породными консолями и при отработке разделительного рудо-породного целика. Отметим, что предприятие «Макмал» находится в 9-ти балльной сейсмогенерирующей зоне с повторяемостью сильных землетрясений 2 раза в 1000 лет.

В настоящее время на предприятии ведется отработка подкарьерных запасов весьма мощного Южного рудного тела. В соответствии с проектом месторождение вскрыто штольнями с высотою

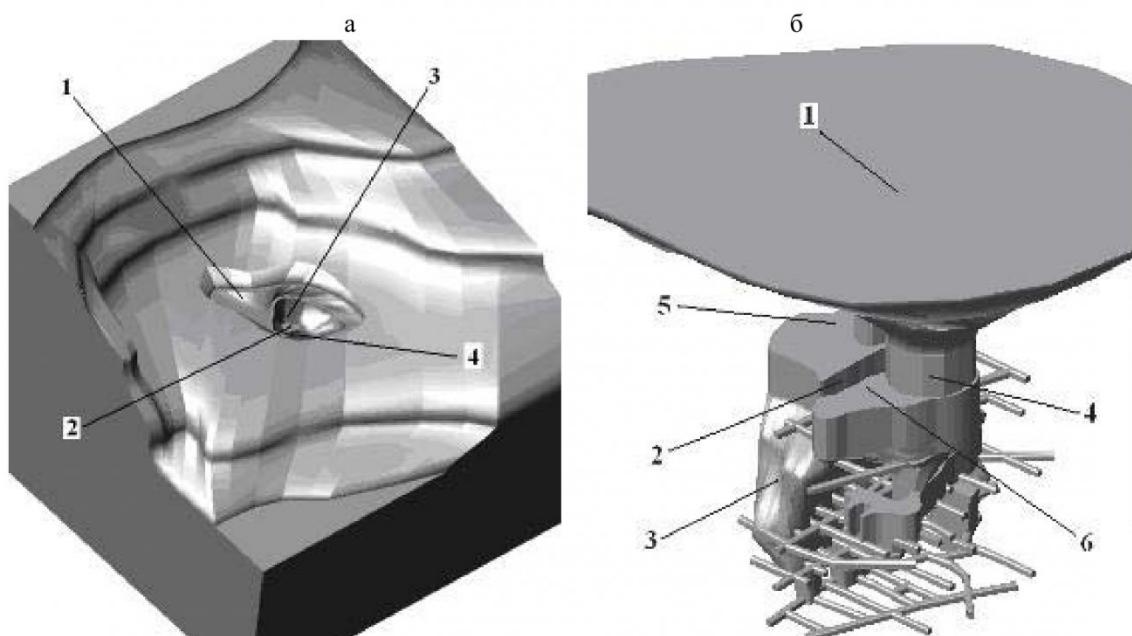


Рис. 1. Развитие горных работ на Макмальском золоторудном месторождении: а) общий вид поверхности месторождения; б) объемная твердотельная модель выработанного пространства (открытых камер и выработок) при отработке Южного рудного тела; 1 – карьер; 2 – целик; 3, 4 – соответственно выработанное пространство Северной и Южной линз; 5, 6 – породные консоли над отработанными Северной и Южной камерами

этажа 40 м и подэтажа – 20 м. Система разработки для выемки мощных рудных тел – этажное и подэтажное обрушение, для отработки рудных залежей мощностью до 10 м – подэтажных штреков.

На современном этапе развития горных работ технология выемки подкарьерных запасов Южного рудного тела была нарушена. В настоящее время отработка залежи ведется камерной системой разработки с камерно-целиковым порядком выемки и оставлением целиков. В результате под дном карьера образовалось выработанное пространство объемом над Северной и Южной линзами 211.2 и 94.2 тыс. м<sup>3</sup> с нависающими породными консолями объемом 70.0 и 27.0 тыс. м<sup>3</sup> соответственно (рис. 1). Последние уходят в борта карьера и имеют высоту от 20.0 до 50.0 м.

В центральной части рудного тела оставлен рудо-породный целик мощностью до 20 м, содержащий линзу забалансовой руды. Наличие этого целика и физико-механические свойства пород месторождения обусловили достаточно высокую устойчивость выработанному пространству и горным конструкциям в течение длительного периода времени (около 5 лет). Вместе с тем, опасность внезапных обрушений отдельностей нависших породных консолей, бортов открытых камер и оставленного рудо-породного целика, разделяющего Северную и Южную линзы, постоянно возрастает. Последнее обстоятельство создает аварийную ситуацию на предприятии и требует немедленной остановки горных работ до разработки специальных мероприятий, регламентирующих безопасную технологию добычи и порядок выемки запасов.

Целью выполненного исследования является геомеханическая оценка сложившейся горнотехнологической ситуации на Южном рудном теле Макмальского золоторудного месторождения и определение возможности его перспективного и безопасного освоения.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Моделирование механического поведения массива пород для выделенных условий проводилось в предположении объемного напряженного состояния методом конечных элементов (МКЭ) [1]. Руда и слагающие месторождение породы имитируется упругими, изотропными, линейно-деформируемыми, однородными материалами.

Недостаточная изученность исходного силового поля напряжений на месторождении предопределила постановку и решение задачи в двух вариантах.

1. Исходное напряженное состояние массива соответствует гипотезе Динника:

$$\sigma_y = \gamma g H \quad \sigma_x = \sigma_z = \lambda \sigma_y$$

где  $\lambda = \mu / (1 - \mu)$  – коэффициент бокового распора,  $\gamma$  – плотность пород,  $g$  – ускорение свободного падения,  $H$  – расстояние до земной поверхности,  $\mu$  – коэффициент поперечных деформаций.

2. Исходное поле напряжений определяется тектоническими силами:

$$\tau_{\text{текн}} = \lambda \gamma g H$$

где  $\lambda_0$  – коэффициент бокового давления.

И.Т. Айтматов для рудников Средней Азии предложил эмпирические зависимости, отражающие изменение величин горизонтальных напряжений с глубиной ( $H$ ) [2]:

$$\sigma_x + \sigma_z = 5.0 + 0.058H, \\ \sigma_x = 3.0 + 0.030H, \quad \sigma_z = 2.0 + 0.028H$$

В соответствии с этими данными, в качестве краевых условий второго варианта задачи, приняты следующие значения тектонического поля напряжений:

$$\sigma_x = 2.0 \text{ MPa}, \quad \sigma_z = 1.6 \text{ MPa}$$

На рис. 2а приведена расчетная схема и основные параметры к определению НДС массива. В центральной части модели заложена конфигурация целиков, открытых камер и консолей, которые отражают сложившуюся обстановку на предприятии. Глубина горных работ от дна карьера до горизонта +2370 м составляет 130-140 м.

На исследуемой базе приняты следующие граничные условия (рис. 2а):

На плоскости  $ABCD$  –

$$\sigma_y(0, x, z) = \gamma g H = 6$$

$$\tau_{xy}(0, x, z) = \tau_{yz}(0, x, z) = 0$$

$EFGH$  –

$$u_y(L_y, x, z) = 0$$

$$\tau_{xy}(L_y, x, z) = \tau_{yz}(L_y, x, z) = 0$$

$DCGH$  –

$$\sigma_x(L_x, y, z) = \lambda \gamma g H$$

$$\tau_{xy}(L_x, y, z) = \tau_{xz}(L_x, y, z) = 0$$

$ABFE$  –

$$u_x(a, y, z) = 0$$

$$\tau_{xy}(a, y, z) = \tau_{xz}(a, y, z) = 0$$

$BCGF$  –

$$\sigma_z(L_z, y, x) = \lambda \gamma g H$$

$$\tau_{xz}(L_z, y, x) = \tau_{yz}(L_z, y, x) = 0$$

$ADHE$  –

$$u_y(0, y, x) = 0$$

$$\tau_{xy}(0, y, x) = \tau_{yz}(0, y, x) = 0$$

где  $\sigma_y, \sigma_x, \sigma_z$  – вертикальная и горизонтальные нормальные компоненты тензора напряжений,  $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$  – касательные компоненты тензора напряжений,  $u_y, u_x, u_z$  – вертикальная и горизонтальные компоненты вектора перемещений. Для учета веса горных пород окружающего массива в моделях задавалась объемная сила  $\gamma g$ .

Исходные данные для расчетов: модуль Юнга  $E = 60000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0.3$ , плотность соответственно породы и руды  $\gamma = 2700$  и  $2730$  кг/м<sup>3</sup>. Шаг дискретизации расчетной области в районе влияния открытых камер, рудо-

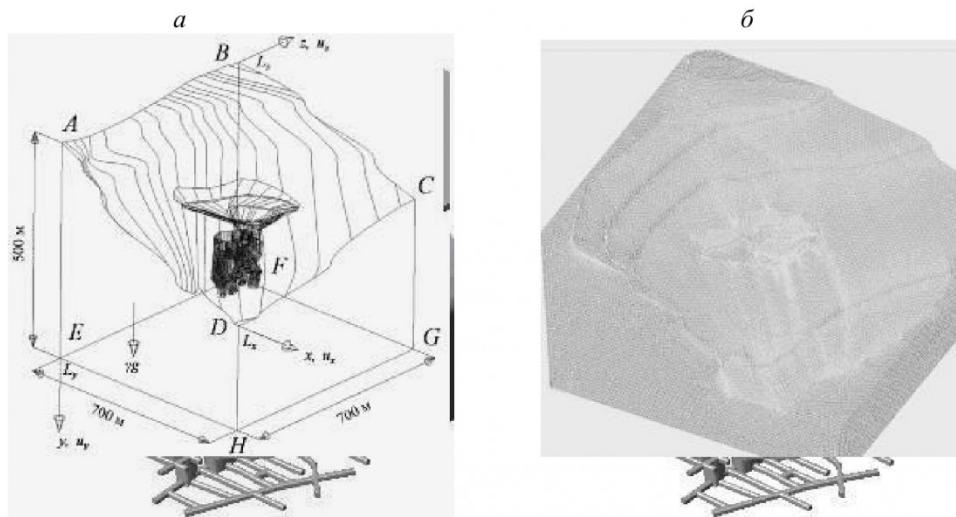


Рис. 2. Моделирование НДС массива пород: а) расчетная схема; б) дискретизация геомеханической модели

породного целика и консоляй принят от 1.0 до 2.0 м, на внешнем контуре модели – до 12.0 м (рис. 2б). Общее количество элементов

, представленных 4-х узловыми тетраэдрами и узлов объемной сетки, соответственно составило 2830000 и 557000.

Верхняя граница расчетной области соответствует земной поверхности. На границе контакта двух материалов (порода-руды) предполагается выполнение условия жесткого сцепления (равенство компонент вектора перемещений  $u_y^1 = u_y^2$ ,  $u_x^1 = u_x^2$ ,  $u_z^1 = u_z^2$ ). Поверхности граничных нагрузок удалены от области горных конструкций на расстояние, которое не оказывает влияние на природное поле напряжений (не менее чем на трех кратный размер наибольшего пролета выработанного пространства).

В качестве исследуемых областей принимались разрезы вдоль плоскостей: 0xz – по горизонту + 2445 м; 0ух – поперек Северной и Южной камер (линия 9820); 0uz – разрез соответственно

по рудо-породному целику и Северной камере (линии 10570 и 10590). Результаты расчетов представляются в виде картин изолиний напряжений. За максимальное главное напряжение принималось  $\sigma_1$ , за минимальное –  $\sigma_2$ , растяжение – со знаком «минус».

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Особенности распределения полей напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  (МПа) в массиве пород в условиях гравитации приведены на рис. 3 – 6.

Обобщение результатов расчета данного варианта показало, что области наибольших значений напряжений  $\sigma_1$  локализуются, в основном, в целике горизонта +2460 м и ниже, породных консолях и в бортах открытых камер (от 3 до 7-8 МПа).

Рудо-породный целик практически по всей высоте от гор. +2480 до гор. +2396 м испытывает двухосное сжатие ( $\sigma_2 = 0$  МПа, максимальное и промежуточное напряжения являются положи-

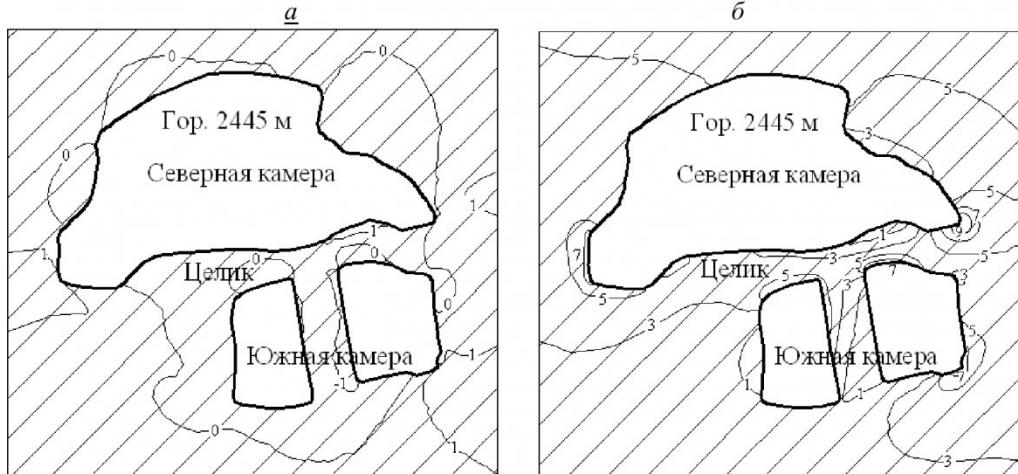


Рис. 3. Характер распределения напряжений в массиве пород на гор. +2445 м (I вариант):  
а –  $\sigma_2$ ; б –  $\sigma_1$

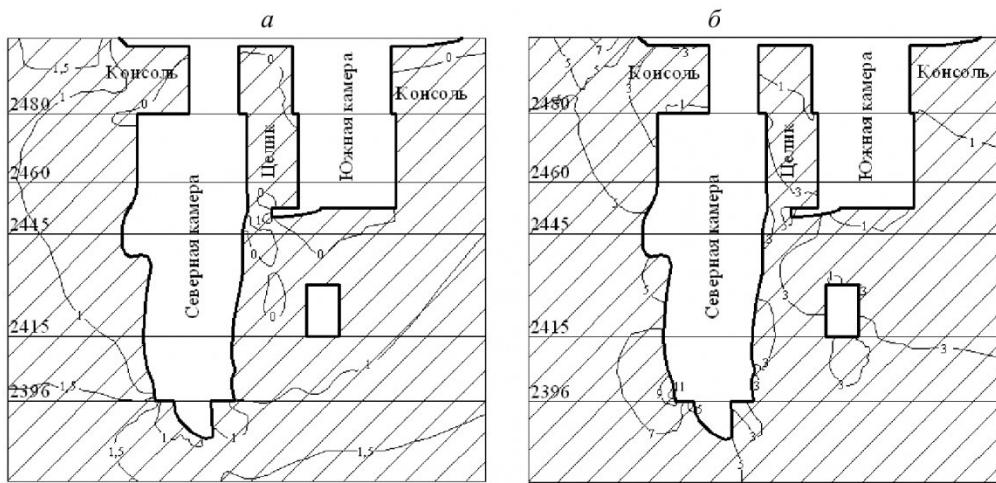


Рис. 4. Характер распределения напряжений в массиве пород вдоль линии 9820 (I вариант):  
а –  $\sigma_2$ ; б –  $\sigma_1$

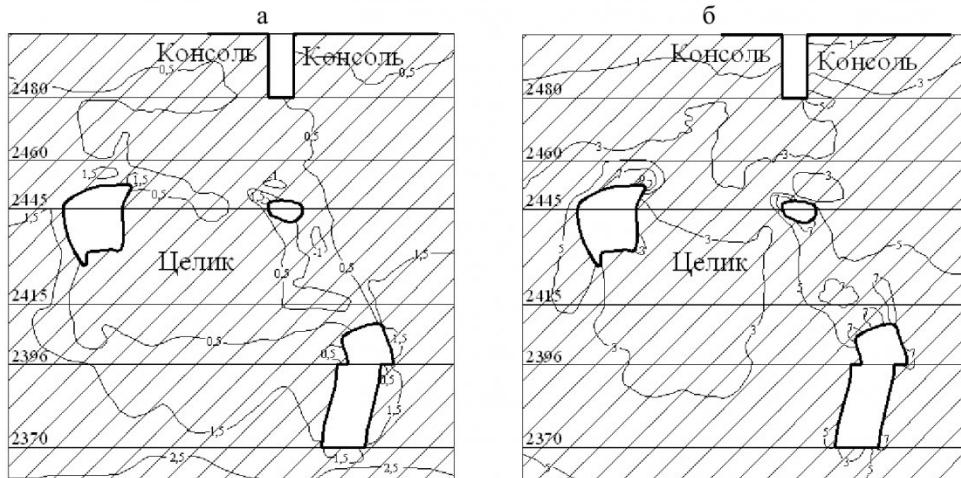


Рис. 5. Характер распределения напряжений в массиве пород вдоль линии 10570 (I вариант):  
а –  $\sigma_2$ ; б –  $\sigma_1$

тельными). На участке целика в районе гор. +2445 м, где его размеры существенно снижаются, наблюдается незначительная зона одноосного растяжения  $\sigma_2 = -1$  МПа. В остальных элементах конструкции наблюдается условие объемного сжатия. Ниже горизонта +2445 м борта камер со стороны целика находятся в состоянии близком к двухосному сжатию ( $\sigma_2 = 0$ ,  $\sigma_1 = 1-2$  МПа).

Из анализа следует, что наиболее нагруженными по напряжениям  $\sigma_1$  и  $\tau_{\max}$  являются участки породной консоли и стенок обнажений со стороны Северной камеры, однако уровень этих напряжений значительно ниже, чем пределы прочности вмещающих пород и руды на растяжение. Поэтому разрушений на этих участках наблюдаться не будет.

Аналогичная ситуация отмечается в районе Южной камеры (гор. +2445 м). В области Северной камеры уровень напряжений выше, чем в окрестностях Южной, что является следствием больших ее размеров. Породные консоли, как и целик, находятся в двухосном напряженном со-

стоянии, с постепенным переходом в борта карьера к объемному сжатию.

Концентрация сжимающих напряжений  $\sigma_1$  – зоны опорного давления – наблюдается в окрестности вертикальных границ открытых камер со стороны массива пород и в горных конструкциях (целиках, днищах, выработках) на глубоких горизонтах.

В целом, оценивая уровень действующих напряжений, в рассматриваемой задаче, отметим, что максимальными являются вертикально ориентированные напряжения и их абсолютные значения не являются критическими с позиции разрушения пород. Последнее обстоятельство не оказывает существенного влияния на устойчивость горных конструкций и безопасность ведения подземных работ.

На рис. 7 – 10 показано распределение действующих напряжений, сформированных отработкой залежи в условиях тектонического поля напряжений.

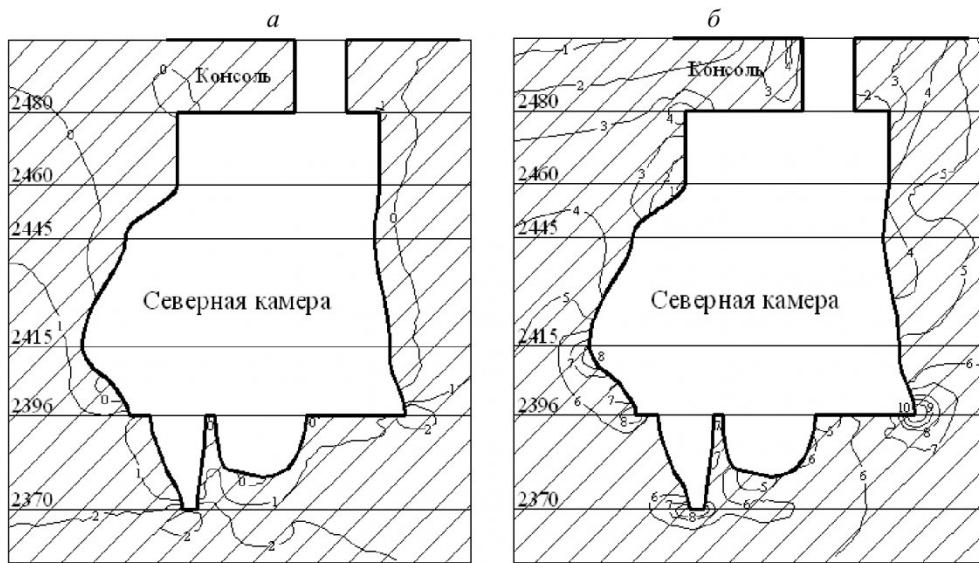


Рис. 6. Характер распределения напряжений в массиве пород вдоль линии 10590 (I вариант):  
*a* –  $\sigma_2$ ; *б* –  $\sigma_1$

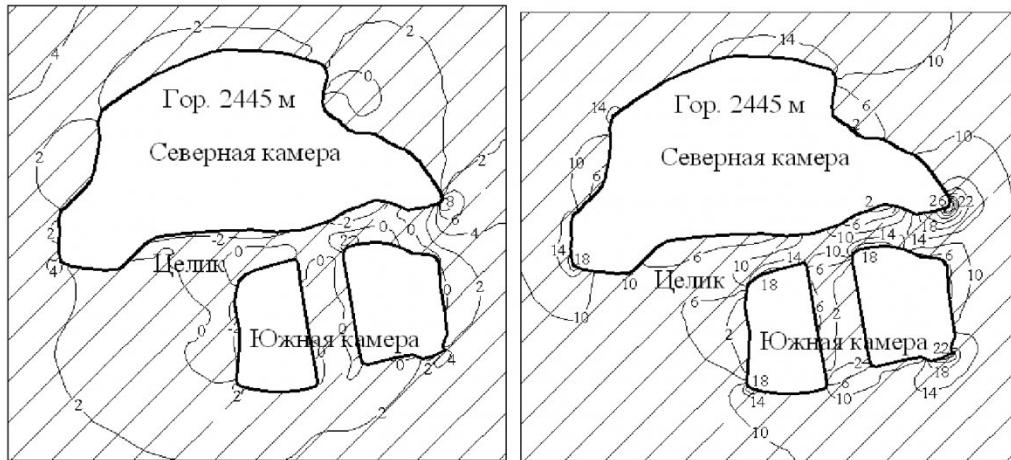


Рис. 7. Напряжения в массиве пород на горизонте +2445 м в условиях тектоники (II вариант):  
*a* –  $\sigma_2$ ; *б* –  $\sigma_1$

В сравнении с предыдущей задачей, здесь наблюдается заметный рост напряжений за счет тектонических сил. Результаты анализа позволили установить места концентраций, где наибольшие абсолютные значения максимальных напряжений

наблюдаются в целике ( $\sigma_1 = 9-12$ ,  $\tau_{\max} = 4-7$  МПа) и консолях, как с северной ( $\sigma_1 = 15-18$ ,  $\tau_{\max} = 6-9$  МПа), так и с южной стороны ( $\sigma_1 = 12-15$ ,  $\tau_{\max} = 6.0-7.5$  МПа).

Наличие зон растяжения в целике  $\sigma_2 = 0 \div -2$

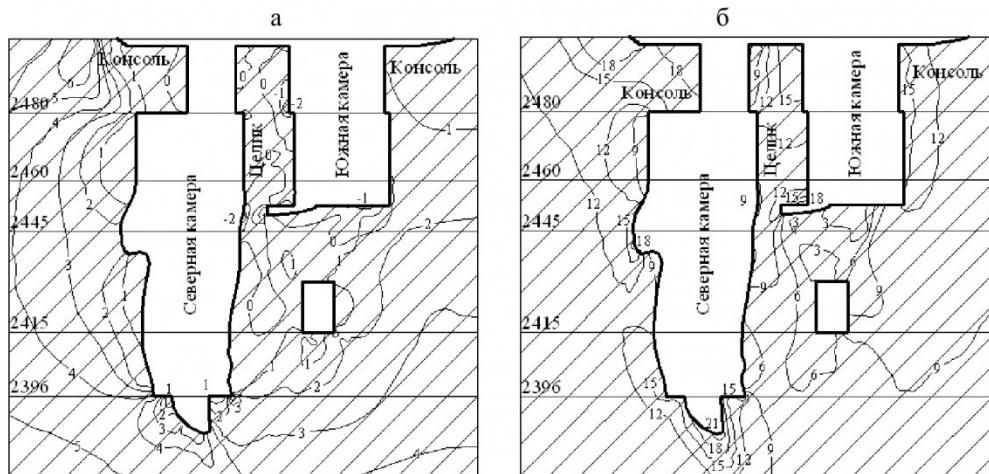


Рис. 8. Напряжения в массиве пород вдоль линии 9820 в условиях тектоник (II вариант): *a* –  $\sigma_2$ ; *б* –  $\sigma_1$

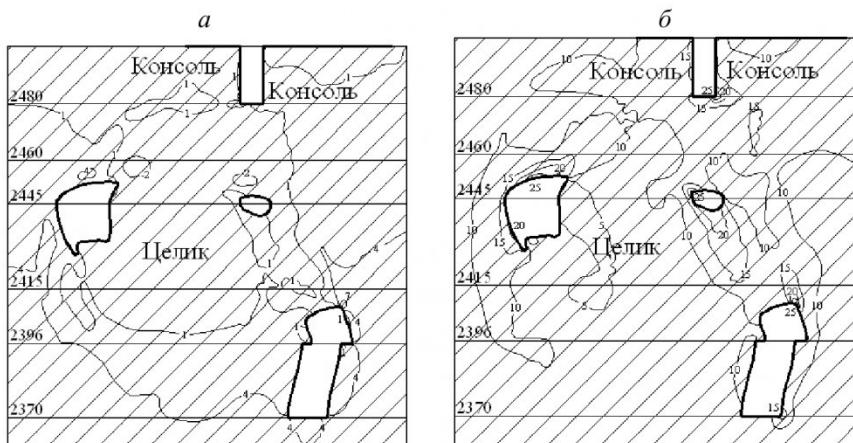


Рис. 9. Напряжения в массиве пород вдоль линии 10570 в условиях тектоники (II вариант):  
а –  $\sigma_2$ ; б –  $\sigma_1$

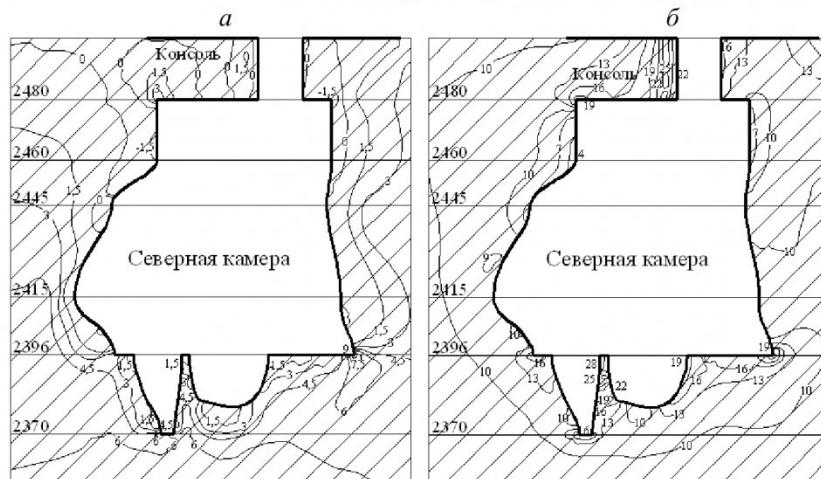


Рис. 10. Напряжения в массиве пород вдоль линии 10590 в условиях тектоники (II вариант):  
а –  $\sigma_2$ ; б –  $\sigma_1$

МПа свидетельствует о возможной потере его устойчивости. Однако полученные напряжения не являются запредельными, ввиду высоких значений пределов прочности пород на сжатие и растяжение.

В породной консоли с северной стороны происходит постепенный переход от двухосного сжатия ( $\sigma_2 \approx 0$  МПа) к объемному в направлении борта карьера. Поэтому консоль и борта карьера в районе открытых камер будут находиться в состоянии средней и ниже средней устойчивости.

Сопоставляя полученные результаты с напряженным состоянием в условиях гравитации, отметим, что качественная и количественная картины изменились в худшую сторону со значительными диапазонами различия. Так рост напряжений в целике составил более чем в 3 раза.

Наиболее благоприятная ситуация в рассматриваемом варианте характерна для стенок камер, которые испытывают состояние трехосного сжатия.

В подобных случаях устойчивость пород очевидна.

Анализ результатов исследования НДС массива на Южном рудном теле месторождения при вариации параметров исходного силового поля земли показал, что величины напряжений, полученные в ходе расчетов, не превышают прочностных характеристик пород и не являются предельными, вследствие чего опасность обрушений элементов разработки снижается.

### УСТОЙЧИВОСТЬ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРНЫХ РАБОТ

Устойчивость элементов разработки оценивалась по двум критериям.

1. По критерию трещинообразования (статистический подход), в основе которого лежит длительная прочность и структурная нарушенность породы в массиве [3]:

$$\sigma_p \leq K_c \sigma_{\text{ср}}$$

Таблица 1. Прочностные свойства выделенных горных пород с учетом  $K_c$

Тип породы	$\phi$ , град	$C$ , МПа	$\sigma_{\text{сж}}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа
Мраморы слабоскарнированные (I – тип)	50	7.5	41.4	5.4
Мраморы скарнированные(II – тип)	53	9.3	54.7	6.3

где  $\sigma_d$  – напряжения в массиве, МПа;  $K_c$  – показатель учитывающий длительную нарушенность породы, д.ед.;  $\sigma_{c,s}$  – предел прочности породы на сжатие, МПа.

2. По критерию запаса прочности пород ( $K_{зап}$ ), выраженному из уравнения прямой напряжений Мора (считается, что наиболее разрушительными являются сдвиговые напряжения):

$$\tau = C + \sigma \tan \phi$$

где  $\tau$  – предел прочности породы по касательным напряжениям, МПа;  $C$  – сцепление, МПа;  $\sigma$  – нормальное напряжение, действующее на площадке разрушения, МПа;  $\phi$  – угол внутреннего трения.

Коэффициент запаса прочности пород [4]:

$$K_{зап} = \frac{d\sigma(\sigma_1 + \sigma_2 + 2C\tan\phi)}{\sigma - \sigma_1}, \text{ д. ед.}$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – соответственно максимальные и минимальные значения напряжений, действующих в массиве пород, МПа.

Условие  $K_{зап} \leq 1$  соответствует процессу разрушения пород

Частичная неопределенность исходной информации предопределили рассмотрение показателя устойчивости для двух видов наименее прочных пород, слагающих Южное рудное тело (табл. 1) с учетом коэффициента структурного ослабления  $K_c = 0.6$ .

Результаты расчета устойчивости представлены в табл. 2.

В условиях гравитационного поля напряжений, учитывая, что массив пород испытывает значительно меньшие нагрузки, устойчивость горных конструкций не вызывает сомнений ( $K_{зап}$  составляет более 2.0). Вполне обоснованно предположить, что исследуемые элементы камер и целиков будут подвержены большим значениям горного давления при действии горизонтальных сил. Исходя из этого, к более детальной проработке была принята ситуация ведения горных работ в условиях прогнозной тектоники.

Консоли Северной и Южной камер при действии повышенных горизонтальных напряжений находятся в пограничном состоянии, устойчивость которых со временем потенциально снижается. Это обстоятельство может спровоцировать возможные внезапные обрушения пород. Зависшая консоль над Северной камерой характеризуется большей площадью обнажения по сравнению с Южной ( $S_c = 1665 \text{ м}^2$  против  $S_{ю} = 744 \text{ м}^2$ ) и меньшей прочностью. Снижение устойчивости пород также наблюдается в бортах камер в интервале горизонтов 2460 – 2445 м.

Степень прочности рудо-породного целика определяется взаимным влиянием выработанных пространств Северной и Южной камер и характеризуется, на данном этапе ведения работ, как достаточно высокая.

Вместе с тем, дальнейшая разработка залежи без коренного изменения технологии очистной выемки может привести к полной потере устойчи-

Таблица 2. Коэффициенты запаса прочности горных пород в условиях тектонического поля напряжений

Наименование участка	$K_{зап}$	
	Тип породы – I	Тип породы – II
Борт Северной камеры:		
гор. 2460 м	1.4	1.6
гор. 2445 м	1.3	1.5
гор. 2415 м	1.5	1.6
гор. 2396 м	1.4	1.5
гор. 2370 м	1.6	1.8
Борт Южной камеры:		
гор. 2460 м	1.3	1.4
гор. 2445 м	1.3	1.4
гор. 2415 м	1.8	2.0
гор. 2396 м	1.7	1.9
гор. 2370 м	2.1	2.3
Консоль:		
Северная	1.2	1.2
Южная	1.2	1.3
Целик:		
гор. 2460 м	1.7	1.7
гор. 2445 м	1.2	1.2
гор. 2415 м	1.4	1.5
гор. 2396 м	1.7	1.9
гор. 2370 м	1.8	2.0

вости и обрушению целика в динамической форме. Коэффициент запаса прочности наиболее уязвимых участков массива не гарантирует сохранность выработанного пространства в случае значительных сейсмических событий в регионе, в том числе, массовых взрывов больших масштабов.

## ПРЕДПОСЫЛКИ БЕЗОПАСНОГО ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Исходя из сложившихся горнотехнических условий на Южном рудном теле, добывающие работы следует приостановить до погашения открытых камер закладкой и образования предохранительных породных подушек. Безопасную отработку руды, в оставленных целиках штолен № 7 и 6, возможно технически осуществить системой этажного обрушения с отбойкой руды на зажатую среду (рис. 11). Эта геотехнология достаточно широко известна в мировой практике.

Очистная выемка ведется сплошным фронтом. Руду отбивают вертикальными или слабонаклонными слоями взрыванием скважинных зарядов на обрушенную породу (в нашем случае, на сухую закладку). Выпуск отбитой руды ведут, через дучки непосредственно на скреперный штрек и далее через полок грузится в вагоны. Очистное пространство не поддерживается и заполняется по мере выпуска руды налегающими породами. При всей простоте эта технология для достижения удовлетворительных показателей извлечения руды из недр обуславливает ряд требований к про-

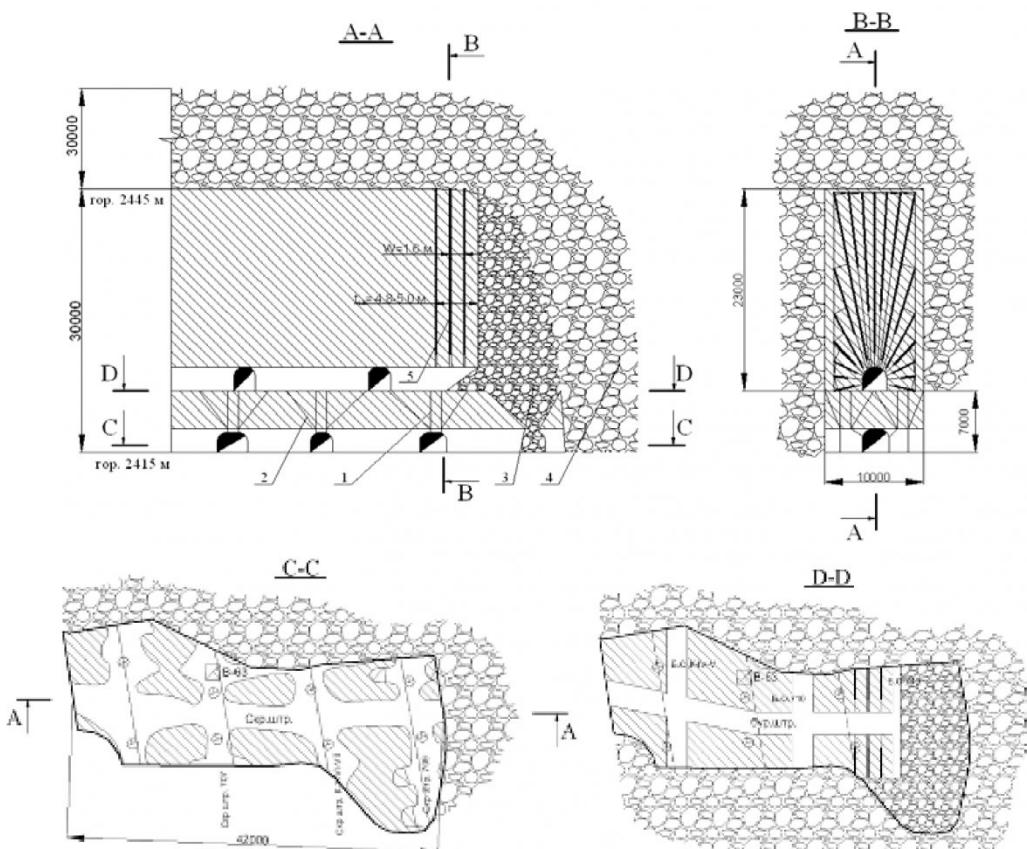


Рис. 11. Технологическая схема отработки целиков на гор. 2445 – 2415 м системой этажного обрушения: 1 – дучки; 2 – пудоп приемные воронки; 3 – отбитая пуда; 4 – налегающие вмещающие породы: процессом отбойки и выпуска.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Под влиянием временного фактора и атмосферного воздействия устойчивость сложившейся горной конструкции будет постоянно снижаться, создавая аварийность и возможную остановку дальнейшего освоения месторождения. Произведенные расчеты геомеханического состояния выработанного пространства по Южному рудному телу, на современном этапе добычи, позволяют оценить горнотехническую ситуацию на предприятии в меру безопасной, перспективной и пригодной для ведения горных работ с выполнением оп-

ределенных технологических ограничений и профилактических мероприятий, предусмотренных ЕПБ Кыргызской Республики.

Учитывая высокую сейсмичность региона, постоянные взрывные работы, очистную выемку на месторождении до выполнения требований, направленных на предупреждение негативных последствий неуправляемого поведения массива горных пород (высокая концентрация напряжений, воздушные удары при обрушении отдельностей обнажений и др.) и до образования предохранительных породных подушек следует остановить.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 538 с.
2. Айтматов И.Т. Методы и результаты изучения напряженного состояния массивов и создание на их основе эффективных способов управления горным давлением при подземной разработке руд / Ахматов В.И. и др. // ФТПРПИ.-1987.-№4.
3. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. / Турчанинов И.А., Марков Г.А., Иванов В.И., Козырев А.А. – Л., «Наука», 1978., 256 с.
4. Казикаев Д.М. Геомеханика подземной разработки руд / Учебник для вузов, - М.: Изд-во МГГУ, 2005.

□ Авторы статьи:

Неверов  
Сергей Алексеевич  
- канд.техн.наук, научн.сотр. ИГД СО РАН  
Тел. (383) 217-09-52, e-mail: [neverovaa\\_79@mail.ru](mailto:neverovaa_79@mail.ru)

Неверов  
Александр Алексеевич  
- канд.техн.наук, научн.сотр. ИГД СО  
РАН, e-mail: [neverovaa\\_79@mail.ru](mailto:neverovaa_79@mail.ru)