

# ВЛИЯНИЕ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПОРОД НА ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ЭТАЖНО-КАМЕРНОЙ ВЫЕМКЕ С ВЫПУСКОМ РУДЫ ИЗ ПОДКОНСОЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА<sup>1</sup>

*А.А. Неверов, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Россия*

Приведены результаты геомеханического обоснования междукамерных целиков и породной кровли при камерной системе разработки с выпуском руды из подконсольного пространства в зависимости от вида исходного поля напряжений нетронутого массива

## Состояние вопроса

В настоящее время проектирование и выбор геотехнологий подземной добычи минерального сырья для новых мало изученных месторождений, в большинстве случаев, основаны на применении в установленном порядке технологических норм, СНИПов, инструкций, методических указаний и т.д. Однако выделенный комплекс нормативных документов не всегда учитывает региональные горно-геологические и геомеханические особенности месторождений, что не исключает ошибки в принятии правильности технологических решений.

Принятая на месторождение или его части система разработки практически предопределяет безопасность ведения горных работ, механизацию и автоматизацию процессов производства, производительность, показатели полноты и качества извлечения запасов из недр и, в конечном счете, результативность предприятия. Поэтому выбор технологии отработки является весьма ответственной задачей проекта будущего рудника.

Важнейшим природным фактором, определяющим правильный выбор геотехнологий и их параметров, эффективный расчет устойчивости конструктивных элементов систем разработки, достоверный прогноз характера и формы проявления горного давления, является естественное поле напряжений нетронутого горными работами массива пород [1-6]. Иначе говоря, система разработки не может считаться безопасной, если при ее обосновании не учтены параметры реального тензора напряжений.

Актуальность данной проблемы обуславливается тем, что уже сегодня действующие рудники нередко несут значительные убытки, связанные с непредвиденными работами в экстремальных условиях больших глубин из-за недооценки геомеханической обстановки на месторождениях.

В связи с этим в настоящей статье рассматривается решение задачи о напряженно-деформированном состоянии (НДС) междукамерных целиков и налегающей толщи при этажно-камерной геотехнологии выемки мощной пологопадающей залежи с выпуском руды под зависающей породной консолью (рис. 1), позволяющей определить степень влияния типа геомеханических условий разработки на устойчивость горных пород и выбор научно обоснованных пролетов отработки.

Сущность геотехнологии [7] заключается в выемке камер увеличенной ширины под нависающей консолью с временными рудными целиками на их флангах, погашаемых совместно с обрушением пород кровли, направленных на улучшение показателей извлечения.

Управление горным давлением производится полным обрушением пород налегающего массива. Отработка камер с отставанием целиков в смежных панелях осуществляется преимущественно единым фронтом. Система разработки может исполняться с рудной или с полевой подготовкой горизонта выпуска руды.

Подготовка панели при полевом расположении горизонта выпуска производится буродоставочными заездами и ортами, пройденными в породах почвы рудного тела, выработками вентиляционного горизонта по верхнему контуру залежи и вентиляционного восстающего.

Выемка камерных запасов предусматривает отбойку руды с частичным ее магазинированием и выпуском через полевые траншеи в торец буропогрузочных заездов, путем послонно-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.»

го погашения «породного моста» в отступающем порядке с доставкой руды самоходной техникой в рудоспуск на фланге панели. При этом отбойка руды и погашение пород кровли ведутся независимо. Взрывание «породного моста» над выработками днища осуществляется слоями толщиной 2,5–3,0 м с повышенным на 20–25% удельным расходом ВВ. Подобный прием обеспечивает заброс и уплотнение пород в выработанном пространстве.

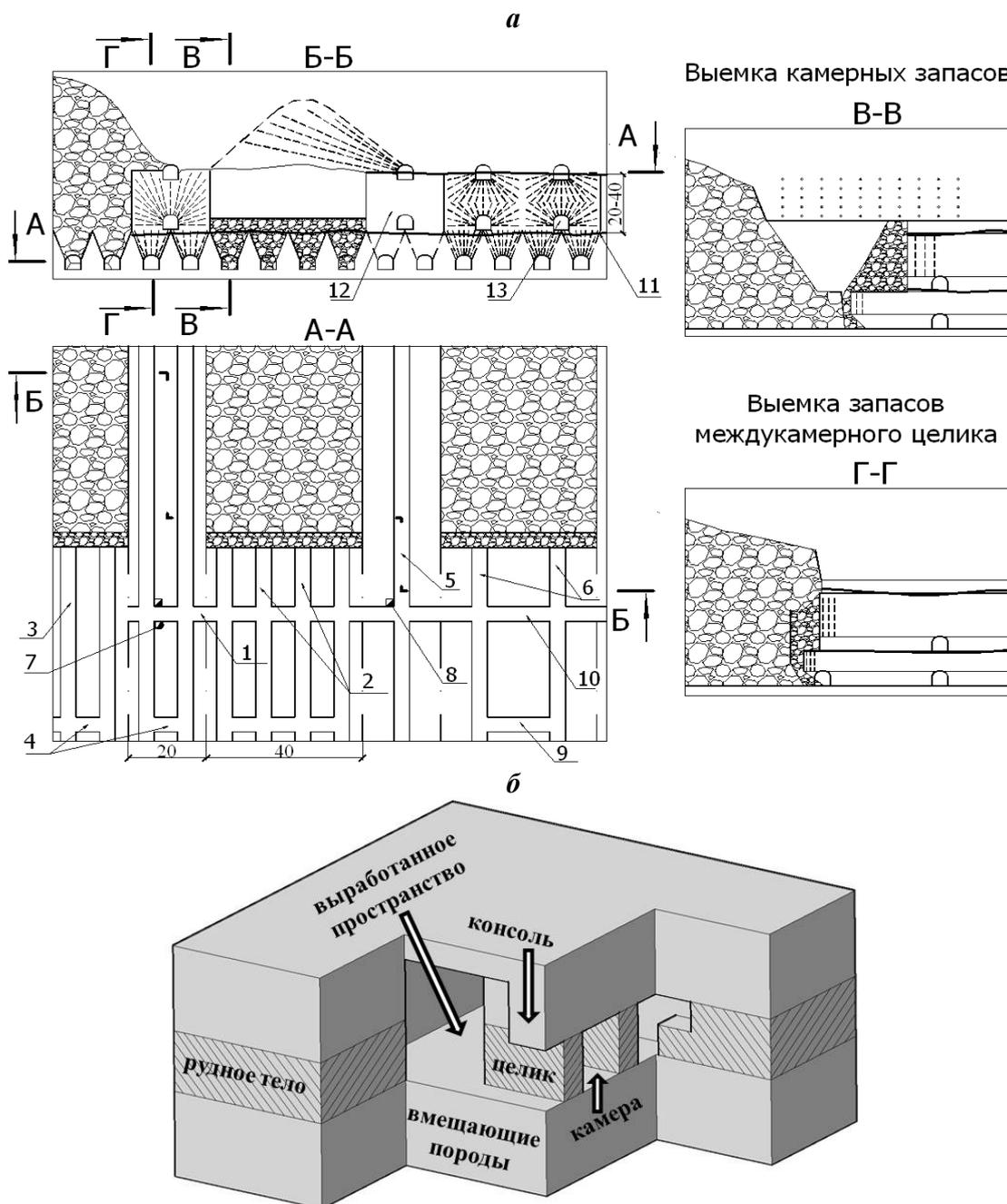


Рис. 1. Этажно-камерная система разработки с выпуском руды из подконсольного пространства (а), объемная модель (б): 1 – панельный штрек; 2 – буропогрузочные заезды; 3 – буропогрузочный орт междукammerного целика; 4 – вентиляционная сбойка погрузочно-доставочного горизонта; 5 – буропосадочный орт буровентиляционного горизонта; 6 – буровой орт буровентиляционного горизонта; 7 – рудоспуск; 8 – вентиляционно-ходовой восстанавливающий; 9 – вентиляционная сбойка бурового горизонта; 10 – сборочный вентиляционный штрек; 11 – рудное тело; 12 – междукammerный целик; 13 – буровые выработки

Отработка междукammerных целиков ведется параллельно с обрушением кровли с отставанием от забоя камерной выемки на 30–60 м. Обязательным условием их погашения, исклю-

чающим заброс руды в выработанное пространство, является заполнение его налегающими породами на высоту равную не менее мощности рудного тела.

#### Постановка задачи

Для геомеханической оценки геотехнологии приняты следующие параметры: область расчета включает три камеры и два целика (выработки не учитываются см. рис. 1 б); междукамерные целики ограничены с трех сторон выработанным пространством; камеры обрабатываются единым фронтом без опережения одних над другими; глубина горных работ ( $H$ ) – 800 м; мощность рудного тела ( $m$ ) – 40 м; ширина камер ( $B_k$ ) – 36-46 и 56-65 м; ширина междукамерных целиков ( $B_c$ ) – 12-25 м; высота обрушения кровли –  $h = m = 40$  м; длина пролета отработки вдоль и поперек камер, соответственно  $L_p = 140$  м,  $L_{p,o} = 160-220$  м; длина консоли ( $L_R$ ) – 52 м; опережение выемки камерных запасов над целиками ( $L_o$ ) – 60 м; исходное максимальное горизонтальное напряжение ( $\sigma_{h,max}$ ) ориентировано поперек целиков. Примем, что  $\sigma_y = \sigma_v$ ,  $\sigma_x = \sigma_{h,max}$ ,  $\sigma_z = \sigma_{h,min}$ , где,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  – соответственно вертикальное и горизонтальные максимальные и минимальные нормальные напряжения, действующие в массиве.

В соответствии с разработанными [2, 3] геомеханическими моделями геосреды к рассмотрению принимаются три вида напряженного состояния нетронутого массива пород:

1. Гравитационный тип геосреды хорошо описывается гипотезой Динника:

$$\sigma_y = \gamma g H, \quad \sigma_x = \sigma_z = q \sigma_y, \quad \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0,$$

где,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{xz}$  – касательные компоненты тензора напряжений;

$\gamma$  – плотность пород;

$g$  – ускорение свободного падения;

$q = \mu / (1 - \mu)$  – коэффициент бокового распора.

2. Геостатическая модель характеризуется равнокомпонентным распределением напряжений в массиве:

$$\sigma_y = \gamma g H \approx \sigma_x \approx \sigma_z, \quad \text{или} \quad \sigma_x \approx \sigma_z \approx q \sigma_y, \quad \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0,$$

где,  $q = \frac{\sigma_{h,max}}{\sigma_v} = 0,8 \div 1,2$  – коэффициент бокового давления.

3. Массив пород с тектоническим распределением напряжений в недрах земли обусловлен более высоким значением коэффициента бокового давления в одном из горизонтальных направлений в сравнении с геостатическим:

$$\sigma_y = \gamma g H, \quad \sigma_x = q_x \sigma_y, \quad \sigma_z = q_z \sigma_y, \quad \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0,$$

где  $q_x$ ,  $q_z$  – соответственно коэффициенты бокового давления по простиранию и вкрест простирания месторождения. При этом границы изменения коэффициентов  $q_x$  и  $q_z$  находятся в пределах  $1,2 \leq q \leq 2,0$ . В решениях принимаются  $q_x = 2,0$ ,  $q_z = 1,0$ .

На основании выделенных типов геомеханических условий разработки в расчетах были приняты следующие величины напряжений для глубины 800 м (см. табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Компоненты исходного поля напряжений

Вид геомеханической модели	Напряжения, МПа		
	Горизонтальные $\sigma_x$	Горизонтальные $\sigma_z$	Вертикальные $\sigma_y$
Гравитационная	6,0	6,0	21
Геостатическая	21	21	21
Тектоническая	42	21	21

Прогнозные исследования НДС массива горных пород при этажно-камерной выемке проводились путем численного моделирования в упругой объемной постановке задачи методом конечных элементов [8]. Руда и слагающие месторождение вмещающие породы моделировались упругими, изотропными, линейно-деформируемыми, однородными материалами, соответственно с модулем упругости  $E_{руд} = 50$ ,  $E_{пор,1} = 60$  и  $E_{пор,2} = 55$  ГПа, коэффициентом Пуассона

сона  $\mu_{руд} = 0,25$ ,  $\mu_{пор,1} = 0,22$  и  $\mu_{пор,2} = 0,23$  и объемным весом  $\gamma_{руд} = 4,0$  и  $\gamma_{пор} = 2,7$  т/м<sup>3</sup>.

Условия на границе расчетной области определялись напряженным состоянием нетронутого массива (в соответствии с видами геомеханических моделей). Для учета веса горных пород массива задавалась объемная сила  $\gamma g$ . На границах контакта разнородных пород выполнялось условие жесткого сцепления (равенство компонент вектора перемещений –  $u_y^1 = u_y^2$ ,  $u_x^1 = u_x^2$ ,  $u_z^1 = u_z^2$ ). Контуры открытых обнажений (камер, выработанных пространств) свободны от внешних нагрузок ( $\sigma_y = \sigma_x = \sigma_z = 0$ ). Границы модели выбраны в соответствии с принципом Сен-Венана, согласно которому зона влияния горных разработок распространяется на расстояние не более трех максимальных размеров объекта исследования (отсутствует вероятность влияния области отработки на внешние границы модели). Отметим, что при моделировании не учитывались обрушенные породы, которые в натуральных условиях повышают сохранность открытых обнажений за счет бокового подпора. Поэтому результаты расчетов обладают определенным запасом надежности. Анализ НДС массива выполнен для главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  и  $\tau_{max}$ . За максимальное напряжение принималось  $\sigma_1$ , за минимальное –  $\sigma_3$ , растяжение – со знаком «минус».

### Обсуждение результатов расчетов

Результаты моделирования НДС горных пород при применении геотехнологии этажно-камерной выемки в зависимости от вида геомеханической модели геосреды представлены на рис. 2-6.

На рис. 2-3 приведены распределения главных напряжений в центральном сечении целиков соответственно в вертикальном по их длине (соответствует разрезу Г-Г см. рис. 1 а) и в поперечном по их ширине (соответствует разрезу Б-Б см. рис. 1 а).

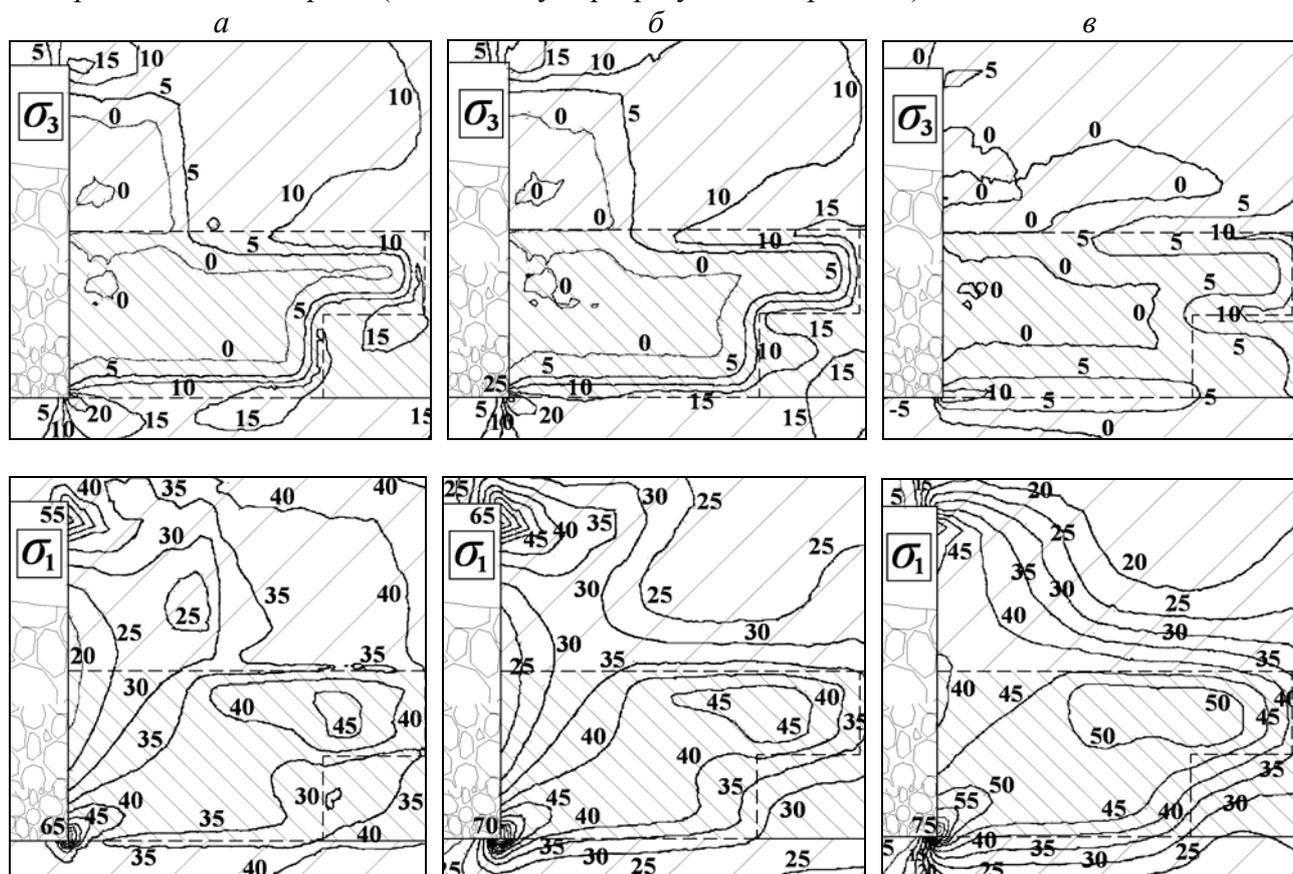


Рис. 2. Характер распределения главных напряжений в центральном вертикальном сечении целика по его длине в зависимости от типа геомеханических условий при  $H = 800$  м,  $B_k = 46$  м,  $B_c = 12$  м,  $L_p = 140$  м,  $L_{p.o} = 160$  м,  $L_o = 60$  м: а – тектоническая модель; б – геостатическая; в – гравитационная

Обобщение полученных данных о НДС горных пород показало, что при фиксированных конструктивных параметрах системы разработки максимальная концентрация сжимающих нагрузок  $\sigma_1$  отмечается в целиках в условиях гравитационного распределения исходного поля напряжений в нетронутым массиве, которые в 1,4 и 1,2 раза выше, чем при тектонической и геостатической модели соответственно. Изменение минимального главного давления  $\sigma_3$  свидетельствует об отсутствии в центральной части целиков растягивающих усилий в варианте с динниковским распределением напряжений в сравнении с тектоническим и равнокомпонентным типами геомеханических условий разработки, где имеют место быть области незначительного растяжения ( $\sigma_3 \leq -0.5$  МПа).

В кровле камер картина распределения главных напряжений в отличие от НДС целиков меняется на противоположную (см. рис. 3). Максимальные значения компоненты  $\sigma_1$  наблюдаются при значительных горизонтальных напряжениях ( $q = 2$ ), действующих в породном массиве, минимальные – при вертикальных ( $q = 0,283$ ). Однако наличие больших по величине растягивающих напряжений ( $\sigma_3 = -10$  МПа) в кровле, резко снижает область применения рассматриваемой системы разработки в условиях гравитационной модели геосреды.

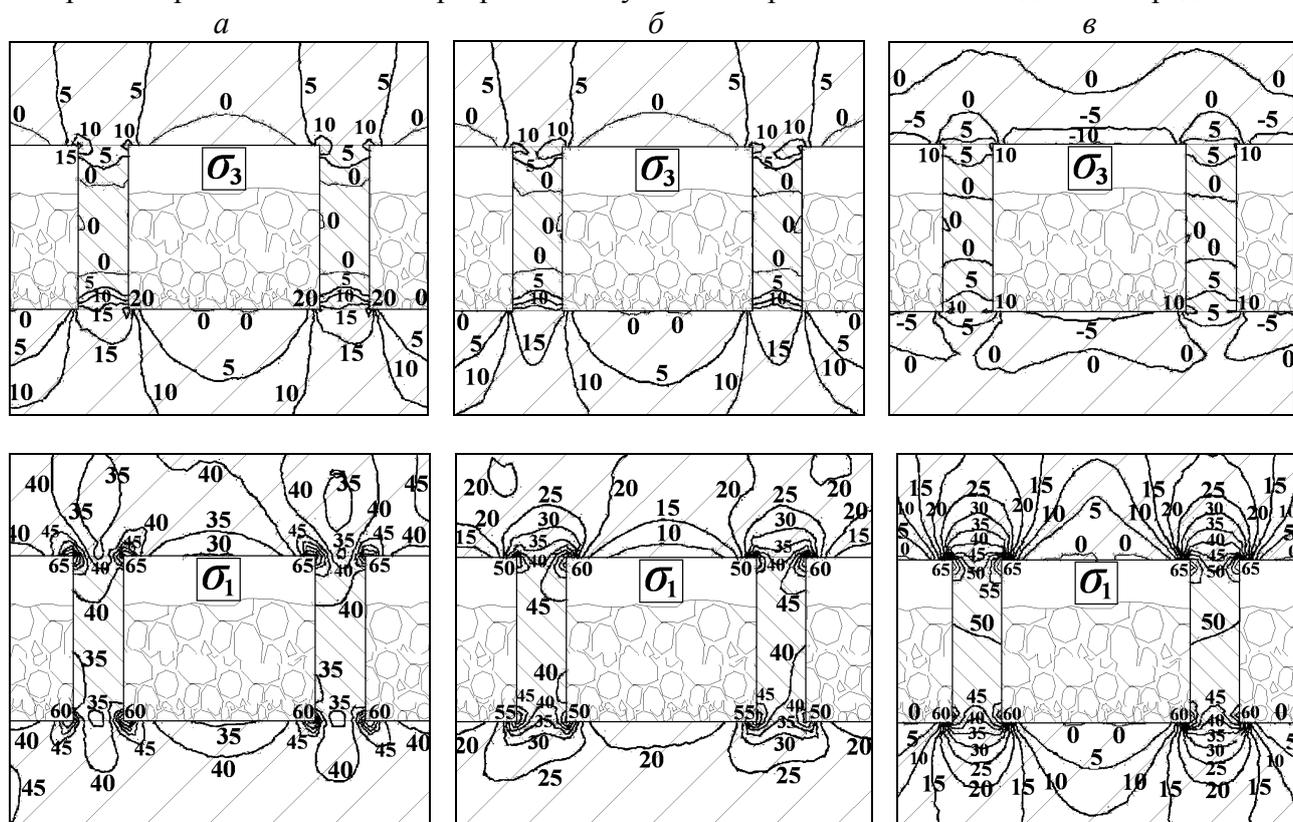


Рис. 3. Характер распределения главных напряжений в центральном поперечном сечении целика в зависимости от типа геомеханических условий при  $H = 800$  м,  $B_k = 46$  м,  $B_c = 12$  м,  $L_p = 140$  м,  $L_{p.o} = 160$  м,  $L_o = 60$  м: а – тектоническая модель; б – геостатическая; в – гравитационная

В дополнении на рис. 4 представлен уровень действующих сдвиговых напряжений  $\tau_{max}$  по длине зависающей породной консоли в центре камеры. Изучение этих величин с детальным анализом главных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  и учетом значений пределов прочности массива пород на сжатие, растяжение и сдвиг показало, что потеря устойчивости налегающей толщи в кровле связана с действием растягивающих нагрузок, особенно в варианте с низким коэффициентом бокового давления ( $q = 0,283$ ). За счет высоких горизонтальных напряжений действующих в массиве в тектонической и геостатической моделях растягивающие усилия в кровле камер минимальны и составляют -2,0 и -3,2 МПа, соответственно. Отметим, что снижение прочности целиков, главным образом, обуславливается действием в массиве пород значительных по величине напряжений сжатия и сдвига

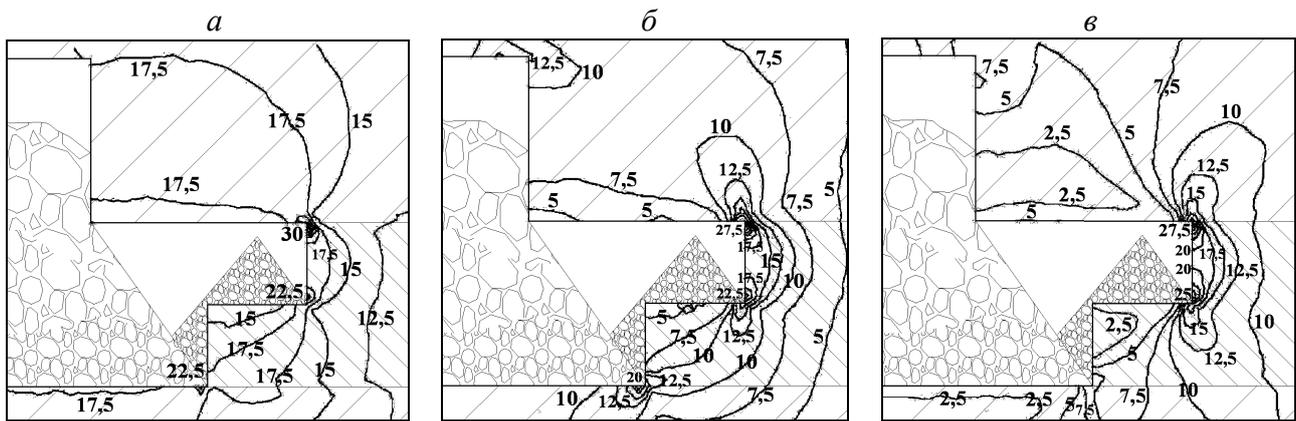


Рис. 4. Характер распределения максимальных касательных напряжений  $\tau_{\max}$  в продольном вертикальном сечении камеры в зависимости от типа геомеханических условий при  $H = 800$  м,  $B_k = 46$  м,  $B_c = 12$  м,  $L_p = 140$  м,  $L_{p.o} = 160$  м,  $L_o = 60$  м: *a* – тектоническая модель; *б* – геостатическая; *в* – гравитационная

Результаты исследований параметров междукамерных целиков, камер и соответственно пролета отработки на НДС горных пород показали следующее (рис. 5-6).

Увеличение ширины целика от 12 до 25 м приводит, с одной стороны к снижению максимального сжимающего напряжения  $\sigma_1$  в его центральной части в среднем в 1,3 раза независимо от ширины камеры и величины бокового давления  $q$  (см. рис. 5 *a, б*), с другой – к незначительному росту растягивающих усилий  $\sigma_3$  (см. рис. 6 *a*). При этом нагрузка  $\sigma_1$  при динниковском распределении исходного поля напряжений более чем в 1,35 и 1,2 раза выше, чем при тектоническом и гидростатическом типе геомеханических условий разработки.

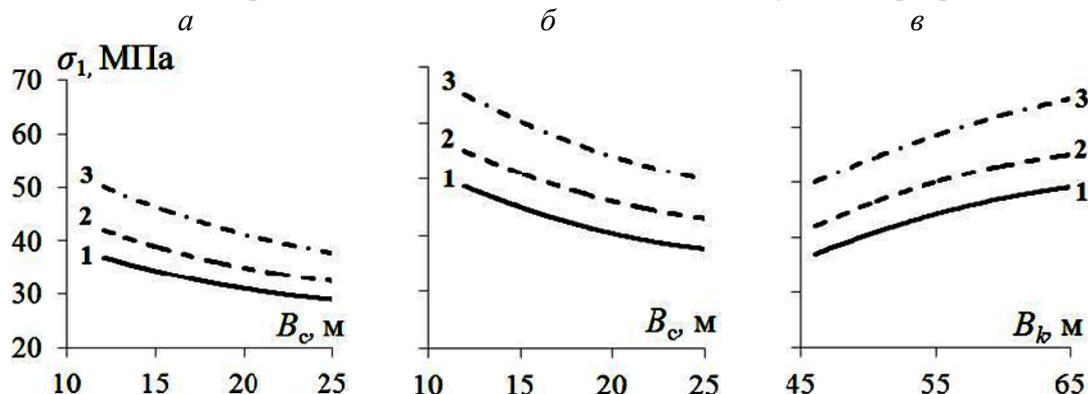


Рис. 5. Изменение главных максимальных напряжений в центральной части целиков: *a, б* – в зависимости от  $B_c$ , соответственно при  $B_k$  36-46 и 60-65 м; *в* – в зависимости от  $B_k$  при  $B_c = 12$  м: 1 – тектоническая модель; 2 – геостатическая; 3 – гравитационная

Повышение ширины камеры от 36-46 до 60-65 м при фиксированных размерах  $B_c$ , ведущее к росту пролета отработки (от 160 до 220 м) сопровождается увеличением давления  $\sigma_1$  в центре целиков в 1,3 раза (см. рис. 5 *в*) и растягивающих напряжений  $\sigma_3$  в породах кровли в 1,5, 1,3 и 1,1 раза соответственно для тектонической, геостатической и гравитационной геомеханической моделей геосреды (см. рис. 6 *в*). Изменение компоненты  $\sigma_3$  в кровле камер при увеличении  $B_c$  от 12 до 25 м свидетельствует о снижении в ней растягивающих усилий от -2,0 до 0, от -3,2 до -1,5 и от -11 до -9,0 МПа соответственно при боковом давлении  $q = 2$ ,  $q = 1$  и  $q = 0,283$ . Как видно из графиков, предельные значения напряжений наблюдаются в условиях гравитационного распределения напряжений в нетронутом массиве пород.

Выполненные расчеты НДС горных пород позволили оценить устойчивость междукамерных целиков и кровли камер с учетом структурного ослабления массива ( $K_c = 0,4-0,8$ ). В качестве оценочных критериев прочности пород использовались теории наибольших нормальных сжимающих и растягивающих напряжений и Кулона-Мора [9-11]. Коэффициент запаса

устойчивости ( $K_y$ ) определялся как отношение прочности массива к действующему напряжению с учетом структурного ослабления.

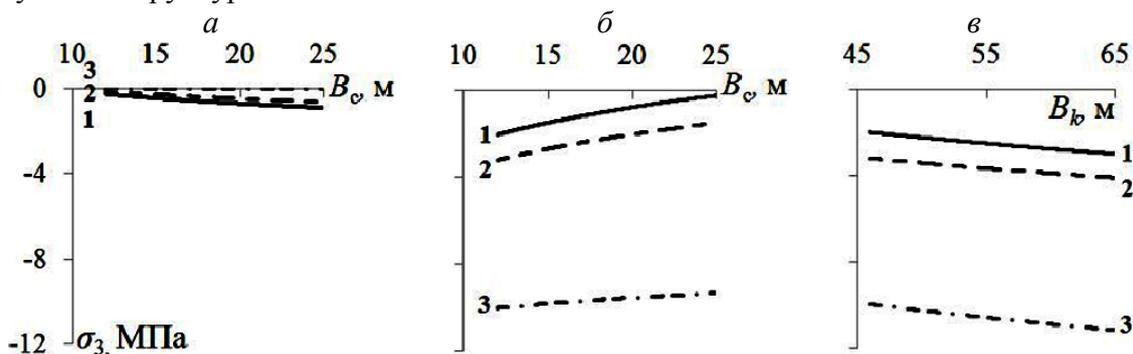


Рис. 6. Изменение главных минимальных напряжений: а, б – в центральной части целиков и в кровле камеры соответственно в зависимости от  $B_c$  при  $B_k$  36-46 м; в – в кровле камеры в зависимости от  $B_k$  при  $B_c = 12$  м: 1 – тектоническая модель; 2 – геостатическая; 3 – гравитационная

При определении показателя устойчивости ( $K_y$ ) были приняты следующие исходные данные (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Прочностные свойства горных пород

Тип породы	Угол внутреннего трения ( $\varphi$ ), град,	Сцепление (C), МПа	Предел прочности породы на сжатие ( $\sigma_{сж}$ ), МПа	Предел прочности породы на растяжение ( $\sigma_p$ ), МПа
Порода – I	40	24	120	12
Порода – II	40	16	80	6

Значения  $K_y < 1$  характеризуют области запределного деформирования пород.

Анализ результатов расчетов  $K_y$  показал следующее.

Повышенная устойчивость ( $K_y > 1$ ) междукамерных целиков с размерами  $B_c = 12-25$  м по критерию Кулона-Мора в большей степени характерна для тектонической и геостатической моделей геосреды при сцеплении пород более 20 МПа и структурном ослаблении массива  $K_c = 0,4-0,8$ . В варианте с гравитационным типом геомеханических условий разработки при  $K_c \leq 0,6$  прочность целиков резко снижается ( $K_y < 1$ ). Сохранность целиков при увеличении ширины камеры до 60-65 м и соответственно пролета отработки от 160 до 220 м при  $K_c \leq 0,6$  обеспечивается в тектонически напряженных массивах при  $B_c$  не менее 16 м и в условиях равнокомпонентного типа геосреды при  $B_c \geq 20$  м. В гравитационной модели с ростом  $B_k$  породы междукамерных целиков с параметрами  $B_c = 12-25$  м находятся в запределном состоянии.

Оценка прочности кровли камер по критерию растягивающих усилий показала, что за счет значительного бокового давления ( $q$ ) в вариантах с тектоническим и геостатическим распределением исходных напряжений в массиве, налегающая толща пород находится в устойчивом состоянии  $K_y > 1$ . В условиях с  $q = 0,283$  потеря устойчивости пород кровли значительна и в большей степени относится к камерам увеличенной длины.

Для рассматриваемых типов пород сохранность междукамерных целиков и пород кровли камер обеспечивается при следующих параметрах геотехнологии:

- для тектонической модели –  $B_c \geq 16$  м,  $B_k \leq 60-65$  м,  $L_{p.o} \leq 220$  м;
- для геостатической –  $B_c \geq 20$  м,  $B_k \leq 50$  м,  $L_{p.o} \leq 190$  м;
- для гравитационной –  $B_c \geq 25-30$  м,  $B_k \leq 30-40$  м,  $L_{p.o} \leq 130-160$  м.

### Выводы

1. Выполненный комплекс исследований влияния типа геомеханических условий разработки на НДС горных пород при этажно-камерной выемки показал, что устойчивость междукамерных целиков и кровли камер зависит от соотношения между действующими напря-

жениями в массиве и деформационно-прочностными свойствами пород с учетом их нарушенности. Доказано, что высокие исходные тектонические напряжения, действующие в массиве способствуют повышению устойчивости целиков и пород кровли камер. Установлены наиболее безопасные размеры целиков, камер и пролета отработки, а также область применения геотехнологии для каждого из вариантов выделенных геомеханических моделей.

2. Существенная потеря устойчивости целиков и кровли камер в условиях рассматриваемой геотехнологии с увеличенными размерами  $B_k$ , структурным ослаблением  $K_c \leq 0,6$  и пределами прочности пород на срез ( $C$ ) и растяжение ( $\sigma_p$ ) менее 15-20 и 6,0 МПа соответственно, исключает возможность ее применения в массивах с преобладанием вертикальных напряжений над горизонтальными ( $q = 0,283$ ).

#### Список литературы

1. Бронников Д.Н. Разработка руд на больших глубинах / Д.Н. Бронников, Н.Ф. Замесов, Г.И. Богданов / М.: Недра, 1982.
2. Неверов С.А. Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния. Ч. 1: Современные представления о напряженном состоянии массивов горных пород с ростом глубины / С.А. Неверов / ФТПРПИ. – 2012. – № 2.
3. Неверов С.А. Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния. Ч. 2: Тектонотипы рудных месторождений и модели геосреды / С.А. Неверов / ФТПРПИ. – 2012. – № 3.
4. Назарова Л.А. Освоение камерной системы разработки с обрушением кровли на Николаевском руднике / Л.А. Назарова, А.М. Фрейдин, А.А. Неверов / ФТПРПИ. – 2005. – № 4.
5. Фрейдин А.М. Современные способы разработки рудных залежей с обрушением на больших глубинах / А.М. Фрейдин, А.А. Неверов, С.А. Неверов, П.А. Филиппов / Монография. Рос. акад. наук, Сиб. отд, Ин-т горного дела. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 151 с.
6. Неверов А.А. Геомеханическое обоснование комбинированного способа отработки пологих рудных залежей с закладкой и обрушением под охраняемыми объектами / А.А. Неверов, С.А. Неверов, Е.В. Денисова / Вестник Кузбасского гос. тех. университета, 2011 № 5. с. 31-36.
7. Фрейдин А.М. Подземная разработка рудных месторождений / А.М. Фрейдин, А.А. Неверов, С.А. Неверов / Учебное пособие.- Под редакцией чл.-корр. РАН В.Н. Опарина. – Новосибирск.: ИГД СО РАН, 2012. – 372 с.
8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. / О. Зенкевич / – М.: Мир, 1975.
9. Литвинский Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов / Г.Г. Литвинский / Монография. – ДонГТУ. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 207 с.
10. Фрейдин А.М. Устойчивость горных выработок при системах поэтажного обрушения / А.М. Фрейдин, А.А. Неверов, С.А. Неверов, П.А. Филиппов / ФТПРПИ. – 2008. – №1.
11. Фрейдин А.М. Геомеханическая оценка горнотехнической ситуации на золоторудном месторождении «Макмал» / А.М. Фрейдин, А.А. Неверов, С.А. Неверов / ФТПРПИ. – 2009. – №5.