

# ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВАРИАНТОВ ПОДЭТАЖНОГО ОБРУШЕНИЯ С РОСТОМ ГЛУБИНЫ В УСЛОВИЯХ ТЕКТОНИЧЕСКОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ<sup>1</sup>

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

В работе изложены сравнительные результаты численного моделирования напряженного состояния массива горных пород с понижением горизонта очистной выемки при отработке месторождений полезных ископаемых системами подэтажного обрушения с торцовым и площадно-торцовым выпуском руды. Установлена предельная глубина освоения геотехнологий в выделенных геомеханических условиях отработки.

## Введение

Большинство крупных подземных рудников Сибири, Урала и Дальнего Востока ведут добычу руд на глубинах свыше 500 м. В Норильском регионе глубина разработок достигла 1500 м, Горной Шории – 800 м, на Дальнем Востоке – 900 м.

Постоянное понижение горных работ на все более глубокие горизонты сопровождается ухудшением горнотехнических и геомеханических условий разработки, возникают трудности в выборе рациональных параметров добычи и обеспечении сохранности выработок горизонтов выпуска. В подобных условиях массив руд и пород нередко переходит в предельное состояние и разрушается в статической и динамической формах. Все эти явления влекут за собой трудности в обеспечении безопасной выемки месторождений и требуют прогнозирования напряженно-деформированного состояния разрабатываемого массива.

При отработке железорудных месторождений, а также залежей сложенных рудами средней ценности и качества, наибольшее распространение получили системы подэтажного обрушения. В зарубежной практике, на рудниках Швеции, Канады, США, Чили, Замбии и др., имеются успешные примеры освоения этих геотехнологий на больших глубинах [1]. Однако область их эффективного применения все еще до конца не изучена.

Безопасное освоение геотехнологии определяется сохранностью горных выработок на весь срок их службы. В связи с этим, рассматривается задача по определению предельной глубины освоения системы разработки подэтажного обрушения с торцовым и, нового варианта этой геотехнологии, с площадно-торцовым выпуском руды (рис. 1), путем установления наиболее слабых элементов горных конструкций.

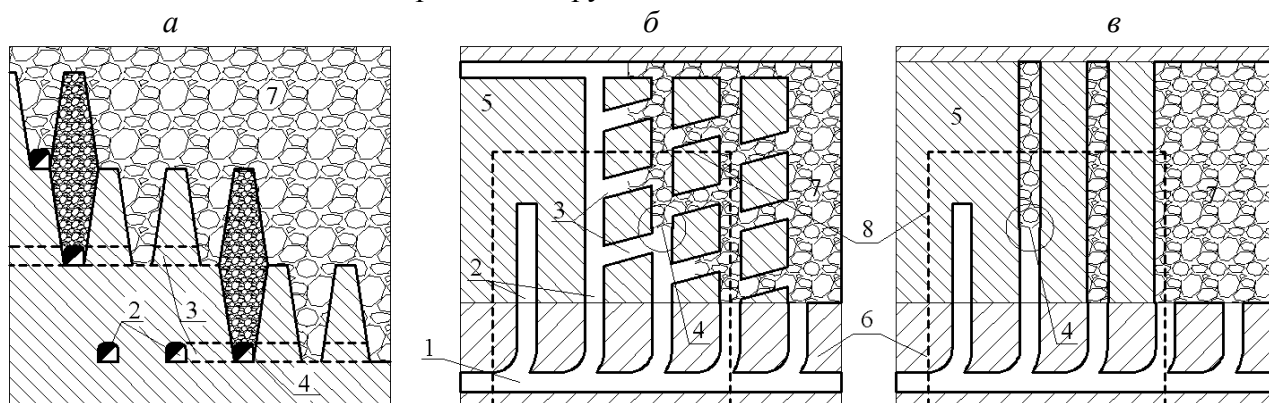


Рис. 1. Технология подэтажного обрушения: *а* – общий вид; *б* – горизонт подготовки по площадно-торцовой схеме; *в* – горизонт подготовки по торцовой схеме; 1 – подэтажные штреки; 2 – подэтажные буро-доставочные орты; 3 – погрузочные заезды; 4 – очистной забой; 5 – рудный массив; 6 – породный массив; 7 – обрушенные вмещающие породы; 8 – область исследования

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

За основу создания нового варианта системы разработки принята классическая схема с торцовым выпуском руды. Сущность поэтажного обрушения с подготовкой горизонта выпуска по площадно-торцовой схеме заключается в одновременном выпуске отбитой руды по площади слоя и из его торца. Этим исключаются недостатки торцового выпуска – наблюдается рост показателей извлечения и обеспечивается вентиляция очистных забоев за счет общешахтной депрессии. Из основных особенностей отметим, что количество погрузочных заездов, находящихся одновременно в очистной выемке, регламентировано и не превышает более двух выработок (одна предназначена для вентиляции, другая находится в процессе проходки) для исключения высокой изрезанности горизонта доставки. Технологические процессы включают в себя послонную отбойку и выпуск руды из торцов буро-доставочного орта и погрузочного заезда.

### Постановка задачи и граничные условия

В качестве основного метода решения поставленной задачи использовался МКЭ, позволяющий эффективно оценивать напряженное состояние массива пород в любой его точке с учетом неоднородности и конструктивной (геометрической) сложности системы разработки [2]. Освоение вариантов системы разработки рассматривалось на примере выемки мощных крутопадающих залежи Горной Шории, где преобладающими по величине являются горизонтально ориентированные напряжения, превышающие  $\gamma H$  в 1,3-2,5 раза.

Моделирование механического поведения массива пород проводилось в предположении объемного напряженного состояния. Руда и вмещающие породы имитировались упругими, изотропными, линейно-деформируемыми, однородными материалами (табл. 1), на границе контактов которых приняты условия жесткого сцепления.

Таблица 1. Механические свойства моделируемых пород

Показатель	Рудный массив	Породный массив	Обрушенный массив
Объемный вес ( $\gamma$ ), т/м <sup>3</sup>	3,7	2,8	2,0
Модуль Юнга ( $E$ ), ГПа	60	50	5
Коэффициент Пуассона ( $\mu$ )	0,25	0,26	0,42

Значения действующих напряжений в нетронутом массиве горных пород (табл. 2) соответствуют натурным замерам, выполненным на Шерегешском и Таштагольском рудниках [3], на более глубоких горизонтах – прогнозным данным на базе типизации рудных месторождений по виду напряженного состояния [4-5].

Границы геомеханической модели (рис. 2) определены в соответствии с принципом Сен-Венана, согласно которого зона влияния горных разработок распространяется на расстояние не более трех максимальных размеров области ведения горных работ вглубь массива и не оказывает влияние на исходные краевые условия.

Таблица 2. Начальное напряженное состояние массива пород

Напряжения, МПа	Глубина горных работ ( $H$ ), м		
	600	1000	1500
	$\sigma_y < \sigma_x \leq \sigma_z$	$\sigma_y < \sigma_x \leq \sigma_z$	$\sigma_y \approx \sigma_x \approx \sigma_z$
Вертикальные ( $\sigma_y = \gamma H$ )	$\gamma H$	$\gamma H$	$\gamma H$
Горизонтальные вкрест простирания ( $\sigma_x = q_x \times \gamma H$ )	$1,8\gamma H$	$1,6\gamma H$	$1,1\gamma H$
Горизонтальные по простиранию ( $\sigma_z = q_x \times \gamma H$ )	$2,5\gamma H$	$2,0\gamma H$	$1,3\gamma H$

Решение задачи в упругой постановке обусловлено высокой «хрупкостью» горных пород, в которых практически отсутствует возможность проявления реологических свойств и которые разрушаются в течение короткого промежутка времени.

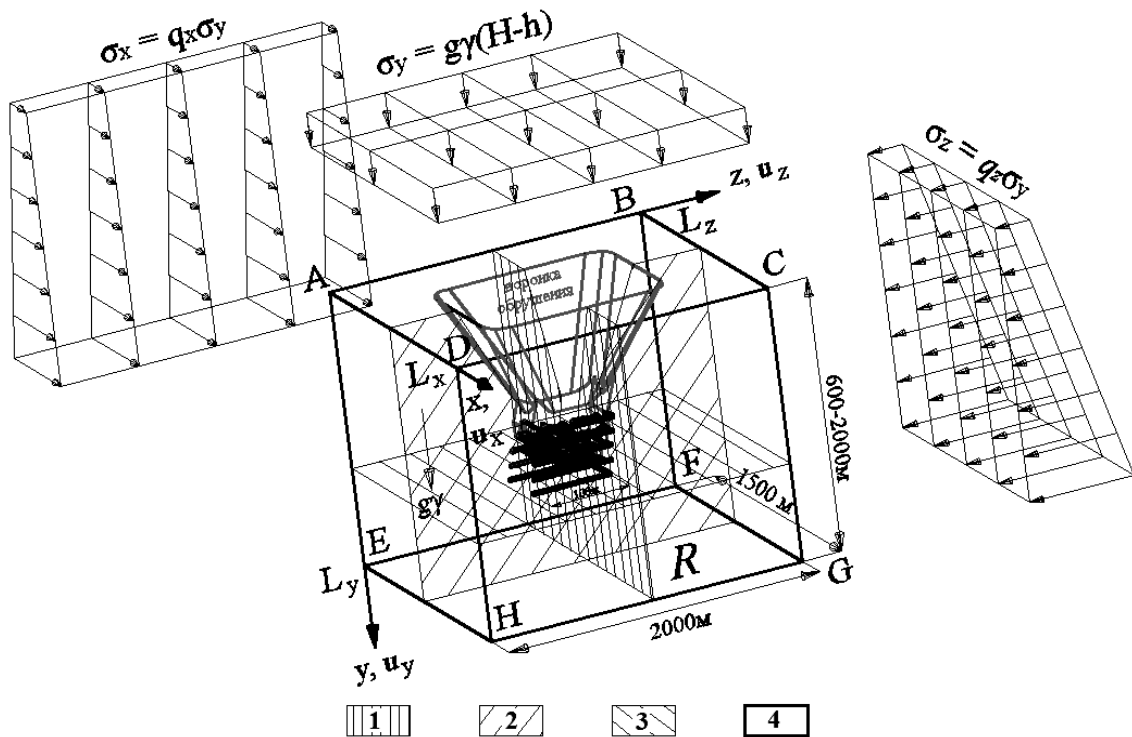


Рис. 2. Расчетная схема к определению НДС массива пород: 1 – область разреза по центральной части обрабатываемой панели вкрест простирания залежи; 2 – тоже по простиранию залежи; 3 – тоже по горизонту выпуска и доставки руды; 4 – расчетная область  $R$

Детализированная твердотельная конструкция системы разработки, являющаяся составной частью моделируемой горнотехнической ситуации приведена на рис. 3.

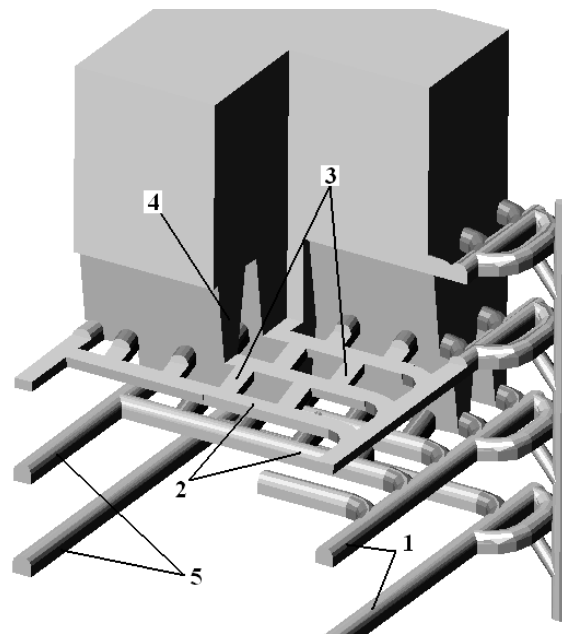


Рис. 3. Моделируемая конструкция системы разработки: 1 – транспортный штрек; 2 – буродоставочный орт; 3 – погрузочные заезды; 4 – слой отбитой руды; 5 – вентиляционный штрек

Расчетная область  $R$  (см. рис. 2) представляет собой куб размером  $1500 \times 2000 \times 2000$  м с параметрами  $(0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_z)$ , в которой выполняются следующие уравнения: равновесия:

$$\sigma_{ij,j} + pF_i = 0, \quad (1)$$

Коши:

$$\varepsilon_{ij} = 0,5(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (2)$$

обобщенный закон Гука:

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda\theta\delta_{ij} \quad (3)$$

и граничные условия:

$$\text{на плоскости } ABCD - \sigma_y(0, x, z) = \gamma g(H - h), \quad \tau_{xy}(0, x, z) = \tau_{zy}(0, x, z) = 0; \quad (4)$$

$$EFGH - u_y(L_y, x, z) = 0, \quad \tau_{xy}(L_y, x, z) = \tau_{zy}(L_y, x, z) = 0; \quad (5)$$

$$BCGF - \sigma_z(L_z, y, x) = q_z \sigma_y, \quad \tau_{xz}(L_z, y, x) = \tau_{yz}(L_z, y, x) = 0; \quad (6)$$

$$ADHE - u_z(0, y, x) = 0, \quad \tau_{xz}(0, y, x) = \tau_{yz}(0, y, x) = 0, \quad (7)$$

$$ABFE - \sigma_x(0, y, z) = q_x \sigma_y, \quad \tau_{yx}(0, y, z) = \tau_{zx}(0, y, z) = 0; \quad (8)$$

$$DCGH - u_x(L_x, y, z) = 0, \quad \tau_{yx}(L_x, y, z) = \tau_{zx}(L_x, y, z) = 0; \quad (9)$$

где  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений ( $\sigma_y, \sigma_x, \sigma_z$ , и  $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$  – соответственно вертикальная, горизонтальные нормальные и касательные компоненты тензора напряжений);  $pF_i = \gamma g \delta_{ij}$  – объемные силы;  $\gamma$  – плотность пород;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензора деформаций ( $\varepsilon_y, \varepsilon_x, \varepsilon_z$  и  $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$  – соответственно вертикальная, горизонтальные главные линейные и угловые компоненты тензора деформаций);  $u_{i,j}$  – компоненты вектора перемещений ( $u_y, u_x, u_z$  – вертикальная и горизонтальные компоненты вектора перемещений);  $\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$  – относительная объемная деформация;  $G$  и  $\lambda$  – параметры Ламе;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $q$  – коэффициент бокового давления;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $H$  – глубина разработки;  $h$  – расстояние от верхней границы модели до горизонта очистных работ.

Результаты расчетов приводятся в виде изолиний главных напряжений (МПа): за максимальное напряжение принято  $\sigma_1$ , за минимальное –  $\sigma_3$ , растяжение – со знаком «минус». Напряженное состояние массива пород оценивалось в области влияния очистного забоя рабочей панели по горизонту выпуска и доставки руды (рис. 1б, в).

Основные параметры моделируемой горнотехнической ситуации: мощность залежи – 50 м; количество подэтажей в одновременной работе – 2; угол падения –  $70^0$ ; высота подэтажа – 20 м; расстояние между буро-доставочными ортами – 14 м; расстояние между погрузочными заездами – 14 м. Конструктивное исполнение вариантов системы разработки с подобными параметрами принято по условию обеспечения максимальных показателей полноты и качества извлечения запасов из недр, более детальные исследования которых приведены в работе [6].

### Результатов исследований

Рудные панели, в представленных вариантах, находится в весьма неоднородной по напряженному состоянию области с зонами сжатия и растяжения (рис. 4, 5).

В условиях подготовки горизонта выпуска по площадно-торцовой схеме отмечается, что в наиболее неблагоприятной ситуации находятся борта и кровля погрузочных заездов, непосредственно прилегающих к очистному забою, в которых формируются растягивающие напряжения. Величина их изменяется, в зависимости от глубины разработок, от 0 до -4 МПа (рис. 5).

Анализируя НДС массива в районе обрабатываемого подэтажа в условиях площадно-торцового выпуска можно отметить, что напряжения в зоне заездов изменяются от сжатия в кровле к растяжению в бортах. Максимальная концентрация сжимающих напряжений  $\sigma_1$  в них составляет при  $H = 600, 1000$  и  $1500$  м соответственно 30-50, 60-80 и 65-90 МПа. В стенках погрузочных заездов по направлению к буро-доставочному орту напряжения  $\sigma_3$  колеблются от  $0 \div -4$  МПа. На глубине 1500 м в кровле заездов величина напряжений  $\sigma_1$  превышает значение 100 МПа. Неблагоприятная ситуация наблюдается в местах сопряжения буро-доставочных ортов с погрузочными заездами и в торцовой зоне выпуска руды ( $\sigma_3 = -4 \div -8$  МПа). Давление на кровлю подэтажного орта несколько ниже, чем в погрузочном заезде,  $\sigma_1$  изменяются от 40 до 90 МПа.

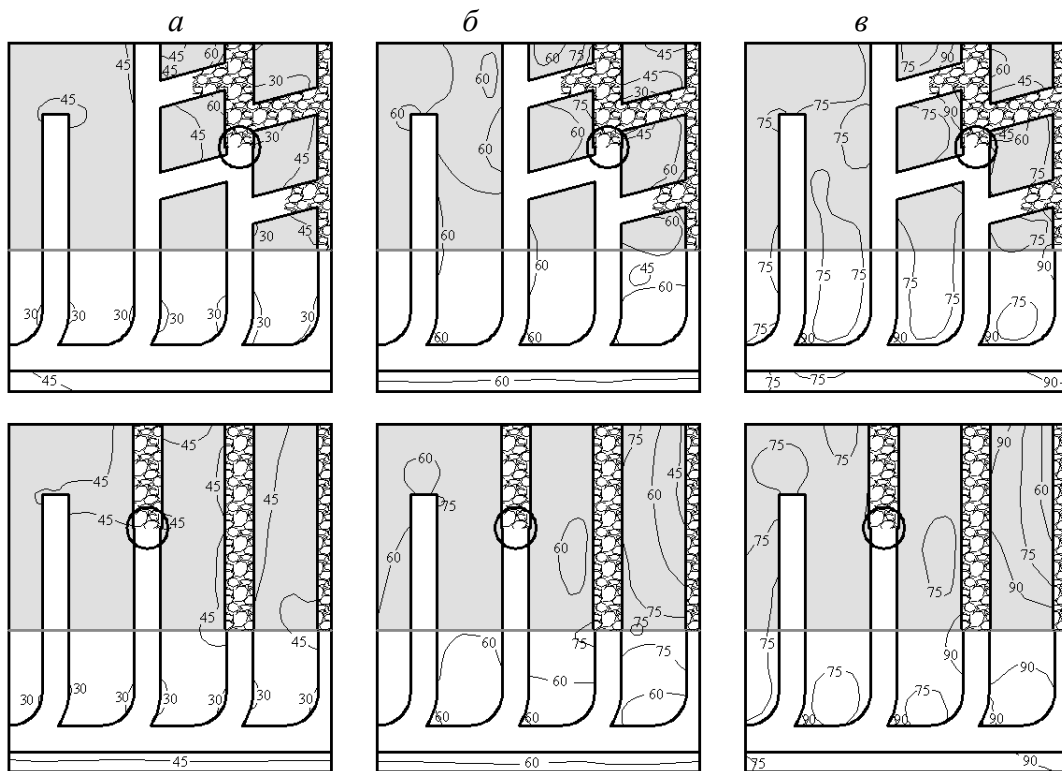


Рис. 4. Характер распределения главных максимальных напряжений  $\sigma_1$  в массиве пород:  
 а) при глубине горных работ  $H = 600$  м; б)  $H = 1000$  м; в)  $H = 1500$  м

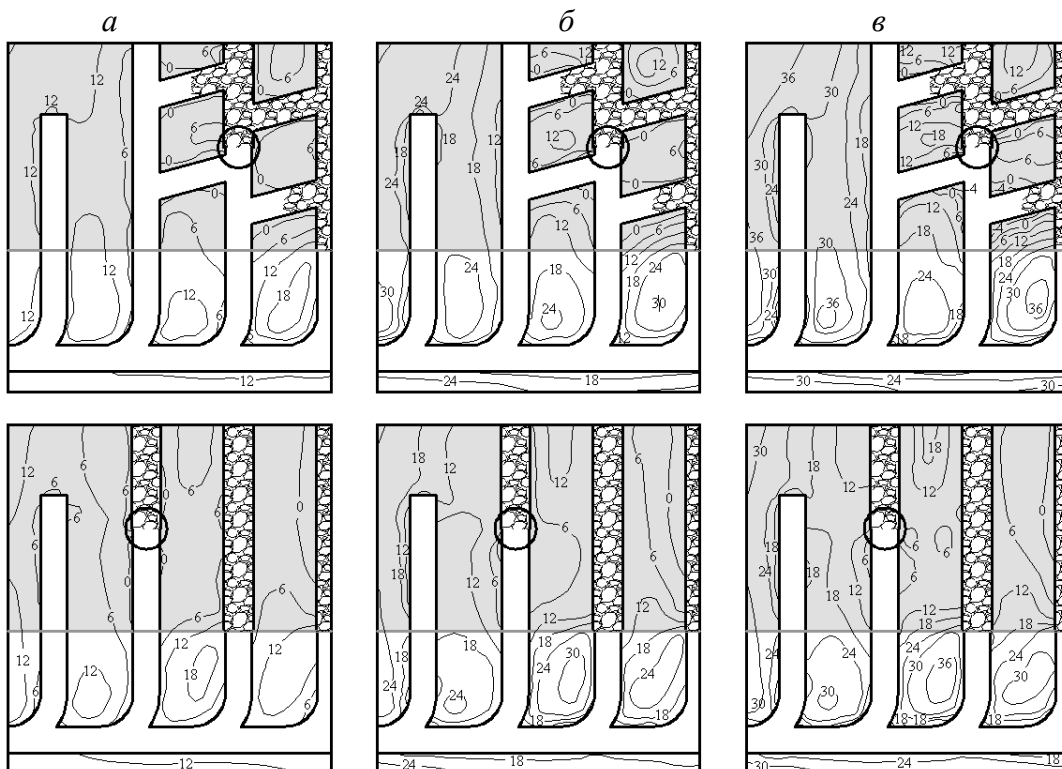


Рис. 5. Характер распределения главных минимальных напряжений  $\sigma_3$  в массиве пород:  
 а) при глубине горных работ  $H = 600$  м; б)  $H = 1000$  м; в)  $H = 1500$  м

Оценка результатов расчетов НДС массива на уровне обрабатываемого горизонта при торцовом выпуске, позволяет отметить следующее. В выработках практически отсутствуют

зоны растяжения. Величина максимальной нагрузки в кровле не превышает 80 МПа. Высокая концентрация напряжений наблюдается в области выпуска руды. Напряжения  $\sigma_1$  в бортах ортов находятся на уровне 30-80 МПа. В целом, в аналогичных условиях, напряжения при торцовой подготовке горизонта выпуска ниже, чем при площадно-торцовой схеме на 15 - 20 % (см. рис. 4, 5).

Характер распределения максимальных сжимающих и растягивающих напряжений в плоскости вкрест простирания залежи представлен на рис. 6. В центральной части отбиваемого слоя для торцового выпуска и в области влияния погрузочных заездов при площадно-торцовой подготовке залежи характерно наличие растягивающих напряжений соответственно до -2 и -4 МПа. Величина напряжений  $\sigma_1$  в ромбовидных панелях, отрезанных от рудного массива, изменяется по вертикали в верхней части от 10 до 65 МПа и в нижней – до 90 МПа. Максимальные значения растягивающих усилий наблюдаются в центре панелей, которые постепенно к ее периферии переходят в сжимающие. Для обоих вариантов вне зоны влияния очистных работ характер распределения напряжений приближается к исходному полю, действующему в нетронутом массиве.

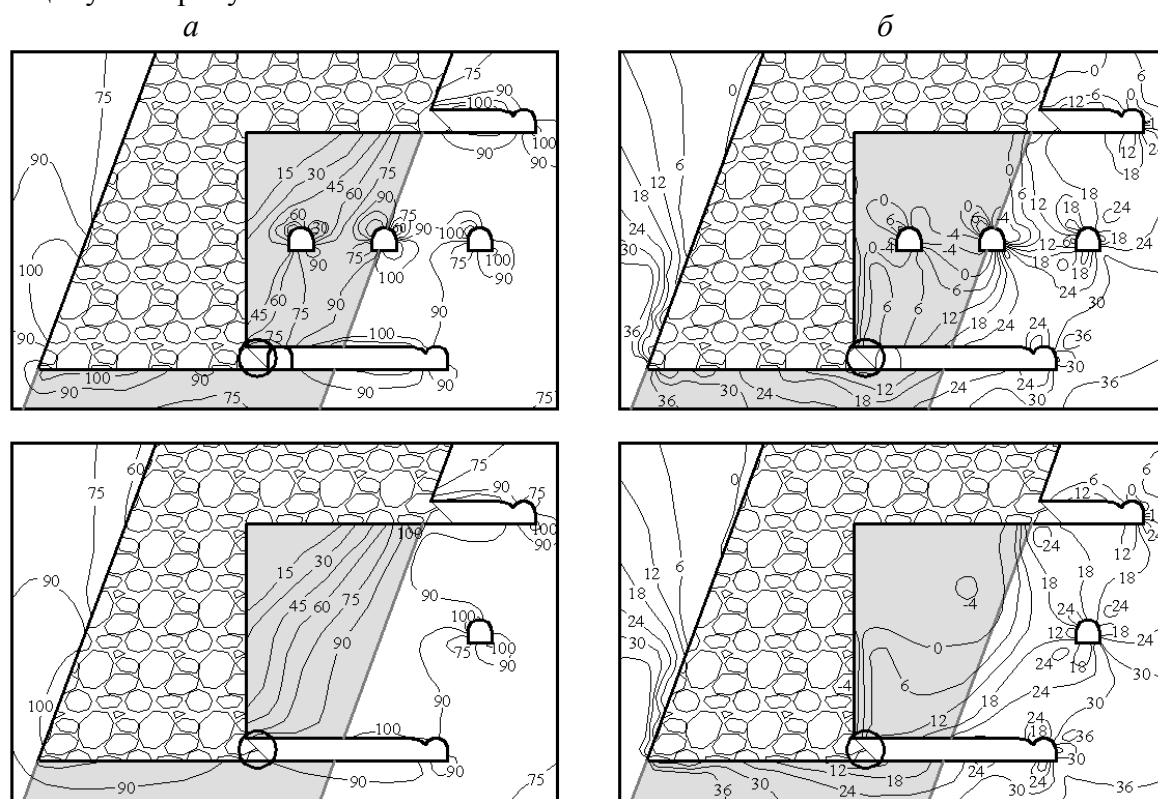


Рис. 6. Характер распределения главных напряжений в крест простирания залежи на глубине 1500 м: а)  $\sigma_1$ ; б)  $\sigma_3$

Выполненная геомеханическая оценка в границах исследуемой области очистных работ, показала, что с увеличением глубины разработки состояние горных пород приближается к предельному, при этом наблюдаются обширные зоны с растягивающими напряжениями. В наиболее сложных условиях находятся заезды при площадно-торцовом выпуске и сопряжения буро-доставочных ортов с откаточным штреком для обоих вариантов. В этих местах, возможно, ожидать развития трещин, заколообразования и разрушения.

Основными критериями оценки прочности горных пород в работе приняты теория максимальных нормальных растягивающих напряжений и показатель устойчивости ( $K_y$ ). Последний выражается через уравнение прямолинейной огибающей предельных кругов Мора (критерий Кулона-Мора) с учетом структурного ослабления ( $K_c$ ), характерного для рудников Горной Шории:

$$\sigma_3 \leq [\sigma_{пред}] K_c \quad (10)$$

$$K_y = \frac{\sin \varphi (\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \times C \times ctg \varphi)}{\sigma_1 - \sigma_3} > 1 \quad (11)$$

где  $\sigma_{пред}$  – предел прочности пород на растяжение, МПа;

$C$  – сцепление, МПа;

$\varphi$  – угол внутреннего трения горных пород, град.

Участки массива горных пород, наиболее подверженные разрушению в соответствии с вышеприведенными критериями приведены на рис. 7.

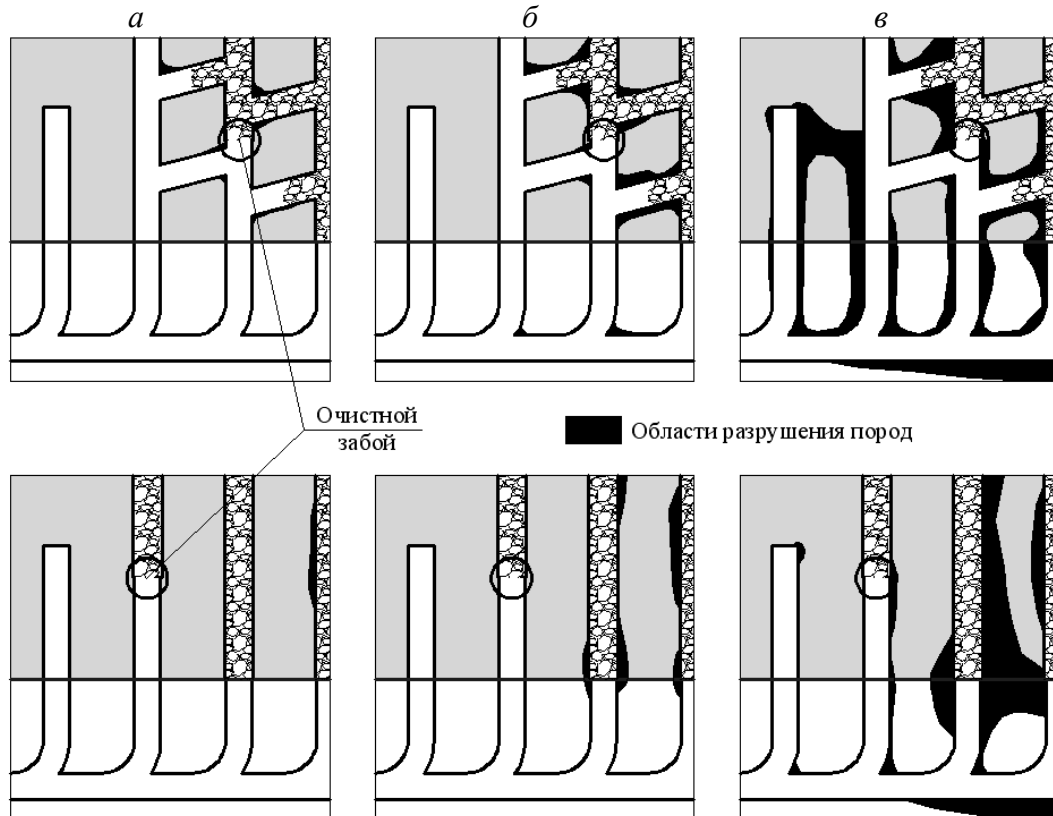


Рис. 7. Участки ожидаемых разрушений выработок: а)  $H = 600$  м; б)  $H = 1000$  м; в)  $H = 1500$  м

В условиях площадно-торцового выпуска руды на глубине 1500 м характерно проявление растягивающих напряжений, которые распространены практически по всей длине буродоставочных ортов и погрузочных заездов. В связи с тем, что срок существования погрузочных заездов не превышает 10-15 смен, весьма вероятно ожидать их сохранность на глубинах до 1000-1270 м.

Устойчивость выработок при торцовой технологии выемки руды с учетом их крепления на глубинах свыше 1000 м, находится на достаточном уровне и не вызывает сомнений.

#### Заключение

Концентрации максимальных сжимающих напряжений  $\sigma_1$  во всех случаях образуются в окрестностях очистной выемки. Формирование зон растяжения в местах сопряжения буродоставочных ортов с погрузочными заездами при площадно-торцовой схеме подготовки свидетельствует о возможной потере устойчивости пород.

На глубине 600 м в подготовительно-нарезных выработках при торцовом и площадно-торцовом выпуске практически не наблюдается растягивающих усилий, и максимальные касательные напряжения не превышают предельных значений.

Горные работы на глубинах свыше 1000 м характеризуются как приемлемые и предельно возможные, соответственно для торцовой и площадно-торцовой схем подготовки. Нагрузки,

возникаемые в элементах горных конструкций, соизмеримы с длительным пределом прочности горных пород.

Повышенное сжатие и растяжение вокруг нарезных выработок и очистного забоя на глубинах 1500 м при площадно-торцовой технологии, свидетельствует о разрушении пород. Технологическое исполнение системы подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды в выделенных условиях больших глубин, позволяет безопасно использовать ее без видимых изменений.

Выполненными расчетами установлено, что варианты системы разработки подэтажного обрушения с торцовым и площадно-торцовым выпуском руды, в условиях тектонического поля напряжений Шерегешевского и Таштагольского месторождений, могут быть успешно реализованы до глубин 1530 и 1270 м соответственно. Основным условием их приемлемости является крепление на горизонтах свыше 1000 м буро-доставочных ортов, их сопряжений с доставочными штреками и погрузочных заездов. В случаях высокой нарушенности горных пород площадно-торцовая технология способна гибко трансформироваться в торцовую схему выпуска руды при некотором ухудшении показателей извлечения.

#### Список литературы

1. Замесов Н.Ф., Айнбиндер И.И., Бурцев Л.И., Родионов Ю.И., Овчаренко О.В. Развитие интенсивных методов добычи руд на больших глубинах. — М.: ИПКОН РАН СССР — 1990. — 234 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975.
3. Курленя М.В., Ерёмченко А.А., Шрепп Б.В. Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири. — Новосибирск: Наука, 2001. — 230 с.
4. Неверов С.А. Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния. Ч. I: Современные представления о напряженном состоянии массивов горных пород с ростом глубины / ФТПРПИ. — 2012. — № 2. с. 56-70.
5. Неверов С.А. Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния. Ч. II: Тектонотипы рудных месторождений и модели геосреды. / ФТПРПИ. — 2012. — № 3. с. 61-73.
6. Фрейдин А.М., Неверов С.А. Моделирование площадно-торцовой технологии выпуска руды под обрушенными породами / ФТПРПИ. — 2005. — № 5, с. 50 – 61.

## ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПРОГНОЗА РЕСУРСОВ УГОЛЬНОГО МЕТАНА

*Н.С. Полякова, Государственный ВУЗ «Национальный горный университет», Украина,  
Д.Н. Пимоненко, Институт геотехнической механики НАН Украины  
им. Н.С. Полякова, Украина*

Рассмотрены основные физико-механические (пористость, проницаемость, прочность, температура), газодинамические (газоносность, напряженное состояние) и геологические (мощность пород и углей, дислоцированность, глубина залегания, степень метаморфизма) факторы, влияющие на условия накопления угольного метана. В пределах Донецкого бассейна выделены три области, отличающиеся количеством и распределением метана в углепородном массиве.

Проблема промышленной добычи метана из угольных пластов и вмещающих пород успешно решается в ряде стран Западной Европы и Америки, и в первую очередь в США. Так, в конце 1996 года в США действовали 6700 скважин по добыче шахтного метана, а объем производства метана составил около 29 млрд. м<sup>3</sup>. Ежедневно добывается 79 млн. м<sup>3</sup> метана. В США шахтный метан добывается в основном в угольных бассейнах Сан Хуан, Блэк Уорнер и Аппалачи. В большинстве стран мира метан угольных месторождений рассматривается как самостоятельное полезное ископаемое и активно ведется его добыча.