

УДК 622.274.36/44

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ВЫРАБОТОК  
ВЫПУСКА РУДЫ ПРИ СИСТЕМАХ С ОБРУШЕНИЕМ**

**С. А. Неверов, А. А. Неверов**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Методом конечных элементов решена задача о напряженном состоянии массива горных пород в выработках выпуска при торцовой и площадно-торцовой схемах извлечения отбитой руды под обрушенными породами. Описаны особенности распределения напряжений в зонах их концентраций и разгрузки в зависимости от способа подготовки горизонта выпуска руды на глубинах до 1.5 км.

*Массив горных пород, торцовый и площадно-торцовый выпуск руды, глубина, напряженное состояние, устойчивость*

**ВВЕДЕНИЕ**

При выемке мощных рудных залежей черных и цветных металлов, горно-химического сырья более 30 % запасов обрабатывается системами с обрушением руды под налегающими породами. Среди геотехнологий этого класса наибольшее распространение на крупных зарубежных и отечественных подземных рудниках получил вариант подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды погрузочно-доставочными машинами (ПДМ).

При известных преимуществах этого способа разработки [1–3] ему свойственны существенные недостатки: сравнительно низкие показатели качества и полноты извлечения минерального сырья; трудности проветривания тупиковых забоев. В этой связи разработан вариант подготовки доставочного горизонта при геотехнологиях этого класса с выпуском отбитой руды из торцов забоев доставочных ортов и по площади из погрузочных заездов, позволяющий осуществлять вентиляцию выработок за счет общешахтной депрессии [4–7].

Выполненные исследования [2, 4, 7] показали, что площадно-торцовая технология выпуска отбитой руды под обрушенными породами по сравнению с торцовой позволяет сократить потери отбитой руды в 1.4–1.5 раза и снизить разубоживание на 30–35 %. Однако при этом проходятся дополнительные выработки — погрузочные заезды и соответственно возрастает нарушенность горизонта доставки руды.

Цель настоящей статьи — оценка устойчивости горных выработок при торцовой и площадно-торцовой технологии выпуска руды в зависимости от глубины подземных разработок.

Решение задачи осуществлялось на примере условий железорудных подземных рудников Горной Шории, в частности Шерегешевского месторождения.

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Для решения задачи выбран метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет анализировать напряженно-деформированное состояние (НДС) объектов, представленных различными материалами и самой различной формы с учетом неоднородностей и конструктивной сложности [8].

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

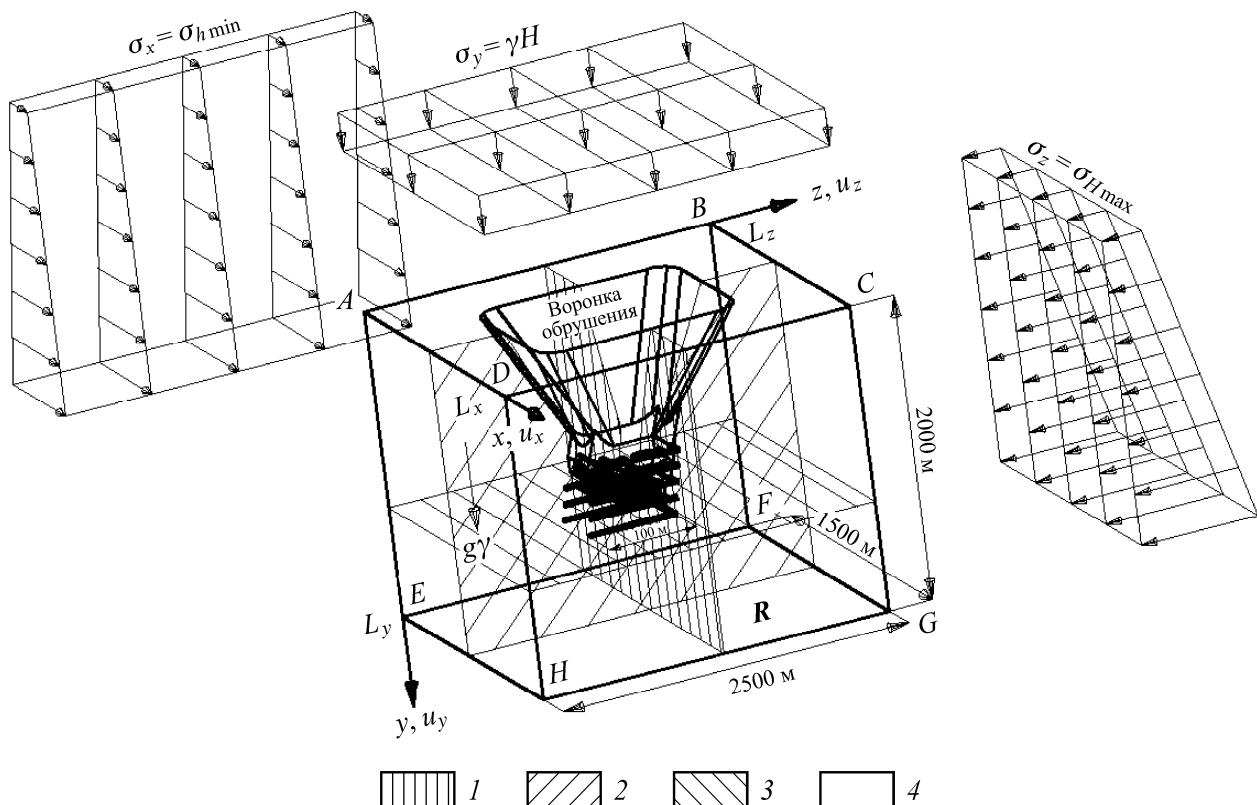


Рис. 1. Расчетная схема к определению НДС массива горных пород: 1 — область разреза по центральной части обрабатываемой панели вкрест простирания залежи; 2 — то же по простиранию залежи; 3 — то же по горизонту выпуска и доставки руды; 4 — расчетная область **R**

ТАБЛИЦА 1. Механические свойства моделируемых руд и пород

Показатель	Рудный массив	Породный массив
Объемный вес $\gamma$ , МН/м <sup>3</sup>	0.0363	0.0265
Модуль Юнга $E$ , МПа	60000	50000
Коэффициент Пуассона $\mu$	0.25	0.26

Основные значения тензора напряжений для глубин 600 м приняты по натурным замерам, выполненным на Шерегешском руднике [2], на более глубоких горизонтах — в соответствии с методикой прогнозной оценки естественного поля напряжений массива пород [9, 10].

Для района расположения месторождения характерны следующие геомеханические особенности:

- тектонотип месторождения — расчлененный рельеф, складчатая горная система с наличием тектонических нарушений различных рангов;
- развитая сейсмика и ярко выраженная блочность массива горных пород, невыдержанный тектонический режим нагружения геологических структур;
- в массиве месторождения преобладают горизонтальные напряжения, максимальные из которых ориентированы в субмеридиональном направлении (по простиранию залежей).

Эти особенности позволили отнести напряженное состояние массива горных пород Шерегешевского месторождения к двум моделям геосреды: геодинамической (до глубины 1000 м) и тектонической (на глубине более 1000 м) [10].

На глубине до 1000 м величины природного поля напряжений (МПа) определялись по следующим зависимостям (геодинамический тип напряженного состояния) [3]:

$$\sigma_{H \max} \approx \alpha \lambda^k \ln(\gamma H) - \delta; \quad (1)$$

$$\sigma_{h \min} \approx \frac{(\sigma_{H \max} + \sigma_v)}{2}; \quad (2)$$

$$\sigma_v \approx \gamma H, \quad (3)$$

где  $\sigma_{H \max}$ ,  $\sigma_{h \min}$  и  $\sigma_v$  — максимальные, минимальные горизонтальные и вертикальные напряжения;  $\alpha$  и  $\delta$  — эмпирические коэффициенты пропорциональности, установленные корреляционным анализом [2, 3],  $\alpha \approx 33$ ,  $\delta \approx 80$ ;  $\lambda$  — коэффициент бокового давления на соответствующей глубине (максимальный), принимается по натурным замерам или согласно графику в работе [3],  $\lambda = 1.8 \div 2.5$ ;  $k$  — эмпирический коэффициент, учитывающий деформационно-прочностные свойства горных пород,  $k = 0.2 \div 0.3$ ;  $\gamma$  — объемный вес пород, МН/м<sup>3</sup>;  $H$  — глубина залегания пород, м.

На глубине более 1000 м, с учетом особенностей тектонотипа геологических структур, напряженное состояние массива горных пород Шерегешевского месторождения удовлетворительно согласуется с тектонической моделью и определяется по следующим зависимостям:

$$\sigma_{H \max} = 2.8 e^{\kappa \lambda} \gamma H^{0.7}; \quad (4)$$

$$\sigma_{h \min} = (0.6 \div 0.85) \sigma_{H \max}; \quad (5)$$

$$\sigma_v \approx \gamma H. \quad (6)$$

Расчетные значения исходного поля напряжений в нетронutom массиве горных пород, принятые в анализе, приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Исходное напряженное состояние массива горных пород

Напряжения, МПа	Глубина горных работ $H$ , м		
	600	1000	1500
Вертикальные $\sigma_y = \sigma_v = \gamma H$	16.0	26.0	39.0
Горизонтальные вкост простирания $\sigma_x = \sigma_{h \min}$	25.0	38.0	44.0
Горизонтальные по простиранию $\sigma_z = \sigma_{H \max}$	34.0	50.0	55.0

Границы расчетной модели определены в соответствии с принципом Сен-Венана, согласно которому зона влияния горных разработок распространяется на расстояние не более трех максимальных размеров области ведения горных работ в глубь массива и не оказывает воздействия на исходные краевые условия. Упругая постановка задачи объясняется тем, что хрупкие высокомодульные породы не обладают в значительной степени реологическими свойствами, а менее крепкие — разрушаются в течение короткого промежутка времени.

Расчетная область  $R$  (см. рис. 1) представляет собой куб размером  $2500 \times 1500 \times 2000$  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:

$$\text{равновесия: } \sigma_{ij,j} + pF_i = 0, \quad (7)$$

$$\text{Коши: } \varepsilon_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (8)$$

$$\text{обобщенный закон Гука: } \sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda^* \theta \delta_{ij} \quad (9)$$

и граничные условия:

$$\text{на плоскости } ABCD — \sigma_y(0, x, z) = \gamma H, \quad \tau_{xy}(0, x, z) = \tau_{zy}(0, x, z) = 0; \quad (10)$$

$$EFGH — u_y(L_y, x, z) = 0, \quad \tau_{xy}(L_y, x, z) = \tau_{zy}(L_y, x, z) = 0; \quad (11)$$

$$BCGF — \sigma_z(L_z, y, x) = \sigma_{H \max}, \quad \tau_{xz}(L_z, y, x) = \tau_{yz}(L_z, y, x) = 0; \quad (12)$$

$$ADHE — u_z(0, y, x) = 0, \quad \tau_{xz}(0, y, x) = \tau_{yz}(0, y, x) = 0; \quad (13)$$

$$ABFE — \sigma_x(0, y, z) = \sigma_{h \min}, \quad \tau_{yx}(0, y, z) = \tau_{zx}(0, y, z) = 0; \quad (14)$$

$$DCGH — u_x(L_x, y, z) = 0, \quad \tau_{yx}(L_x, y, z) = \tau_{zx}(L_x, y, z) = 0, \quad (15)$$

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);  $u_i$  — 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:  $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ ,  $\lambda^* = \frac{E\mu}{(1-2\mu)(1+\mu)}$ ;  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Результаты расчетов приводятся в виде картин-изолиний главных ( $\sigma_1, \sigma_3$ ) и максимального касательного ( $\tau_{\max}$ ) напряжений (МПа). В качестве максимального напряжения принято  $\sigma_1$ , минимального —  $\sigma_3$ , растяжение — со знаком “минус”.

Для моделирования принят вариант подэтажного обрушения и следующие значения основных параметров геотехнологии: мощность залежи — 50 м; угол падения —  $70^\circ$ ; количество подэтажей в одновременной работе — 2; высота подэтажа — 20 м; расстояние между буро-

доставочными ортами — 14 м; расстояние между погрузочными заездами — 14 м. Конструктивное исполнение системы разработки с подобными параметрами принято из условия обеспечения максимальных показателей полноты и качества извлечения запасов из недр, установленных в [2, 4–7].

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Очистные панели и выработки доставочного горизонта при торцовой (верхний ряд I) и площадно-торцовой (нижний ряд II) схемах выпуска руды в анализируемых глубинах находятся в весьма неоднородных по напряженному состоянию областях с зонами сжатия и растяжения (рис. 2–6).

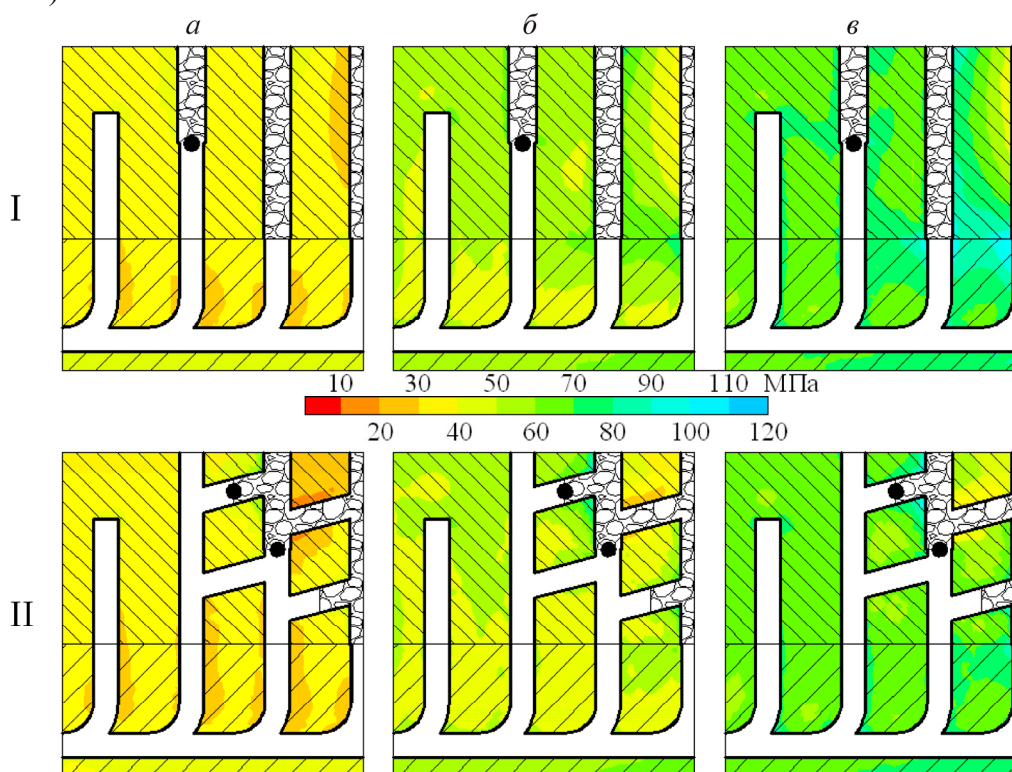


Рис. 2. Характер распределения главных максимальных напряжений  $\sigma_1$  в массиве горных пород на уровне горизонта выпуска: *a* — при глубине горных работ  $H = 600$  м; *б* —  $H = 1000$  м; *в* —  $H = 1500$  м; здесь и на рис. 3–7: ● — области анализа НДС массива горных пород

В варианте подготовки горизонта выпуска с площадно-торцовой схемой (II) отмечается, что в наиболее неблагоприятных условиях находится область сопряжения погрузочного заезда и буро-доставочного орта, непосредственно прилегающая к очистному забою (зона выпуска руды). В этой области наблюдается максимальное значение растягивающих усилий ( $\sigma_3 = -5 \div -10$  МПа). Наибольшая концентрация сжимающей компоненты  $\sigma_1$  — в кровле, изменяется в пределах 40–60, 60–90 и 70–120 МПа соответственно при  $H = 600$ , 1000 и 1500 м (см. рис. 2–6). В стенках погрузочных заездов по направлению к буро-доставочному орту напряжения  $\sigma_3$  колеблются от 0 до –5 МПа.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что на глубине 1500 м действующие напряжения  $\sigma_1$  в кровле заездов и ортов соизмеримы с пределом прочности пород на одноосное сжатие.

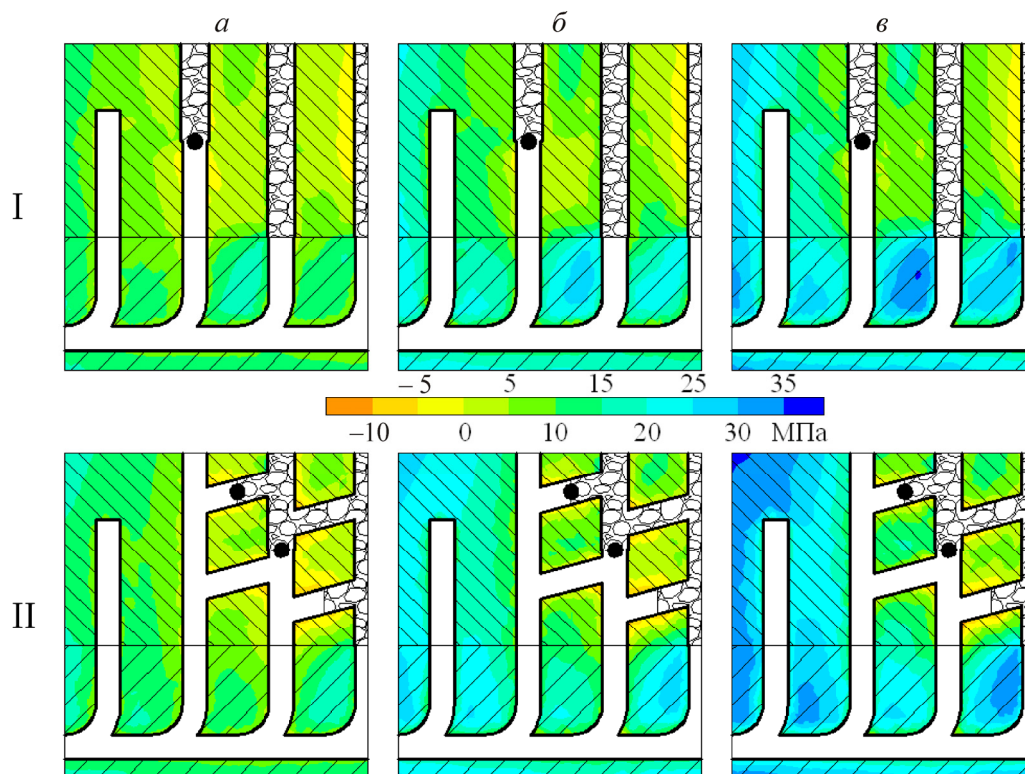


Рис. 3. Характер распределения главных минимальных напряжений  $\sigma_3$  в массиве пород на уровне горизонта выпуска: *a* — при глубине горных работ  $H = 600$  м; *б* —  $H = 1000$  м; *в* —  $H = 1500$  м

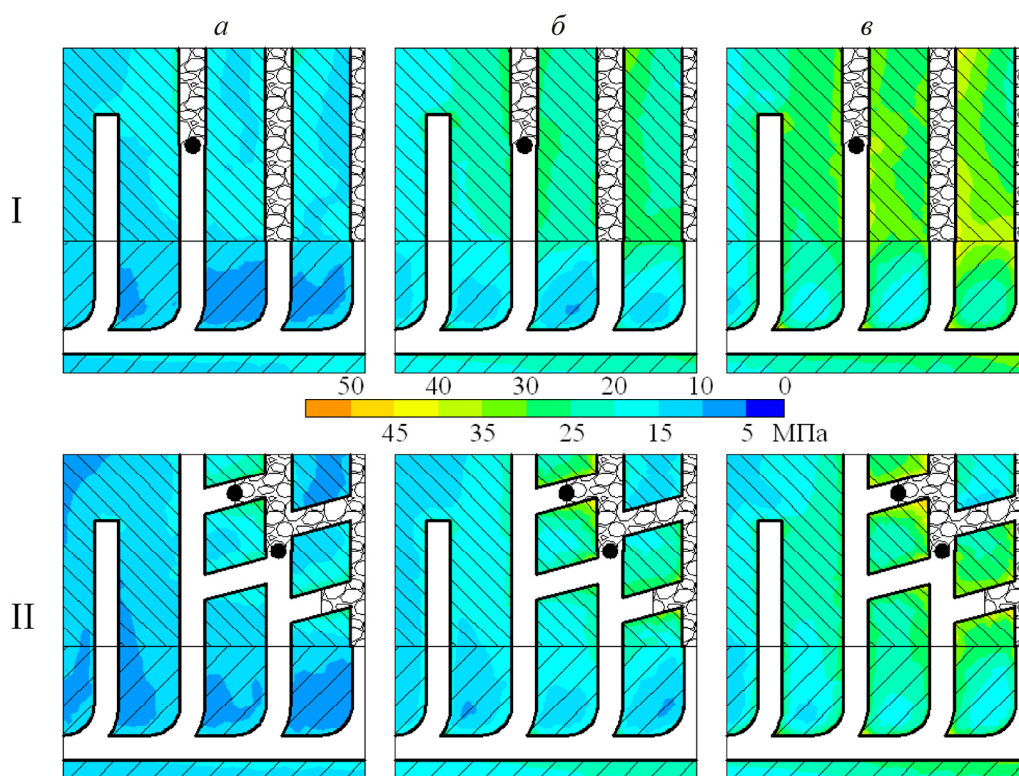


Рис. 4. Характер распределения максимальных касательных напряжений  $\tau_{\max}$  в массиве пород на уровне горизонта выпуска: *a* — при глубине горных работ  $H = 600$  м; *б* —  $H = 1000$  м; *в* —  $H = 1500$  м



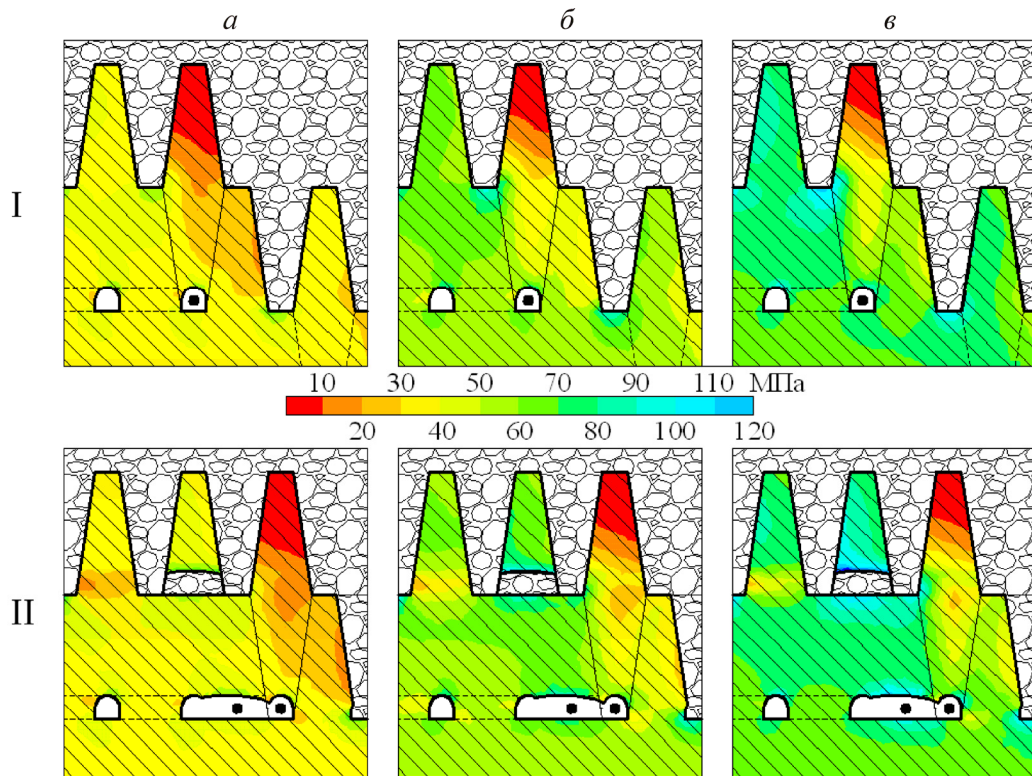


Рис. 5. Характер распределения главных максимальных напряжений  $\sigma_1$  в массиве пород по простиранию отбиваемого слоя: *a* — при глубине горных работ  $H = 600$  м; *б* —  $H = 1000$  м; *в* —  $H = 1500$  м

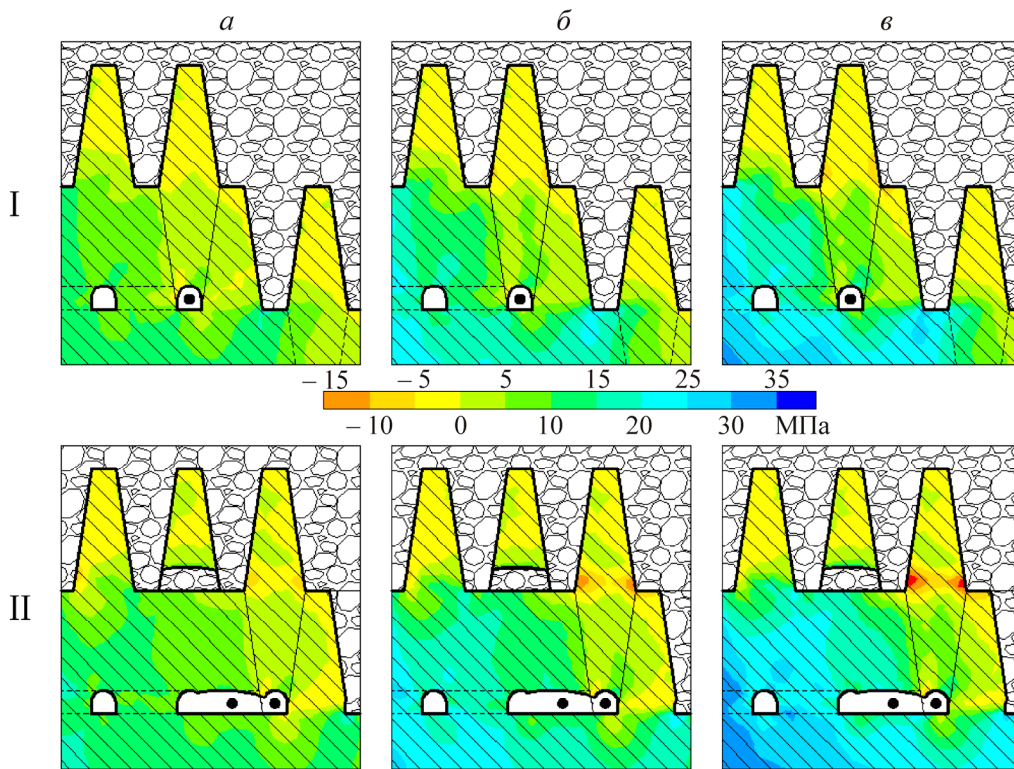


Рис. 6. Характер распределения главных минимальных напряжений  $\sigma_3$  в массиве пород по простиранию отбиваемого слоя: *a* — при глубине горных работ  $H = 600$  м; *б* —  $H = 1000$  м; *в* —  $H = 1500$  м

В пределах обрушаемого слоя руды на расстоянии 5 м от торца очистного забоя доставочного орта напряжения  $\sigma_1$  по высоте ромбовидной панели в направлении сверху вниз колеблются в диапазоне 5–40, 5–60 и 5–80 МПа соответственно для анализируемых глубин (рис. 5). Аналогично для центральной части панели растягивающие усилия  $\sigma_3$  составляют  $0 \div -3$ ,  $-3 \div -6$  и  $-5 \div -8$  МПа с постепенным переходом в нижней ее части в зону сжатия (см. рис. 6). Давление  $\sigma_1$  в кровле поэтажного буро-доставочного орта несколько ниже (в 1.1–1.2 раза), чем в погрузочном заезде, и увеличивается с ростом глубины (600–1500 м) от 40 до 90 МПа.

Обобщая результаты расчетов НДС массива горных пород при торцовой схеме подготовки доставочного горизонта, отметим следующие особенности. В выработках выпуска практически отсутствуют зоны растяжения. Значения максимальных сжимающих напряжений  $\sigma_1$  в кровле погрузочно-доставочных ортов достигают 50–60, 70–80 и 80–100 МПа, в бортах — 20–30, 40–50 и 60–70 МПа соответственно в рассматриваемых глубинах. В варианте площадно-торцового выпуска руды напряжения в сопоставимых участках на 10–20 % выше, чем при торцовой схеме.

Таким образом, выполненная геомеханическая оценка в границах исследуемой области очистных работ показала, что с увеличением глубины разработки до 1500 м состояние горных пород приближается к предельному, при этом наблюдаются обширные участки с растягивающими напряжениями. В наиболее сложных условиях находятся погрузочные заезды при площадно-торцовом выпуске и сопряжения их с буро-доставочными ортами. В этих участках и на сопряжениях ортов с доставочными штреками можно ожидать развитие трещин, заколообразование и разрушение.

### УСТОЙЧИВОСТЬ ВЫРАБОТОК

Наибольшее распространение при оценке устойчивости горных выработок получили механические теории, в рамках которых прочность пород определяется уровнем их напряженно-деформированного состояния [11–16]. Теории прочности представляют собой гипотезы о критериях, определяющих условия перехода породы в предельное состояние.

В качестве оценок прочности пород вокруг выработок в работе использовались:

1. Критерий Кулона–Мора, согласно которому разрушение происходит, когда действующее касательное напряжение становится равным пределу прочности породы на срез. При этом показатель устойчивости пород в массиве ( $K_y$ ) определялся из выражения [11–13, 16]:

$$K_y = [\sin \varphi (\sigma_1 + \sigma_3 + 2C \operatorname{ctg} \varphi)] / (\sigma_1 - \sigma_3) \geq 1$$
, где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  — главные максимальные и минимальные напряжения соответственно, действующие в массиве пород (получены из упругого решения), МПа;  $C$  — сцепление пород, МПа;  $\varphi$  — угол внутреннего трения пород, град.

2. Теория максимальных нормальных растягивающих напряжений — потеря прочности пород происходит, когда возникающие в массиве растягивающие усилия превосходят предельные их значения. Основанием ее использования является существенно разная прочность горных пород на сжатие и растяжение [11, 13, 16]. Коэффициент запаса устойчивости ( $K_3$ ) по данной теории находится как отношение прочности пород по растягивающей компоненте с учетом структурного ослабления к растягивающему напряжению в массиве.

При расчете  $K_y$  и  $K_3$  приняты средние значения деформационно-прочностных характеристик магнетитовой руды Шерегешевского месторождения с учетом коэффициента структурного ослабления  $K_c$ , равного 0.6:  $\varphi = 40^\circ$ ;  $C = 13$  МПа;  $\sigma_p = 7$  МПа.



На рис. 7 показаны участки массива горных пород, в которых  $K_y$  и  $K_z$  меньше 1 и вероятны разрушения в соответствии с вышеприведенными критериями.

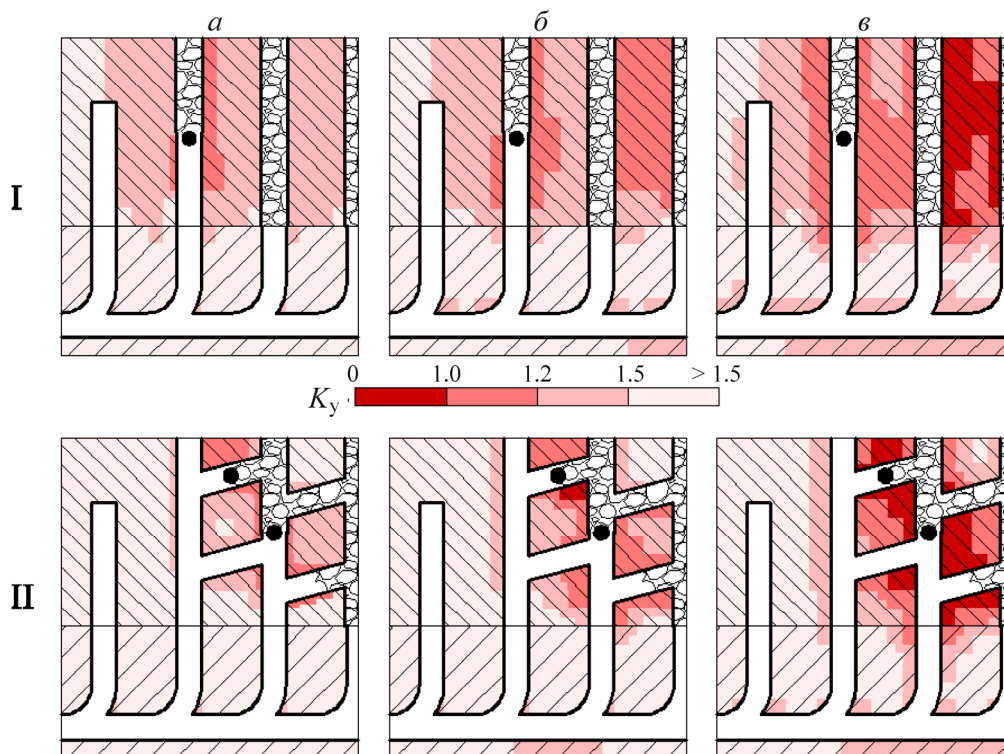


Рис. 7. К характеристике запаса устойчивости выработок выпуска руды при торцовой и площадно-торцовой схемах подготовки: *a* —  $H = 600$  м; *б* —  $H = 1000$  м; *в* —  $H = 1500$  м

Результаты расчетов позволяют отметить следующее:

- коэффициент запаса устойчивости горных пород в выработках торцового выпуска на 10–20 % выше, чем при площадно-торцовой схеме;
- в сравниваемых вариантах на глубинах до 1000 м в выработках выпуска руды  $K_y > 1$ .

Сохранность их будет определяться естественной и техногенной нарушенностью массива горных пород;

- на глубинах более 1000 м при площадно-торцовой технологии выпуска руды наблюдаются обширные области горных пород с растягивающими напряжениями по всей длине погрузочных заездов и частично доставочных ортов. Учитывая высокую интенсивность очистной выемки при системах с обрушением, постепенную проходку и содержание погрузочных заездов в панели не более двух (один — для выгрузки, второй — для вентиляции), ограниченные сроки поддержания призабойной зоны в безопасном состоянии (доставочных ортов 18–20 смен, погрузочных заездов 10–12 смен), возможно планировать ее сохранность на глубинах до 1200–1300 м при условии крепления бортов и кровли выработок, например анкерованием.

## ВЫВОДЫ

1. На глубине горных работ до 1000 м в подготовительно-нарезных выработках при торцовом и площадно-торцовом выпуске руды практически не наблюдаются растягивающие усилия, максимальные касательные напряжения не превышают предельных значений. Нагрузки, возникаемые в элементах горных конструкций, соизмеримы с длительным пределом прочности горных пород.

2. Появление зон повышенного сжатия и растяжения вокруг нарезных выработок и очистного забоя на глубинах 1500 м при площадно-торцовой технологии показывает высокую вероятность потери устойчивости этих участков. Технологическое исполнение систем с обрушением и торцовым выпуском руды в подобных условиях позволяет эффективно использовать ее без усложнения конструкции доставочного горизонта.

3. Установлено, что варианты системы разработки с торцовым и площадно-торцовым выпуском руды в условиях тектонического поля напряжений Шерегешевского месторождения могут безопасно применяться на глубинах 1500 и 1200–1300 м соответственно. Обязательным условием при этом является крепление буро-доставочных ортов, их сопряжений с доставочными штреками и погрузочными заездами на горизонтах ниже 1000 м.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скорняков Ю. Г. Подземная добыча руд комплексами самоходных машин. — М.: Недра, 1986.
2. Фрейдин А. М., Неверов А. А., Неверов С. А., Филиппов П. А. Современные способы разработки рудных залежей с обрушением на больших глубинах / отв. ред. А. П. Тапсиев. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
3. Опарин В. Н., Русин Е. П., Тапсиев А. П. и др. Мировой опыт автоматизации горных работ на подземных рудниках / отв. ред. Н. Н. Мельников. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007.
4. Патент № 2301335 РФ. Способ разработки рудных месторождений подэтажным обрушением / С. А. Неверов, А. М. Фрейдин, А. А. Неверов // Оpubл. в БИ. — 2007. — № 17.
5. Патент № 2208162 РФ. Способ разработки рудных месторождений подэтажным обрушением / А. М. Фрейдин, Э. Н. Кореньков, П. А. Филиппов и др. // Оpubл. в БИ. — 2003. — № 19.
6. Фрейдин А. М., Филиппов П. А., Гайдин С. П., Кореньков Э. Н., Неверов С. А. Перспективы технического перевооружения подземных рудников Западно-Сибирского металлургического комплекса // ФТПРПИ. — 2004. — № 3.
7. Фрейдин А. М., Неверов С. А. Моделирование площадно-торцовой технологии выпуска руды под обрушенными породами // ФТПРПИ. — 2005. — № 5.
8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975.
9. 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.
10. Неверов С. А. Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния. Ч. II: Тектонотипы рудных месторождений и модели геосреды // ФТПРПИ. — 2012. — № 3.
11. Казикаев Д. М. Геомеханика подземной разработки руд: учебник для вузов. — М.: Изд-во МГГУ, 2005.
12. Болтенгаген И. Л., Кореньков Э. Н., Попов С. Н., Фрейдин А. М. Обоснование параметров сплошной камерной системы разработки с управляемым обрушением кровли // ФТПРПИ. — 1997. — № 1.
13. Литвинский Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов. — Донецк: Норд-Пресс, 2008.
14. Неверов А. А. Геомеханическое обоснование нового варианта камерной выемки пологих мощных залежей с выпуском руды из подконсольного пространства // ФТПРПИ. — 2012. — № 6.
15. Фрейдин А. М., Неверов А. А., Неверов С. А. Геомеханическая оценка горнотехнической ситуации на золоторудном месторождении “Макмал” // ФТПРПИ. — 2009. — № 5.
16. Баклашов И. В. и др. Геомеханика: учебник для вузов в 2 т. — М.: Изд-во МГГУ, 2004.

*Поступила в редакцию 20/II 2013*