

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.28, 622.831

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ МОЩНЫХ ПОЛОГИХ РУДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ С ЗАКЛАДКОЙ И ОБРУШЕНИЕМ

А. М. Фрейдин, А. А. Неверов, С. А. Неверов

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: nnn.aa@mail.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Разработан вариант комбинированной геотехнологии выемки с твердеющей закладкой и обрушением для отработки мощной пологопадающей рудной залежи полиметаллического месторождения. На основании численных оценок установлено, что вариант, предусматривающий принудительное обрушение налегающей толщи пород над участками, заполненными твердеющей закладкой, обеспечивает более безопасные условия разработки.

Комбинированная система разработки, большая глубина, массив пород, напряженно-деформированное состояние, выработка, закладка, камера, целик, кровля, безопасность

С ростом глубины разработки рудных месторождений в мировой практике все большее распространение получают различные варианты ведения горных работ с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями: слоевые с восходящей и нисходящей выемкой, сплошные камерные и с камерно-целиковым порядком отработки [1–6]. Эти способы добычи позволяют достаточно эффективно управлять сдвижением налегающего массива горных пород, исключить срывы крупных структурных блоков и тем самым минимизировать динамические события в призабойной зоне очистных работ.

Однако при выемке руд средней и малой ценности геотехнологии со сплошной закладкой выработанного пространства не обеспечивают рентабельность разработки. В этой связи в ряде месторождений на глубинах до 2000 м и более используют системы разработки с обрушением руды и вмещающих пород [1]. Применение вариантов выемки с обрушением на больших глубинах, как и систем разработки с открытым выработанным пространством, обуславливают, с одной стороны, существенное снижение издержек производства по сравнению с геотехнологиями с закладкой, с другой — рост потерь и разубоживания руды. При этом заметно ухудшается безопасность горных работ, повышается вероятность проявления динамических событий в призабойной зоне, вплоть до горных ударов большой энергетической мощности [1–6].

Синтезируя преимущества способов разработки месторождений с обрушением и вариантов с закладкой и, наоборот, уменьшая их отрицательные последствия применительно к выемке мощных и весьма мощных пологих рудных залежей разработан вариант комбинированной геотехнологии с закладкой и обрушением (рис. 1) [7].

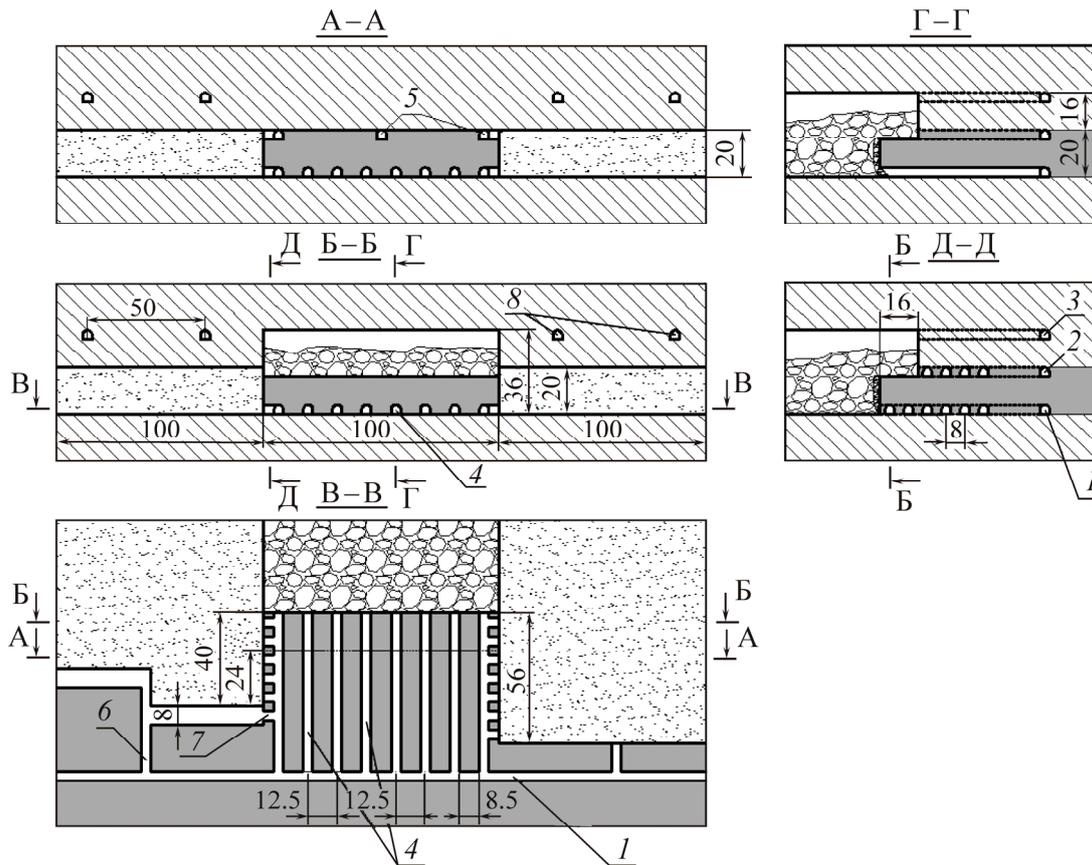


Рис. 1. Комбинированная система разработки с закладкой и обрушением: 1–3 — соответственно транспортный, вентиляционный и закладочный штреки; 4 — буро-доставочный орт; 5 — буро-вентиляционный орт целика; 6 — слоевой орт; 7 — разрезной штрек; 8 — выработки вентиляционно-закладочного горизонта

СИСТЕМА РАЗРАБОТКИ

Сущность варианта (см. рис. 1) заключается в разделении залежи на участки, обрабатываемые с твердеющей закладкой и обрушением руды и налегающих пород. В первую очередь, извлекаются запасы, на месте которых формируются искусственные закладочные массивы, во вторую, с отставанием на период набора прочности твердеющей закладки, обрабатываются временные рудные целики под обрушенными породами кровли. Высота зоны обрушения определяется заполнением выработанного пространства породами кровли на высоту не менее мощности залежи. Размеры искусственных целиков и компрессионные свойства закладки должны ограничивать скорость и общую величину оседания налегающей толщи пород до значений, близких к варианту отработки залежи с полной закладкой твердеющими смесями. Ширина временных рудных целиков выбирается в зависимости от размера устойчивого пролета пород кровли.

В зависимости от горно-геологических условий, выемка участков с твердеющей закладкой может осуществляться слоевыми или камерными системами разработки сплошной или камерно-целиковой схемой, обработка временных рудных целиков — этажным или подэтажным обрушением.

Подготовительно-нарезные работы на участках, обрабатываемых системой с твердеющей закладкой, заключаются в проведении транспортного, вентиляционного и закладочного штреков, рудоспусков, вентиляционных восстающих, слоевых ортов, разрезных штреков и выработок вентиляционно-закладочного горизонта (см. рис. 1).

Подготовка к очистной выемке временного рудного целика осуществляется проведением в его границах этажных (подэтажных) буро-доставочных (в почве) и буро-вентиляционных (в кровле) ортов. Очистные работы на участках с закладкой развиваются выемкой лент шириной 8 м по сплошной или камерно-целиковой схеме с опережением по отношению к отработке временного рудного целика на величину, определяемую мощностью залежи. Искусственные закладочные массивы в начальный период не несут нагрузки со стороны кровли, вес зависающей над горными выработками толщи горных пород воспринимают, главным образом, временные рудные целики [4, 6].

Выемка запасов рудных целиков производится во вторую стадию послойной отбойкой руды веерами восходящих скважин с торцовым выпуском ее из буро-доставочных выработок. Поскольку обычно при заполнении камер твердеющей закладкой образуется недозаклад, отрицательно влияющий на сдвигание подработанного массива с возможными срывами структурных блоков, для повышения безопасности горных работ предусмотрено принудительное обрушение налегающих пород кровли для заполнения выработанного пространства. Бурение вееров скважин для посадки кровли над целиком проводится из буровых ортов вентиляционного горизонта целика и над заложенными камерами из выработок вентиляционно-закладочного горизонта.

Таким образом, в варианте погашения налегающей толщи пород над заложенными участками создается единая (сплошная) область обрушения по фронту выемки, способствующая плавному сдвиганию налегающей кровли.

В настоящей статье рассмотрена задача и дана сравнительная геомеханическая оценка вариантов выемки с обрушением подработанной толщи пород над заложенными участками и с сохранением ее.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Все технические решения и обоснование параметров комбинированной системы разработки с закладкой и обрушением реализованы в рамках выполнения “Технологического регламента на безопасную отработку одного из пологих глубокозалегающих месторождений полиметаллических руд Норильского региона”.

В соответствии с геолого-тектоническим строением массива пород оруденение месторождения формировалось в условиях сбросового напряженного состояния (режим растяжения), типичного для пород осадочных отложений, что является его характерной особенностью. В связи с этим район месторождения относится к нетектонически активным, в котором вертикальная (гравитационная) составляющая поля напряжений определяется объемным весом вышележащей толщи пород и является максимальным давлением, действующим в массиве (соответствует динниковскому распределению исходных напряжений):

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

где σ_y , σ_x , σ_z и τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz} — соответственно вертикальная и горизонтальные нормальные и касательные компоненты тензора напряжений (ось y направлена вертикально вниз); H — глубина разработки; γ — плотность пород; g — ускорение свободного падения; $q = \mu/(1 - \mu)$ — коэффициент бокового распора; μ — коэффициент Пуассона.

Согласно литологической структуре массива месторождения, рудные залежи и вмещающие породы представлены скальными высокомодульными геологическими материалами с физико-механическими свойствами, приведенными в таблице.

Физико-механические свойства массива пород месторождения

Наименование	Плотность $\gamma, \text{т/м}^3$	Прочность, МПа		Сцепление $C, \text{МПа}$	Угол внутреннего трения φ , град	Коэффициент Пуассона μ	Модуль Юнга $E, \text{ГПа}$
		на сжатие $\sigma_{\text{сж}}$	на растяжение $\sigma_{\text{р}}$				
Вкрапленная руда	4.0	120–140	6–12	15–25	35–55	0.25	50
Габбро-долерит с сульфидным оруденением	2.7	80–100	5–10	10–20	33–52	0.23	55
Песчаники	2.7	100–120	4–11	12–22	32–48	0.23	62
Базальты	3.0	120–150	8–14	16–34	30–45	0.22	70
Безрудные габбро-долериты	2.7	100–160	8–15	18–30	30–50	0.22	60

Моделирование и расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) массива пород в горнотехнической конструкции комбинированной геотехнологии проведены в объемной упругой постановке задачи методом конечных элементов (МКЭ) [8–12]. Выбор в качестве механической модели поведения массива пород упругой геологической среды обусловлен тем, что вмещающий массив и рудные залежи месторождения не обладают в значительной степени реологическими свойствами и в большей своей части подвержены хрупкому разрушению (соотношение пределов прочности на сжатие и растяжение более 10) без заметной пластической деформации.

Численные оценки выполнялись для типовых условий пологого выдержанного рудного тела месторождения мощностью 20 м, залегающего на глубине 1000 м. Область расчета включала пять последовательно обрабатываемых участков с общей длиной фронта выемки по простиранию 500 м и пролетом выработанного пространства 200 м. Учет отработки в пяти смежных участках позволил обеспечить повышение точности и достоверности определения НДС массива горных пород.

На рис. 2 представлена схема расчетной области R — параллелепипед ($0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_z$) с постановкой задачи (краевыми условиями). Граничные условия задачи приняты в соответствии с гравитационным типом геомеханических условий разработки и представляются как сжимающие усилия и ограничения нормальных перемещений на границах расчетной области: к верхней границе приложено внешнее давление (13.2 МПа), заменяющее вес столба массива пород высотой 500 м (расстояние от верхней границы модели до почвы рудной залежи 500 м); на нижней и боковых границах соответственно вертикальная и горизонтальные компоненты вектора перемещений и касательные компоненты тензора напряжений принимались нулевыми. То есть при динниковской модели геосреды значения горизонтальных напряжений σ_x, σ_z в механическом смысле эквивалентны условию равенства нулю нормальных перемещений ($u_x = u_z = 0$) на вертикальных границах расчетной области. Вес пород в задачах учитывался объемной силой γg . 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 (выработок) свободны от внешних нагрузок ($\sigma_n = \tau_n = 0$). Границы модели выбраны в соответствии с принципом Сен-Венана.

В задачах предполагалось, что закладка несет определенную нагрузку и имеет сцепление с рудным телом и вмещающими породами. Последнее позволяет принять ее низко модульным упругим материалом ($E = 3.0 \text{ ГПа}, \mu = 0.35, \gamma = 2.0 \text{ т/м}^3, \sigma_{\text{сж}} = 4.0–6.0 \text{ МПа}, \sigma_{\text{р}} = 0.2–0.5 \text{ МПа}, C = 0.6–1.2 \text{ МПа}, \varphi = 25^\circ$), обеспечивающим сплошность отработанного пространства с окружающим массивом.

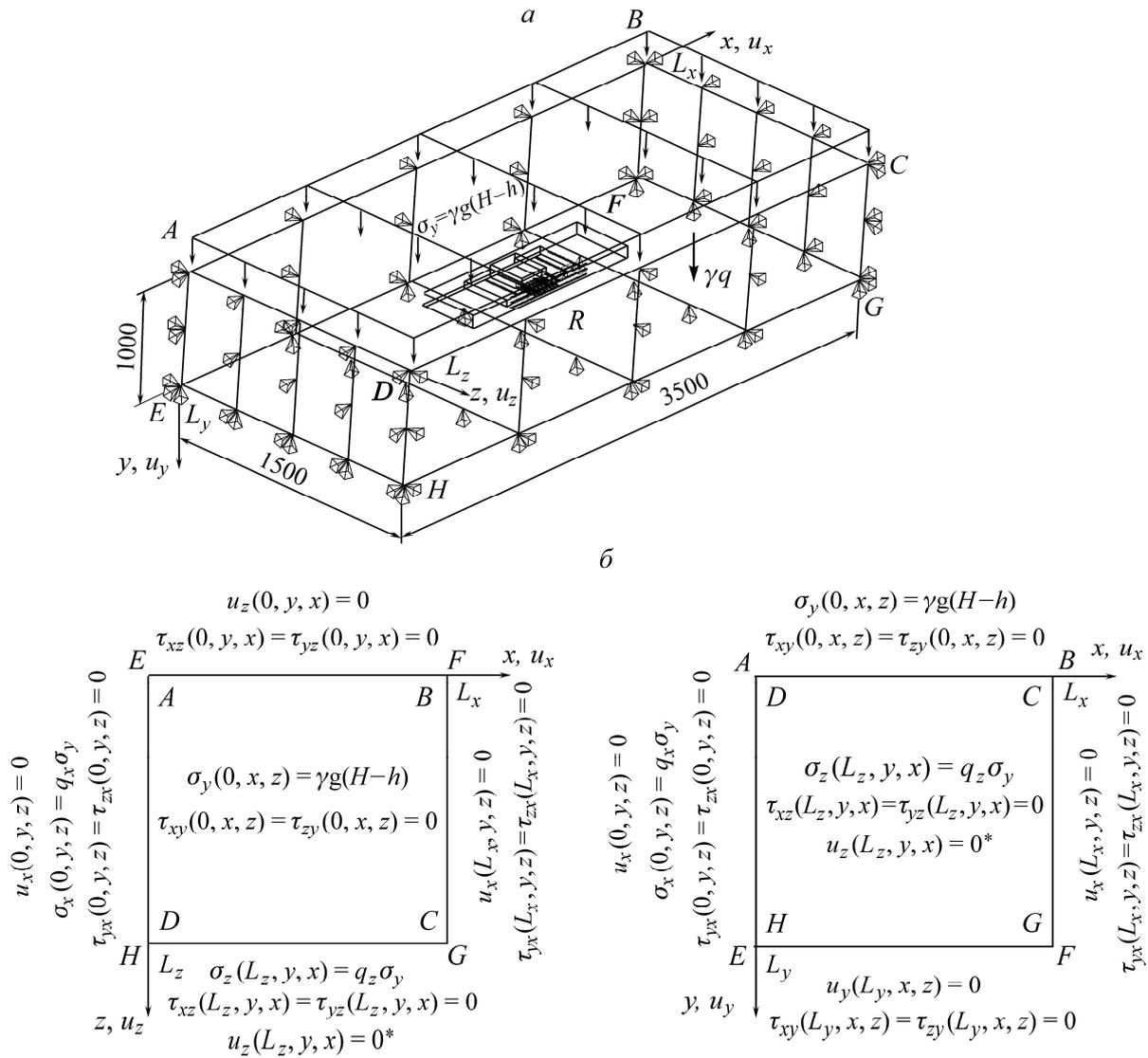


Рис. 2. Расчетная схема и основные параметры к определению НДС массива пород: *a* — объемное представление задачи; *b* — то же на плоскостях; u_y, u_x, u_z — вертикальная и горизонтальные компоненты вектора перемещений; h — расстояние от верхней границы модели до почвы рудной залежи

Моделирование проводилось в условиях “прямой” постановки, т.е. нагружение модели осуществлялось поверхностными усилиями на границах и распределенными по объему массовыми силами после того, как в расчетной области создана система горных выработок.

Анализ полученных результатов осуществлялся для центрального участка с наиболее сложными геомеханическими условиями. Результаты расчетов представляются в виде распределения главных напряжений σ_1, σ_3 и максимальных касательных τ_{max} . За максимальное главное напряжение принималось σ_1 , за минимальное — σ_3 , растяжение — со знаком “минус”.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 3–6 проиллюстрировано НДС массива горных пород в конструктивных элементах комбинированной геотехнологии в варианте без обрушения породной кровли над заложенными камерами по наиболее характерным сечениям (в соответствии с рис. 1).

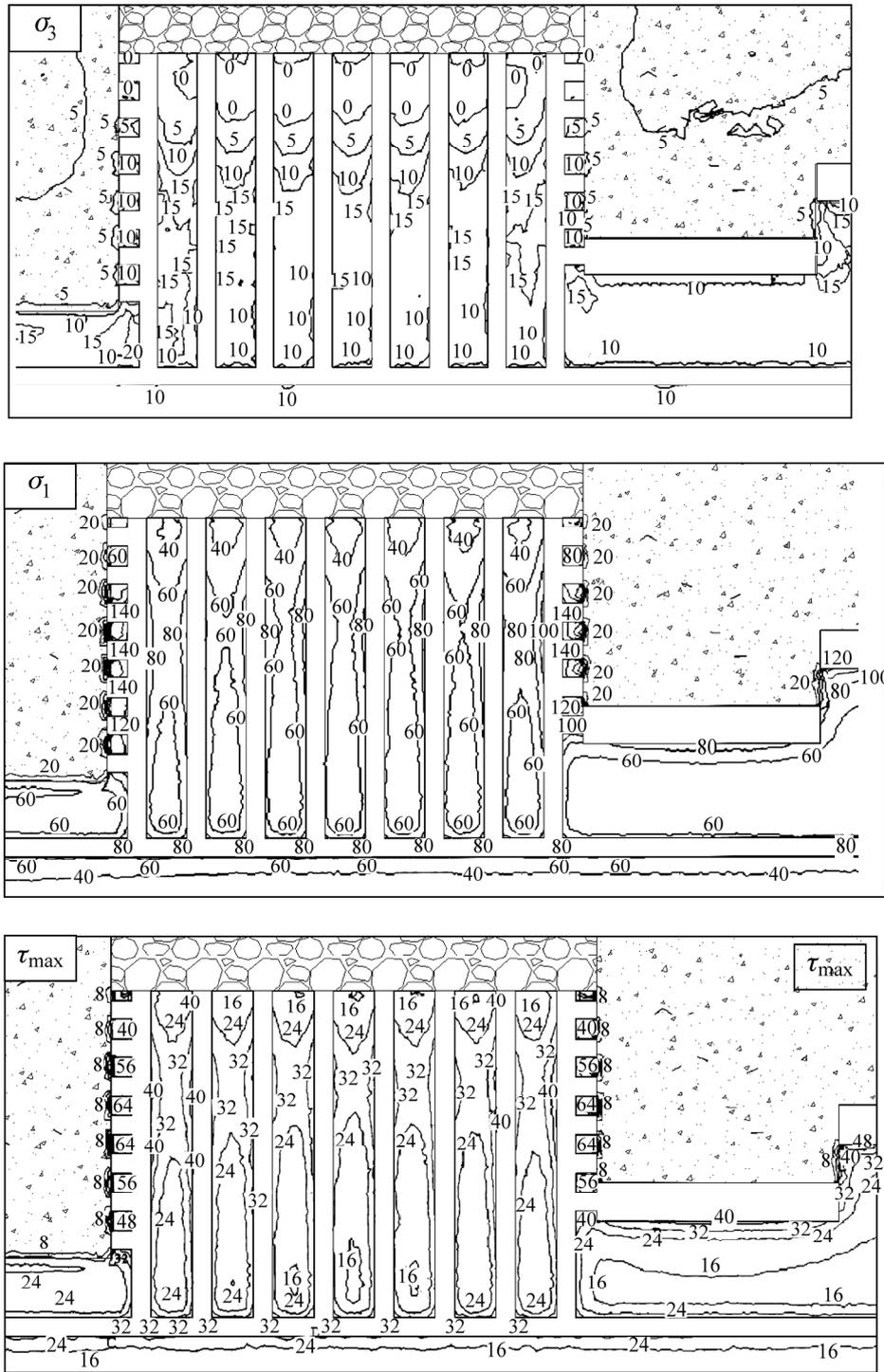


Рис. 3. Характер распределения напряжений в горнотехнической конструкции комбинированной геотехнологии в плане по почве рудной залежи (см. разрез В – В на рис. 1)

Анализ результатов расчета показал следующее.

Области концентрации сжимающих напряжений σ_1 формируются:

— на флангах участков, обрабатываемых с закладкой твердеющей смесью ($\sigma_1 = 120 - 140$ МПа), а также в бортах доставочных ортов целика по линии забоя опережающей посадки пород кровли ($\sigma_1 = 70 - 80$ МПа);

— в краевой части зоны опережающего обрушения налегающих пород кровли ($\sigma_1 = 70-90$ МПа) и призабойной области участка, обрабатываемого с закладкой выработанного пространства ($\sigma_1 = 50-65$ МПа).

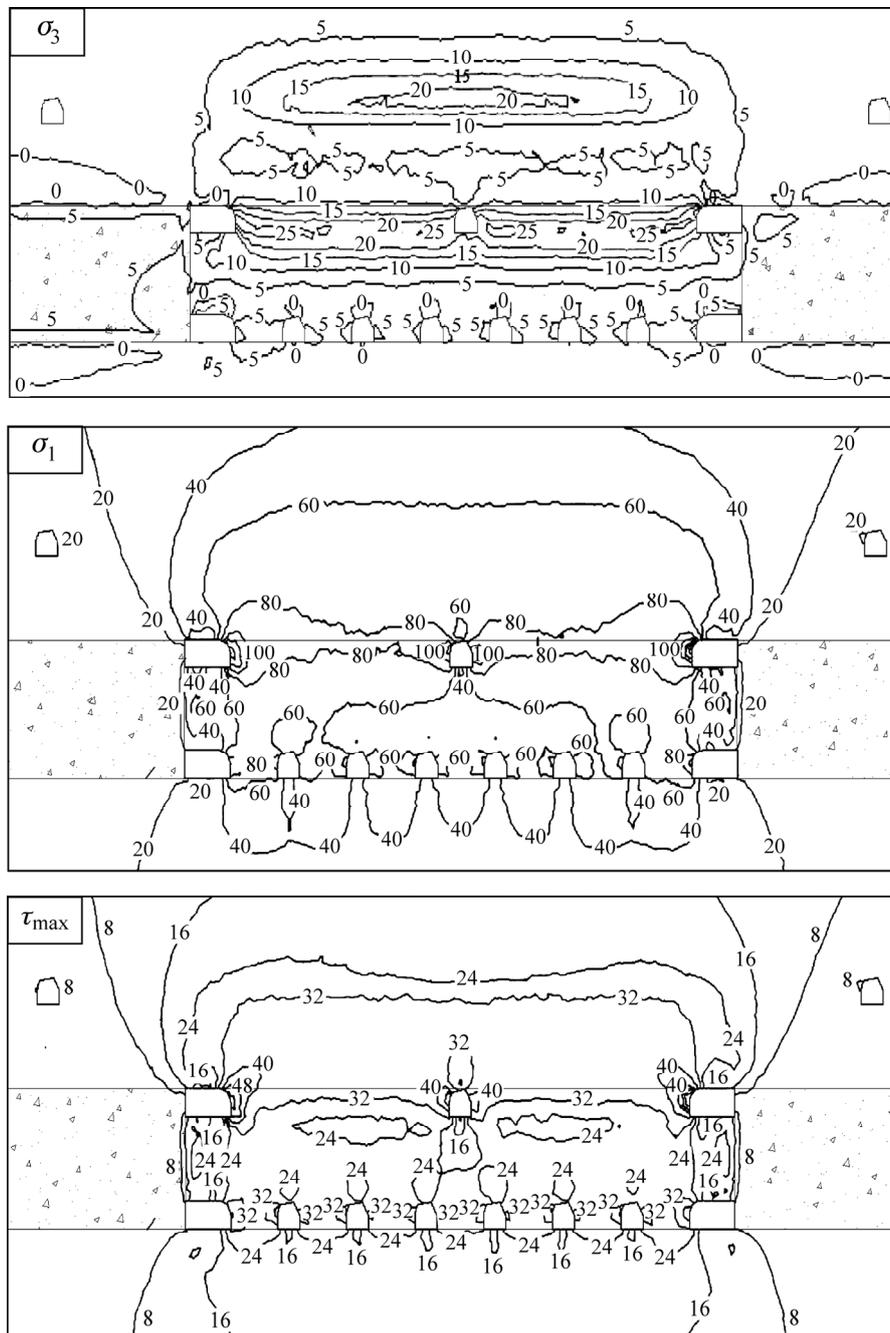


Рис. 4. Характер распределения напряжений в горнотехнической конструкции комбинированной геотехнологии в центральном поперечном сечении целика в районе линии забоя опережающей посадки пород кровли (см. разрез А – А на рис. 1)

Распределение минимальных главных напряжений σ_3 показало, что в кровле выработанного пространства возникают значительные растягивающие усилия, достигающие предельные прочностные характеристики горных пород. В подобных условиях следует ожидать появления обширных зон их разрушений.

Благоприятная геомеханическая ситуация отмечается в призабойной области рудных целиков, находящихся под защитой опережающего обрушения породной кровли. В этой зоне нагрузки, по сравнению с краевым участком обрушения кровли, снижаются более чем в 4 раза. В кровле и почве буро-доставочных ортов зон с растягивающими усилиями не отмечается. Сжимающие усилия σ_1 в кровле выработок не превышают 40 МПа. В нарезных выработках, расположенных в краевой части опережающего обрушения, необходимо предусматривать крепление вследствие возможной потери устойчивости пород.

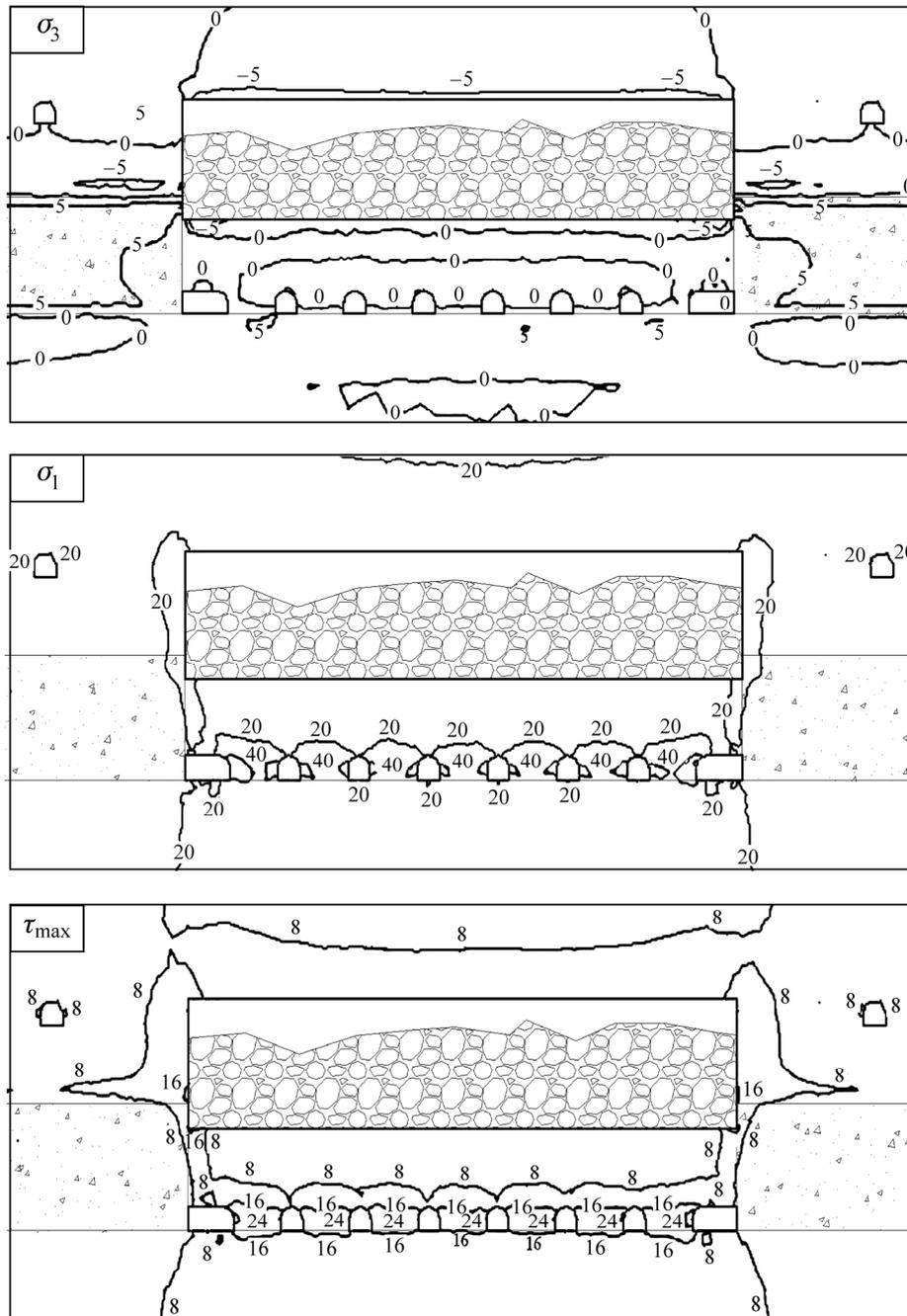


Рис. 5. Характер распределения напряжений в горнотехнической конструкции комбинированной геотехнологии на участке (в рудном целике), обрабатываемом системой с обрушением в центральном поперечном сечении целика в районе отбиваемого слоя (см. разрез Б–Б на рис. 1)

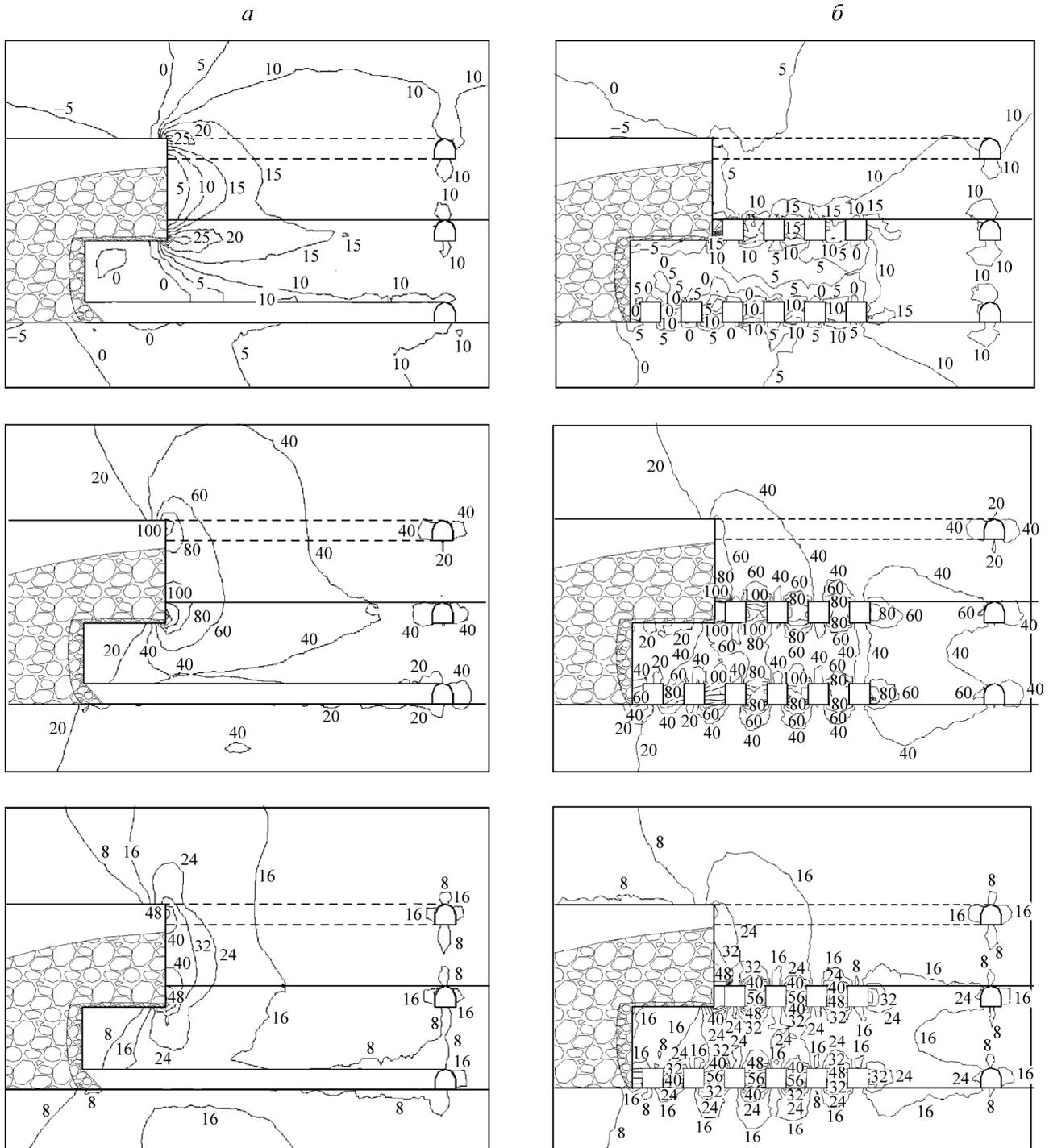


Рис. 6. Характер распределения напряжений в элементах геотехнологии: *а* — в центральной части целика (см. разрез Г–Г на рис. 1); *б* — в краевом участке целика на границе с заложёнными камерами (см. разрез Д–Д на рис. 1)

Обрушение горных пород кровли над заложёнными участками выемки рудных залежей повышает безопасность этого способа разработки. В варианте комбинированной геотехнологии, предусматривающем погашение подработанной кровли над искусственными массивами, к детальному анализу приняты сечения горнотехнической конструкции, демонстрирующие влияние зоны обрушения налегающей толщи на НДС массива пород (рис. 7).

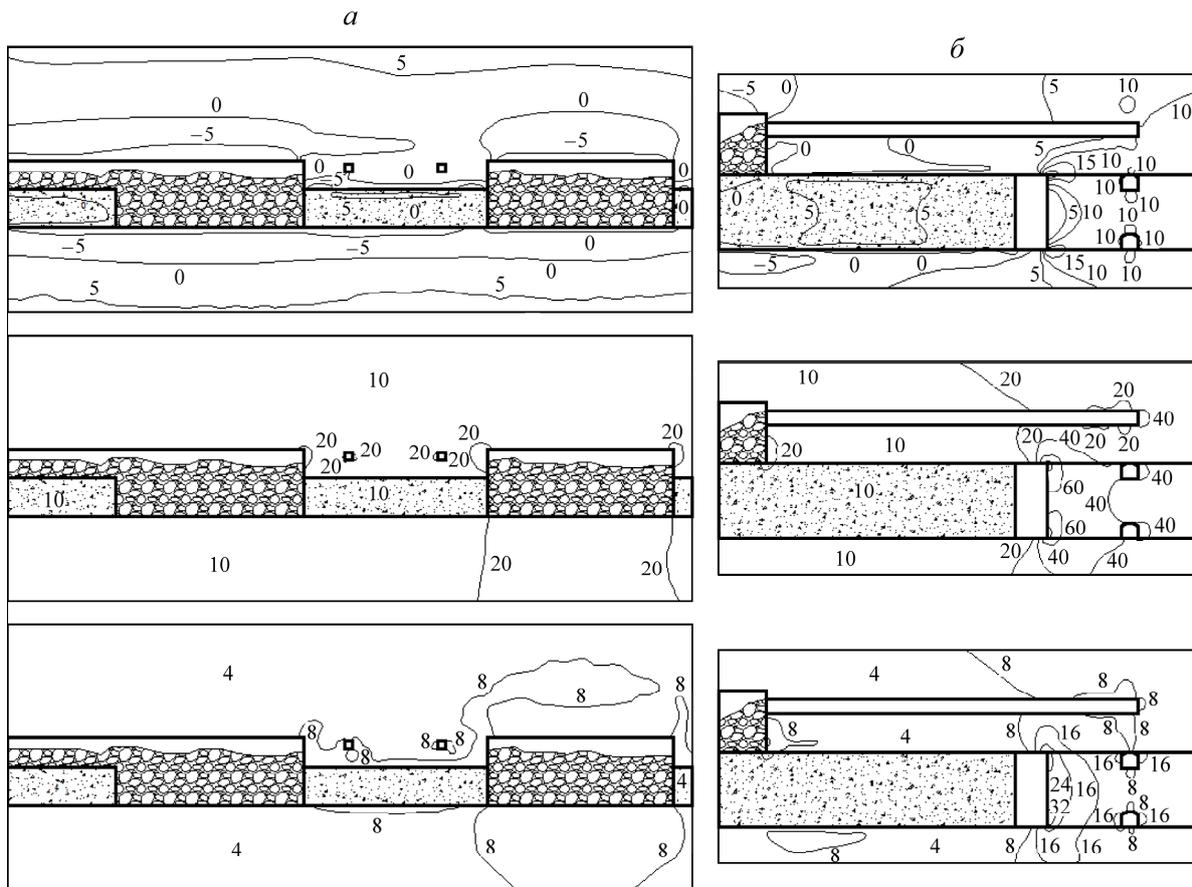


Рис. 7. Характер распределения напряжений в элементах комбинированной системы разработки с обрушением пород кровли над закладочными массивами: *а* — в поперечном сечении по простирацию (по участкам выемки) в 100 м от линии фронта ведения очистных работ; *б* — в продольном центральном сечении участка, обрабатываемого системой с закладкой выработанного пространства

Из рис. 7 видно, что при обрушении пород кровли над заложенными участками происходит значительная разгрузка горной конструкции от действия максимальных сжимающих напряжений. В кровле и почве горнотехнической конструкции наблюдаются области образования зон с повышенными растягивающими напряжениями ($\sigma_3 = -10$ МПа). При этом с некоторым отставанием от фронта погашения рудных целиков формируется единая сплошная зона обрушенных пород. Расчеты показали, что принудительное обрушение налегающей толщи пород над заложенными участками позволяет повысить устойчивость массива в призабойном пространстве и снизить опорное давление в краевых участках рудной залежи в 1.3–2 раза.

Таким образом, результаты геомеханического анализа НДС массива пород в выработках комбинированной геотехнологии на глубине 1000 м с рассмотренными параметрами выемки позволяют оценить способ управления горным давлением с закладкой и обрушением в массивах со средней и малой нарушенностью как достаточно надежный и безопасный.

ВЫВОДЫ

Разработанная геотехнология выемки с комбинированным способом управления горным давлением закладкой и обрушением пород кровли при отработке пологих мощных и весьма мощных обширных рудных залежей в условиях месторождений с гравитационным характером распределения природных напряжений обеспечивает безопасность ведения горных работ на глубинах до 1000 м.

Погашение горных пород кровли над заложенными участками способствует активизации процесса их самообрушения, позволяет снизить опорное давление на краевых участках области отработки с ожидаемым плавным смещением налегающей толщи, минимизируя вероятность динамических форм проявления горного давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бронников Д. Н., Замесов Н. Ф., Богданов Г. И.** Разработка руд на больших глубинах. — М.: Недра, 1982. — 292 с.
2. **Славиковский О. В.** Подземная разработка месторождений руд цветных металлов на больших глубинах за рубежом — М.: ЦНИИЭИЦМ, 1983. — 188 с.
3. **Фрейдин А. М., Шалауров В. А., Еременко А. А. и др.** Повышение эффективности подземной разработки рудных месторождений Сибири и Дальнего Востока. — Новосибирск: Наука, 1992. — 177 с.
4. **Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Фрейдин А. М.** О классификации систем разработки рудных месторождений на больших глубинах // ФТПРПИ. — 2008. — № 6. — С. 47–57.
5. **Неверов А. А., Неверов С. А., Никольский А. М., Алимсеитова Ж. К.** Геомеханическая оценка горнотехнической ситуации при переходе от комбинированной выемки с закладкой и обрушением к технологии этажного обрушения // Вестн. КузГТУ. — 2015. — № 2. — С. 35–40.
6. **Neverov A., Freidin A., Vasichev S.** Assessment of the combined ore mining with caving and backfilling, IV International geomechanics conference “Theory and practice of geomechanics for effectiveness the mining production and the construction”, International House of Scientists Fr. J. Curie Varna, Bulgaria, 2010. — P. 461–469.
7. **А. с. 1606667 СССР.** Способ управления горным давлением / А. М. Фрейдин, В. Н. Какоило, В. А. Шалауров и др. // Оpubл. в БИ. — 1990. — № 42.
8. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 543 с.
9. **Назарова Л. А., Назаров Л. А., Мирошниченко Н. А.** Определение деформационно-прочностных характеристик закладочного массива при ведении очистных работ на основе решения обратных задач // ФТПРПИ. — 2012. — № 4. — С. 29–85.
10. **Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А.** Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.
11. **Курленя М. В., Серяков В. М., Коротких В. И., Тапсиев А. П.** Геомеханическое обоснование камерно-целиковых порядков выемки защитного слоя // ФТПРПИ. — 1991. — № 4. — С. 3–11.
12. **Неверов А. А.** Геомеханическое обоснование нового варианта камерной выемки пологих мощных залежей с выпуском руды из подконсольного пространства // ФТПРПИ. — 2012. — № 6. — С. 87–97.

Поступила в редакцию 20/IV 2016