

ОТРАБОТКА ПОДКАРЬЕРНЫХ ЗАПАСОВ ПОДЭТАЖНО-КАМЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ С ФОРМИРОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ ЦЕЛИКОВ И ПОРОДНОЙ ЗАКЛАДКИ

Сергей Анатольевич Шукин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории подземной разработки рудных месторождений, тел. (913)372-82-63, e-mail: s.shukin@ngs.ru

Александр Алексеевич Неверов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории подземной разработки рудных месторождений, тел. (923)220-02-79, e-mail: nnn_aa@mail.ru

Сергей Алексеевич Неверов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, заведующий лабораторией подземной разработки рудных месторождений, тел. (923)224-15-79, e-mail: nsa_nsk@mail.ru

Для маломощной крутопадающей рудной залежи при переходе от открытых горных работ к подземной выемке предложен вариант камерной системы разработки с отработкой по временно целиковой схеме и последующей комбинированной закладкой очистного пространства. Геотехнология предусматривает восходящую очередность отработки запасов в этажах и нисходящий общий порядок выемки залежи. В качестве комбинированной закладки приняты пустая порода и бутобетон. Рассмотрена многовариантная задача по оценке устойчивости конструктивных элементов системы разработки при ранжировании основных параметров в тектоническом природном поле напряжений. Обоснование безопасного освоения технологии выполнено на базе численного моделирования напряженно-деформированного состояния рудопородного массива методом конечных элементов в объемной постановке. Рассматривался предельный случай погашения запасов в условиях развитого фронта очистных работ и формируемого пролета отработки. Установлены основные закономерности распределения напряжений в конструктивных элементах технологии с определением участков потерь устойчивости. Использование бутобетонных целиков является действенной мерой, способствующей повышению безопасности ведения горных работ по рассматриваемой технологии. Отмечено, что применение комбинированной закладки по сравнению с породной является более надежным способом управления горным давлением, особенно при увеличении мощности рудной залежи.

Ключевые слова: подкарьерные запасы, система разработки, бутобетон, моделирование, конструктивные элементы, напряженно-деформированное состояние (НДС), параметры, устойчивость, безопасность.

EXTRACTION OF OPEN PIT BOTTOM RESERVES BY ROOM-AND-PILLAR METHOD USING HYBRID BACKFILL

Sergei A. Shchukin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Junior Researcher at the Underground Ore Mining Laboratory, cell. +7 913 372 8263, e-mail: s.shukin@ngs.ru

Aleksandr A. Neverov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher at the Underground Ore Mining Laboratory, cell.: +7 923 220 0279, e-mail: nnn_aa@mail.ru

Sergei A. Neverov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Underground Ore Mining Laboratory, cell.: +7 923 224 1579, e-mail: nsa_nsk@mail.ru

For the transition from open pit to underground mining in thin and steeply dipping ore bodies, it is proposed to use the room-and-pillar method with hybrid backfill. The geotechnology assumes bottom-up mining within levels which are generally sequenced top downward. The hybrid backfill is waste rock and rubble concrete. The authors discuss the multivariate problem on the stability of structural elements of the geotechnology with ranking of basic parameters in the field of natural tectonic stresses. The geotechnology safety is proved by the 3D FEM-based stress–strain analysis of the limiting case of mine roof spans. The stress patterns in the structural elements of the technology are determined, and the areas of instability are identified. The rubble concrete pillars effectively ensure mining safety with the discussed technology. The hybrid backfill as against rock fill is a more reliable method of ground control, especially in case of increasing thickness of ore bodies.

Keywords: pit bottom reserves, mining system, rubble concrete, modeling, structural elements, stress–strain behavior, parameters, stability, safety

Введение

В настоящее время при открытых разработках рудных ископаемых, в том числе высокоценного сырья наблюдается повсеместная тенденция решения вопросов воспроизводства запасов переходом от карьерной выемки к подземной [1-6]. Потребность данного приема обуславливается значительным сокращением затрат на вскрышные работы, и как следствие повышение рентабельности добычи. Однако такой переход требует обоснований технических решений и способов выемки, обеспечивающих безопасность и эффективность погашение подкарьерных запасов между открытыми и подземными работами [1-7]. В настоящей статье дается обоснование технологии отработки маломощной крутой залежи ниже дна карьера, применительно к одному из эксплуатируемых золоторудных месторождений.

Технология погашения подкарьерных запасов

Для выемки подкарьерных запасов месторождения в целях обеспечения как полноты их извлечения, так безопасности ведения горных работ был рассмотрен вариант поэтажно-камерной системы разработки с формированием искусственных целиков и породной закладки (рис. 1).

Суть технологии состоит в следующем. Этаж разделяется на подэтажи высотой 12-20 м. Выемка подэтажей в пределах этажа осуществляется в восходящем порядке. Отработка запасов подэтажа производится в две очереди. Сначала отрабатываются и закладываются бетоном камеры I очереди. При возведении бетонобетонных целиков в рудном штреке на этих участках возводится крепь.

После набора закладочным массивом нормативной прочности и создания необходимого опережения фронта горных работ, приступают к отработке камер II очереди. По мере их погашения с рудного штрека вышележащего подэтажа производится закладка выработанного пространства пустой породой. При этом на вышележащем подэтаже формируется комбинированная почва из чередующихся участков бутобетона и пустых пород. При этом породная закладка не является элементом несущей конструкции, основное ее назначение – боковой подпор открытым обнажениям и как платформа для рабочих и оборудования, занятых на очистных работах при погашении вышележащих подэтажей. Очистные работы включают послойную отбойку и доставку руды с использованием самоходных буровых и погрузочно-доставочных машин (ПДМ).

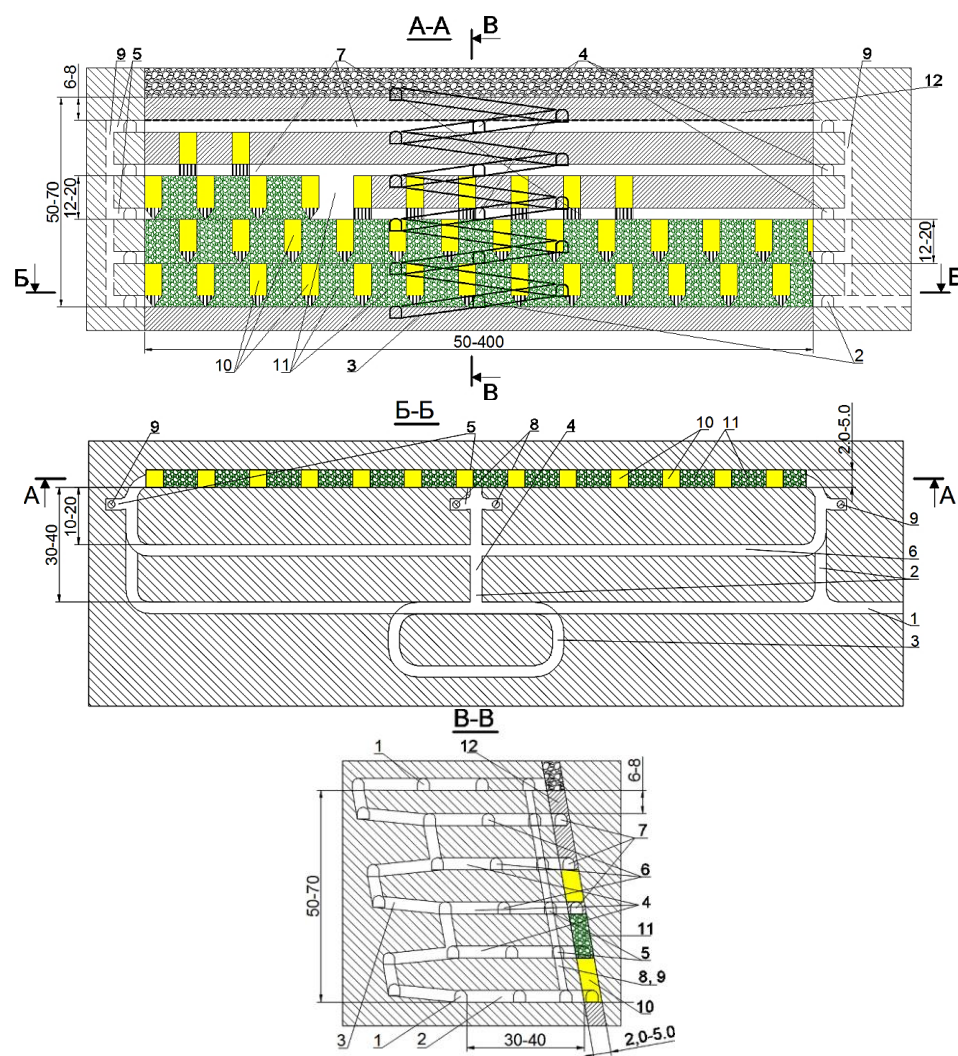


Рис. 1. Подэтажно-камерная система разработки с бутобетонными целиками и породной закладкой:

1 - полевой откаточный штрек; 2 - полевой вент.доставочный орт; 3 - спиральный съезд; 4 - заезд на подэтаж; 5 - ниша под рудоспуск и вен.восстающий; 6 - полевые подэтажные штреки; 7 - буро-доставочные подэтажные рудные штреки; 8 – рудоспуски; 9 - вент.восстающие; 10 - камера I очереди (бутобетонные целики); 11 - камера II очереди (породная закладка); 12 - междуэтажный целик

Особенности геомеханического моделирования системы разработки

Согласно геолого-структурного строения породного массива, а также натуральных измерений природного поля напряжений, район рассматриваемого месторождения относится к тектонически активным, в котором максимальными по величине являются горизонтально ориентированные силы [8-9]:

$$\sigma_y = \gamma g H; \sigma_{\max} = 2,0 \gamma H; \sigma_{\min} = 1,66 \gamma H \quad (1)$$

где σ_y , σ_{\max} и σ_{\min} — соответственно вертикальная, максимальные и минимальные горизонтальные нормальные компоненты тензора напряжений; H — глубина разработки; γ — плотность пород; g — ускорение свободного падения; 2,0 и 1,66 — соответственно коэффициенты бокового давления q_z и q_x .

Моделирование и решение задачи о напряженно-деформированном состоянии (НДС) горного массива было получено в рамках линейной модели теории упругости в объемной постановке методом МКЭ [10-15]. Расчеты выполнялись по усредненным деформационным и прочностным свойствам пород трещиноватого массива месторождения.

На рис. 2 представлена схема расчетной области R — параллелепипед и постановка задачи. В центральной ее части реализованы конструктивные особенности системы разработки с существующей горнотехнической обстановкой на руднике (рис. 3).

Напряженно-деформированное состояние массива пород в расчетной области R описывается системой уравнений:

$$\text{— равновесия: } \sigma_{ij,j} + pF_i = 0, \quad (2)$$

$$\text{— Коши: } \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3)$$

$$\text{— закона Гука: } \sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda\theta\delta_{ij} \quad (4)$$

— и заданием граничных условий (см. рис. 2).

где σ_{ij} — компоненты тензора напряжений (σ_y , σ_x , σ_z , и τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} — соответственно вертикальная и горизонтальные нормальные и касательные компоненты тензора напряжений); $pF_i = \gamma g \delta_{ij}$ — объемные силы; γ — плотность пород; g — ускорение свободного падения; ε_{ij} — компоненты тензора деформаций (ε_y , ε_x , ε_z и ε_{xy} , ε_{yz} , ε_{zx} — соответственно вертикальная и 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 λ — параметры Ламе $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$, $\lambda = \frac{E\mu}{(1-2\mu)(1+\mu)}$; δ_{ij} — символ Кронекера; q_x , q_z — коэффициенты бокового давления ($q_z = 2,0$ и $q_x = 1,66$); μ — коэффициент Пуассона; H — глубина разработки.

При оценке устойчивости пород использовался коэффициент K_y по критерию Кулона-Мора [16-18]:

$$K_y = [\sin \phi(\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \times C \times \text{ctg} \phi)] > \sigma_1 - \sigma_3 \quad (5)$$

где σ_1 и σ_3 – соответственно максимальные и минимальные главные напряжения, действующие в массиве, МПа; C – сцепление пород, МПа; ϕ – угол внутреннего трения пород, град.

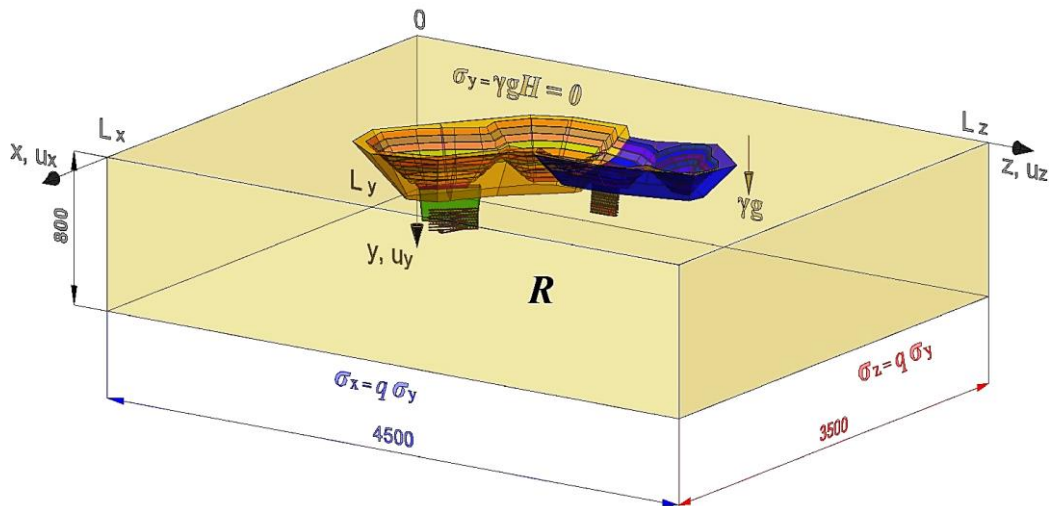


Рис. 2. Расчетная схема к определению НДС массива пород

Анализ расчетов осуществлялся в виде картин изолиний главных напряжений (σ_1 и σ_3) и прогнозируемых зон вероятных разрушений пород в зависимости от степени нарушенности горного массива (использовался коэффициент структурного ослабления $K_c = 0,25-0,6$) [16-20].

При выполнении геомеханического обоснования в целях минимизации рисков в категории безопасности ведения горных работ была рассмотрена предельная горнотехническая ситуация при выемке рудных тел мощностью (m) – 2,0, 5,0 и 10,0 м. Оценивалась область массива с полностью погашенными от дна карьера двумя верхними этажами и развитием фронта выемки на подэтажах 3-го нижнего этажа (рис. 3). При этом первый и второй этаж от дна карьера представляет собой искусственный массив с чередующимися участками бутобетона и породной закладки. Последнее позволяет с высокой степенью надежности проанализировать устойчивость бутобетонных опор, а также МЭЦ и предохранительного подкарьерного целиков в условиях максимальной их подработки и наработки. Моделирование отработки камер на подэтажах нижнего этажа (3 этаж от дна карьера) позволяет рассмотреть влияние параметров бутобетонных целиков и камер II очереди, а также глубины работ и наработки от погашения вышележащих запасов на безопасность выемки.

В табл. приведена характеристика моделируемой горнотехнической ситуации при использовании камерной системы разработки с бутобетонными целиками и породной закладкой.

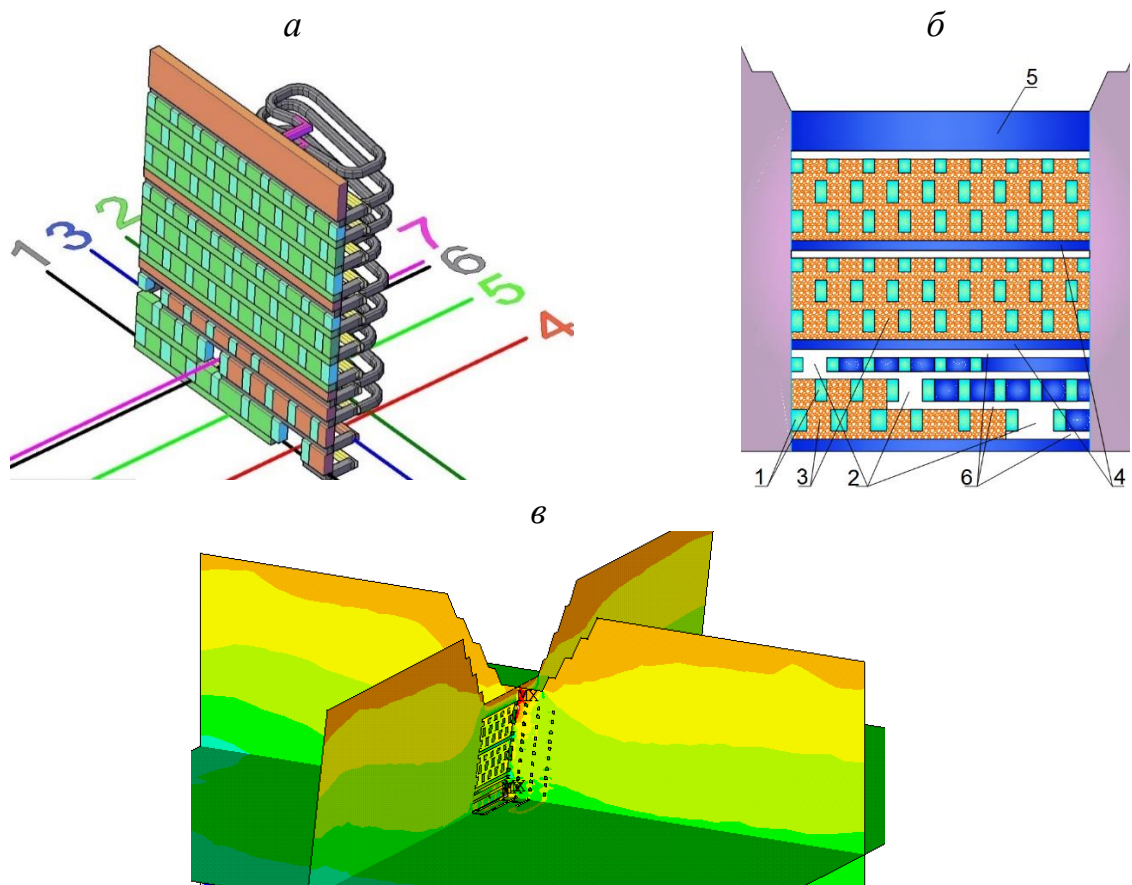


Рис. 3. Моделируемая горнотехническая ситуация при отработке подкарьерных запасов крутой маломощной залежи:
 а – объемное представление системы разработки; б – пример разреза № 1 в вертикальной плоскости; в – общий вид разрезов и планов в границах геомеханической модели

Параметры принятой к расчету горнотехнической ситуации при использовании камерной системы разработки с бутобетонными целиками и породной закладкой

Параметры	Значение		
Мощность залежи (m), м	2	5	10
Глубина разработки (H), м	0-170 м		
Мощность предохранительного подкарьерного целика между открытыми и подземными работами (ППЦ) ($h_{ппц}$), м	20		
Высота этажа по вертикале ($H_э$), м	50		
Высота подэтажа по вертикале ($h_п$), м	15		
Длина бутобетонного целика (камеры первой очереди) ($L_{ц.бут}$), м	6	8	
Длина камеры второй очереди ($L_{к.пз}$), м	12	18	
Общая длина пролета отработки по простиранию ($L_{об}$), м	150		
Высота междуэтажного целика (МЭЦ) ($H_{мэц}$), м	5		
Расстояние от полевых выработок до рудной залежи ($L_{пв.з}$), м	10	30	

Результаты численных оценок

Анализ картин распределения напряжений и зон возможных разрушений пород в конструктивных элементах подэтажно-камерной выемки с бутобетонной и породной закладкой (рис. 4-6) позволил установить следующее.

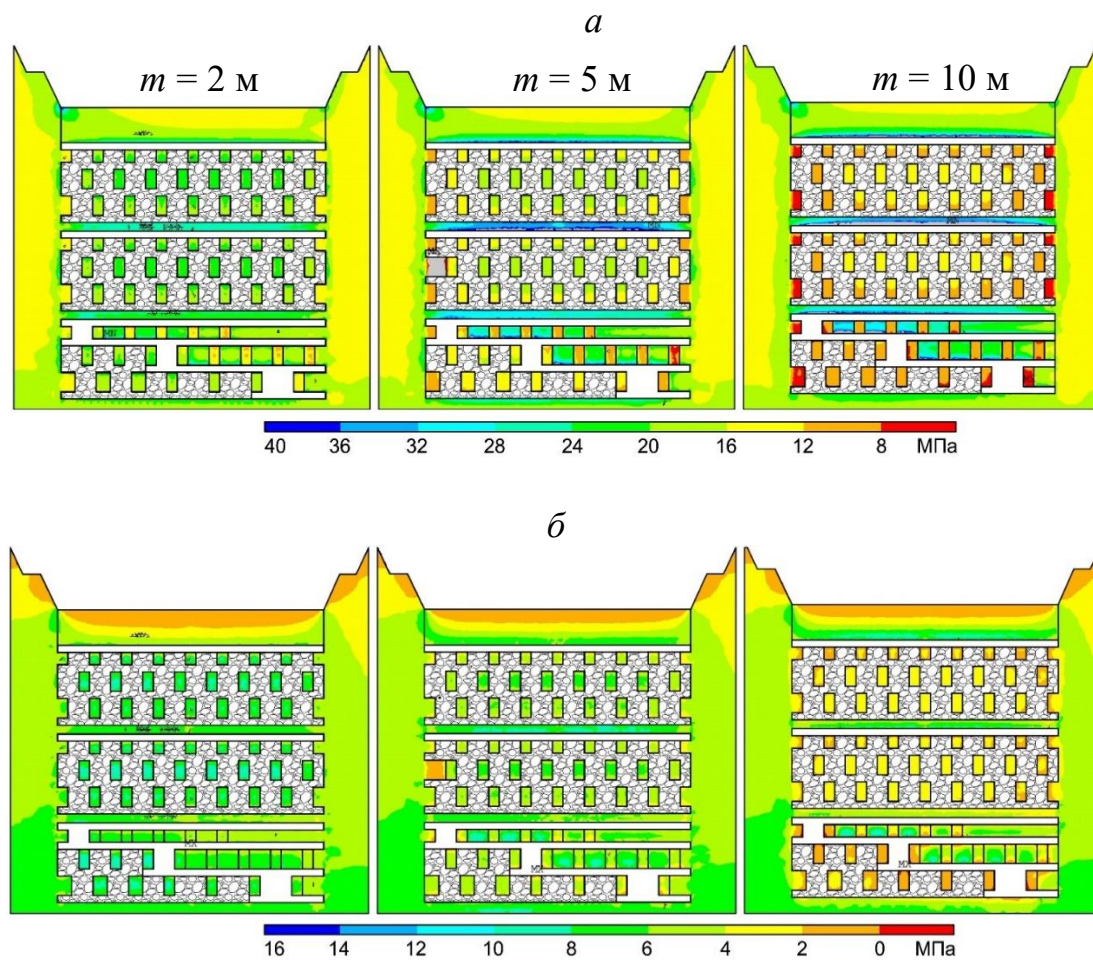


Рис. 4. Характер распределения максимальных (σ_1) и минимальных (σ_3) напряжений в конструктивных элементах системы разработки разреза № 1

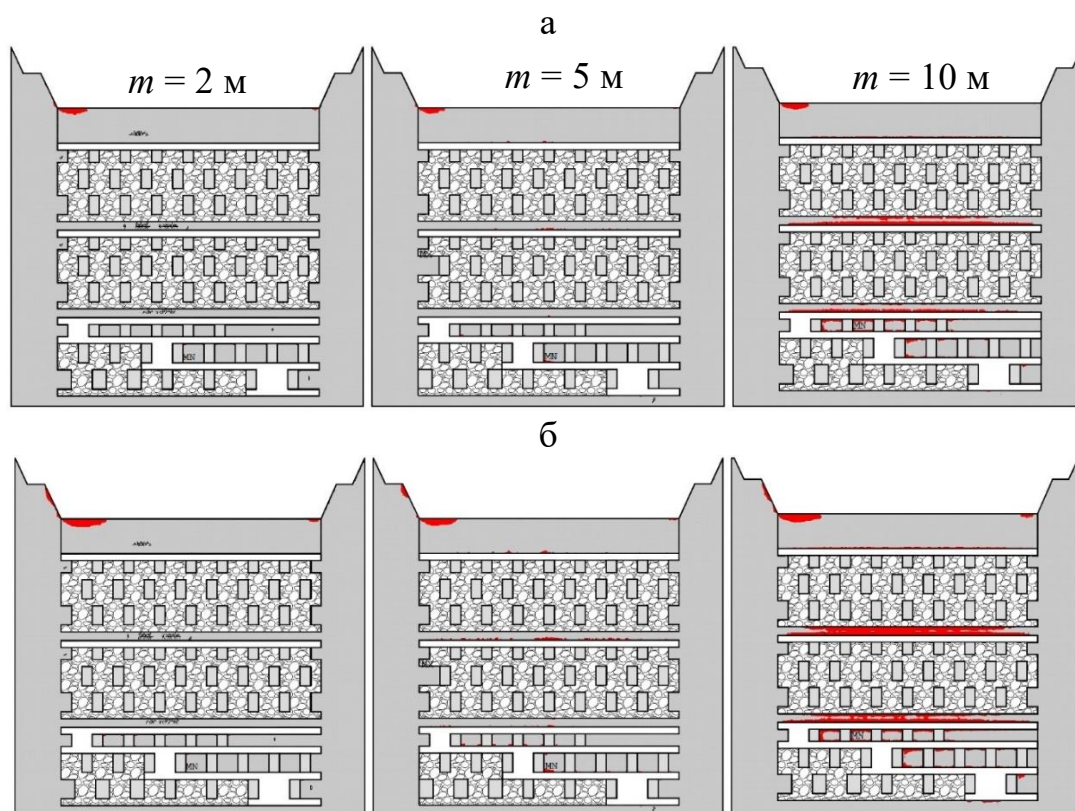


Рис. 5. Прогнозируемые участки потери устойчивости массива пород по разрезу № 1 при коэффициенте структурного ослабления $K_c = 0.3$ (а) и $K_c < 0.25$ (б)

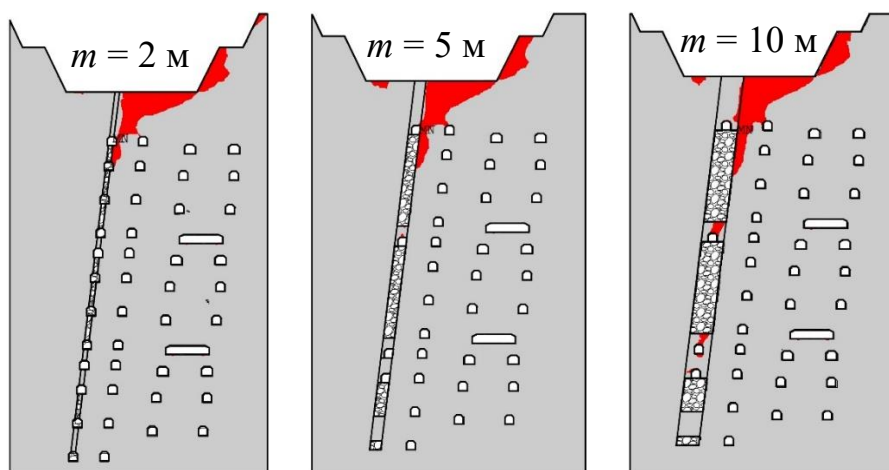


Рис. 6. Прогнозируемые участки потери устойчивости массива пород в конструктивных элементах системы разработки по разрезу № 7 при $K_c < 0.25$

1. Величина максимальных главных напряжений σ_1 , возникаемых в подкарьерном предохранительном рудо-породном целике от дна карьера по его глубине, изменяется от 10,0 до 20,0, от 12,0 до 24,0 и от 12,0 до 30,0 МПа соответственно при мощности обрабатываемого рудного тела 2,0, 5,0 и 10,0 м. Минимальные главные усилия

находятся в диапазонах соответственно $2,0 \div 6,0$, $2,0 \div 8,0$ и $2,0 \div 10,0$ МПа. Отсутствие зон растяжения благоприятно сказывается на устойчивости охранного целика.

2. Массив горных пород вокруг полевых подэтажных штреков находится в объемном сжатии, где максимальные главные напряжения в кровле и бортах выработок сопоставимы между собой и составляют $\sigma_1 = 12,0-20,0$ МПа. Характер изменения минимальной компоненты σ_3 соответствует σ_1 с точки зрения их равенства для кровли и бортов полевых штреков. В условиях сильной нарушенности горные породы, вокруг этих выработок, подвержены разрушению с выходом на дневную поверхность. Следует отметить, что с ростом мощности залежи происходит увеличение размеров зон разрушений.

3. В целом, напряжения, возникаемые в массиве вокруг выработок не превышают предельные характеристики пород, что свидетельствует о удовлетворяющей требованиям безопасности их устойчивости. Однако, учитывая нарушенность пород, которая на месторождении изменяется от слабо- до сильнотрещиноватых массивов, следует ожидать возникновения локальных участков возможных разрушений пород.

4. Для междуэтажных рудных целиков (МЭЦ) характерно повышение σ_1 с ростом мощности залежи, которые достигают 20,0, 30,0 и 40,0 МПа соответственно при m 2,0, 5,0 и 10,0 м. С увеличением толщины МЭЦ с 5,0 до 8,0 величины напряжений снижаются на 15-20 %, что существенно повышает сохранность целиков. Тем не менее устойчивость МЭЦ при мощности рудных тел 2,0-5,0 м является достаточной, при мощности залежи 10,0 м – состояние МЭЦ приближается к предельному. В связи с этим, при отработке участков залежей мощностью более 10 м высота целиков МЭЦ должна составлять 8-10 м.

5. НДС бутобетонных целиков соответствует объемному сжатию. Согласно расчетам интенсивность главных напряжений, возникающая в бутобетонных целиках, находящихся в области выемки, достигает 8,0-10,0 МПа. При всестороннем сжатии, а также учитывая тот факт, что в условиях объемного НДС предел прочности геоматериалов возрастает в среднем в 2,0-2,3 раза, можно спрогнозировать прочность бутобетонной закладки, которая должна составлять при $m = 2,0, 5,0$ и 10,0 м, соответственно не менее 3,0, 4,0 и 5,0 МПа.

Таким образом, установлено, что для ненарушенных ($K_c \geq 0,6$), слабо- ($K_c > 0,45$) и среднетрещиноватых ($K_c = 0,3-0,45$) массивов, полученные решения, свидетельствует об отсутствии явных зон возможных разрушений пород вокруг выработок, в том числе различного рода целиках (подкарьерного, МЭЦ, бутобетонных). Однако в лежащем боку залежи в пределах подкарьерного целика прослеживается зарождение областей возможных обрушений пород в массивах с $K_c = 0,3-0,4$. С ростом мощности залежи устойчивость выработок, а также МЭЦ снижается, предвзяя предельную ситуацию.

Выводы

1. Формирование бутобетонных целиков в этаже близко к шахматной схеме способствует увеличению жесткости всей горнотехнической конструкции отработанного этажа за счет уменьшения вертикального пролета погашенного очист-

ного пространства, что в целом ведет к повышению устойчивости массива пород в элементах выемки.

2. Значения полученных напряжений в элементах системы разработки с точки зрения пределов прочности массива пород на сжатие, растяжение и сдвиг не являются критическими, что относит технологию в разряд безопасных.

3. За счет действия в рудо-породном массиве месторождения тектонического природного поля напряжений, максимальные сжимающие усилия наблюдаются в кровле выработок, а также в междуэтажных целиках.

4. Для массивов пород с изменяющейся нарушенностью от средней до ниже средней ($K_c = 0,25-0,3$) с ростом мощности залижи (m) от 2 до 10 м для обеспечения безопасности горных работ следует:

- длину камеры II очереди уменьшить на верхних горизонтах с 18 до 12 м, на нижних – с 12-14 до 8-10 м;
- высоту целиков МЭЦ увеличить с 5,0 до 8,0 м на верхних горизонтах, и до 10-12 м – на нижних;
- длину камеры I очереди (ширину бутобетонных целиков) увеличить с 6 до 8 м на верхних этажах, и до 10 м на нижних горизонтах;
- нормативную прочность бутобетона увеличить с 3,0 до 5,0 МПа;

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каплунов Д.Р., Юков В.А. Геотехнология перехода от открытых к подземным горным работам: Учебное пособие. - М.: Издательство "Горная книга", 2007 – 267 с.

2. Лобанов Е.А., Чайкин Д.А., Меньшиков П.Ю. Разработка технологических решений вскрытия и отработки прибортовых и подкарьерных запасов апатито-нефелиновых руд // Фундаментальные и прикладные науки в горном деле. – 2018 – Т. 5 – № 1 – С. 88–93.

3. Козырев А.А., Мальцев В.А., Енютин А.Н., Рыбин В.В., Семенова И.Э. Геомеханическое обеспечение безопасности отработки переходных зон между подземными и открытыми горными работами. Тр.8-го между. симпозиума "Горное дело в Арктике". Санкт-Петербург, с.35-40, 2005.

4. Калмыков В.Н., Григорьев В.В., Волков П.В. Изыскание вариантов систем разработки для выемки прибортовых запасов при комбинированной геотехнологии // Вестник Магнитогорского гос. тех. универ. им. Г.И. Носова. – 2010 – № 1 – С. 17–20.

5. Неверов С. А., Неверов А. А., Щукин С. А., Шапошник Ю. Н., Никольский А. М. Обоснование отработки подкарьерных запасов золотосодержащего месторождения восходящей выемкой с породной закладкой / ФТПРПИ. – №4. – 2020, с. 79-93.

6. Конурин А. И., Щукин С. А., Неверов С. А., Неверов А. А. Подэтажное обрушение под защитой рудо-породной подушки при переходе от открытых работ к подземной выемке / Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – №2, Т. 5. – 2018, с. 67-74.

7. Макаров А.Б. Оценка влияния карьера на законтурный массив и условия совмещения открытой и подземной повторной разработки пологих залежей // В кн.: Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу / Сборник X Международной конференции, 2019: – Магнитогорск: МГТУ, 2019, с. 122-127.

8. Верниковский В.А. Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского кряжа / В.А. Верниковский, А.Е. Верниковская // Геология и геофизика. - 2006. - Т. 47. - № 1. - С. 35 – 52.

9. Козырев А.А. Закономерности распределения тектонических напряжений в верхней части земной коры / А.А. Козырев, С.Н. Савченко // Физика Земли. - 2009. - № 11. - С. 34 – 43.

10. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. & Zhu, J.Z. (2005). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Butterworth-Heinemann, 6th edn.
11. Debasis Deb, Kamal C. Das. *Extended Finite Element Method for the Analysis of Discontinuities in Rock Masses / Geotechnical and Geological Engineering*. — September 2010, Vol. 28, Issue 5.
12. Li X., He S., Luo Y. & Wu, Y. (2012). Simulation of the sliding process of Donghekou landslide triggered by the Wenchuan earthquake using a distinct element method. *Environmental Earth Sciences*, 65, 1049–1054.
13. Xue Zhang, BEng, MEng. *Particle Finite Element Method in Geomechanics / Faculty of Engineering and Built Environment. The University of Newcastle, September 2014. Australia*<https://www.researchgate.net/publication/301351333>.
14. Makarov A.B. Comparison of limit equilibrium and finite element methods to slope stability estimation A.B. Makarov, I.S. Livinsky, V.I. Spirin, A.A. Pavlovich / сборнике: *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*. Set of 2 V. 2018. С. 845-850.
15. В. Пыасов. Prediction of rock movements using a finite-discrete element method / В. Пыасов, А. Makarov I. Biryuchiov // *EUROCK 2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium – London: CRC Press, 2018. – Vol. I, p. 805.*
16. Неверов С.А. Геомеханическая оценка устойчивости выработок выпуска руды при системах с обрушением / С.А. Неверов, А.А. Неверов // *ФТПРПИ*. – 2013. – № 2.
17. А. Makarov. Rock mechanics of pillars extraction / А. Makarov, D. Mosyakin // *EUROCK 2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium – London: CRC Press, 2018. – Vol. I, p. 1046.*
18. Фрейдин А. М., Неверов С. А., Неверов А. А., Конурич А. И. Геомеханическая оценка геотехнологий подземной добычи руд на стадии проектных решений // *Горный журнал*. – 2016. – № 2. – С.39-45.
19. Feng D.-K., Zhang J.-M., Hou W.-J. Three-dimensional direct-shear behaviors of a gravel-structure interface, 2018, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(12), 04018095.
20. Савич И.Н. Геомеханическое обоснование параметров камерной системы разработки с закладкой на корбалихинском месторождении // И.Н. Савич, А.А. Лифарь-Лаптев, А.М. Яковлев, М.О. Сыренов, Г.А. Карасев // *Горный информационно-аналитический бюллетень ГИАБ (научно-технический журнал)*. – 2020. – № S25. – С. 3-14.

© С. А. Шукин, А. А. Неверов, С. А. Неверов, 2021