

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.274.36 / 44

ОБОСНОВАНИЕ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ ВЫЕМКИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ РАЗВИТИЯ МОДЕЛЬНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ПРИРОДНОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ

А. А. Неверов¹, С. А. Неверов¹, А. П. Тапсиев¹, С. А. Щукин¹, С. Ю. Васичев²

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

E-mail: nnn_aa@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²ООО Бийский гравийно-песчаный карьер, 59558, Алтайский край, с. Шульгинка, Россия

Определены и систематизированы геомеханические условия разрабатываемых и вводимых в эксплуатацию рудных месторождений на базе их типизации по геолого-структурным особенностям, для которых характерна общность закономерностей распределения напряжений в нетронутом массиве пород. Установлены область и предельная глубина применения некоторых геотехнологий в рамках реализации геомеханических моделей геосреды.

Массив горных пород, напряженное состояние, геомеханическая модель, системы разработки, целик, разрушение, устойчивость, безопасность

DOI: 10.15372/FTPRPI20190409

В России подземным способом разработки добывается ~30% руд цветных, черных металлов и агрохимического сырья. Одна из основных проблем подземной добычи — интенсивное углубление горизонтов выемки, сопровождающееся постоянным увеличением горного давления. Изменение напряженно-деформированного состояния массива пород с некоторых глубин, определяемых геолого-структурным строением месторождения, вызывает разрушение горных конструкций подземных геотехнологий в статической и динамической формах.

Сформулируем основные принципы ведения горных работ в сложных геомеханических условиях больших глубин:

- порядок отработки залежей следует осуществлять от центра к флангам без оставления целиков, а также образования краевых углов и выступов фронта очистных работ;
- система разработки должна обеспечивать одностадийный порядок выемки с минимальной изрезанностью массива горных пород подготовительно-нарезными выработками;
- скорость движения фронта очистных работ должна соответствовать способности массивов руд и пород к их релаксации [1–5].

Этим принципам отвечают сплошные слоевые и камерные технологии с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями [1–7]. Однако отработка месторождений руд высокой ценности и рядового качества по экономическим соображениям требует применения

более производительных и менее затратных способов добычи минерального сырья. В России, Швеции, США, Канаде, Чили, Замбии и др. при разработке мощных рудных залежей в больших масштабах используется система с обрушением руды и вмещающих пород, а также этажной и подэтажной выемкой на глубинах до 1000 м и более.

Как правило, такие геотехнологии реализуются одностадийно, с торцовым, площадно-торцовым или площадным выпуском руды на геологических объектах, где верхняя граница залежей расположена близко от дневной поверхности. В подобном исполнении эти варианты систем разработки в основном отвечают принципам ведения горных работ на больших глубинах.

Другой яркий пример — освоение комбинированных систем разработки, сочетающих разные способы управления горным давлением. За рубежом известны случаи успешного преодоления трудностей больших глубин системами с открытым очистным пространством и обрушением [1, 3–7]. Так, на глубоких (700–1000 м) рудниках “Конрад” (Германия), “Денисон” и “Нью-Квирк” (Канада) первоначальная разработка пологих залежей мощностью 8–12 м велась камерно-столбовой системой. Резкое ухудшение геомеханических условий выемки определило разработку нового варианта комбинированной технологии. Его сущность заключалась во временном поддержании пород кровли опорными целиками с последующим обрушением налегающей толщи в отступающем порядке. Подобная система распространена на рудниках Легницко-Глогувского меднорудного бассейна (Польша). Рудные тела на глубинах 800–1050 м отрабатывались панелями 200 × 200 м с оставлением временных столбчатых целиков по сетке 10 × 10 м. Погашение целиков осуществлялось подрывом их основания, что способствовало плавному опусканию налегающей толщи.

Пределные глубины освоения геотехнологий с обрушением, в том числе комбинированных, до сих пор не установлены, и нет единого мнения в их абсолютных значениях. В технической литературе максимальная глубина разработки месторождений с обрушением руды и вмещающих пород регламентируется на уровне 900–1200 м [1–7].

Обязательным условием безопасного применения выделенных систем разработки является постоянное и планомерное обрушение вмещающих пород вслед за погашением запасов в объемах, равных так называемой подушке безопасности. С ростом глубины выемки, особенно в тектонически напряженных массивах пород, режим процесса их сдвижения и обрушения осложняется и становится неуправляемым.

Наряду с проблемой поиска области применения систем разработки, использующих в качестве основного способа управления горным давлением процесс обрушения, необходимо отметить особое место в краткосрочной перспективе отработки временно неактивных запасов, сосредоточенных в ранее оставленных целиках, погашение которых рассматривается как неизбежная данность. Условия и способы отработки этих запасов в сложившейся горнотехнической обстановке действующих месторождений также требуют новых исследований, в том числе в части геомеханического обоснования их безопасного извлечения.

В [8–16] приведены результаты измерений исходного поля напряжений в верхней части земной коры различных горнодобывающих регионов мира. Анализ и систематизация 175 измерений напряженно-деформированного состояния позволили выделить геолого-тектонические структуры, для которых практически идентично описывается характер изменения напряженного состояния горных пород с ростом глубины их залегания. Научное обобщение, корреляционный анализ и статистическая оценка выделенных тектонотипов геологических структур сведены в [9] к четырем геомеханическим моделям геосреды, которым подчиняются 85 % всех действующих и вводимых в эксплуатацию месторождений с вероятностью наступления события не менее 0.84.

Под геомеханической моделью понимается напряженное состояние массива горных пород, которое характеризуется соотношением максимальных горизонтальных и вертикальных напряжений применительно к определенным геологическим структурам и интервалу глубин и в процессе исследований замещает исходное природное поле напряжений месторождений с сохранением основных закономерностей его изменения. На рис. 1 приведено распределение геомеханических условий рудников по уровню напряженного состояния.

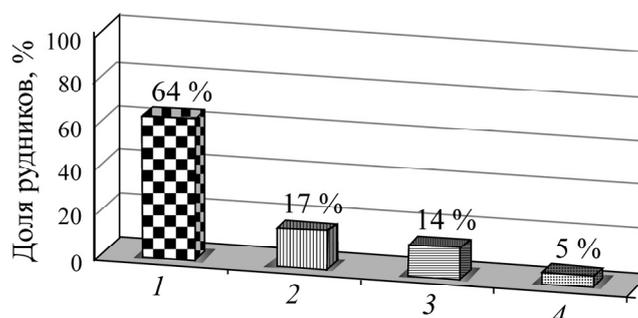


Рис. 1. Структура природного поля напряжений массивов горных пород по данным действующих горных предприятий, разрабатывающих твердые полезные ископаемые: 1 — тектоническое; 2 — гидростатическое; 3 — гравитационное; 4 — сложное неоднородное поле напряжений

Очевидно, что каждой из четырех геомеханических моделей напряженного состояния массива горных пород соответствуют свои безопасная глубина и область использования различных классов систем разработки, в том числе систем с обрушением руды и вмещающих пород и комбинированных геотехнологий. В то же время для уровня напряженного состояния характерна последующая трансформация и взаимное замещение одной геомеханической модели на другую. Следовательно, выбор и обоснование сферы применения геотехнологий выемки в сложных геомеханических условиях больших глубин должны основываться на фундаментальных представлениях о геолого-тектонических структурах массива горных пород, закономерностях изменения его природного поля напряжений и учете ценности добываемого минерального сырья.

Реализация геомеханических моделей геосреды на стадии проектирования позволит с высокой надежностью прогнозировать количественные (прикладные) характеристики полей напряжений, исключить ошибки принятия некорректных инженерных решений и значительно увеличить достоверность определения устойчивых параметров систем разработки при обосновании подземных горных работ.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ГЛУБИНЫ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ НА ВЫБОР СИСТЕМ РАЗРАБОТКИ

Один из возможных путей решения проблем больших глубин — развитие модельных представлений массивов горных пород в рамках структурно-геологического строения, наряду с фундаментальными исследованиями включающие количественные и аналитические оценки изменения параметров природного поля напряжений как прикладного способа для обоснования технологий добычи полезных ископаемых.

Выделенным типам геолого-тектонических структур [8, 9] соответствуют определенные геомеханические модели напряженно-деформированного состояния рудопородного массива. Большинство данных по замерам максимальных горизонтальных напряжений с ростом глубины

ны удовлетворительно моделируются логарифмическими, степенными функциями и прямолинейными зависимостями, формализованное представление которых в виде геомеханических моделей геосреды и области их влияния представлены на рис. 2.

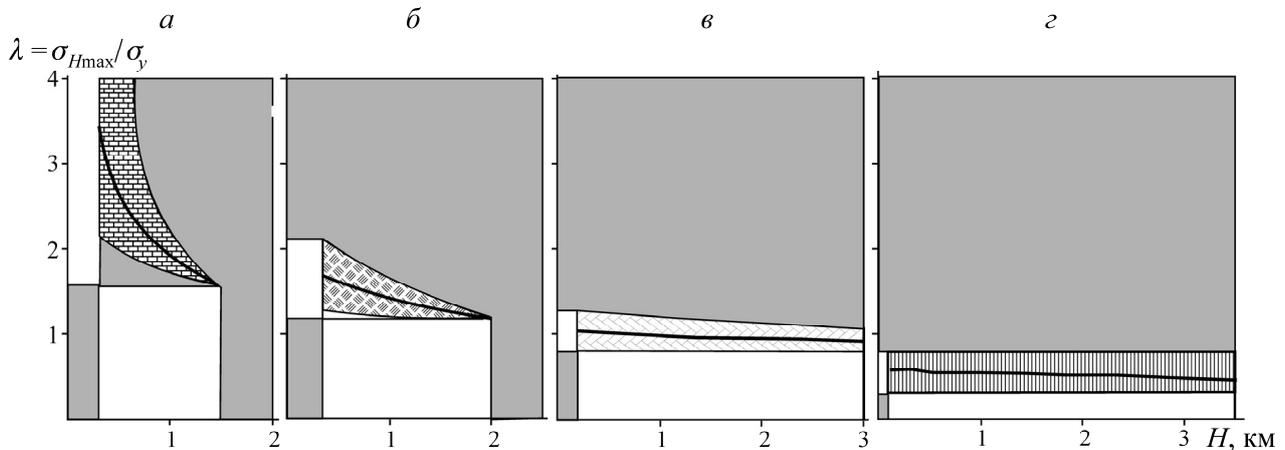


Рис. 2. Графическая интерпретация геомеханических моделей массивов горных пород: а — геодинамическая модель; б — тектоническая; в — геостатическая; г — гравитационная (H — глубина залегания, $\sigma_{H\max}$, σ_y — максимальные горизонтальные и вертикальные напряжения)

Результаты установленных распределений напряжений по месторождениям полезных ископаемых, расположенных в выделенных типах геолого-тектонических структур, имеют высокую сходимость с натурными данными измерений (коэффициент корреляции > 0.84), примеры которых отражены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Геомеханические модели массивов горных пород, соответствующие наиболее показательным действующим горным предприятиям

Геомеханическая модель, область ее влияния	Район, месторождение, рудник
I. Геодинамическая, $300 \leq H \leq 1300$ $1.6 \leq (\lambda = \sigma_{H\max} / \sigma_y) \leq 4.0$	Горная Шория и Хакасия, Николаевское, Гайское, Высокогорское, Лебяжинское, Хибинская группа залежей. Кируна — Швеция. Горно-складчатые области Северной Америки
II. Тектоническая, $300 \leq H \leq 2000$ $1.2 \leq (\lambda = \sigma_{H\max} / \sigma_y) \leq 2.0$	Норильский рудный пояс, Уральский регион, Нежданинское — Якутия. Тишинское, Зыряновское — Восточный Казахстан. Мальмбергет — Швеция, Маунт-Айза — Австралия, Крейтон, Садбери — Рудники в пределах Канадского щита
III. Геостатическая, $300 \leq H \leq 3500$ $0.8 \leq (\lambda = \sigma_{H\max} / \sigma_y) \leq 1.2$	Алмазоносная провинция Якутии, Криворожский железорудный бассейн — Украина. Ларонде, Голдекс — Канада. Витватерсранд — ЮАР. Муфулира — Замбия. Колар — Индия
IV. Гравитационная, $300 \leq H$ $\lambda = \nu / (1 - \nu) \approx 0.2 - 0.7$, ν — коэффициент Пуассона	Угольные месторождения осадочного происхождения. ш. Терновская, Гвардейская — Украина. Рудники Муфьелетт, Редсанн — Норвегия. Лаки-Фрайди, Морнинг-Стар — США. Дрифонтейн, Тау-Тона — ЮАР

Совокупный анализ и научное обобщение напряженного состояния геосреды и типа геолого-тектонической структуры позволяют выявить устойчивые закономерности изменения напряженности породного массива с ростом глубины и осуществить обоснование крайних состояний для решения практических задач геомеханики, направленных на выбор систем разработки и определение их параметров.

С целью верификации геомеханических моделей массивов горных пород с практическими условиями эксплуатации действующих рудников выполнено обобщение используемых классов систем разработки (рис. 3) применительно к корреляционным (прогнозным) зависимостям изменения параметров естественного поля напряжений (рис. 2) на рассматриваемых месторождениях. На рис. 3, 4 отображены результаты анализа геотехнологий, применяющихся более чем на 90 рудниках мира.

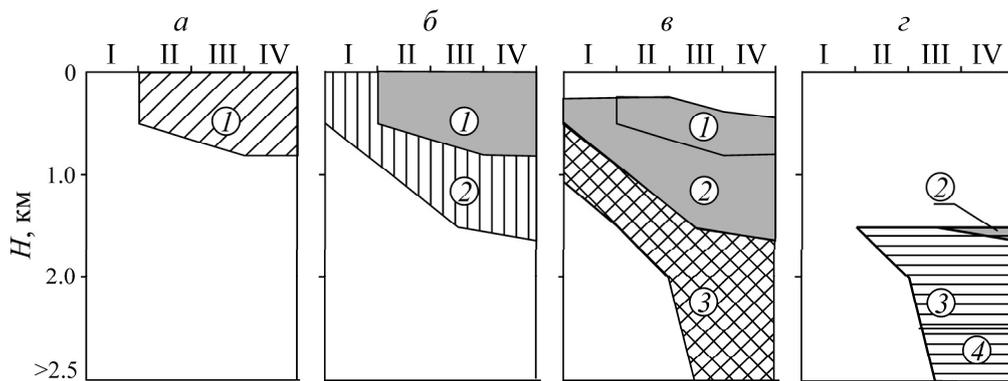


Рис. 3. Соответствие геомеханических моделей геосреды выделенным классам систем разработки рудных месторождений: *а* — технологии с открытым выработанным пространством (1); *б* — с обрушением (2); *в* — с закладкой (3); *г* — с закладкой и физико-химические (4); — области взаимного влияния различных вариантов систем разработки, в том числе комбинированных геотехнологий; I–IV — соответственно геодинамическая, тектоническая, геостатическая и гравитационная модели массива горных пород

В относительно простых горно-геологических и горнотехнических условиях выемки рудных залежей могут применяться известные системы разработки, к которым относятся категории А, Б, В, Г и Д (рис. 4).

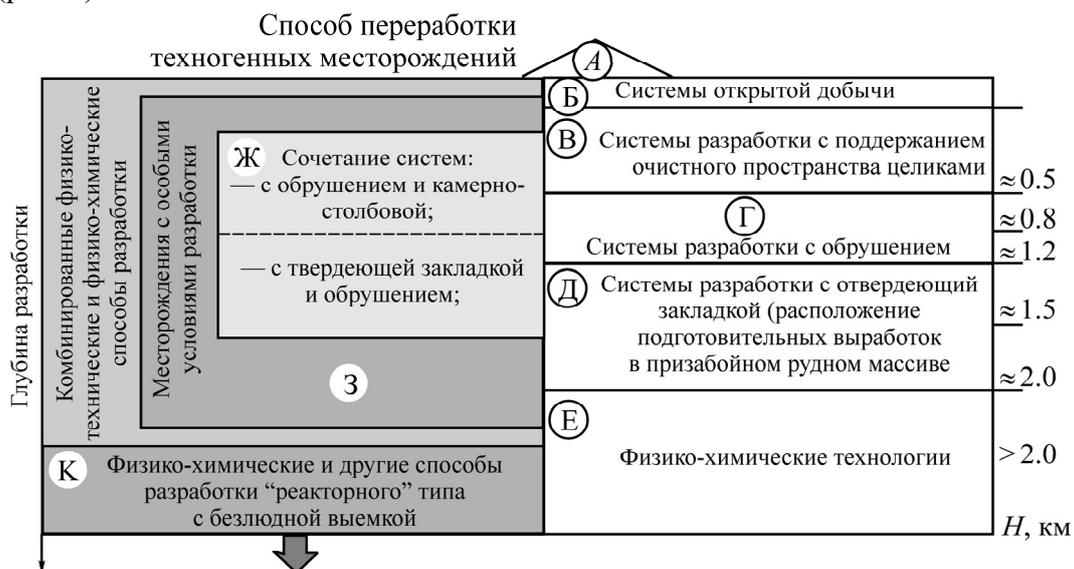


Рис. 4. Область применения систем разработки по глубине выемки

С ростом глубины выемки повышается стоимость геотехнологий. В отдельную группу выделены месторождения с особыми требованиями к разработке (З), например обводненные, залегающие под наносами или определяющие вынужденный переход от открытых горных работ к системам с твердеющей закладкой.

В сложных условиях добычи, к которым относятся большие глубины, аномальная напряженность пород, качественная и количественная характеристика руд, инновационными направлениями будут являться распространение области применения автоматизированных технологий (зона Е); создание комбинированных физико-технических систем разработки, позволяющих частично использовать менее затратные геотехнологии в области применения более дорогих (зона Ж); формирование комбинированных физико-технических и физико-химических способов добычи (зона И), в процессе применения которых, так же как и при переработке техногенных отходов (зона А), нарабатываются элементы рудника будущего — безлюдная выемка (зона К).

Основная особенность выполненных обобщений — наложение по глубине различных классов систем разработки друг на друга с образованием областей совместного влияния (рис. 4). Эти области определяют возможность безопасного освоения различных вариантов геотехнологий и сочетаний способов управления горным давлением, расширяя диапазон эффективного применения более “дешевых” систем на больших глубинах. При этих условиях на выбор системы разработки решающую роль в одинаковой степени с напряженным состоянием оказывают региональные и локальные особенности месторождений, например геоморфологическое строение, сейсмическая активность, наличие глубинных разломов и т. д.

Установленные на современном этапе развития горных работ области применения геотехнологий по глубине добычи представляют собой опыт эксплуатации рудников и экспертный подход к выбору систем разработки. Предлагаемые геомеханические модели геосреды в значительной степени расширяют возможности оценки горнотехнической ситуации на месторождениях и способствуют более корректному планированию подземной разработки.

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГЕОСРЕДЫ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ СИСТЕМ РАЗРАБОТКИ С РОСТОМ ГЛУБИНЫ ГОРНЫХ РАБОТ

Чтобы обосновать основные решения, связанные с разработкой месторождений полезных ископаемых на больших глубинах, проверить их надежность и достоверность, необходимо осуществить поиск рациональных геотехнологий в сфере влияния геомеханических моделей геосреды, представленных различными тектонотипами массива пород, и сопоставление их с имеющимися в практике примерами отработки глубокозалегающих рудных тел.

Для обоснования достоверности определения параметров геотехнологий с учетом уровня напряженно-деформированного состояния пород, детерминированного типом геолого-тектонических структур, приведены исследования по определению области применения и предельной глубины освоения системы подэтажного обрушения, комбинированных технологий и способов выемки различного рода целиков.

Наиболее перспективная геотехнология в условиях больших глубин и существенного снижения ценности и качества добываемых руд — вариант подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды. Глубина освоения этой системы разработки ограничивается значениями до 1200 м, является малоизученной и требует дополнительных обоснований [1 – 3, 20].

Исследуемая область горных работ включает три подэтажа: два из них находятся в очистной выемке и один — в процессе подготовки. Угол падения залежей — 60, 75 и 90°, мощность — 40–60 м. Высота подэтажа — 18–22 м, расстояние между буродоставочными ортами — 14–18 м, толщина отбиваемого слоя руды, подготовленного к отбойке — 3.4–4.4 м. Принятые горнотехнические условия для обоснования технологии — это аналоги действующих отечественных рудников Горной Шории, Дальнего Востока, Урала, предприятий ближнего и дальнего зарубежья: Казахстана, Украины, Швеции, Австралии, Канады, США и Чили. Анализ напряженно-деформированного состояния массива горных пород и его устойчивости в элементах системы разработки осуществлялся посредством численного моделирования методом конечных элементов в трехмерной постановке [17–21].

В качестве оценочных критериев прочности пород в элементах технологии для прогнозирования их устойчивости применялись теории наибольших нормальных напряжений (по растягивающей компоненте) и Кулона–Мора [18–24]:

$$|\sigma_3| \leq K_c \sigma_p, \quad (1)$$

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \phi. \quad (2)$$

Коэффициент запаса устойчивости массива пород определяется как

$$K_{\sigma_3} = \frac{K_c \sigma_p}{|\sigma_3|} > 1, \quad K_y = \frac{2C \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi}{(\sigma_1 - \sigma_3)}.$$

Здесь σ_1 , σ_3 — соответственно максимальные и минимальные главные напряжения, действующие в массиве (получены из упругого решения), МПа; K_c — коэффициент структурного ослабления, доли ед.; σ_p — предел прочности породы на растяжение, МПа; τ — предел прочности породы по касательным напряжениям, МПа; C — сцепление пород, МПа; σ — нормальное напряжение на площадке разрушения, МПа; ϕ — угол внутреннего трения, град. Значения K_{σ_3} и K_y менее единицы характеризуют разрушение пород.

Область применения системы разработки подэтажного обрушения определялась в соответствии с параметрами разработанных [8, 9] геомеханических моделей геосреды (табл. 1). Одно из условий эффективного и безопасного применения данной системы разработки наряду с устойчивостью выработок — способность вмещающего массива к обрушению и заполнению выработанного пространства породами по мере выпуска руды. Последнее исключает зависание горных пород и возможность возникновения динамических явлений в виде внезапных обрушений — горных ударов.

Трещиноватость за счет нарушенности массива — основной фактор в реализации процесса самообрушения и главный критерий устойчивости породы, от которого зависит способ крепления выработок и способность обрушаться.

В качестве критериев оценки обрушаемости пород приняты условия самообрушения вмещающей толщи за счет возникновения вблизи обнажений скальвающих (под влиянием касательных сдвигающих усилий) и растягивающих (трещины отрыва) напряжений. При этом необходимо отметить разную роль вклада геомеханических моделей геосреды в активизацию и развитие процессов разрушения пород. Результаты расчетов представлены на рис. 5, 6 в виде распределения коэффициента запаса устойчивости конструктивных элементов и графиков предельной глубины применения геотехнологии.

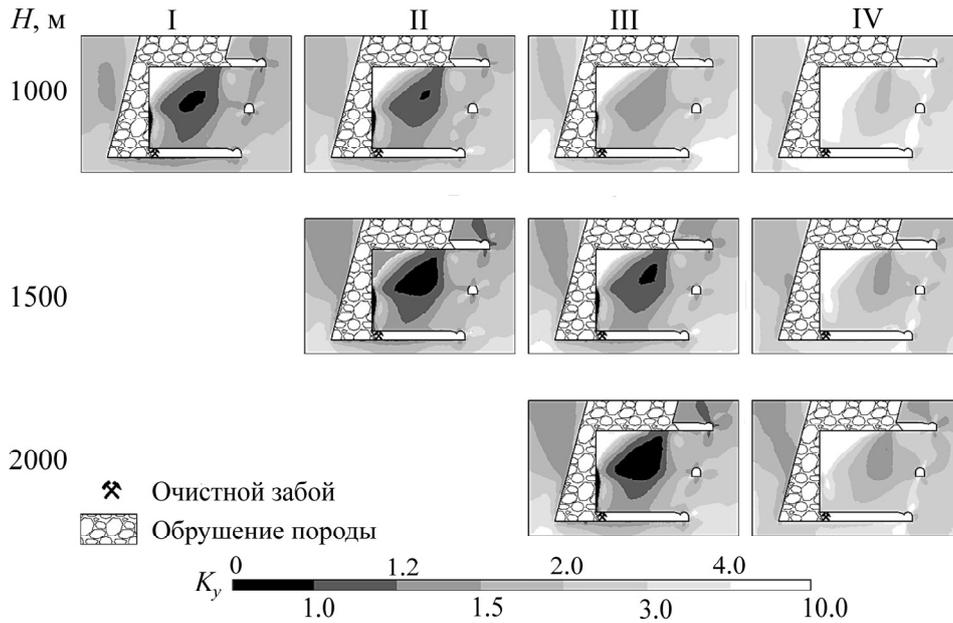


Рис. 5. Коэффициент запаса устойчивости массива горных пород K_y в конструктивных элементах системы разработки подэтажного обрушения (фрагменты вкрест простирания) при $K_c = 0.4$; I–IV — соответственно геодинамическая, тектоническая, геостатическая и гравитационная модели массива горных пород

Обобщающая оценка области применения системы подэтажного обрушения по глубине сведена в табл. 2.

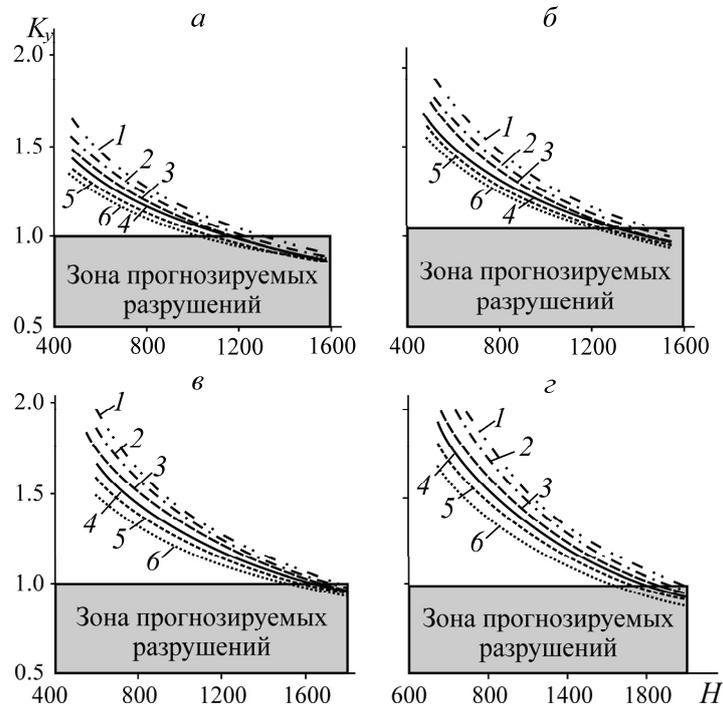


Рис. 6. Изменение коэффициента K_y вокруг выработок горизонта доставки в условиях геодинамической (а), тектонической (б), геостатической (в) и гравитационной (z) геомеханических моделей: 1–3 — при $K_c = 0.6$ и углах падения залежи 90, 75 и 60° соответственно; 4–6 — при $K_c = 0.4$ и углах падения 90, 75 и 60° соответственно

Значения K_y в условиях нарушенности пород и изменчивого поля напряжений свидетельствуют о достаточно широком диапазоне устойчивости конструктивных элементов геотехнологии на больших глубинах. В породах висячего бока, границах отработанного вышележащего подэтажа, формируется зона разгрузки, в которой напряжения близки к растягивающим. На основании последнего можно утверждать о способности горных пород к обрушению.

Приведенные данные в табл. 2 и на рис. 6 удовлетворительно согласуются с практическими данными освоения систем подэтажного обрушения на действующих месторождениях:

- рудники Артемьевский, Иртышский (Восточный Казахстан) — геостатическая модель, $H = 800$ м (условия применения технологии соответствуют практическим данным без видимых изменений);
- месторождения Крейтон, Садбери (горные предприятия Канады) — тектоническая и геостатическая модели, $H = 1300–1800$ м (при отработке ненарушенных участков);
- месторождение Лакки Фрайди (США) — гравитационная модель, $H = 1710$ м (при выемке локальных участков);
- рудник Кируна (Швеция) — тектонический тип, $H = 1300$ м (повсеместное совпадение);
- рудник Николаевский, месторождение Восток-2 (Россия, Дальний Восток) — тектоническая модель, $H = 900$ м (при отработке локальных залежей).

ТАБЛИЦА 2. Глубина применения системы подэтажного обрушения

Геомеханическая модель	Угол падения, град	Предельная глубина по условию устойчивости выработок, м (не более)		Минимальная глубина по способности пород к обрушению, м		Совокупная оценка (максимальная глубина применения)	
		$K_c = 0.4$	$K_c = 0.6$	$K_c = 0.4$	$K_c = 0.6$	$K_c = 0.4$	$K_c = 0.6$
I. Геодинамическая	90	1200	1300	700	750	1200	1300
	75	1150	1250	700	750	1150	1250
	60	1100	1220	650	700	1100	1200
II. Тектоническая	90	1350	1470	700	750	1350	1470
	75	1320	1420	650	700	1320	1420
	60	1300	1370	600	650	1300	1370
III. Геостатическая	90	1650	1750	650	700	1650	1750
	75	1600	1720	600	650	1600	1720
	60	1550	1680	550	600	1550	1680
IV. Гравитационная	90	1850	2000	600	650	1850	2000
	75	1800	1950	500	550	1800	1950
	60	1750	1900	450	500	1750	1900

РАЗВИТИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СПОСОБОВ ПОГАШЕНИЯ ЦЕЛИКОВ

Применительно к отработке пологих рудных месторождений выполнено обоснование комбинированных систем, сочетающих разные способы управления горным давлением. К последним относится камерно-столбовая выемка с последующим обрушением в двух вариантах (рис. 7, 8).

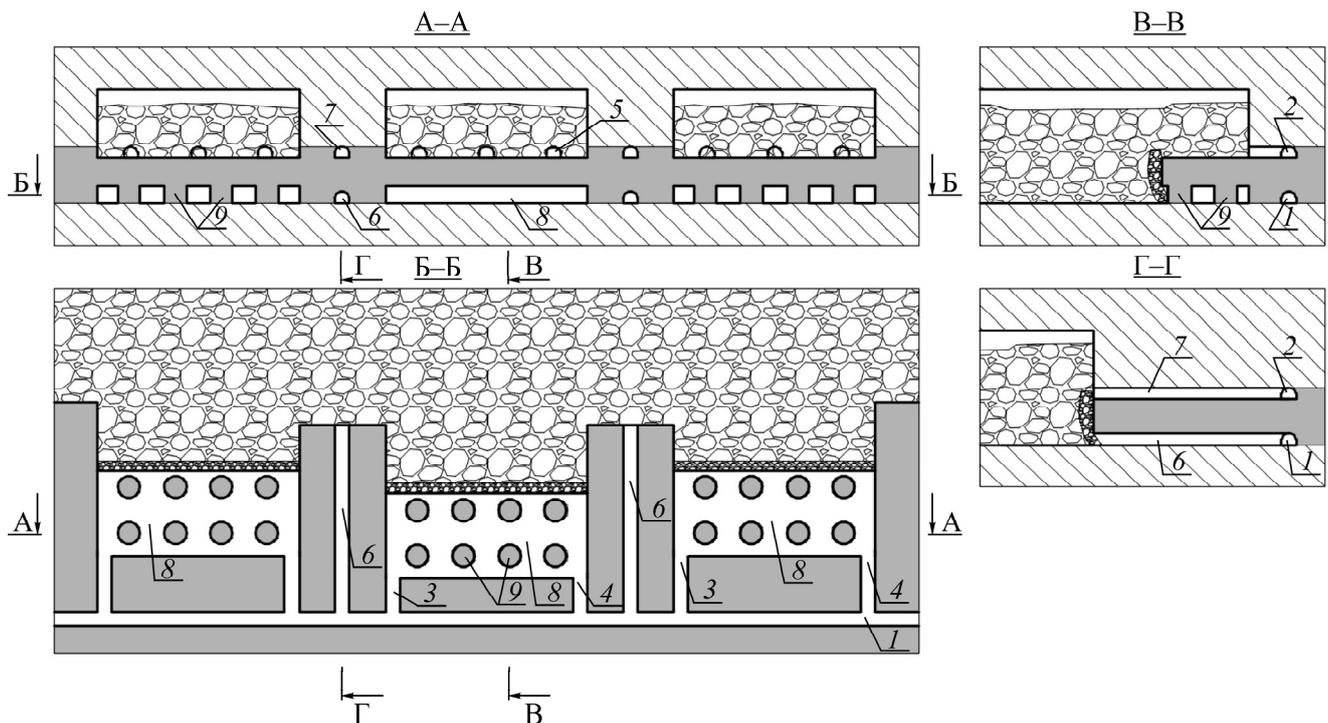


Рис. 7. Комбинированная система разработки с камерно-столбовой выемкой в сочетании с обрушением вмещающих пород: 1, 2 — транспортный и вентиляционный штреки соответственно; 3, 4 — панельный доставочный и вентиляционный орты соответственно; 5 — буровентиляционный орт панели; 6 — буродоставочный орт панельного целика; 7 — вентиляционный орт целика; 8 — лавная подсечка; 9 — столбчатые целики

С целью корректного сравнения расчетных данных с фактическими показателями рудников первоначально выполнено обобщение мирового опыта отработки пологих месторождений камерно-столбовой системой как близкого аналога рассматриваемых технологий.

Определение параметров и области применения систем разработки, сочетающих способы управления горным давлением открытыми камерами и обрушением, с учетом модельного представления напряженно-деформированного состояния массива пород проводилось путем верификации результатов исследований с практическими данными действующих рудников, осуществляющих добычу в различных геомеханических условиях.

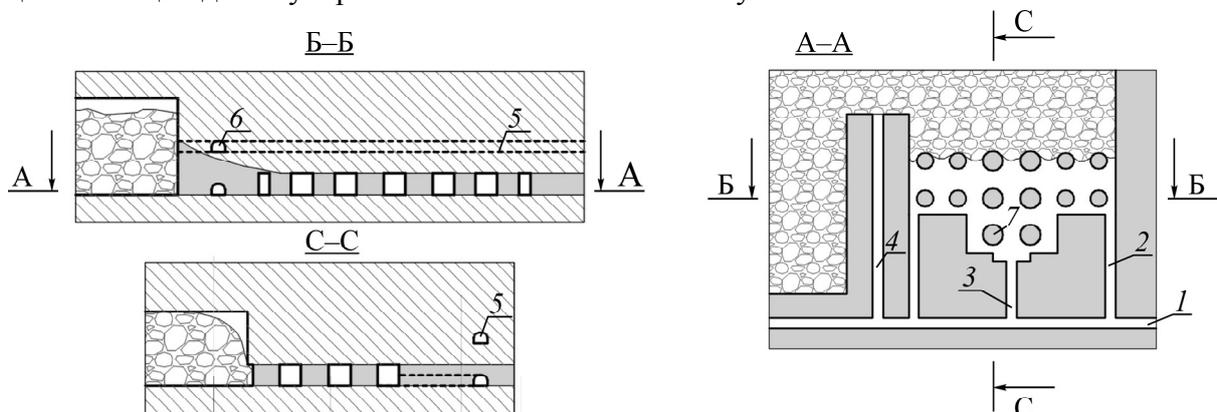


Рис. 8. Камерно-столбовая система разработки с регулярным извлечением целиков и обрушением пород кровли: 1 — панельный транспортный штрек; 2 — панельный вентиляционный орт; 3 — разрезной орт; 4 — буродоставочный орт; 5 — вентиляционно-посадочный штрек; 6 — посадочный орт; 7 — столбчатые целики

На рис. 9 приведены участки возможных разрушений пород в элементах систем разработки при коэффициенте структурного ослабления массива $K_c = 0.5$.

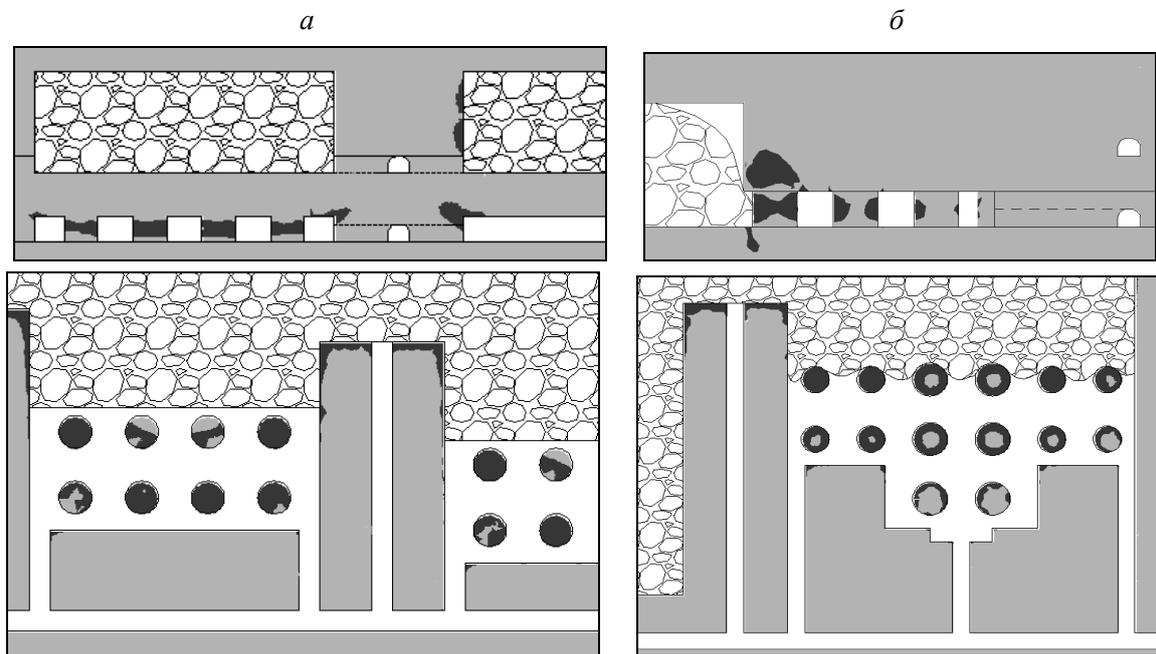


Рис. 9. Прогнозные зоны разрушения массива пород в условиях комбинированной геотехнологии $K_c = 0.5$: *а* — при камерно-столбовой выемке в сочетании с системой с обрушением; *б* — с помощью камерно-столбовой системы с регулярным извлечением целиков и обрушением кровли

Выполненные исследования показали следующие результаты:

- представленные комбинированные технологии с элементами камерно-столбовой выемки и обрушением в условиях гравитационной модели геосреды имеют предельную глубину применения, не превышающую 1000 м в массивах пород средней и малой нарушенности. На глубинах свыше 1000 м использование систем разработки возможно, но с обязательным проведением мероприятий по разгрузке массивов от высоких напряжений;
- приведенная сравнительная оценка доказывает достаточно высокую степень согласованности полученных расчетных данных с практическим опытом (на примере рудника “Конрад” Германия, где глубина добычи составляет 1000 м);
- повышение безопасности применения камерно-столбовой выемки с обрушением налегающих пород в условиях глубоких горизонтов может быть достигнуто за счет использования более широких столбчатых опор увеличенного диаметра (до 12 – 15 м) либо ленточных целиков.

Наряду с описанной комбинацией способов управления горным давлением (за счет естественной устойчивости массива и обрушения) в рамках одной геотехнологии также следует уделить внимание системам разработки, сочетающим обрушение и закладку.

Высокая стоимость твердеющей закладки предопределяет необходимость поиска менее затратных способов разработки залежей с малой и средней ценностью руд. Анализ способов управления кровлей показал, что для обеспечения ее плавной посадки, ограничения скорости движений и величины деформаций допустимо в ряде условий лишь частично закладывать выработанное пространство. В этой связи перспективно развивать направление по разработке способов управления горным давлением с помощью рудных и искусственных целиков из твердеющей закладки. На рис. 10 представлен вариант комбинированной системы разработки с закладкой и обрушением [25].

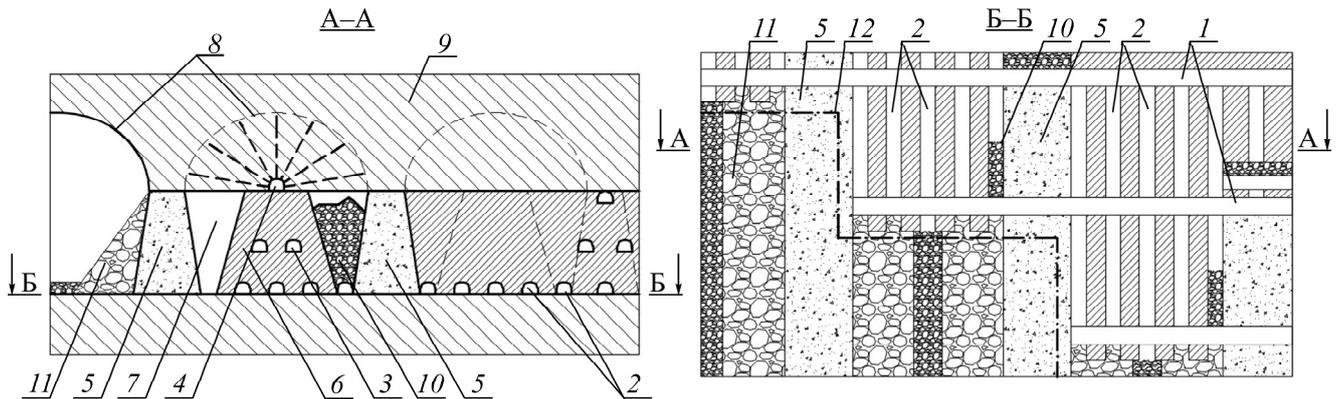


Рис. 10. Комбинированная система разработки с управлением горным давлением закладкой и обрушением: 1 — панельный штрек; 2 — буродоставочный орт; 3 — подэтажные штреки; 4 — посадочный орт; 5 — искусственные целики; 6 — рудные массивные целики; 7 — камеры в границах рудного целика; 8 — свод естественного равновесия; 9 — породный массив; 10 — отбитая руда; 11 — обрушенные породы кровли (подпорные откосы); 12 — уступный фронт ведения очистных работ

Сначала извлекают рудные участки (первичные камеры) трапециевидного сечения на полную мощность залежи. После их отработки проводят закладку выработанного пространства твердеющей смесью, в результате формируются искусственные (закладочные) массивы, между которыми образуются рудные целики. Перераспределение горного давления на искусственные массивы выполняют с помощью частичной отработки запасов краевых частей рудных целиков расширяющимися кверху камерами. Далее осуществляют принудительное обрушение налегающих пород кровли между искусственными целиками, в результате чего достигается полная разгрузка центрального массивного рудного целика. При этом обрушенные породы заполняют расширяющиеся кверху камеры, создавая боковой подпор для искусственных целиков.

Следующий этап очистных работ — извлечение массивного рудного целика технологией подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды. После погашения его запасов в выработанном пространстве у боковых поверхностей искусственных целиков формируются подпорные откосы. При этом поддержание (управление кровлей) налегающей толщи пород совершается взаимным действием искусственных (закладочных) опор и опирающимся на них устойчивым сводом естественного равновесия.

Исследованиями по обоснованию параметров геотехнологии установлено, что уступный фронт отработки смежных массивных рудных целиков на стадии извлечения краевых расширяющихся кверху камер трапециевидной формы позволяет снизить концентрацию сжимающих напряжений по направлению выемки над искусственными опорами на 15–20%, вследствие чего повышается безопасность работ. При этом рациональное соотношение ширины рудного целика с заложеной твердеющей закладкой камеры, с учетом объемов извлечения системами с закладкой и обрушением, находится в диапазоне 1.6–2.5.

Рассмотренные варианты комбинированной выемки значительно повышают надежность управления напряженным состоянием массива путем формирования управляемого обрушения и возведением искусственных целиков в сочетании со сводом естественного равновесия в налегающих породах кровли, существенно снижая вероятность динамических проявлений горного давления и тем самым значительно расширяя область применения систем разработки.

Установленная геомеханическая модель месторождения в совокупности со сложившейся горнотехнической обстановкой на действующих рудниках определяет эффективность и безопасность отработки различного рода целиков. Формирование последних связано в основном с более ранней отработкой системами с открытым выработанным пространством и управлением горным давлением естественной устойчивостью рудопородного массива.

Так, применительно к условиям крутопадающего маломощного Иртышского рудного месторождения выполнены комплексные исследования по обоснованию и выбору наиболее приемлемого (с точки зрения безопасности) порядка и подходящей технологии доработки ранее оставленных междукамерных (МКЦ), подштрековых (ПШЦ) и надштрековых (НШЦ) целиков, сформированных камерными системами разработки с открытым выработанным пространством (рис. 11, 12). Согласно правилам техники безопасности, для отработки целиков необходимо использовать только существующие в них сооружения. Проходить новые горные выработки разрешается только при условии, когда отработанные камеры заполнены пустой породой, закладкой или рудой.

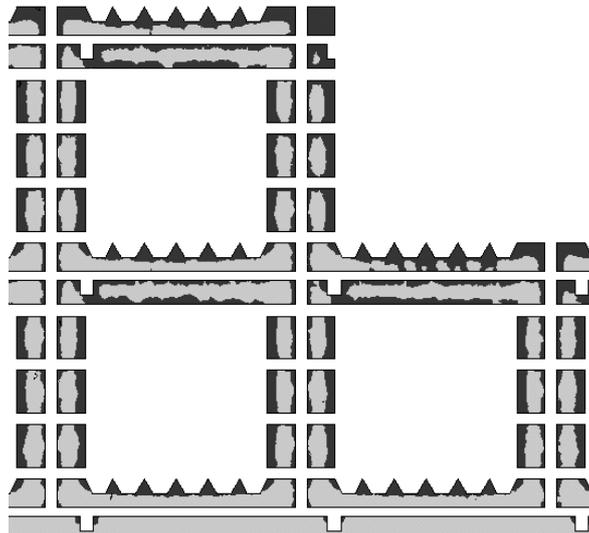


Рис. 11. Зоны возможных разрушений в целиках Иртышского месторождения в условиях рудной подготовки при ширине МКЦ 15 м, высоте ПШЦ и НШЦ 5 и 8 м соответственно

Способы выемки целиков разделяются на две группы, существенно различающиеся между собой по конструктивным признакам. Первая группа — способы выемки целиков при открытых камерах, вторая — при заполненных камерах, например закладкой или пустыми породами.

На основе установленных закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния и устойчивости массива пород с оценкой его морфоструктурных особенностей и конструктивных параметров предложен дифференцированный порядок погашения целиков по простиранию и падению залежи. Технология погашения целиков предусматривает массовое обрушение за один прием одного-двух МКЦ с одним-двумя междуэтажными целиками (НШЦ + ПШЦ) и выпуском руды под налегающими обрушенными породами верхнего этажа. Для выемки МКЦ рекомендуется этажное (подэтажное) обрушение с отбойкой скважинами, пробуренными из восстающих выработок или подэтажных буровых штреков (сбоек).

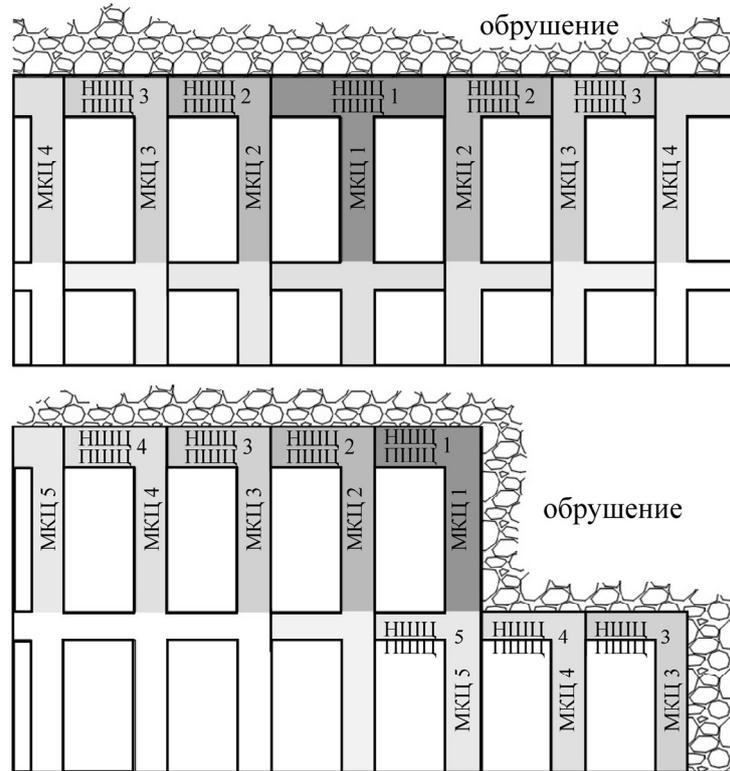


Рис. 12. Последовательность и порядок погашения целиков расходящимися фронтами от центра к флангам и одним фронтом от фланга к флангу

ВЫВОДЫ

Формализация напряженного состояния массивов горных пород по типам геолого-тектонических структур с учетом глубины разработки позволяет выделить для каждой геомеханической модели геосреды область и диапазон эффективного применения различных систем разработки.

Показаны эффективность и целесообразность использования типовых геомеханических условий массивов горных пород для определения предельной глубины освоения геотехнологий, которые в значительной степени расширяют возможности использования систем с обрушением и комбинированным способом управления горным давлением.

По фактору сохранности горных выработок с учетом различной степени нарушенности массива пород установлена предельная глубина и определены требования к применениям системы подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды: в условиях геодинамической модели геосреды максимальная глубина составляет 1100–1300 м, тектонической — 1300–1470 м, геостатической — 1550–1750 м и гравитационной — до 2000 м.

Перспективным направлением исследований является создание и обоснование новых ресурсосберегающих технологий, сочетающих комбинацию систем разработки с разными способами управления горным давлением и позволяющих увеличить преимущества и минимизировать недостатки каждого из них. Область эффективного освоения комбинированных систем разработки определяется морфологическим строением месторождения, мощностью рудных тел, моделью напряженного состояния массива горных пород и кондиционными параметрами полезного ископаемого. Особенность их применения заключается в возможности безопасного ведения горных работ в тектонически напряженных массивах пород.

Для Иртышского рудного месторождения разработаны способы и технология отработки целиков на основе систем с обрушением на открытые и частично заполненные налегающими породами камеры с определенной последовательностью их выемки. При одновременном ведении работ по погашению целиков в соседних этажах близко расположенных участков рекомендуется осуществлять их выемку с опережением верхнего этажа относительно нижнего не менее чем на две камеры (блока).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бронников Д. Н., Замесов Н. Ф., Богданов Г. И.** Разработка руд на больших глубинах. — М.: Недра, 1982. — 292 с.
2. **Замесов Н. Ф., Айнбиндер И. И., Бурцев Л. И., Родионов Ю. И., Овчаренко О. В., Аршавский В. В.** Развитие интенсивных методов добычи руд на больших глубинах. — М.: ИПКОН РАН СССР, 1990. — 236 с.
3. **Фрейдин А. М., Неверов А. А., Неверов С. А.** Подземная разработка рудных месторождений. — Новосибирск: ИГД СО РАН, НГУ, 2012.
4. **Борщ-Компонице В. И., Макаров А. Б.** Горное давление при отработке мощных пологих рудных залежей. — М.: Недра, 1986.
5. **Курленя М. В., Еременко А. А., Шрепп Б. В.** Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири. — Новосибирск: Наука, 2001. — 184 с.
6. **Гальперин В. Г., Юхимов Я. И., Борсук И. В.** Опыт разработки месторождений на больших глубинах за рубежом. — М.: ЦНИИЭИЦМ, 1986.
7. **Подвишенский С. Н., Иофин С. Л., Ивановский Э. С., Гальперин В. Г.** Техника и технология добычи руд за рубежом. — М.: Недра, 1986.
8. **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. 56–69.
9. **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. 25–34.
10. **Козырев А. А.** Современные результаты экспериментального изучения природных напряжений в верхней части земной коры и проблемы горного давления // Геомеханика в горном деле: доклады Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2014. — С. 39–53.
11. **Зубков А. В.** Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния земной коры Урала во времени // Литосфера. — 2010. — № 1. — С. 84–93.
12. **Zoback M. L., Zoback M. D., and Adams J.** Global patterns of tectonic stress nature, *Nature*, 1989, Vol. 341, No. 6240. — P. 291–298.
13. **Brady B. and Bzown E.** *Rock mechanics for underground mining*, Kluwer Academic Publishers, 2004. — 688 p.
14. **Snelling P. E., Godin L., and McKinnon S. D.** The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada, *J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2013, Vol. 58. — P. 166–179.
15. **Reiter K. and Heidbach O.** 3-D geomechanical-numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada), *Solid Earth*, 2014, No. 5. — P. 1123–1149.

16. **Heidbach O., Tingay M., Barth A., Reinecker J., Kurfe D., and Muller B.** World Stress Map 2th ed., based on the WSM database release, 2008, Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences, 2009.
17. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975.
18. **Назаров Л. А., Назарова Л. А., Фрейдин А. М., Алимсеитова Ж. К.** Оценка длительной сохранности целиков при камерно-столбовой выемке рудных залежей // ФТПРПИ. — 2006. — № 6. — С. 11–21.
19. **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. — С. 66–75.
20. **Неверов С. А., Неверов А. А.** Геомеханическая оценка устойчивости выработок выпуска руды при системах с обрушением // ФТПРПИ. — 2013. — № 2. — С. 113–122.
21. **Неверов А. А.** Геомеханическая оценка комбинированной геотехнологии при отработке мощной пологой рудной залежи // ФТПРПИ. — 2014. — № 1. — С. 119–131.
22. **Казикаев Д. М.** Геомеханика подземной разработки руд: учебник для вузов. — М.: МГГУ, 2005.
23. **Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В.** Основы механики горных пород. — Л.: Недра, 1989.
24. **Баклашов И. В.** Деформирование и разрушение породных массивов. — М.: Недра, 1988.
25. **Пат. 2454540 РФ.** Способ управления горным давлением / А. М. Фрейдин, С. Ю. Васичев и др. // Оpubл. в БИ. — 2012. — № 18.

Поступила в редакцию 13/VI 2019

После доработки 13/VI 2019

Принята к публикации 03/VII 2019