

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ С СОЗДАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ ЦЕЛИКОВ В СЛОЖНЫХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЖИЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Ш.И. Хакимов¹, Ш.Т. Таджиев¹, О.С. Кобилев¹, О.М. Гиязов¹, У.Б. Ермекбаев¹

¹ Навоийский государственный горно-технологический университет,
Навои, Узбекистан, e-mail: shtadjiev@mail.ru

Аннотация: В сложных геомеханических условиях разработки жильных месторождений применение традиционных технологических схем часто сопровождается значительными потерями руды в естественных целиках и потолочинах. Эти потери обусловлены высокой концентрацией напряжений в массиве горных пород, формирующейся после проведения очистных работ, что приводит к снижению технико-экономических показателей добычи и уровня безопасности горных работ. Рассмотрены и обоснованы варианты технологических схем разработки жильных месторождений с магазинированием руды и поэтажной отбойкой, предусматривающие создание искусственных целиков из твердеющих закладочных смесей в пределах очистных блоков. Предложенные решения обеспечивают возможность поэтапной отработки ранее оставляемых естественных целиков и позволяют существенно снизить, а в ряде случаев полностью исключить потери руды в сложных геомеханических условиях. Выполнен анализ устойчивости горного массива при использовании искусственных целиков различной прочности с учетом глубины разработки и напряженного состояния пород. Определены рациональные составы и расход твердеющих смесей, обеспечивающие требуемые прочностные характеристики закладочного массива. Показано, что применение разработанных технологических схем способствует повышению безопасности ведения горных работ, улучшению полноты извлечения запасов и может быть рекомендовано для условий глубоких жильных месторождений, испытывающих влияние повышенного горного давления.

Ключевые слова: технологическая схема, сложные геомеханические условия, целик, потери руды, естественный целик, искусственный целик, твердеющая закладка, твердеющие смеси, поэтажная отбойка руды, безопасность горных работ.

Для цитирования: Хакимов Ш. И., Таджиев Ш. Т., Кобилев О. С., Гиязов О. М., Ермекбаев У. Б. Разработка технологических схем с созданием искусственных целиков в сложных геомеханических условиях жильных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 11. – С. 19–32. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_11_0_19.

Development of technological schemes with the creation of artificial pillars under difficult geomechanical conditions of vein deposits

Sh.I. Khakimov¹, Sh.T. Tadjiev¹, O.S. Kobilov¹, O.M. Giyazov¹, U.B. Yermekboyev¹

¹ Navoi State University of Mining and Technology, Navoi, Uzbekistan, e-mail: shtadjiev@mail.ru

Abstract: In complex geomechanical conditions of vein deposit mining, the application of conventional technological schemes is often associated with significant ore losses in natural pillars and crown pillars. These losses are caused by high stress concentrations in the rock mass formed after stoping operations, leading to a reduction in the technical, economic, and safety performance of underground mining. This paper considers and substantiates technological schemes for vein deposit mining based on shrinkage stoping and sublevel stoping methods involving the construction of artificial pillars from cemented backfill mixtures within stoping blocks. The proposed solutions enable the step-by-step extraction of ore previously left in natural pillars and make it possible to significantly reduce, and in some cases completely eliminate, ore losses under complex geomechanical conditions. The stability of the rock mass was analysed for artificial pillars with different strength characteristics, taking into account mining depth and the stress state of the surrounding rock mass. Rational compositions and consumption rates of cemented backfill mixtures providing the required strength characteristics of the backfill mass were determined. The results demonstrate that the proposed technological schemes improve mining safety, increase ore recovery, and can be recommended for deep vein deposits subjected to elevated rock pressure.

Key words: technological scheme, complex geomechanical conditions, pillar, ore losses, natural pillar, artificial pillar, cemented backfill, cemented mixtures, sublevel ore blasting, mining safety.

For citation: Khakimov Sh. I., Tadjiev Sh. T., Kobilov O. S., Giyazov O. M., Yermekboyev U. B. Development of technological schemes with the creation of artificial pillars under difficult geomechanical conditions of vein deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(11):19-32. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_11_0_20.

Введение

Повышение эффективности использования минеральных ресурсов в современных условиях является одной из ключевых задач горнодобывающей отрасли и в значительной степени определяется уровнем совершенствования горного производства. Это в полной мере относится как к процессам добычи, так и к переработке рудных полезных ископаемых.

Залежи руд цветных металлов характеризуются значительным разнообразием горно-геологических и геомеханических условий залегания, что предопределяет необходимость применения различных систем подземной разработки, отличающихся по технологическим решениям и технико-экономическим показателям [1, с. 17]. Выбор рациональной технологической схемы при этом

оказывает решающее влияние на полноту извлечения запасов, безопасность горных работ и экономическую эффективность эксплуатации месторождений.

Анализ практики подземной разработки показывает, что многие известные технологические схемы отработки жильных месторождений в сложных геомеханических условиях характеризуются низкой эффективностью. Основной причиной этого являются значительные потери руды в естественных целиках и потолочинах, которые формируются в зонах высокой концентрации напряжений, возникающих в массиве горных пород после проведения очистных работ [2, с. 109; 3, с. 18]. В условиях увеличения глубины разработки и роста горного давления такие целики, как правило, теряют устойчивость либо становятся недоступными для последующей выемки,

что приводит к их безвозвратной утрате [4].

В связи с этим совершенствование существующих систем разработки, направленное на повышение безопасности ведения горных работ и обеспечение более полной выемки запасов в сложных геомеханических условиях, является актуальной научно-технической задачей. Ее решение во многом определяет эффективность подземной добычи руды и перспективы дальнейшего развития горнодобывающих предприятий в целом.

Анализ направлений совершенствования систем подземной разработки жильных месторождений в сложных горно-геологических условиях

В зависимости от условий залегания рудных тел в практике подземной разработки жильных месторождений применяется значительное количество технологических схем, основанных на системах с магазинированием руды при мощности рудного тела до 2,0 м и системах подэтажной отбойки при мощности более 2,0 м и относительно выдержанных элементах залегания. Использование систем разработки с креплением либо закладкой очистного пространства в ряде случаев ограничено вследствие высоких материальных затрат, что сдерживает их широкое внедрение в производственную практику [5, с. 155; 6, с. 1328].

Проведенный анализ показывает, что одним из основных недостатков указанных технологических схем является разделение рудного тела на отдельные выемочные блоки с формированием межблочных и межэтажных естественных рудных целиков. При глубинах отработки до 150—200 м и сравнительно незначительном горном давлении размеры таких целиков, как правило, невелики, и после отбойки и выпуска камер-

ных запасов они могут быть полностью извлечены, выполняя временную подерживающую функцию. Однако с увеличением глубины разработки возникает необходимость увеличения размеров целиков, в результате чего их последующая отработка в условиях зажима становится невозможной и сопровождается безвозвратными потерями руды.

Практика эксплуатации ряда рудников подтверждает нерациональность систем разработки, предусматривающих поддержание очистного пространства исключительно естественными целиками при добыче ценных руд в сложных геомеханических условиях. Преобладание данного способа управления горным массивом во многом обусловлено отсутствием более совершенных и технико-экономически обоснованных технологических решений, адаптированных к таким условиям разработки [7, с. 45; 8, с. 41].

Результаты анализа свидетельствуют о том, что применение систем разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями в сложных геомеханических условиях является одним из перспективных направлений совершенствования подземных горных работ. Несмотря на сравнительно высокие стоимостные показатели, эффективность данного способа управления массивом горных пород подтверждена при разработке мощных залежей. Это связано, прежде всего, с увеличением глубины горных работ и высокой ценностью извлекаемых руд.

Твердеющая закладка получила широкое распространение за рубежом, в том числе в Канаде, США, Японии, Швеции, Финляндии, Индии, Германии и Австралии, при разработке полиметаллических, медных, железных и других руд [9, с. 224; 10, с. 200]. В настоящее время с применением систем с твердеющей закладкой в странах СНГ добы-

вается около 25% руд цветных и ценных металлов, в Австралии — порядка 30%, в Канаде — до 40%, а в ряде европейских стран данный показатель достигает 80—85%, что свидетельствует о высокой эффективности рассматриваемой технологии. Дополнительные трудовые и материальные затраты при этом компенсируются повышением качества добываемой руды и снижением расходов на ее обогащение [11, с. 13; 12, с. 134].

Методы исследований

Для решения поставленных задач в рамках настоящего исследования были проанализированы и обобщены результаты ранее выполненных работ, посвященных применению твердеющих смесей при разработке жильных месторождений в сложных геомеханических условиях. На основе проведенного анализа предложены комбинированные варианты технологических схем, ориентированные на снижение потерь руды и повышение безопасности горных работ.

В ходе исследований были рассмотрены и систематизированы следующие технологические решения: отбойка и magazинирование руды с формированием внутри очистного пространства искусственных опорных целиков; поэтажная отбойка руды с созданием искусственных целиков непосредственно в пределах очистной камеры; секционная поэтажная отбойка с применением сухой и твердеющей закладки [13, с. 252; 14, с. 68; 15, с. 240; 16, с. 40]. Для указанных вариантов технологических схем выполнена оценка условий их применения в зависимости от горно-геологических и геомеханических факторов.

В процессе исследования определялись величины потерь руды в целиках при различной глубине отработки, степени трещиноватости массива, угле падения рудного тела, длине очистного блока и пределе прочности вмещающих

пород на сжатие. На основе полученных данных представлена сравнительная оценка эффективности комбинированных способов управления массивом горных пород с использованием твердеющих смесей.

Анализ показал, что основными недостатками ранее предложенных технологических схем поэтажной отбойки с искусственными целиками являются жесткая взаимосвязь процессов отбойки руды с операциями возведения целиков при приближении к линии их формирования, недостаточный уровень механизации работ при создании целиков, а также значительные затраты времени и труда, связанные с проходкой восстающих и сооружением искусственных опорных элементов.

Для количественного обоснования эффективности рассматриваемых технологических схем выполнены расчеты удельного расхода твердеющей закладки с учетом глубины разработки, трещиноватости массива горных пород, длины очистного блока и угла падения рудного тела, а также расчеты потерь руды, устойчивости искусственных целиков и ожидаемого экономического эффекта. При этом использован следующий подход.

Удельный расход твердеющей закладки при системе разработки с magazинированием руды и формированием искусственных целиков определялся по выражению

$$q_{\text{уд}} = V_3 / V_6, \quad (1)$$

где $q_{\text{уд}}$ — удельный расход твердеющей закладки, м³/м³; V_3 — объем твердеющей закладки, м³; V_6 — объем очистного блока, м³.

Для оценки эффективности технологических схем также определялось изменение потерь руды в зависимости от параметров очистного пространства:

$$P = Q_c / Q_6 \cdot 100, \quad (2)$$

где P — потери руды в целиках, %; $Q_{ц}$ — количество руды, оставляемой в естественных целиках, т; Q_6 — балансовые запасы руды в пределах очистного блока, т.

При применении искусственных целиков снижение потерь руды определялось по формуле

$$\Delta P = P_{\tau} - P_{и}, \quad (3)$$

где P_{τ} — потери руды при традиционной технологической схеме, %; $P_{и}$ — потери руды при схеме с искусственными целиками, %.

Для оценки требуемой прочности искусственного целика из твердеющей закладки использовалось условие

$$\sigma_3 \geq K \cdot \sigma_H, \quad (4)$$

где σ_3 — прочность твердеющей закладки на одноосное сжатие, МПа; σ_H — расчетное напряжение, действующее на искусственный целик, МПа (максимальное напряжение в искусственном целике, МПа); K — коэффициент запаса устойчивости.

Экономический эффект от применения предлагаемой технологической схемы определялся по выражению

$$E = (Q_d \cdot C_p) - Z_3, \quad (5)$$

где E — экономический эффект, сум; C_p — условная стоимость 1 т добытой руды, сум/т; Z_3 — дополнительные затраты на приготовление и подачу твердеющей закладки, сум; Q_d — дополнительный объем руды, вовлекаемый в обработку за счет снижения потерь, т:

$$Q_d = Q_6 \cdot \Delta P / 100. \quad (6)$$

Разработка технологических схем жильных месторождений с твердеющей закладкой

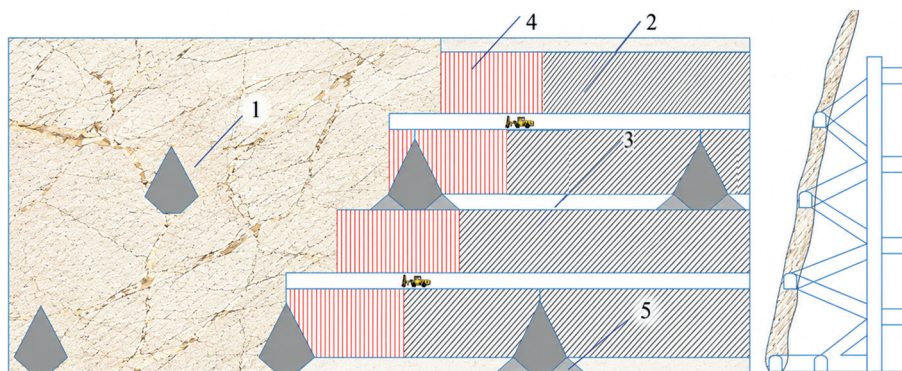
Жильные месторождения крутого залегания при относительно устойчивых рудах и вмещающих породах, как правило, обрабатываются в две стадии. На

первом этапе осуществляется выемка запасов очистных камер, в пределах которых предусматривается возведение искусственных массивов из твердеющих смесей, после чего производится отработка оставшихся между ними рудных целиков [17, с. 176; 18, с. 11].

С целью упрощения организации горных работ для камер первой и второй очереди, как правило, применяется одна и та же система разработки, при этом их геометрические размеры принимаются одинаковыми. В случае использования комбинированной закладки размеры искусственных массивов из экономических соображений стремятся минимизировать, исходя из допускаемых напряжений в массиве горных пород. Характерной особенностью таких массивов является то, что их протяженность по простиранию и падению значительно превышает высоту (мощность), вследствие чего существенное влияние на их прочность оказывают силы сцепления по контактам с боковыми породами, а также условия работы центральных зон в объемно-напряженном состоянии.

В основу расчетов параметров искусственных массивов приняты следующие положения: в камерах первой очереди искусственные целики воспринимают в основном нагрузки от собственной массы, температурных деформаций и проявлений ползучести пород висячей стороны; интенсивное перераспределение нагрузок от массы вышележащих пород на искусственные целики происходит преимущественно в период выемки разделяющих их рудных целиков, относящихся к камерам второй очереди.

В зависимости от горно-геологических условий и стадии ведения очистных работ условия работы искусственных массивов подразделяются на три основных типа: сплошная закладка выработанного пространства, искусственные целики при значительной площади



1 – искусственный целик многоугольной формы; 2 – буровой штрек; 3 – штрек искусственного целика; 4 – скважины; 5 – перемычка из рудной насыпи

Рис. 1. Технологическая схема подэтажной отбойки руды с частичным магазинированием и формированием многоугольных искусственных целиков из твердеющей закладки, подаваемой через скважину
Fig. 1. Technological scheme of sublevel stoping with partial ore shrinkage and the formation of artificial pillars from cemented backfill placed through boreholes

подработки и искусственные целики, расположенные во фронтальной зоне очистных работ. При камерных системах разработки жил закладка выработанного пространства рассматривается как неотъемлемая технологическая операция, входящая в единый производственный цикл отработки запасов руды в пределах выемочных единиц — камер, лент, временных междуканальных целиков и рудных откосов [19, с. 64].

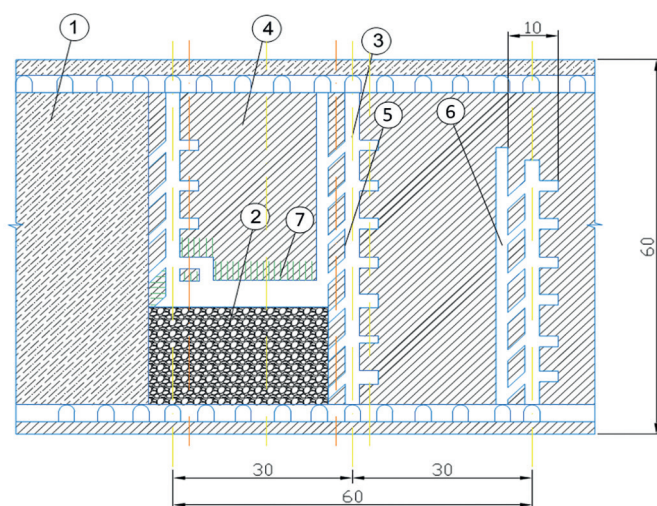
На рис. 1 представлена технологическая схема подэтажной отбойки руды с формированием искусственных целиков из твердеющей закладки, подаваемой по скважинам. В рамках данной схемы предусмотрено последовательное формирование опорных элементов в очистном пространстве, обеспечивающих устойчивость массива и безопасность ведения очистных работ.

В связи с переходом рассматриваемых рудников на трубопроводный транспорт для доставки твердеющих смесей разработан адаптированный вариант подэтажной отбойки руды с созданием искусственных целиков непосредственно внутри очистной камеры. Подготовительно-нарезные работы включают про-

ведение восстающих, наклонного участка транспортного съезда, ортов заездов к съезду и рудоспуску, а также подэтажных штреков. Высота подэтажей в рассматриваемых условиях принимается в пределах 10–15 м.

Процесс возведения искусственных целиков осуществляется одновременно на всех подэтажах и включает последовательное расширение потолочины над подэтажным штреком, формирование закладочной выработки и ее заполнение твердеющей смесью с добавлением крупного заполнителя из пустой породы. Подача твердеющей смеси в очистную камеру производится с верхнего подэтажа через скважины. Реализация данного технологического решения обеспечивает формирование устойчивых искусственных опорных элементов и создает условия для безопасной и эффективной выемки запасов в блоке.

На рис. 2 представлена технологическая схема отработки блока при системе разработки с магазинированием руды и закладкой выработанного пространства твердеющими смесями при высоте этажа 60 м. Согласно данной схеме, работы в блоке начинаются с формирования от-



- 1 – заполненная твердеющей смесью отработанная камера; 2 – отбитая магазинированная руда; 3 – блоковый восстающий с ходками; 4 – неотбитая часть блока; 5 – междукamerные целики; 6 – отрезная щель; 7 – шпуров для отбойки руды

Рис. 2. Технологическая схема отработки блока при системе разработки с магазинированием руды и закладкой выработанного пространства твердеющими смесями при высоте этажа 60 м

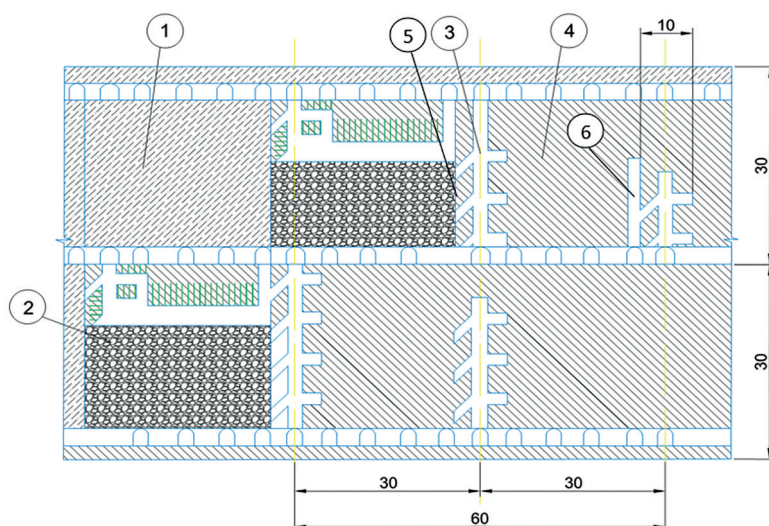
Fig. 2. Technological scheme of block mining using the shrinkage stopping system with backfilling of the mined-out space by cemented mixtures at a mining level height of 60 m

резной щели на границе камеры с междукamerным целиком путем взрывания ранее пробуренных шпуров. Отбойка руды в очистной камере осуществляется вертикальными слоями с использованием нескольких комплектов шпуров.

Выпуск отбитой руды производится торцовым способом на почву нижнего подэтажа, где осуществляется ее погрузка и транспортировка погрузочно-доставочными машинами к рудоспускам. Для снижения разубоживания руды и обеспечения устойчивости контуров очистного пространства в процессе ведения работ рекомендуется применение контурного взрывания. Проветривание очистных выработок осуществляется по участковому наклонному съезду, транспортным ортам и вентиляционному восстающему, при этом загрязненный воздух удаляется по восстающей выработке на полевой доставочный штрек вышележащего горизонта и направляется в исходящую струю.

Основными достоинствами рассматриваемой технологической схемы являются обеспечение высокого уровня безопасности ведения горных работ, формирование искусственных целиков с повышенными прочностными характеристиками, упрощение организации очистных работ и снижение материальных затрат по сравнению с системами разработки, предусматривающими сплошную закладку очистного пространства. Кроме того, схема характеризуется сравнительно высокими качественными и количественными показателями добычи руды и широкими возможностями применения самоходного оборудования в очистных процессах [20, с. 8; 21, с. 41; 22, с. 27].

На рис. 3 показана технологическая схема отработки короткими блоками с магазинированием руды и формированием искусственных целиков из твердеющих смесей. Отличительной особенностью данной схемы является независи-



- 1 – искусственный целик из твердеющей смеси; 2 – отбитая магазинированная руда;
 3 – блоковый восстающий с ходками; 4 – неотбитая часть блока; 5 – междукammerный целик;
 6 – отрезная щель

Рис. 3. Технологическая схема короткими блоками с магазинированием руды и формированием искусственных целиков из твердеющих смесей

Fig. 3. Technological scheme of short-block mining with ore shrinkage and the formation of artificial pillars made of cemented backfill mixtures

мость выполнения подготовительных, нарезных и очистных работ, а также процессов формирования искусственных целиков, что обеспечивает наличие достаточного времени для набора прочности твердеющей закладки. Схема создает благоприятные условия для эффективного проветривания тупиковых забоев, своевременной отработки междукammerных целиков и потолочины, а также для широкого применения погрузочно-доставочных машин с дистанционным управлением.

Основные недостатки разделения выемочных участков на длинные и узкие очистные камеры заключаются в необходимости выполнения значительных объемов подготовительных и нарезных работ, что сопровождается ростом материальных и трудовых затрат. Данные обстоятельства оказывают непосредственное влияние на экономические показатели подземной разработки жильных

месторождений, особенно в условиях увеличения глубины горных работ.

Согласно приведенной выше методике расчета эффективности выполнения расчетов технико-экономических показателей рассмотренных систем отработки. Для сравнительной оценки приняты следующие исходные условия: балансовые запасы руды в пределах очистного блока составляют $Q_6 = 100\,000$ т.

Согласно нормативным документам, принятым в Республике Узбекистан, при традиционной схеме разработки потери руды в естественных целиках принимаются равными 25%, а при применении искусственных целиков — 10%. Тогда при $P_T = 25\%$, $P_{и} = 10\%$ по формуле (3) получим

$$\Delta P = 25 - 10 = 15\%.$$

Дополнительный объем руды, вовлекаемый в отработку, составит, согласно формуле (6),

Сравнительная оценка потерь руды при различных технологических схемах **Comparative assessment of ore losses under various process flowsheets**

Показатель	Традиционная схема с естественными целиками	Схема с искусственными целиками
Балансовые запасы блока, т	100 000	100 000
Потери руды в целиках, %	25	10
Потери руды, т	25 000	10 000
Дополнительно извлекаемая руда, т	—	15 000
Снижение потерь, %	—	15

$$Q_d = 100\,000 \cdot 15/100 = 15\,000 \text{ т.}$$

Следовательно, применение технологической схемы с искусственными целиками позволяет дополнительно вовлечь в отработку около 15 тыс. т руды в пределах одного очистного блока (таблица).

При дополнительном вовлечении в отработку 15 000 т руды экономический эффект определяется по формуле (5) и зависит от фактической стоимости добытой руды и затрат на приготовление, транспортирование и подачу твердеющей закладки. Таким образом, применение предлагаемой технологической схемы обеспечивает положительный экономический эффект за счет снижения потерь

руды и увеличения полноты извлечения запасов.

Результаты выполненных расчетов представлены графически на рис. 4, 5.

Анализ результатов расчетов

На рис. 4 представлены графики изменения прибыли в зависимости от глубины разработки (H), длины очистной камеры (L) и угла падения рудного тела (α) при применении системы разработки с magazинированием отбитой руды и твердеющей закладкой. Анализ приведенных зависимостей показывает, что при увеличении глубины отработки эффективность данной системы существенно зависит от рационального выбора

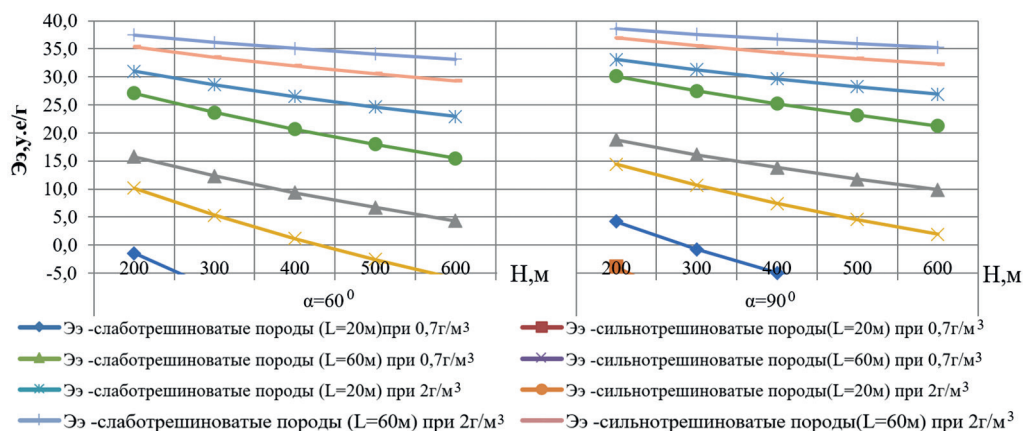


Рис. 4. Графики изменения прибыли в зависимости от глубины разработки (H), длины камеры (L) и угла падения рудного тела (α) при системе разработки с magazинированием отбитой руды и твердеющей закладкой

Fig. 4. Profit variation curves as a function of mining depth (H), chamber length (L), and ore body dip angle (α) for the shrinkage stoping system with cemented backfill

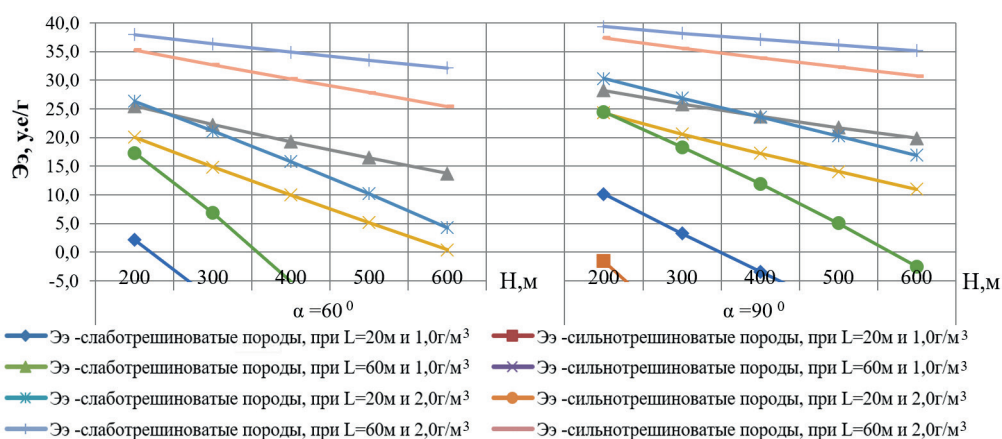


Рис. 5. Графики изменения прибыли в зависимости от глубины разработки (H), длины камеры (L) и угла падения рудного тела (α) при подэтажной системе разработки с твердеющей закладкой с многоугольными целиками

Fig. 5. Profit variation curves as a function of mining depth (H), chamber length (L), and ore body dip angle (α) for the sublevel stoping system with cemented backfill and polygonal artificial pillars

геометрических параметров очистных камер и пространственного положения рудного тела. Несоответствие указанных параметров приводит к снижению прибыли вследствие роста потерь руды и увеличения затрат на поддержание устойчивости выработанного пространства.

На рис. 5 приведены аналогичные зависимости для подэтажной системы разработки с твердеющей закладкой и формированием многоугольных искусственных целиков. Сопоставление данных, представленных на рис. 4 и рис. 5, свидетельствует о том, что применение подэтажной системы с искусственными целиками обеспечивает более стабильные экономические показатели при изменении глубины горных работ и геометрии очистных камер. Это обусловлено снижением потерь руды в целиках, уменьшением расхода дорогостоящего цементного вяжущего и повышением надежности управления горным массивом.

В целом результаты экономического анализа подтверждают целесообразность внедрения технологических схем с при-

менением твердеющей закладки и искусственных целиков при разработке жильных месторождений в сложных геомеханических условиях. Реализация рассматриваемых решений позволяет обеспечить рост прибыли за счет повышения полноты извлечения запасов, оптимизации параметров очистных выработок и сокращения удельных затрат на производство горных работ.

Анализ полученных зависимостей показывает, что удельный расход твердеющей закладки увеличивается с ростом глубины разработки и степени трещиноватости массива горных пород. Наиболее высокие значения расхода закладочного материала наблюдаются в условиях сильнотрещиноватых пород при увеличении глубины разработки до 600 м.

Установлено, что одним из основных факторов, влияющих на расход твердеющей закладки, является длина очистной камеры. При уменьшении расстояния между искусственными целиками возрастает объем закладочных работ, необходимый для обеспечения устойчивости очистного пространства.

Полученные графики также показывают, что применение искусственных целиков позволяет снизить потери руды и повысить полноту извлечения запасов по сравнению с традиционными схемами разработки. При этом наиболее эффективные показатели достигаются при использовании комбинированных технологических схем с твердеющей закладкой.

Результаты технико-экономических расчетов свидетельствуют о том, что применение искусственных целиков обеспечивает снижение потерь руды в среднем на 15–25% и способствует повышению устойчивости массива горных пород при ведении очистных работ в сложных геомеханических условиях.

Заключение

В результате выполненных исследований установлена нецелесообразность применения ряда традиционных систем разработки жильных месторождений в условиях сложного геологического строения. Анализ показал, что использование таких систем сопровождается значительными потерями руды в естественных целиках и снижением эффективности подземных горных работ.

Обосновано, что применение твердеющих смесей в качестве закладочного материала и для формирования искусственных целиков является рациональным решением при разработке жильных месторождений в сложных геомеханических условиях.

Разработанные комбинированные технологические схемы позволяют обеспечить устойчивость массива горных пород, повысить безопасность ведения очистных работ и существенно сократить потери руды в целиках.

Показано, что рекомендуемые технологические схемы обеспечивают надежную организацию горных работ как при отработке камерных запасов, так и при последующей выемке рудных целиков. Применение твердеющей закладки и искусственных опорных элементов способствует снижению расхода дорогостоящего цементного вяжущего за счет рационального подбора прочностных характеристик закладочного массива и оптимизации параметров очистных работ.

Полученные результаты подтверждают целесообразность внедрения предложенных технологических схем в производственную практику при разработке крутопадающих жильных месторождений и могут быть использованы при проектировании и совершенствовании систем подземной добычи руды в условиях повышенного горного давления.

Выполненные расчеты показали, что применение искусственных целиков из твердеющих закладочных смесей позволяет снизить потери руды в среднем на 15–25% и обеспечить повышение устойчивости очистного пространства при разработке жильных месторождений в сложных геомеханических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Л. М., Левин Ю. И. Закладка выработанного пространства на рудниках // Горный журнал. — 2010. — № 3. — С. 54–58.
2. Сабянин Г. В. Геоэкологические аспекты подземной разработки жильных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 8. — С. 109–115.
3. Таджиев Ш. Т., Хакимов Ш. И., Кобилов О. С. Снижение потерь руды при отработке жильных месторождений в сложных условиях // Горный вестник Узбекистана. — 2015. — № 3(62). — С. 17–21.

4. Golik V. I., Efremenkov A. B. Control of rock mechanics in underground ore mining // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017, vol. 221, no. 1, article 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/221/1/012013.

5. Петров А. П. Особенности и перспективы подземной разработки малообъемных месторождений Якутии // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. — 2007. — С. 155 — 164.

6. Pysmennyi S., Fedko M., Chukharev S., Rysbekov K., Kyelgyenbai K., Anastasov D. Technology for mining of complex-structured bodies of stable and unstable ores // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022, vol. 970, no. 1, article 012040. DOI: 10.1088/1755-1315/970/1/012040.

7. Stewart S. B. V., Forsyth W. W. The Mathews method for open stope design // The CIM Bulletin. 1995, vol. 88, no. 1036, pp. 45 — 53.

8. Hutchinson D. J., Phillips C., Cascante G. Risk considerations for crown pillar stability assessment for mine closure planning // Geotechnical and Geological Engineering. 2002, vol. 20, pp. 41 — 64. DOI: 10.1023/A:1013852722768.

9. Hoek E., Diederichs M. S. Empirical estimation of rock mass modulus // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2006, vol. 43, no. 2, pp. 203 — 215. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2005.06.005.

10. Choudhury P. B., Raina A. K., More R. Crown pillar stability assessment in an underground copper mine using acoustic emission // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2004, vol. 41, no. 3, pp. 235 — 240. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2004.03.047.

11. Wang Z., Song G., Ding K. Study on the ground movement in an open-pit mine in the case of combined surface and underground mining // Advances in Materials Science and Engineering. 2020, vol. 2020, 13 p. DOI: 10.1155/2020/8728653.

12. Soni A. K. Technologies in Mining, March 2025, 134 p. DOI: 10.5772/intechopen.1005665.

13. Hakimov S., Kobilov O., Tadjiev S., Khamzayev S. Increases in the volume of ore loss in ore pillars as the mine deepens // E3S Web of Conferences. 2023, vol. 417, article 01003. DOI: 10.1051/e3sconf/202341701003.

14. Wang R., Zeng F., Li L. Stability analyses of side-exposed backfill considering mine depth and extraction of adjacent stope // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021, vol. 142, article 104735. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104735.

15. Xu S., Liang R., Suorineni F. T., Li Y. Evaluation of the use of sublevel open stoping in the mining of moderately dipping medium-thick orebodies // International Journal of Mining Science and Technology. 2021, vol. 31, no. 2, pp. 333 — 346. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.12.002.

16. Li L., Aubertin M. A modified solution to assess the required strength of exposed backfill in mine stopes // Canadian Geotechnical Journal. 2012, vol. 49, no. 8, pp. 994 — 1002. DOI: 10.1139/t2012-056.

17. Mitchell R. J., Olsen R. S., Smith J. D. Model studies on cemented tailings used in mine backfill // Canadian Geotechnical Journal. 1982, vol. 19, no. 1, pp. 14 — 28. DOI: 10.1139/t82-002.

18. Pysmennyi S., Fedko M., Chukharev S., Rysbekov K., Kyelgyenbai Kh., Anastasov D. Technology for mining of complex-structured bodies of stable and unstable ores // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022, vol. 970, no. 1, article 012040. DOI: 10.1088/1755-1315/970/1/012040.

19. Li L., Aubertin M. An improved method to assess the required strength of cemented backfill in underground stopes with an open face // International Journal of Mining Science and Technology. 2014, vol. 24, no. 5, pp. 549 — 558. DOI: 10.1016/j.ijmst.2014.05.020.

20. Yang P., Li L., Aubertin M. A new solution to assess the required strength of mine backfill with a vertical exposure // International Journal of Geomechanics. 2017, vol. 17, no. 10, article 04017084. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000975.

21. Hutchinson D. J., Phillips C., Cascante G. Risk considerations for crown pillar stability assessment for mine closure planning // Geotechnical and Geological Engineering. 2002, vol. 20, pp. 41 — 63.

22. Кобилов О. С., Хакимов Ш. И., Гиязов О. М., Солиев Б. З. Определение потери руды в системах разработки с открытым очистным пространством и естественными целиками // Universum: Технические науки. — 2023. — № 6 (111). — С. 27 — 33. **ПЛАБ**

REFERENCES

1. Vasiliev L. M., Levin Yu. I. Stowing of worked-out area in mines. *Gornyi Zhurnal*. 2010, no. 3, pp. 54–58.
2. Sabyanin G. V. Geoenvironmental aspects of underground mining of vein deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no. 8, pp. 109–115.
3. Tadzhiyev Sh. T., Khakimov Sh. I., & Kobilov O. S. Reduction of ore losses during vein deposits mining in difficult conditions. *Gornyy vestnik Uzbekistana*. 2015, no. 3(62), pp. 17–21.
4. Golik V. I., Efremenko A. B. Control of rock mechanics in underground ore mining. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 221, no. 1, article 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/221/1/012013.
5. Petrov A. P. Features and prospects of underground mining of small-volume deposits in Yakutia. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2007, pp. 155–164.
6. Pysmennyi S., Fedko M., Chukharev S., Rysbekov K., Kyelgyenbai K., Anastasov D. Technology for mining of complex-structured bodies of stable and unstable ores. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 970, no. 1, article 012040. DOI: 10.1088/1755-1315/970/1/012040.
7. Stewart S. B. V., Forsyth W. W. The Mathews method for open stope design. *The CIM Bulletin*. 1995, vol. 88, no. 1036, pp. 45–53.
8. Hutchinson D. J., Phillips C., Cascante G. Risk considerations for crown pillar stability assessment for mine closure planning. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2002, vol. 20, pp. 41–64. DOI: 10.1023/A:1013852722768.
9. Hoek E., Diederichs M. S. Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2006, vol. 43, no. 2, pp. 203–215. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2005.06.005.
10. Choudhury P. B., Raina A. K., More R. Crown pillar stability assessment in an underground copper mine using acoustic emission. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004, vol. 41, no. 3, pp. 235–240. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2004.03.047.
11. Wang Z., Song G., Ding K. Study on the ground movement in an open-pit mine in the case of combined surface and underground mining. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 2020, 13 p. DOI: 10.1155/2020/8728653.
12. Soni A. K. Technologies in Mining, March 2025, 134 p. DOI: 10.5772/intechopen.1005665.
13. Hakimov S., Kobilov O., Tadjiev S., Khamzayev S. Increases in the volume of ore loss in ore pillars as the mine deepens. *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 417, article 01003. DOI: 10.1051/e3sconf/202341701003.
14. Wang R., Zeng F., Li L. Stability analyses of side-exposed backfill considering mine depth and extraction of adjacent stope. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021, vol. 142, article 104735. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104735.
15. Xu S., Liang R., Suorineni F. T., Li Y. Evaluation of the use of sublevel open stoping in the mining of moderately dipping medium-thick orebodies. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021, vol. 31, no. 2, pp. 333–346. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.12.002.
16. Li L., Aubertin M. A modified solution to assess the required strength of exposed backfill in mine stopes. *Canadian Geotechnical Journal*. 2012, vol. 49, no. 8, pp. 994–1002. DOI: 10.1139/t2012-056.
17. Mitchell R. J., Olsen R. S., Smith J. D. Model studies on cemented tailings used in mine backfill. *Canadian Geotechnical Journal*. 1982, vol. 19, no. 1, pp. 14–28. DOI: 10.1139/t82-002.
18. Pysmennyi S., Fedko M., Chukharev S., Rysbekov K., Kyelgyenbai Kh., Anastasov D. Technology for mining of complex-structured bodies of stable and unstable ores. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 970, no. 1, article 012040. DOI: 10.1088/1755-1315/970/1/012040.
19. Li L., Aubertin M. An improved method to assess the required strength of cemented backfill in underground stopes with an open face. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2014, vol. 24, no. 5, pp. 549–558. DOI: 10.1016/j.ijmst.2014.05.020.
20. Yang P., Li L., Aubertin M. A new solution to assess the required strength of mine backfill with a vertical exposure. *International Journal of Geomechanics*. 2017, vol. 17, no. 10, article 04017084. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000975.
21. Hutchinson D. J., Phillips C., Cascante G. Risk considerations for crown pillar stability assessment for mine closure planning. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2002, vol. 20, pp. 41–63.

22. Kobilov O. S., Khakimov Sh. I., Giyazov O. M., Soliev B. Z. Determination of ore loss in mining systems with open stopes and natural pillars. *Universum: Technical Sciences*. 2023, no. 6 (111), pp. 27 – 33. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хакимов Шодибой Икматиллаевич¹ — д-р техн. наук,

профессор, e-mail: sh.xakimov2020@gmail.com,

ORCID ID: 0009-0006-3189-6745,

Таджиев Шухрат Тулкинович¹ — PhD, доцент,

e-mail: shtadjiev@mail.ru, ORCID ID: 0009-0005-7975-6584,

Кобиллов Олимжон Сирожович¹ — PhD,

e-mail: olimjonkobilov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2034-1649,

Гиязов Отабек Мухитдинович¹ — PhD, доцент,

e-mail: ogiyazov6556@mail.ru, ORCID ID: 0009-0003-6983-9525,

Ермекбаев Умиджон Бобакулович¹ — PhD,

e-mail: Bobakulovumidjon.uzb@mail.ru,

ORCID ID: 0009-0001-3719-8669,

¹ Навоийский государственный горно-технологический университет,

Навои, Узбекистан.

Для контактов: Таджиев Ш.Т., e-mail: shtadjiev@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sh.I. Khakimov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: sh.xakimov2020@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-3189-6745,

Sh.T. Tadjiev¹, PhD, Associate Professor,

e-mail: shtadjiev@mail.ru, ORCID ID: 0009-0005-7975-6584,

O.S. Kobilov¹, PhD, e-mail: olimjonkobilov@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0003-2034-1649,

O.M. Giyazov¹, PhD, Associate Professor,

e-mail: ogiyazov6556@mail.ru, ORCID ID: 0009-0003-6983-9525,

U.B. Yermekboyev¹, PhD, e-mail: Bobakulovumidjon.uzb@mail.ru,

ORCID ID: 0009-0001-3719-8669,

¹ Navoi State University of Mining and Technology, 210100, Navoi, Uzbekistan.

Corresponding author: Sh.T. Tadjiev, e-mail: shtadjiev@mail.ru.

Получена редакцией 17.04.2025; получена после рецензии 08.06.2026; принята к печати 10.10.2026.

Received by the editors 17.04.2025; received after the review 08.06.2026; accepted for printing 10.10.2026.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ
(специальный выпуск), смотри на www.gornaya-kniga.ru

СИСТЕМНЫЙ МОНИТОРИНГ ФАКТОРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ХОЗЯЙСТВЕННОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ, ОКАЗЫВАЮЩИХ НЕГАТИВНОЕ
ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

(2026, № 6, СБ 23, 16 с.)

Алкинани Фатима Дахил Саихуд — аспирант, НИТУ МИСИС, e-mail: ciop@misis.ru,

ORCID ID: 0009-0007-2141-755X.

SYSTEMIC MONITORING OF INDUSTRIAL AND ECONOMIC ACTIVITIES' FACTORS
OF URBAN AGGLOMERATIONS THAT NEGATIVELY IMPACT THE ENVIRONMENT

Alkinani Fatima Dakhil Saihud, Graduate Student, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia,

e-mail: ciop@misis.ru, ORCID ID: 0009-0007-2141-755X.