

УДК 622.273

Антипин Юрий Георгиевич,

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией
подземной геотехнологии
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: geotech@igduran.ru

Барановский Кирилл Васильевич,

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН

Никитин Игорь Владимирович,

кандидат технических наук,
научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН

Вольхин Иван Андреевич,

инженер,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН

ИЗЫСКАНИЕ И ВЫБОР СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛОГОПАДАЮЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ МОЩНОСТИ ЗАЛЕЖИ*

Аннотация:

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности подземной разработки пологопадающих месторождений вкрапленных медно-никелевых руд в условиях высокой изменчивости мощности залежи и неоднородности свойств вмещающих пород. Цель работы – обоснование эффективных и безопасных систем разработки и их оптимальных параметров для различных интервалов мощности залежи, обеспечивающих повышение полноты и качества извлечения запасов полезных ископаемых из недр и снижение удельного объема подготовительно-нарезных работ. На первом этапе исследования выполнен анализ технической возможности и целесообразности применения систем разработки различных классов в реальных горно-геологических и горнотехнических условиях эксплуатации медно-никелевого месторождения, на втором этапе – систематизация, конструирование и сравнение систем разработки по основным технико-экономическим показателям (потери и разубоживание при добыче руды, удельный объем подготовительно-нарезных работ). В результате проведенного исследования с применением дифференцированного подхода определены наиболее эффективные системы разработки для различных

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.03.006

Antipin Yuriy G.

Candidate of Technical Sciences,
Head of the Laboratory of underground
geotechnology,
Institute of Mining UB RAS,
58 Mamina-Sibiryaka Str.,
620075 Ekaterinburg
e-mail: geotech@igduran.ru

Baranovsky Kirill V.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of underground geotechnology,
Institute of Mining UB RAS

Nikitin Igor V.

Candidate of Technical Sciences,
Researcher, Laboratory of underground
geotechnology,
Institute of Mining UB RAS

Volhin Ivan A.

Engineer, Laboratory of underground
Geotechnology,
Institute of Mining UB RAS

SEARCH AND SELECTION OF MINING SYSTEM FOR GENTLY SLOPING DEPOSITS IN CONDITIONS OF HIGH VARIABILITY OF DEPOSIT CAPACITY

Abstract:

The relevance of the study is due to the need to increase the efficiency for underground mining of gently sloping deposits of interspersed copper-nickel ores in conditions with high variability of deposit capacity and heterogeneity of the properties of the host rocks. The purpose of the work is to substantiate effective and safe mining systems and their optimal parameters for different intervals of deposit capacity, which ensure an increase in the completeness and quality of extraction of mineral reserves from the subsoil and reduction of the specific volume of preparation and cutting operation. At the first stage of the study, the production capacity and feasibility of using various classes of mining systems were analyzed in the actual mining, geological and technical conditions of the copper-nickel deposit. At the second stage, the systems were systematized, designed and compared in terms of their main technical and economic indicators (losses and dilution of ore, specific volume of preparation and cutting operation). As a result of the conducted research using a differentiated approach, the most effective mining systems have been identified for different areas: for deposits with a capacity of 5-10 and 10-20 m – combined mining system that combines the level chamber system and the level caving system; for deposits with a capacity of 20-45 m – sublevel caving system with end-of-floor ore extraction.

* Исследования выполнены в рамках Гос. задания №075-00410-25-00. № гос. рег. 125070908257-0.

Тема 1 (2025-2027). Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001).

участков: при мощности залежи 5 – 10 и 10 – 20 м – комбинированная система разработки, сочетающая этажно-камерную систему и систему этажного обрушения, при мощности залежи 20 – 45 м – система подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды.

Ключевые слова: пологое месторождение, вкрапленные руды, подземная разработка, система разработки, мощность залежи, систематизация, экономико-математическое моделирование, технико-экономические показатели.

Key words: gently sloping deposit, interspersed ores, underground mining, mining system, deposit capacity, systematization, economic and mathematical modeling, technical and economic indicators.

Введение

Устойчивое развитие горных предприятий в условиях рыночной экономики тесно связано с решением комплекса задач по обеспечению максимально эффективного использования имеющихся в их распоряжении минерально-сырьевых ресурсов [1]. Особое значение эта взаимосвязь имеет при эксплуатации месторождений с низким содержанием полезных компонентов, к которым следует отнести одно из крупнейших в России месторождение сульфидных медно-никелевых руд «Норильск-1», представленное преимущественно вкрапленными рудами в интрузиве [2].

Рудная залежь в общем повторяет контуры интрузии и имеет пластообразную форму. Протяженность рудного тела по месторождению достигает 13 км. Мощность рудного тела изменяется от 5 до 45 м, угол падения составляет 5 – 8°, на отдельных участках – до 25 – 35°. Рудное тело сложено пикритовыми, такситовыми и контактовыми габбро-долеритами. Породы рудной толщи средне- и крупнокристаллические, крепкие, трещиноватые, преимущественно мелкоблочные.

Трещиноватость, нарушенность руд и пород различны. Собственно вкрапленные руды, как правило, имеют среднюю трещиноватость. Верхняя часть пикритовых габбро-долеритов имеет повышенную трещиноватость и широкое развитие вторичной минерализации по трещинам. Налегаящие породы, как правило, крепкие, средней трещиноватости, средней устойчивости. Подстилающие породы имеют различную степень трещиноватости. Песчаники и базальты – средней трещиноватости, аргиллиты, углестые аргиллиты и угли – сильно трещиноватые и слабоустойчивые. Крепость руд и вмещающих пород месторождения по шкале М.М. Протоdjяконова составляет: вкрапленные руды – 10–14; оливиновые габбро-долериты – 14–16; базальты и долериты – 12–14; песчаники – 10–12; каменные угли – 4 – 6. Объемная масса вкрапленных руд и вмещающих пород – 3,0 т/м³ [2].

В настоящее время разработка месторождения «Норильск-1» осуществляется одновременно открытым и подземным способами [3]. Подземная добыча вкрапленных медно-никелевых руд ведется технологией с обрушением руды и вмещающих пород и использованием комплексов самоходного оборудования (СО) на глубине 350 – 450 м. В условиях высокой изменчивости мощности рудной залежи и неоднородности свойств вмещающих пород применяемая система разработки не обеспечивает необходимого уровня извлечения запасов полезных ископаемых из недр: потери руды достигают 20 - 25 %, разубоживание – 25 – 30 % [4].

Таким образом, изыскание и выбор эффективных и безопасных систем разработки для различных участков залежи вкрапленных медно-никелевых руд, обеспечивающих повышение полноты и качества извлечения запасов из недр и снижение удельного объема подготовительно-нарезных работ (ПНР), является актуальной научно-технической задачей.

Методы исследования

В работе использован комплексный метод исследования, включающий анализ практики и условий применения, систематизацию, конструирование, экономи-

ко-математическое моделирование и оценку рациональных вариантов системы разработки.

На первом этапе исследования выполнен анализ организационно-технической возможности и целесообразности применения систем разработки различных классов в реальных горно-геологических и горнотехнических условиях месторождения «Норильск-1», на втором этапе – систематизация, конструирование и сравнение рассматриваемых вариантов системы разработки по основным технико-экономическим показателям (ТЭП): потери и разубоживание руды, удельный объем ПНР.

Результаты исследования

На основе анализа горно-геологических и горнотехнических условий подземной разработки месторождения «Норильск-1» выполнена систематизация рациональных вариантов системы разработки по следующим признакам: класс системы разработки и мощность залежи вкрапленных руд (табл. 1). Систематизация позволяет упорядочить процедуру отбора и способствует расширению области поиска эффективных и безопасных систем разработки с учетом современных тенденций их развития [5 – 9].

Таблица 1

Систематизация вариантов системы разработки пологой залежи

Класс системы разработки	Мощность залежи вкрапленных руд		
	от 5 до 10 м	от 10 до 20 м	от 20 до 45 м
1. С обрушением руды и вмещающих пород	1.1. Система этажного обрушения с торцовым выпуском и полевой подготовкой	1.2. Система этажного обрушения с торцовым выпуском и рудно-полевой подготовкой	1.3. Система подэтажного обрушения с торцовым выпуском и рудной подготовкой
2. С открытым выработанным пространством	2.1. Камерно-столбовая с оставлением целиков	2.2. Камерно-столбовая с выемкой камер увеличенной ширины и оставлением целиков	–
3. Комбинированная (сочетание систем с открытым выработанным пространством и с обрушением)	3.1. Комбинированная с выемкой камер с плоским днищем, заполнением их пустой породой и отработкой целиков системой этажного обрушения с торцовым выпуском	3.2. Комбинированная с выемкой камер с плоским днищем, принудительным обрушением налегающих пород и отработкой целиков системой этажного обрушения с торцовым выпуском	3.3. Комбинированная с выемкой камер увеличенной ширины с траншейным днищем, принудительным обрушением налегающих пород и отработкой целиков системой подэтажного обрушения с торцовым выпуском

Далее осуществлено конструирование вариантов системы разработки в соответствии с систематизацией. Общие положения и условия, принятые при конструировании вариантов системы разработки:

1. Рудная залежь в плане разбивается на панели шириной 90 – 100 м и длиной 800 – 900 м. Панель по падению (вкрест простирания) залежи разделяется транспортными штреками на добычные блоки длиной 90 м и шириной, равной ширине панели, – 90–100 м. Высота этажа равна мощности рудной залежи.

2. Подготовка запасов панели заключается в проведении транспортных и вентиляционных (на горизонте принудительного обрушения) штреков и ортов, вентиляцион-

но-ходовых восстающих (ВХВ) и рудоспусков.

3. Расчет устойчивых размеров камер и целиков выполнен на основе статистических данных и зависимостей, изложенных в «Методических указаниях по определению размеров камер и целиков при подземной разработке руд цветных металлов» (Читинский филиал ВНИПИГорцветмет, 1988) с учетом глубины ведения горных работ 450 м.

Техническим проектом предусмотрено применение системы этажного (подэтажного) обрушения в трех вариантах, отличающихся расположением буродоставочного горизонта в зависимости от фактической устойчивости приконтактного слоя руды и породы (рис. 1):

- в подстилающих породах (полевая подготовка) (вариант 1.1);
- в руде на контакте руда – порода и частичным расположением буродоставочных штреков в подстилающих породах (вариант 1.2);
- в руде в полном объеме на контакте руда – порода (вариант 1.3).

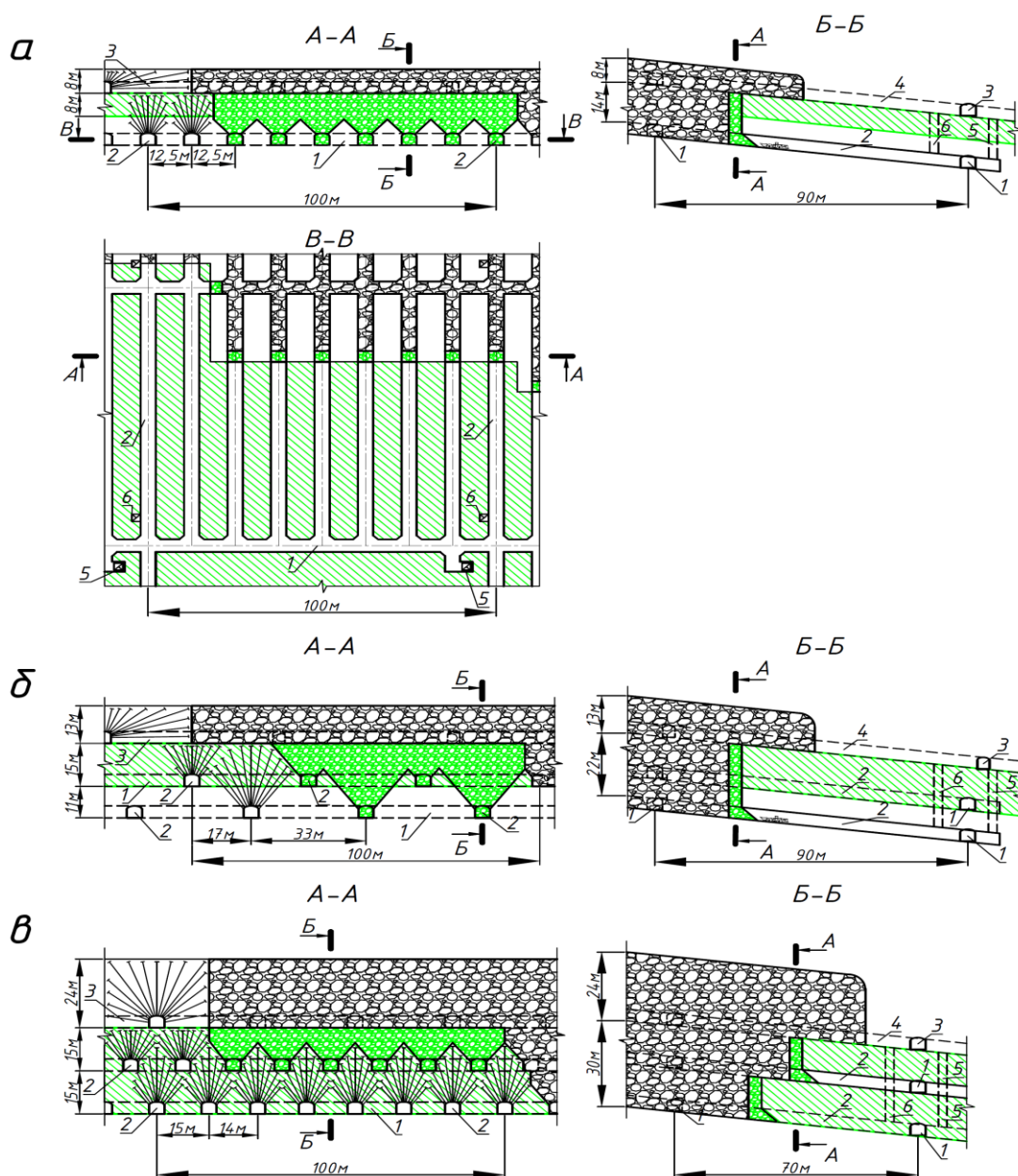


Рис. 1. Система разработки этажного (подэтажного) обрушения:

- а) вариант 1.1; б) вариант 1.2; в) вариант 1.3: 1 – буродоставочный штрек; 2 – буродоставочный орт; 3 – штрек ГПО; 4 – орт ГПО; 5 – рудоспуск; 6 – ВХВ

Подготовка запасов к выемке на подэтажах предусматривает проведение полевых доставочных или рудных буро-доставочных штреков, сбиваемых между собой через каждые 10 м ортами, а также штреков и ортов горизонта принудительного обрушения (ГПО).

Очистная выемка запасов добычного блока состоит в послойной отбойке рудного массива вертикальными или крутонаклонными скважинами на зажатую среду с последующим выпуском отбитой руды под обрушенными породами из торца буро-доставочного орта с помощью погрузо-доставочной машины (ПДМ).

Приняты следующие параметры системы разработки с обрушением:

- ширина панели – 100 м;
- высота подэтажа – 14 – 25 м;
- расстояние между осями ортов – 12,5 – 17 м;
- ширина целика между выработками – в подстилающих породах 8 – 10 м, в руде 9 – 11 м в зависимости от глубины разработки.

Система этажного обрушения обеспечивает высокую интенсивность отработки добычных блоков за счет одностадийной выемки и применения СО.

Камерно-столбовая система разработки применяется при отработке пологих и наклонных рудных тел малой и средней мощности и обеспечивает условия для эффективной эксплуатации СО на основных и вспомогательных технологических процессах [10].

Вариант 2.1 предусматривает отработку залежи мощностью 5 – 10 м (в среднем 8 м) (рис. 2а). Добычный блок включает очистную камеру шириной 8 м и ленточный междуканальный целик (МКЦ) шириной 6 м, располагаемые длинной стороной по падению залежи. Между добычными блоками по падению залежи через 90 м оставляется междублоковый целик (МБЦ) шириной 20 м, охраняющий доставочный штрек. Распределение балансовых запасов в блоке: камера – 42,4 %, МКЦ – 35,3 % и МБЦ – 22,2 %.

Подготовка к выемке запасов добычного блока заключается в проходке доставочного штрека, наклонных погрузочных заездов на буровой горизонт, буровых ортов по контакту рудного тела с налегающими породами, погрузочных заездов по контакту рудного тела с подстилающими породами, отрезных заходов и восстающих. Буровые орты расширяются до ширины камеры, и производится анкерное крепление ее кровли [11].

Выемка камерных запасов начинается с образования отрезной щели на фланге камеры и осуществляется путем отбойки рудного массива нисходящими параллельными скважинами, погрузки отбитой руды ПДМ с почвы камеры и доставки ее до рудоспуска. Проветривание камеры осуществляется нагнетательным способом с применением вентиляторов местного проветривания, расположенных в доставочном штреке.

Основные недостатки варианта 2.1:

- технология добычи руды предусматривает оставление регулярных ленточных МКЦ, имеющих значительную долю запасов (35,3 %) от общих запасов блока, что определяет весьма низкий уровень полноты извлечения запасов в блоке и, как следствие, высокий удельный объем ПНР;
- технологический процесс выемки камер, включающий предварительную подсечку кровли камеры на всю ее ширину с последующим креплением кровли, отбойку нисходящими скважинами, погрузку и доставку руды из очистного пространства, характеризуется относительно высокими затратами и низкой производительностью труда;
- для оформления бурового горизонта требуется проходка наклонных заездов под кровлю камеры с большим уклоном, что осложняет организацию ведения работ и увеличивает объем ПНР в блоке.

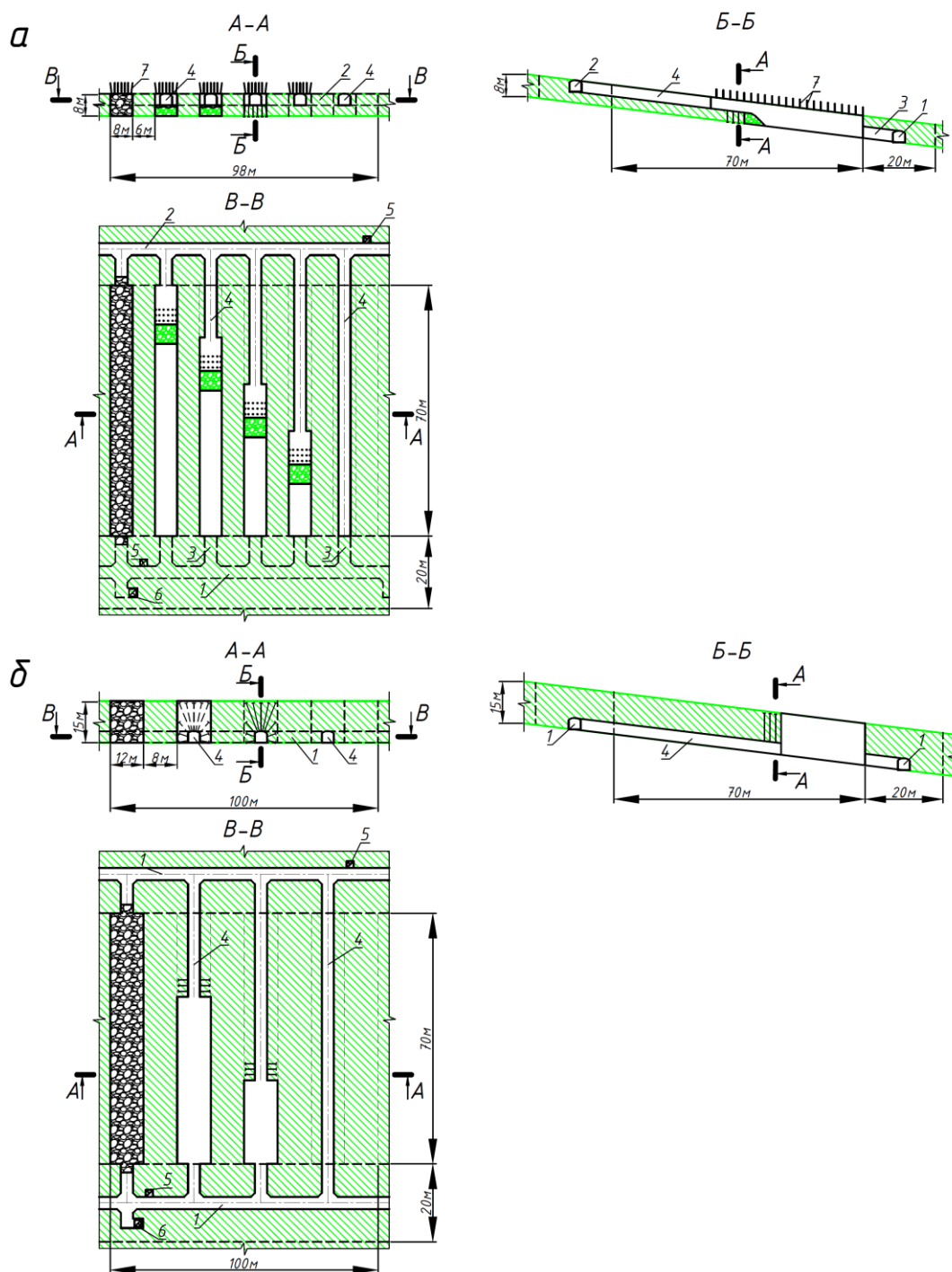


Рис. 2. Камерно-столбовая система разработки:

- а) вариант 2.1; б) вариант 2.2: 1 – доставочный штрек; 2 – вентиляционный штрек; 3 – погрузочный орт; 4 – буро-вентиляционный (буро-доставочный) орт; 5 – ВХВ; 6 – рудоспуск; 7 – железобетонные анкеры

Вариант 2.2 предусматривает отработку залежи мощностью 10 – 20 м (в среднем 15 м) (рис. 2б). Добычный блок включает очистную камеру шириной 12 м, ленточный МКЦ шириной 8 м и МБЦ шириной 20 м. Доля балансовых запасов в блоке: камера – 46,6 %, МКЦ – 31,1 % и МБЦ – 22,2 %.

Подготовка к выемке запасов добычного блока заключается в проведении доставочного штрека и буро-доставочных ортов по контакту рудного тела с подстилающими породами, отрезных заходок и восстающих.

Выемка камерных запасов начинается с образования отрезной щели на фланге камеры и осуществляется путем секционной (2–3 слоя) отбойки рудного массива восходящими веерами скважин с последующим выпуском и доставкой отбитой руды до рудоспуска с помощью ПДМ с дистанционным управлением (ДУ). Отработанные камеры закладываются пустой породой от проходческих работ с помощью ПДМ с ДУ и автосамосвала [12].

Применение варианта 2.2 по сравнению с вариантом 2.1 позволяет:

- исключить присутствие людей в очистном пространстве за счет применения ПДМ с ДУ и увеличить ширину камер в 1,5 раза (с 8 до 12 м) за счет корректировки расчета допустимого пролета обнажения, учитывающего отсутствие людей в очистном пространстве;

- использовать один буро-доставочный горизонт для выемки камер и снизить удельный объем ПНР;

- уменьшить эксплуатационные затраты и увеличить производительность труда по блоку за счет исключения мелкошпуровой отбойки, крепления кровли камеры и увеличения объема добытой руды в блоке.

В результате экономико-математического моделирования установлено, что применение камерно-столбовой системы разработки для выемки залежи мощностью более 15 м (при ширине камеры свыше 12 м) нерационально вследствие резкого увеличения потерь руды в целиках (рис. 3) и снижения безопасности ведения очистных работ.



Рис. 3. Зависимость величины потерь руды в целиках при камерно-столбовой системе разработки от мощности залежи

Комбинированная система разработки, сочетающая в пределах одного добычного блока этажно-камерную систему и систему этажного обрушения, позволяет существенно улучшить показатели извлечения руды в целом по блоку за счет выемки камерами до 40 % запасов блока и полной отработки оставшихся целиков [13, 14].

Вариант 3.1 предусматривает отработку залежи мощностью 5 – 10 м (в среднем 8 м) (рис. 4а). Добычный блок включает очистную камеру шириной 8 м, МКЦ шириной 10 м и МБЦ шириной 20 м. Распределение балансовых запасов в блоке: камера – 34,6 %, МКЦ – 43,2 % и МБЦ – 22,2 %.

Выемка камерных запасов осуществляется путем секционной (2– 3 слоя) отбойки нисходящих вееров скважин, разбуренных из буро-вентиляционного орта, располагаемого в кровле камеры, и последующего выпуска и доставки отбитой руды из очистного пространства камеры до рудоспуска с помощью ПДМ с ДУ. Отсыпка пустой породы в отработанной камере ведется из буро-вентиляционного орта в кровле камеры. Для повышения устойчивости кровли камеры производится ее анкерное крепление до

начала буровзрывных работ. Выемка запасов МКЦ ведется путем послойной отбойки восходящих вееров скважин, разбуренных из буро-доставочного орта, и послойного торцового выпуска руды с помощью ПДМ. Одновременно с отбойкой МКЦ производится обрушение налегающих пород на высоту 8 м и формирование выпускной траншеи высотой 9 м [14].

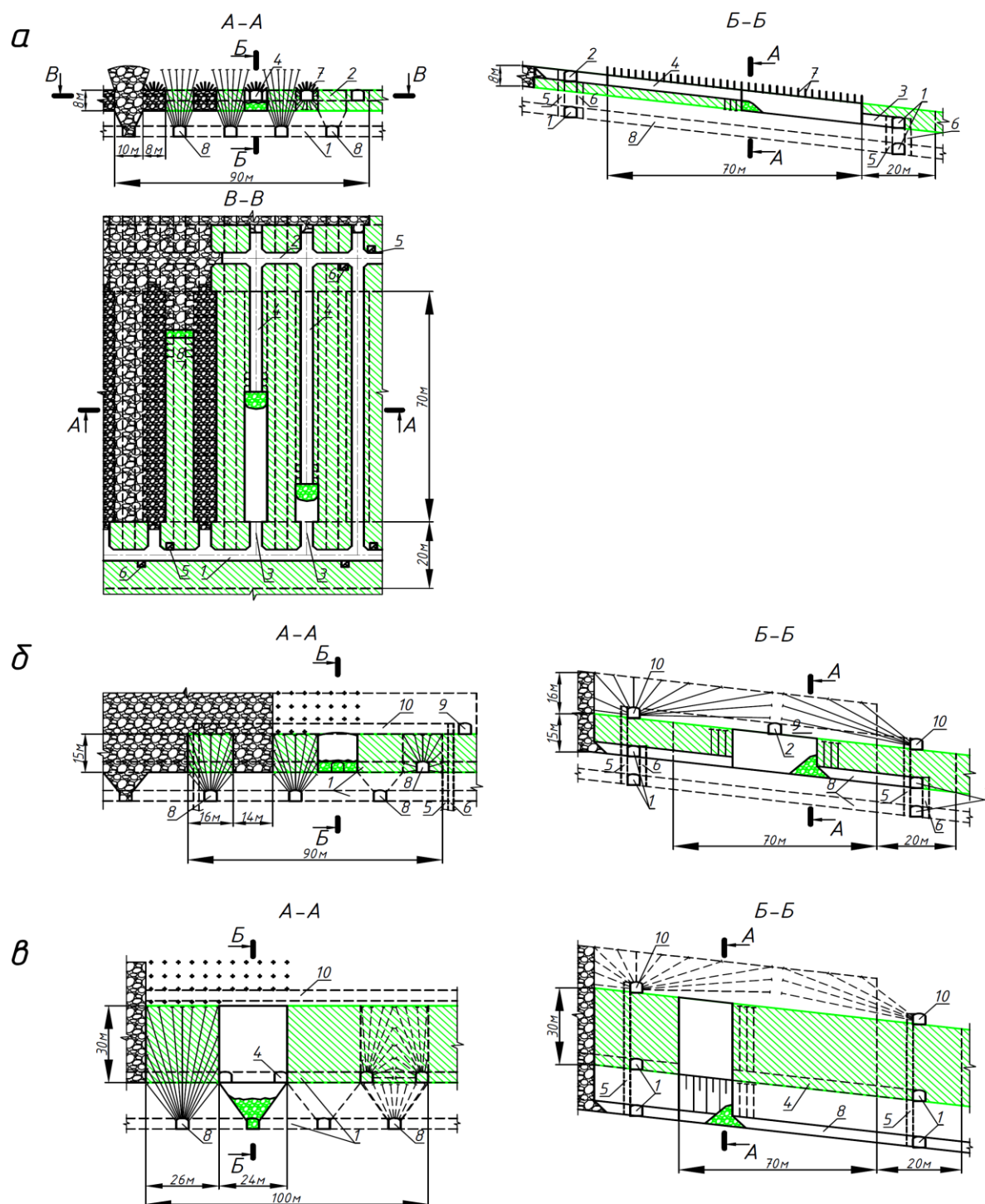


Рис. 4. Комбинированная система разработки:

а) вариант 3.1; б) вариант 3.2; в) вариант 3.3:

- 1 – доставочный штрек; 2 – вентиляционный штрек; 3 – погрузочный орт;
- 4 – буро-вентиляционный орт; 5 – ВХВ; 6 – рудоспуск;
- 7 – железобетонные анкеры; 8 – буро-доставочный орт;
- 9 – вентиляционный орт; 10 – буро-вентиляционный штрек

Вариант 3.2 предусматривает отработку залежи мощностью 10 – 20 м (в среднем 15 м) (рис. 4б). Добычной блок включает очистную камеру шириной 14 м, МКЦ шириной 16 м и МБЦ шириной 20 м. Доля балансовых запасов в блоке: камера – 36,3 %, МКЦ – 41,5 % и МБЦ – 22,2 %.

Выемка камерных запасов осуществляется путем секционной (2– 3 слоя) отбойки восходящих вееров скважин, разбуренных из буро-доставочного орта, располагаемого на контакте рудного тела с подстилающими породами, последующего выпуска и доставки отбитой руды из очистного пространства камеры с помощью ПДМ с ДУ. Принудительное обрушение налегающих пород производится одномоментно по всей площади блока на высоту 16 м путем взрывания встречных вееров скважин, разбуренных из фланговых буро-вентиляционных штреков, располагаемых в налегающих породах. Выемка запасов МКЦ осуществляется путем послойной отбойки и торцового выпуска руды под обрушенными породами из траншеи высотой 13 м с помощью ПДМ.

Вариант 3.3 предусматривает отработку залежи мощностью 20 – 45 м (в среднем 30 м) (рис. 4в). Добычной блок включает очистную камеру шириной 24 м, МКЦ шириной 26 м и МБЦ шириной 20 м. Доля балансовых запасов в блоке: камера – 37,4 %, МКЦ – 40,4 % и МБЦ – 22,2 %.

Общая схема подготовки, порядок и технология отработки запасов добычного блока аналогичны варианту 3.2. Отличительной особенностью является проведение двух буро-доставочных штреков по руде и формирование траншейного днища для выемки запасов камеры [15]. Выпуск руды из камеры через выпускную траншею без использования погрузочных заездов обеспечивает минимальный объем нарезных работ и устойчивость днища камеры.

Расположение камер и целиков по простиранию залежи имеет следующие преимущества:

- все буро-доставочные выработки проходятся горизонтально, а не под углом 7°, что позволяет снизить объем ПНР в блоке до 5 – 8 %;
- погрузка и доставка руды из горизонтальных выработок более эффективна в отличие от наклонных, поскольку обеспечивается необходимая глубина внедрения ковша в навал руды и интенсивность его зачерпывания.

В результате анализа рассмотренных вариантов системы разработки и сравнения их основных ТЭП определены наиболее эффективные для различных участков рудной залежи. Сводные ТЭП вариантов системы разработки пологой залежи вкрапленных медно-никелевых руд представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сводные ТЭП вариантов системы разработки пологой залежи

№ п/п	Система разработки	Балансовые запасы блока, т	Потери, %	Разубоживание, %	Эксплуат. запасы блока, т	Объем ПНР, м³	Удельный объем ПНР, м³/1000т
Система этажного (подэтажного) обрушения							
1	Вариант 1.1	216000	22,3	28,2	233749	20488	87,6
2	Вариант 1.2	405000	19,1	20,4	411614	23449	57,0
3	Вариант 1.3	810000	13,5	14,9	823325	45431	55,2
Камерно-столбовая система разработки							
4	Вариант 2.1	181440	46,4	8,2	105939	13453	127,0
5	Вариант 2.2	388800	42,2	8,6	245871	14193	57,7
Комбинированная система разработки							
6	Вариант 3.1	194400	12,7	16,3	202761	14210	70,1
7	Вариант 3.2	405000	13,4	18,9	432466	23352	54,0
8	Вариант 3.3	900000	14,8	20,5	964528	46168	47,9

Сравнение вариантов систем разработки показало следующее:

- 1) при отработке залежи мощностью 5 – 10 м наиболее эффективным является вариант 3.1 за счет более низких потерь руды (в 1,8 раза по сравнению с вариантом 1.1 и в 3,6 раза – с вариантом 2.1) и удельного объема ПНР (на 25 % по сравнению с вариантом 1.1 и в 1,8 раза – с вариантом 2.1);
- 2) при отработке залежи мощностью 10 – 20 м наиболее эффективным является вариант 3.2 за счет более низких потерь руды (в 1,4 раза по сравнению с вариантом 1.2 и в 3 раза – с вариантом 2.2) при практически равном удельном объеме ПНР;
- 3) при отработке залежи мощностью 20 – 45 м наиболее эффективным является вариант 1.3 за счет более низких потерь руды (на 10 % по сравнению с вариантом 3.3) и разубоживания (на 38 % по сравнению с вариантом 3.3).

Заключение

На основе дифференцированного подхода для условий пологопадающих месторождений вкрапленных медно-никелевых руд, отличающихся высокой изменчивостью мощности залежи и неоднородностью свойств вмещающих пород, определены наиболее эффективные и безопасные системы разработки по показателям минимума потерь и разубоживания руды и удельного объема ПНР: при мощности залежи 5 – 10 и 10 – 20 м – комбинированная система разработки, сочетающая этажно-камерную систему и систему этажного обрушения, при мощности залежи 20 – 45 м – система подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды.

Список литературы

1. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., 2015. Реализация концепции устойчивого развития горных территорий - базис расширения минерально-сырьевого комплекса России. *Устойчивое развитие горных территорий*, № 3, С. 46-50.
2. Дюжиков О.А., Дистлер В.В., Струнин Б.М. [и др.], 1988. *Геология и рудоносность Норильского района*. Москва: Наука, 249 с.
3. Галаов Р.Б., Пелипенко Е.В., Колечко С.С., 2015. История освоения и перспективы развития минерально-сырьевой базы ЗФ ПАО «Норильский никель». *Горный журнал*, № 6, С. 7-10. DOI: 10.17580/gzh.2015.06.01
4. Малиновский Е.Г., Ахпашев Б.А., Голованов А.И., Гильдеев А.М., 2019. Сравнение результатов физического моделирования и натурного эксперимента по торцовому выпуску руды при системе этажного принудительного обрушения для пологих залежей. *Известия вузов. Горный журнал*, № 7, С. 34-44. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-34-44
5. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Гобов Н.В., Никитин И.В., 2020. Опыт разработки инновационных подземных геотехнологий освоения рудных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3-1, С. 338-350. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-338-350
6. Тапсиев А.П., Фрейдин А.М., Усков В.А. [и др.], 2014. Развитие ресурсосберегающих геотехнологий разработки мощных пологопадающих залежей полиметаллических руд в условиях Норильска. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 5, С. 123-136.
7. Неверов А.А., Семенов Д.П., Неверов С.А., Никольский А.М., Тишков М.В., 2018. Обоснование параметров камерно-столбовой выемки с регулярным извлечением целиков и обрушением пород кровли в условиях больших глубин. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, № 1. С. 5-13. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-1-5-13
8. Li J.-G., Zhan K., 2018. Intelligent Mining Technology for an Underground Metal Mine Based on Unmanned Equipment. *Engineering*, Vol. 4, No. 3, P. 381-391.

9. Kant R., Sen P., Paul P.S., Kher A.A., 2016. A Review of Approaches Used for the Selection of Optimum Stopping Method in Hard Rock Underground Mine. *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 11, P. 7483-7490.
10. Сидоров Д.В., 2012. Геомеханическое обоснование конструктивных параметров камерно-столбовой системы разработки для проектирования глубоких горизонтов СУБРа. *Записки Горного института*, Т. 199, С. 134-140.
11. Лукичев С.В., Любин А.Н., 2016. Повышение полноты извлечения и качества руд при разработке тонких пологих месторождений. *Проблемы недропользования*, № 4 (11), С. 69-73. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.069
12. Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Никитин И.В., Соломеин Ю.М., 2023. Совершенствование технологии отработки пологих залежей бедных комплексных руд. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 4, С. 376-387.
13. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Криницын Р.В., 2021. Обоснование конструкции и параметров комбинированной системы разработки пологой залежи бедных комплексных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5-1, С. 88-104. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-51-0-88
14. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Рожков А.А., Никитин И.В., 2022. Пути повышения эффективности подземной разработки пологих месторождений бедных комплексных руд. *Проблемы недропользования*, № 4 (35), С. 33-43. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.04.033
15. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Соломеин Ю.М., 2024. Обоснование рациональной конструкции днища блока при комбинированной системе разработки пологих залежей средней мощности. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, Т. 22, № 3, С. 5-12. DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-5-12

References

1. Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V., Radchenko D.N., 2015. Realizatsiya kontseptsii ustoichivogo razvitiya gornyx territorii - bazis rasshireniya mineral'no-syr'evogo kompleksa Rossii [The implementation of the concept of sustainable development of mountainous territories is the basis for the expansion of the Russian mineral resource complex]. *Ustoichivoe razvitie gornyx territorii*, № 3, P. 46-50.
2. Dyuzhikov O.A., Distler V.V., Strunin B.M. [i dr.], 1988. *Geologiya i rudonosnost' Noril'skogo raiona* [Geology and ore content of the Norilsk region]. Moscow: Nauka, 249 p.
3. Galaov R.B., Pelipenko E.V., Kolechko S.S., 2015. Istoriya osvoeniya i perspektivy razvitiya mineral'no-syr'evoi bazy ZF PAO "Noril'skii nikel" [The history of exploration and prospects for the development of the mineral resource base of PJSC Norilsk Nickel]. *Gornyi zhurnal*, № 6, P. 7-10. DOI: 10.17580/gzh.2015.06.01
4. Malinovskii E.G., Akhpashev B.A., Golovanov A.I., Gil'deev A.M., 2019. Sravnenie rezul'tatov fizicheskogo modelirovaniya i naturnogo eksperimenta po tortsevomu vypusku rudy pri sisteme etazhnogo prinuditel'nogo obrusheniya dlya pologikh zalezhei [Comparison of the results of physical modeling and a full-scale experiment on the end discharge of ore with a floor-high forced collapse system for shallow deposits]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, № 7, P. 34-44. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-34-44
5. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Gobov N.V., Nikitin I.V., 2020. Opyt razrabotki innovatsionnykh podzemnykh geotekhnologii osvoeniya rudnykh mestorozhdenii [Experience in the development of innovative underground geotechnologies for the development of ore deposits]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 3-1, P. 338-350. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-338-350
6. Tapsiev A.P., Freidin A.M., Uskov V.A. [i dr.], 2014. Razvitie resursosbergayushchikh geotekhnologii razrabotki moshchnykh pologopadayushchikh zalezhei polimetalli-cheskikh rud v usloviyakh Noril'ska [Development of resource-saving geotechnolo-

gies for the development of powerful shallow deposits of polymetallic ores in the conditions of Norilsk]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 5, P. 123-136.

7. Neverov A.A., Semenov D.P., Neverov S.A., Nikol'skii A.M., Tishkov M.V., 2018. Obosnovanie parametrov kamerno-stolbovoi vyemki s regulyarnym izvlecheniem tselikov i obrusheniem porod krovli v usloviyakh bol'shikh glubin [Substantiation of the parameters of the chamber-pillar excavation with regular extraction of the pillars and the collapse of the roof rocks in conditions of great depths]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, № 1. P. 5-13. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-1-5-13

8. Li J.-G., Zhan K., 2018. Intelligent Mining Technology for an Underground Metal Mine Based on Unmanned Equipment. *Engineering*, Vol. 4, No. 3, P. 381-391.

9. Kant R., Sen P., Paul P.S., Kher A.A., 2016. A Review of Approaches Used for the Selection of Optimum Stopping Method in Hard Rock Underground Mine. *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 11, P. 7483-7490.

10. Sidorov D.V., 2012. Geomekhanicheskoe obosnovanie konstruktivnykh parametrov kamerno-stolbovoi sistemy razrabotki dlya proektirovaniya glubokikh gorizontov SUBRa [Geomechanical substantiation of the design parameters of the chamber-pillar development system for the design of deep horizons of the subsurface]. *Zapiski Gornogo instituta*, Vol. 199, P. 134-140.

11. Lukichev S.V., Lyubin A.N., 2016. Povyshenie polnoty izvlecheniya i kachestva rud pri razrabotke tonkikh pologikh mestorozhdenii . [Increasing the completeness of extraction and ore quality during the development of thin shallow deposits]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4 (11), P. 69-73. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.069

12. Antipin Yu.G., Baranovskii K.V., Nikitin I.V., Solomein Yu.M., 2023. Sovvershenstvovanie tekhnologii otrabotki pologikh zalezhei bednykh kompleksnykh rud . [Improving the technology of mining shallow deposits of poor complex ores]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 4, P. 376-387.

13. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Krinitsyn R.V., 2021. Obosnovanie konstruktssii i parametrov kombinirovannoi sistemy razrabotki pologoi zalezhi bednykh kompleksnykh rud [Substantiation of the design and parameters of the combined mining system for shallow deposits of poor complex ores]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5-1, P. 88-104. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-51-0-88

14. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Baranovskii K.V., Rozhkov A.A., Nikitin I.V., 2022. Puti povysheniya effektivnosti podzemnoi razrabotki pologikh mestorozhdenii bednykh kompleksnykh rud [Ways to increase the efficiency of underground mining of shallow deposits of poor complex ores]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4 (35), P. 33-43. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.04.033

15. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Solomein Yu.M., 2024. Obosnovanie ratsional'noi konstruktssii dnishcha bloka pri kombinirovannoi sisteme razrabotki pologikh zalezhei srednei moshchnosti [Substantiation of the rational design of the block bottom with a combined system for the development of shallow deposits of medium capacity]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, Vol. 22, № 3, P. 5-12. DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-5-12