

УДК 622.271.3/272:553.3

Соколов Игорь Владимирович

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

Смирнов Алексей Алексеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: geotech@igduran.ru

Антипин Юрий Георгиевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: geotech@igduran.ru

Никитин Игорь Владимирович

научный сотрудник лаборатории
подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: geotech@igduran.ru

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТРАТЕГИИ
ОСВОЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН РУДНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ****Аннотация:*

Разработаны теоретические основы геотехнологической стратегии освоения переходных зон при последовательной схеме комбинированной разработки рудных месторождений, состоящие в систематизации и формировании вариантов подземной геотехнологии в соответствии с установленными принципами, разработке методических подходов и соответствующих методик определения параметров и показателей подземной геотехнологии с учетом специфических факторов и условий, образованных на стадии открытых горных работ, и требований по созданию оптимальных условий для освоения основных запасов подземным способом, установлении на основе экономико-математического моделирования оптимального варианта геотехнологической стратегии по предложенным критериям минимума снижения доходности горнодобывающего предприятия в переходный период и максимума чистого дисконтированного дохода от освоения всех запасов, предназначенных для подземной разработки.

Ключевые слова: рудное месторождение, геотехнологическая стратегия, комбинированная разработка, переходный процесс, переходная зона, подземная геотехнология, чистый дисконтированный доход

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.01.014

Sokolov Igor V.

Doctor of Science (Engineering),
Head of the Laboratory
of Underground Geotechnology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075, Russia, Ekaterinburg, Mamina-Sibiriyaka
Str., 58
e-mail: geotech@igduran.ru;

Smirnov Alexey A.

Candidate of Science (Engineering),
Senior Researcher of the Underground
Geotechnology Laboratory,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: geotech@igduran.ru

Antipin Yuriy G.

Candidate of Science (Engineering),
Senior Researcher of the Underground
Geotechnology Laboratory,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: geotech@igduran.ru

Nikitin Igor V.

Researcher of the Underground
Geotechnology Laboratory,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: geotech@igduran.ru

**THEORETICAL BASES
OF GEOTECHNOLOGICAL STRATEGY
FOR DEVELOPMENT OF TRANSITION
ZONES OF ORE DEPOSITS
BY UNDERGROUND METHOD***Abstract:*

The theoretical bases have been provided for geotechnological strategy for development of transition zones under a consistent scheme of combined development of ore deposits, these bases consisting in the systematization and formation of options for underground geotechnology in accordance with established principles, the development of methodological approaches and appropriate methods for determining the parameters and indicators of underground geotechnology, taking into account the specific factors and conditions formed at the stage of open mining operations and the requirements for the creation of optimal conditions for the exploitation of major reserves by the underground method, the economic-mathematical modeling of the optimal variant for geotechnological strategy according to the proposed criteria of minimum reduction of profitability of mining enterprise in the transition period and the maximum of net discounted income from the development of all reserves designated for underground mining.

Key words: ore deposit, geotechnological strategy, combined development, transition process, transition zone, underground geotechnology, net discounted income

* Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00581-19-00. Тема №0405-2019-0005

В настоящее время актуальной является задача обоснования оптимального варианта геотехнологической стратегии (ГС) освоения переходных зон (ПЗ) рудных месторождений, образующихся при переходе от открытых горных работ (ОГР) к подземным (ПГР), а ее решение сдерживают следующие обстоятельства:

- несовершенство методологической базы долгосрочного (на весь период освоения месторождения) и целевого (максимальный экономический эффект от доработки оставшихся после ОГР запасов) планирования;
- недостаточная изученность особенностей переходного процесса, связанного с отработкой ПЗ, и обоснованность параметров подземной геотехнологии, включающей в себя порядок развития горных работ, способ и схему вскрытия, систему разработки и способ погашения выработанного пространства;
- отсутствие адекватных критериев и соответствующих методик технико-экономической оценки ГС освоения ПЗ, учитывающих специфические условия, образованные на предыдущих этапах освоения месторождения.

Таким образом, целью исследований является совершенствование теоретических основ и методологии выбора ГС освоения ПЗ при комбинированной разработке рудных месторождений в направлении устранения указанных выше недостатков.

Особенностью обоснования технологии освоения ПЗ является необходимость всестороннего учета специфических горнотехнических и эколого-экономических условий, сформированных на предыдущих этапах освоения месторождений. Условия эти формировались в процессе освоения верхней части месторождений ОГР. Следовательно, обоснование оптимального варианта ГС освоения ПЗ должно базироваться на методологии выбора подземной геотехнологии в направлении всестороннего учета специфических факторов и условий, сформированных на предшествующих стадиях освоения месторождения, с целью обеспечения наибольшей эффективности и безопасности отработки как ПЗ, так и основных запасов (ОЗ) ПГР.

Необходимыми требованиями при принятии важнейших технологических и организационно-технических решений являются четкое понимание цели и задач переходного процесса, знание присущих ему закономерностей, учет сложившихся на его начало и целевых на его завершение специфических условий, актуализация положительных и нейтрализация негативных факторов, действующих в переходный период [1 – 2].

Исходя из этого дано определение *переходного процесса* при комбинированной разработке как освоения (вскрытия, очистной выемки и погашения) части месторождения с целью перевода горнодобывающего предприятия от одного стабильного состояния к другому; и *переходной зоны* – как части месторождения, в пределах которой осуществляются организационно-технические и технологические мероприятия, направленные на создание оптимальных условий для освоения запасов в стабильном периоде ПГР с учетом специфических факторов и условий, сформированных при ОГР. Переходный период характеризует время реализации переходного процесса.

На основе анализа опыта освоения 122 месторождений комбинированным способом [3] установлены основные производственные условия и факторы, влияющие на выбор ГС освоения ПЗ:

- *горнотехнические*: производственная мощность предприятия (интегральный показатель, учитывающий природные и производственные факторы), глубина разработки, способ и схема вскрытия, система разработки;
- *технологические*: схема и параметры буровзрывных работ, схема выпуска и доставки руды; тип, состав и производительность комплекса технологического оборудования; параметры системы разработки; показатели извлечения; способ погашения выработанного пространства;

– *организационные*: порядок разработки месторождения во времени (ярусный, многоярусный); последовательность ввода в эксплуатацию месторождения (количество этапов); направление развития горных работ по вертикали (сверху вниз, снизу вверх); порядок отработки запасов в этаже (сплошной, камерно-целиковый); организация очистных и проходческих работ;

– *специфические*: наличие карьера, его глубина, техническое состояние и пригодность для целей вскрытия и очистной выемки; объем дорабатываемых ППР запасов, глубина их распространения и пространственное расположение относительно карьера; близость подземного блока к карьере, что вызывает действие негативных факторов – повышенное горное давление в прикарьерном массиве, активные аэродинамические и гидродинамические связи между карьером и подземными выработками и др.

Видно, что варианты ГС следует формировать на основе соответствующих подземных геотехнологий, представляющих собой рациональное сочетание порядка развития горных работ во времени и пространстве, способа и схемы вскрытия, технологии очистной выемки, способа погашения выработанного пространства и схемы транспорта горной массы [4 – 5]. В контексте сказанного сформулированы основные принципы формирования вариантов ГС освоения ПЗ при комбинированной разработке рудных месторождений:

1. Согласованность ГС освоения ПЗ с ГС комплексного освоения всего месторождения, отсутствие противоречия с ее целями и задачами.

2. Определенность границ рационального применения геотехнологий и обеспечение оптимальных условий перехода от одной геотехнологии к другой.

3. Максимальное использование существующих горных выработок, поверхностных комплексов, геотехники и транспортных коммуникаций для целей вскрытия и добычи руды на новом этапе освоения месторождения.

4. Нейтрализация (уменьшение) отрицательного воздействия негативных факторов, вызванных наличием технологических объектов (карьер, зона обрушения), созданных на предыдущих этапах освоения месторождения.

5. Императив применения комбинированных способов вскрытия и технологий отработки (а не вынужденная мера при затухании горных работ на предыдущем этапе).

6. Рациональное сочетание комплексов технологического оборудования, присутствующих геотехнологиям, применяемым на различных этапах освоения месторождения.

7. Минимизация ущерба, наносимого окружающей среде, путем максимального использования выработанного пространства для размещения вскрышных пород и отходов обогащения.

8. Применение методов оптимизационного экономико-математического моделирования (ЭММ) при оценке как вариантов геотехнологии, так и соответствующих им вариантов ГС освоения ПЗ.

Разработана блок-схема формирования вариантов и определения показателей подземной геотехнологии освоения ПЗ, представляющая собой последовательность решения и последующего согласования результатов 12 основных научно-технических задач (рис. 1).

Исходя из установленных принципов и решаемых при этом научно-технических задач, разработаны и систематизированы перспективные варианты подземной геотехнологии освоения ПЗ при последовательной схеме комбинированной разработки рудных месторождений (табл. 1). Данные варианты учитывают особенности освоения ПЗ и отличаются следующими признаками: состоянием карьера, порядком отработки (направлением развития ППР в пространстве), способом и схемой вскрытия, системой разработки ПЗ и ОЗ, способом изоляции ППР от карьера.

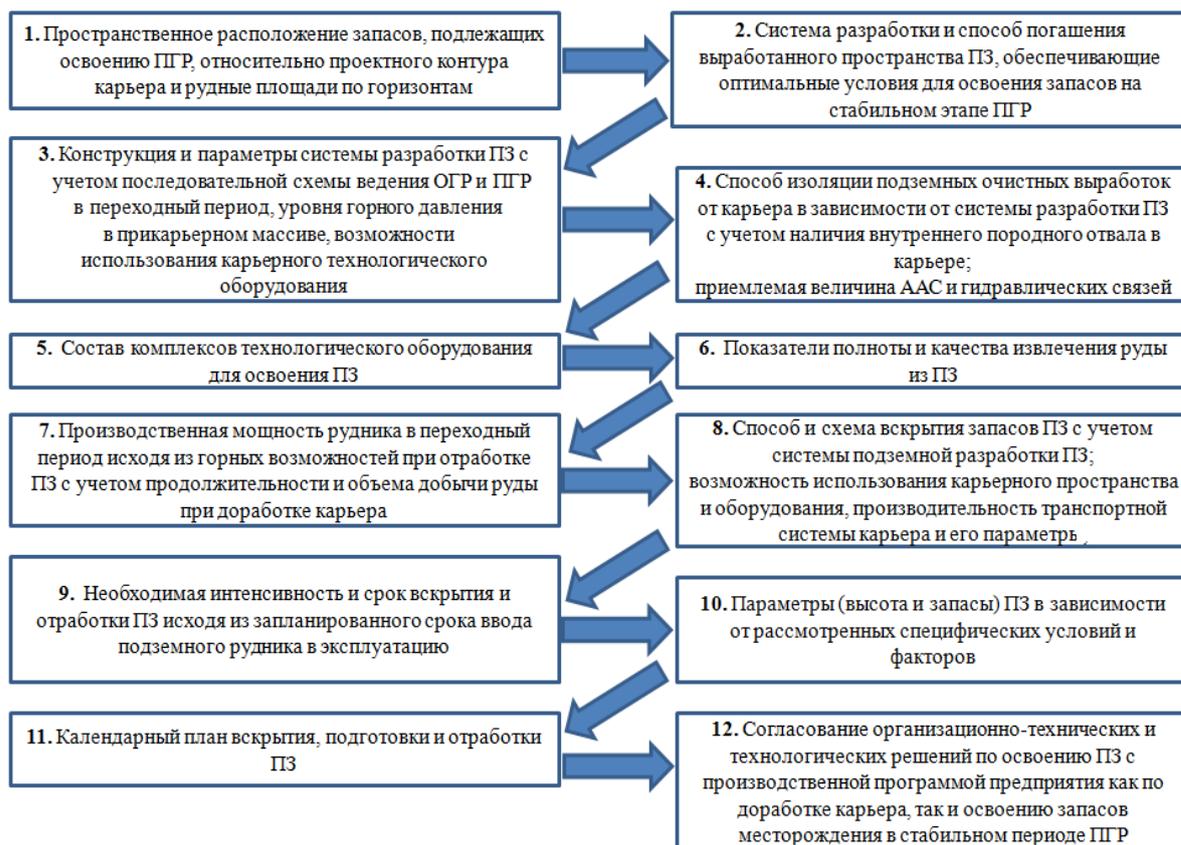


Рис. 1 – Блок-схема формирования вариантов и определения показателей подземной геотехнологии освоения ПЗ

Таблица 1

Перспективные варианты подземной геотехнологии освоения ПЗ

Элемент геотехнологии	Варианты подземной геотехнологии			
	1	2	3	4
Состояние карьера	обрушен или сформирован внутренний отвал на дне карьера	в устойчивом состоянии	обрушен или сформирован внутренний отвал на дне карьера	в устойчивом состоянии
Порядок отработки	нисходящий		восходящий	
Способ и схема вскрытия	вертикальными стволами с поверхности	автоуклоном из карьера и наклонным съездом с поверхности	вертикальными стволами с поверхности	автоуклоном из карьера и наклонным съездом с поверхности
Система разработки ПЗ	этажное принудительное или подэтажное обрушение	этажно-камерная или слоевая с закладкой	этажное принудительное или подэтажное обрушение	этажно-камерная или слоевая с закладкой
Способ изоляции ПЗ от карьера	массивом разрыхленных пород на дне карьера	рудным или искусственным целиком в пределах ПЗ	массивом разрыхленных пород на дне карьера	рудным или искусственным целиком в пределах ПЗ
Система разработки ОЗ	этажное принудительное или подэтажное обрушение под массивом разрыхленных пород	этажно-камерная с закладкой под закладочным массивом	этажно-камерная с закладкой под рудным массивом	

В соответствии с предложенной систематизацией сформированы 4 варианта ГС, основанных на соответствующих вариантах 1 – 4 подземной геотехнологии освоения ПЗ, для условий последовательной открыто-подземной разработки Молодежного медноколчеданного месторождения с мощностью рудного тела 40 м, углом наклона 50° и глубиной залегания 500 м, осваиваемого подземным рудником с производственной мощностью 400 тыс. т руды в год при глубине карьера 260 м и высоте этажа 60 м [6]:

– вариант 1 ГС: на первом этапе осуществляется вскрытие ПЗ двумя вертикальными центрально-расположенными стволами с поверхности и ее отработка системой этажного принудительного обрушения, затем – освоение ОЗ аналогичными схемой вскрытия и системой разработки (рис. 2а);

– вариант 2 ГС: на первом этапе осуществляется вскрытие ПЗ автоуклоном из карьера и наклонным съездом с поверхности и ее отработка этажно-камерной системой с твердеющей закладкой под рудным целиком, затем – освоение ОЗ аналогичными схемой вскрытия и системой разработки (рис. 2б);

– вариант 3 ГС: на начальных этапах осуществляется вскрытие ОЗ (начиная с нижнего этажа) двумя вертикальными центрально-расположенными стволами с поверхности и их отработка этажно-камерной системой с твердеющей закладкой, на заключительном этапе – освоение ПЗ системой этажного принудительного обрушения (см. рис. 2а);

– вариант 4 ГС: на начальных этапах осуществляется вскрытие ОЗ (начиная с нижнего этажа) автоуклоном из карьера и наклонным съездом с поверхности и их отработка этажно-камерной системой с твердеющей закладкой, на заключительном этапе – освоение ПЗ аналогичными схемой вскрытия и системой разработки (см. рис. 2б).

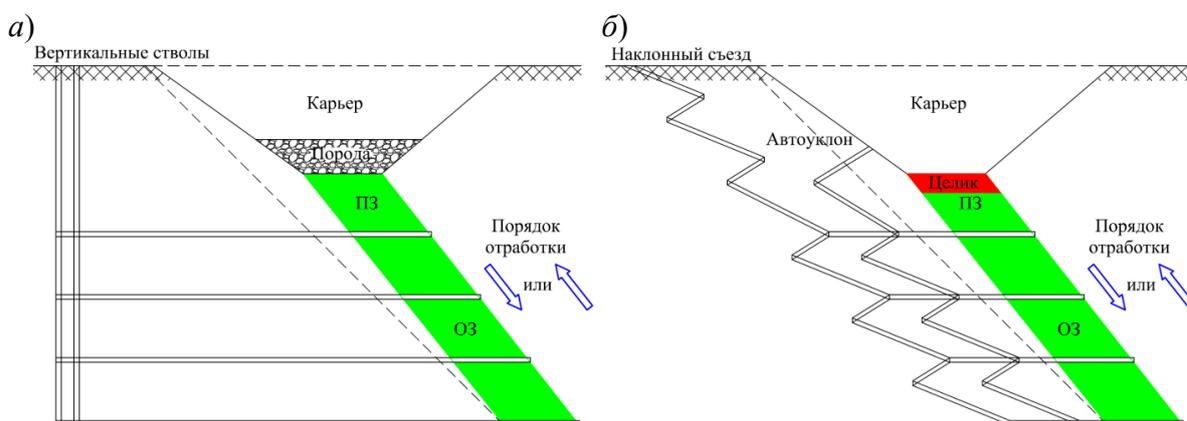


Рис. 2 – Варианты 1 и 3 (а) и 2 и 4 (б) ГС освоения ПЗ и ОЗ

Предложены два подхода к выбору оптимального варианта ГС освоения ПЗ рудных месторождений (1 – сравнительный и 2 – доходный) и разработаны соответствующие методики оценки подземных геотехнологий, на базе которых формируются варианты ГС, учитывающие специфические факторы и условия, сформированные на предыдущих этапах:

1. Методика оценки подземной геотехнологии освоения собственно ПЗ по критерию минимума снижения доходности ΔD горнодобывающего предприятия в переходный период [2, 7], руб.:

$$\Delta D = D_0 - D_{\Pi} = D_0 - \frac{\sum_{t=0}^T (C_{\Pi} A_{\Pi_t} - K_{\Pi_t} - C_{\Pi} A_{\Pi_t})}{T_{\Pi}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где D_0 – среднегодовой доход предприятия в стабильном периоде ОГР, руб/год; D_{Π} – среднегодовой доход предприятия в переходном периоде, руб/год; C_{Π} – удельная извлекаемая ценность добытой руды при освоении ПЗ, руб/т; A_{Π_t} – производственная

мощность подземного рудника в t -ом году, т/год; $K_{П_t}$ – капитальные затраты на вскрытие ПЗ в t -ом году с учетом специфических факторов, руб/год; $C_{П}$ – себестоимость добычи руды (без амортизации) при отработке ПЗ с учетом специфических факторов, руб/т; $T_{П}$ – срок освоения ПЗ (продолжительность переходного периода), лет.

Данная методика пригодна для сравнительной оценки вариантов, так как дает относительные технико-экономические показатели.

2. Методика оценки подземной геотехнологии освоения ПЗ совместно с ОЗ по критерию максимума чистого дисконтированного дохода ЧДД [8], руб.:

$$\text{ЧДД} = \frac{\sum_{t=0}^T (\Pi_{П_t} Q_{П_t} + \Pi_{О_t} Q_{О_t})}{(1+E)^t} - \frac{\sum_{t=0}^T (K_{П_t} + K_{О_t})}{(1+E)^t} - \frac{\sum_{t=0}^T (C_{П_t} Q_{П_t} + C_{О_t} Q_{О_t})}{(1+E)^t} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где T – продолжительность освоения запасов ППР, лет; $\Pi_{О}$ – удельная извлекаемая ценность при освоении ОЗ, руб/т; $Q_{П_t}$, $Q_{О_t}$ – объем добытой руды при освоении ПЗ и ОЗ в t -ом году, соответственно, т/год; $K_{П_t}$ – капитальные затраты на вскрытие ОЗ в t -ом году, руб/год; $C_{О}$ – себестоимость добычи руды (без амортизации) при отработке ОЗ, руб/т; E – норма дисконта, доли ед.

Данная методика кроме сравнительной оценки позволяет оценить эффективность инвестиций по вариантам, поскольку определяются все необходимые технико-экономические показатели (доходность, капитальные вложения, себестоимость, рентабельность, срок окупаемости и пр.).

Таким образом, используя методики (1) и (2), методом ЭММ можно определить оптимальные параметры и показатели подземной геотехнологии и произвести оценку и выбор оптимального варианта ГС освоения ПЗ при комбинированной разработке рудных месторождений в зависимости от установленных специфических факторов, например, глубины карьера (H_k) или глубины распространения подкарьерных запасов (H_d).

На основе ЭММ исследована H_k , изменяющаяся в диапазоне $H_k=140 - 440$ м с шагом 60 м при постоянной $H_d=500$ м, и выполнена сравнительная оценка вариантов 1 – 4 ГС по двум критериям ΔD и ЧДД.

В качестве исходных данных для ЭММ приняты значения, рассчитанные для условий отработки Молодежного медноколчеданного месторождения:

- среднегодовой доход предприятия в период ведения ОГР – 300 млн руб.;
- годовая производственная мощность рудника – 400 тыс. т руды;
- удельная извлекаемая ценность при освоении ПЗ: варианты 1 и 3 ГС – 2618 руб/т, варианты 2 и 4 ГС – 2827 руб/т;
- удельная извлекаемая ценность при освоении ОЗ: вариант 1 ГС – 2692 руб/т, вариант 2 ГС – 2856 руб/т, варианты 3 и 4 ГС – 2863 руб/т;
- капзатраты на вскрытие ПЗ: вариант 1 ГС – 2233 млн руб., вариант 2 ГС – 972 млн руб., вариант 3 ГС – 319 млн руб., вариант 4 ГС – 306 млн руб.;
- капзатраты на вскрытие ОЗ: вариант 1 ГС – 957 млн руб., вариант 2 ГС – 902 млн руб., вариант 3 ГС – 1914 млн руб., вариант 4 ГС – 1530 млн руб.;
- себестоимость добычи и обогащения при освоении ПЗ: варианты 1 и 3 ГС – 2026 руб/т, варианты 2 и 4 ГС – 2171 руб/т;
- себестоимость добычи и обогащения при освоении ОЗ: вариант 1 ГС – 2020 руб/т, вариант 2 ГС – 2191 руб/т, варианты 3 и 4 ГС – 2151 руб/т;
- срок строительства рудника: вариант 1 ГС – 7 лет, вариант 2 ГС – 3 года, вариант 3 ГС – 6 лет, вариант 4 ГС – 5 лет;
- срок освоения ПЗ: варианты 1-4 ГС – 8 лет;
- срок освоения ОЗ: варианты 1-4 ГС – 21 год;
- норма дисконта – 10 %.

В результате ЭММ по критерию ΔD установлено (рис. 3):

– среднегодовой доход предприятия в переходный период $D_{п}$ значительно ниже среднегодового дохода при открытой разработке месторождения $D_{о}$ и находится в диапазоне $D_{п}=90-190$ млн руб., что составляет от 30 до 65 % $D_{о}$;

– при увеличении глубины карьера $H_{к}$ от 140 до 440 м снижение доходности в период отработки ПЗ в вариантах 1 и 3 ГС увеличивается в 1,3 – 1,4 раза, в вариантах 2 и 4 ГС – в 1,2 – 1,3 раза. Это объясняется ростом капитальных затрат на строительство основных вскрывающих выработок вследствие увеличения их длины относительно поверхности;

– наиболее эффективными являются варианты 2 и 4 ГС, что обусловлено более низкими капитальными затратами на вскрытие (по сравнению с вариантами 1 и 3 ГС). Однако даже при лучших вариантах 2 и 4 ГС происходит снижение доходности предприятия от 35 до 50 % по сравнению с периодом ведения ОГР.

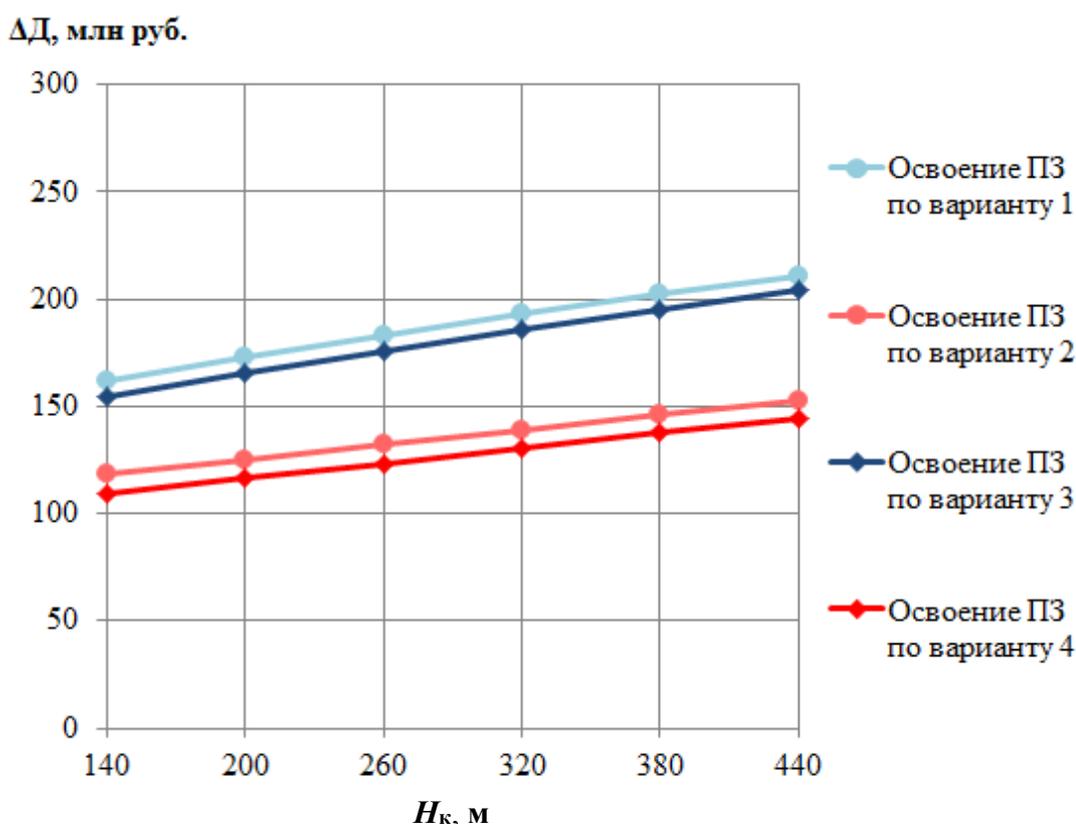


Рис. 3 – Снижение доходности ΔD по вариантам 1-4 ГС освоения ПЗ уральского медноколчеданного месторождения

В результате ЭММ по критерию ЧДД установлено (рис. 4):

– оптимальным является вариант 2 ГС: ЧДД составляет 1428 млн руб., срок окупаемости – 7 лет. Эффект достигается за счет быстрее (на 3-й год) ввода рудника в эксплуатацию для отработки ПЗ, отсрочки во времени капитальных вложений на вскрытие ОЗ (10, 17 и 24-й год) и более низких капитальных затрат (по сравнению с вариантами 1 и 3 ГС) даже при более высоких эксплуатационных затратах (по сравнению с вариантом 4 ГС);

– только при реализации варианта 2 ГС уже при отработке ПЗ образуется доход, составляющий 32 % от общего дохода по варианту.

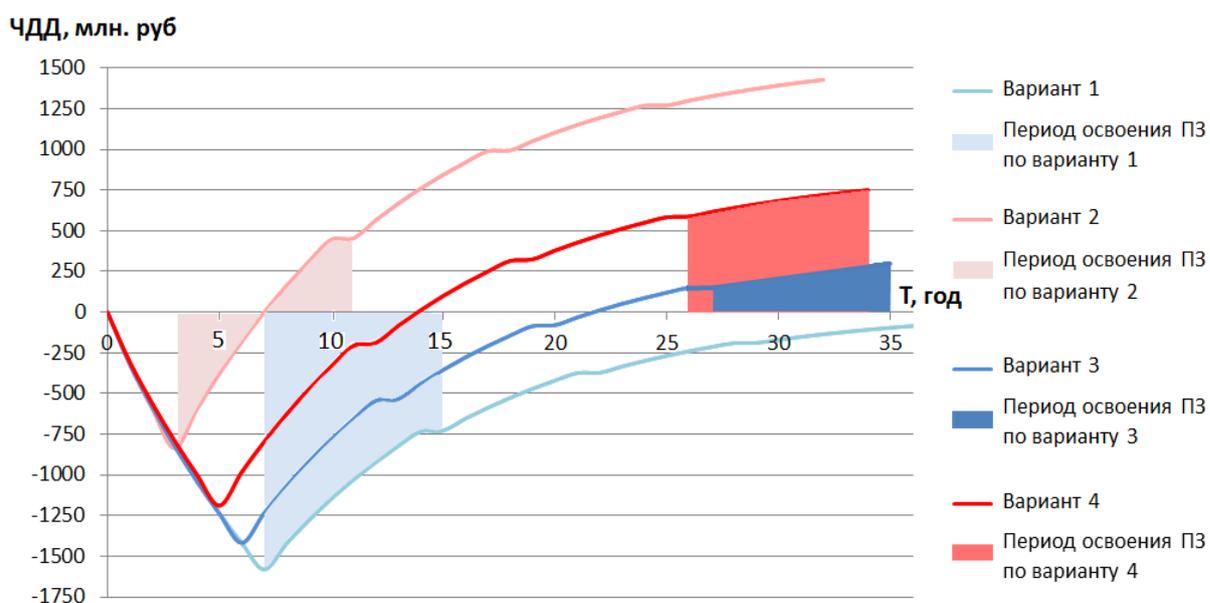


Рис. 4 – Динамика изменения ЧДД по вариантам 1-4 ГС освоения ПЗ и ОЗ уральского медноколчеданного месторождения

Заключение

На основании выполненных исследований получены следующие научно-методические результаты:

1. Систематизированы по признакам – состояние карьера, порядок отработки, способ и схема вскрытия, система разработки переходной зоны и основных запасов, способ изоляции подземного выработанного пространства от карьера – и для условий последовательной открыто-подземной разработки медноколчеданного месторождения сформированы перспективные варианты подземной геотехнологии.

2. Обоснованы два методических подхода (сравнительный и доходный) и разработаны соответствующие методики оценки вариантов подземной геотехнологии по критерию минимума снижения доходности предприятия в переходный период (ΔД) и по критерию максимума чистого дисконтированного дохода от освоения всех подкарьерных запасов (ЧДД) с учетом специфических факторов, образованных на предыдущей стадии освоения месторождения.

3. В результате экономико-математического моделирования на примере освоения уральского медноколчеданного месторождения установлено, что по обоим критериям ΔД и ЧДД оптимальным является вариант 2 за счет нисходящей выемки, поэтапного вскрытия переходной зоны и основных запасов автоуклоном из карьера и наклонным съездом с поверхности, их разработки этажно-камерной системой с закладкой, что обеспечивает наиболее быстрый ввод рудника и отработку всех запасов подземных горных работ с высокими показателями.

Литература

1. Яковлев В.Л. Исследование переходных процессов – новый методологический подход к разработке и развитию инновационных технологий добычи и рудоподготовки минерального сырья при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений / В.Л. Яковлев // Проблемы недропользования. – 2017. – № 2. – С. 5 - 14. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.112

2. Исследование переходных процессов при комбинированной разработке рудных месторождений / В.Л. Яковлев, И.В. Соколов, Г.Г. Саканцев, И.Л. Кравчук // Горный журнал. – 2017. – № 7. – С. 46 - 50.

3. Соколов И.В. Оценка эффективности подземной геотехнологии при обосновании стратегии комбинированной разработки рудных месторождений / И.В. Соколов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 11. – С. 480 - 493.

4. Волков Ю.В. Подземная геотехнология при комбинированной разработке рудных месторождений / Ю.В. Волков, И.В. Соколов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 1. – С. 41 - 47.

5. Ben-Awuah E., Richter O., Elkington T., Pourrahimian Y. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both // International Journal of Mining Science and Technology. - 2016. - Vol. 26. - No. 6. - P. 1065 -1071.

6. Волков Ю.В. Проектные решения по доработке Молодежного месторождения подземным способом / Ю.В. Волков, И.В. Соколов, В.Д. Камаев // Горный журнал. – 2004. – № 6. – С. 37 - 40.

7. Соколов И.В. Принципы формирования и критерий оценки геотехнологической стратегии освоения переходных зон рудных месторождений подземным способом / И.В. Соколов, Ю.Г. Антипин, И.В. Никитин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 9. – С. 151 - 160.

8. Методология выбора подземной геотехнологии освоения переходных зон при комбинированной разработке рудных месторождений / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин, И.В. Никитин // Горный журнал. –2018. – № 1. – С. 22 - 26.