

УДК 622.271.3.06/.272

Соколов Игорь Владимирович

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

Антипин Юрий Георгиевич,

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

Смирнов Алексей Алексеевич

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

**РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА ВАРИАНТОВ
СТРАТЕГИИ ОСВОЕНИЯ
ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ЭКОЛОГИЧЕСКИ
СБАЛАНСИРОВАННЫМИ
ПОДЗЕМНЫМИ ГЕОТЕХНОЛОГИЯМИ**

Аннотация:

Разработаны и оценены варианты геотехнологической стратегии освоения подземных запасов при комбинированной разработке железорудных месторождений, представленные в виде горнотехнической системы, включающей подсистемы вскрытия, очистной выемки, транспорта, подземного обогащения и утилизации отходов. На основе экономико-математического моделирования установлено, что максимальный экономический эффект и экологическая безопасность достигаются применением инновационной геотехнологии с нисходяще-восходящим порядком выемки системами с обрушением и с закладкой в соотношении, обеспечивающем замкнутость горнотехнической системы.

Ключевые слова: геотехнологическая стратегия, горнотехническая система, экономическая и экологическая эффективность, порядок отработки, вскрытие, система разработки, закладка, подземное обогащение

Sokolov Igor V.

Dr. of technical sciences,
the head of the laboratory
of underground geo-technology,
The Institute of mining UB RAS
620075, Yekaterinburg, 58, Mamin-Sibiryak st.
e-mail: geotech@igduran.ru

Antipin Yury G.

candidate of technical sciences,
senior researcher
of the laboratory of underground geo-technology
The Institute of mining UB RAS
e-mail: geotech@igduran.ru

Smirnov Alexey A.

candidate of technical sciences,
senior researcher
of the laboratory of underground geo-technology,
The Institute of mining UB RAS
e-mail: geotech@igduran.ru

**WORKING OUT AND ESTIMATION THE
STRATEGY OPTIONS OF DEVELOPMENT
IRON ORE DEPOSITS BY ECOLOGICALLY
BALANCED SUBSURFACE
GEO-TECHNOLOGIES**

Abstract:

The options of geo-technological strategy of development underground reserves by combined iron ore deposits mining are worked out and estimated. They are presented in the form of a mining system including sub-systems of opening, stoping, transport, underground concentration and wastes utilization. In terms of economic and mathematical modeling it is set up that both the maximum economic effect and ecological safety are obtained by employment ascending-descending order of mining extraction by caving and filling systems in the ratio providing a geo-technical system being avoidant.

Key words: geo-technological strategy, geo-technical system, economic and ecological efficiency, the order of development, opening, mining system, filling, underground concentration

В современной науке и практике формирование вариантов и реализация геотехнологической стратегии (ГС) освоения мощных глубокозалегающих железорудных месторождений основаны на традиционном последовательном и нисходящем порядке ведения горных работ [1]. Причем при комбинированной разработке это присуще как освоению месторождения в целом (с реализацией последовательного перехода от открытых

горных работ к подземным), так и части запасов, предназначенных для подземной разработки (переходная зона и далее нисходящая поэтажная выемка) [2]. Применение инновационной ресурсосберегающей технологии восходящей выемки с закладкой выработанного пространства [3] в рамках общей ГС освоения подземных запасов сдерживается, на наш взгляд, следующими обстоятельствами:

- несовершенством методологической базы собственно долгосрочного (на весь срок освоения) и целевого (получение максимального интегрального эколого-экономического эффекта) планирования разработки месторождения;
- нерешенностью задачи оптимальных структуры и параметров горнотехнической системы (ГТС), включающей порядок и направление развития горных работ, способ и схему вскрытия, систему разработки, способ транспортирования, целесообразность подземного обогащения, использование выработанного пространства для складирования отходов горного производства;
- отсутствием критерия и методики эколого-экономической оценки ГС.

Систематизированы факторы, влияющие на выбор ГС, по группам: социально-экологические (здоровье и занятость населения, воздействия на окружающую среду (ОС); рыночные (внешнеэкономические и макроэкономические); природные (географо-экономические, геологические); инновационные (научно-технический прогресс (НТП)), наличие инновационных технологий); производственные (горнотехнические, технологические, организационные, специфические).

ГС освоения подземных запасов при комбинированной разработке мощных глубокозалегающих рудных месторождений определена как комплекс взаимосвязанных мероприятий, включающий установление в рамках принятой концепции: схемы комбинированной разработки; производственной мощности подземного рудника; порядка развития горных работ во времени и в пространстве; способа и схемы вскрытия; технологии очистной выемки; способа погашения выработанного пространства; схемы и способа транспортирования руды; целесообразности подземного обогащения; схемы и способа утилизации отходов горно-обогательного производства, направленных на обеспечение максимального экономического эффекта от эксплуатации всех запасов месторождения и экологической безопасности.

Предложены принципы формирования ГС, заключающиеся в: системности исследований, комплексности цели и задач; оптимальности результатов; императиве «более чистого производства»; комбинировании технологических процессов различных способов добычи и переработки; разработке инновационных геотехнологий [4]. Для формирования и конструирования соответствующих вариантов ГТС разработаны следующие основные положения:

- с целью утилизации в выработанном пространстве отходов добычи и обогащения руды и снижения эксплуатационных затрат использовать ресурсосберегающий способ восходящей камерной выемки с сухой закладкой (СЗ);
- для существенного (до 2 раз) повышения производственной мощности подземного рудника ориентироваться на восходяще-нисходящий порядок, обеспечивающий независимую отработку этажей в пределах шага освоения;
- вскрытие осуществлять с учетом схемы комбинированной разработки месторождения: при последовательной автоуклонами из карьера, при параллельной вертикальными стволами с поверхности;
- при отработке переходной зоны формировать изолирующие массивы (искусственные монолитные или из разрыхленной породы);
- для обеспечения максимальной интенсивности горных работ использовать высокопроизводительное самоходное оборудование (СО) и проходческие комбайны;
- устанавливать целесообразность применения подземного обогательного комплекса (ПОК) с получением концентрата и использованием отходов обогащения в качестве закладки выработанного пространства;

- схемы и способы транспортирования грузов (руда, порода, концентрат, закладка) обосновывать с учетом оптимального расположения ОК под землей или на поверхности, при этом максимально использовать силы гравитации;
- с целью организации замкнутого цикла горно-обогательного производства и размещения под землей всех отходов, образуемых в рамках ГТС, применять комплексную подземную геотехнологию добычи руды, сочетающую камерную систему с СЗ и восходящей выемкой нижних этажей и системы с обрушением при освоении верхних этажей. Оптимальное соотношение долей применения систем в производственной мощности рудника определять по условию организации замкнутого цикла;
- в качестве резерва емкостей для размещения отходов добычи и обогащения использовать выработанное пространство карьера.

Таблица 1

Технологические схемы, соответствующие вариантам ГС

Вариант ГС	Порядок развития горных работ		Система разработки	Расположение ОК	Отработка запасов шага освоения. Способ погашения и утилизации
1	Последовательный нисходящий		Камерная с последующим обрушением целиков	На земной поверхности	Одноэтажная. Выработанное пространство погашается обрушенными породами. Отходы ГОП размещаются на поверхности
2	Последовательный восходящий		Камерная с закладкой	На земной поверхности	Одноэтажная. Камеры погашаются закладкой: породой от ГПР и отходами ОК, подаваемыми с поверхности
3	Последовательный восходящий		Камерная с закладкой	Под землей	Одноэтажная. Камеры погашаются закладкой: породой от ГПР и отходами ПОК
4	Параллельный. Комбинированный	Нисходящий	Верхние этажи – камерная с обрушением целиков	На земной поверхности	Многоэтажная. Выработанное пространство верхних этажей погашается обрушенными породами. Камеры нижних этажей погашаются закладкой: породой от ГПР и отходами ОК, подаваемыми с поверхности
		Восходящий	Нижние этажи – камерная с закладкой		
5	Параллельный. Комбинированный	Нисходящий	Верхние этажи – камерная с обрушением целиков	Под землей	Многоэтажная. Выработанное пространство верхних этажей погашается обрушенными породами. Камеры нижних этажей погашаются закладкой: породой от ГПР и отходами ПОК.
		Восходящий	Нижние этажи – камерная с закладкой		

Разработка и оценка вариантов ГС выполнена на конкретном примере освоения глубоких горизонтов Естюнинского месторождения. В основу положена концепция выполнения выбывающих мощностей Высокогорского ГОКа, где минимальным условием является обеспечение стабильной производственной мощности собственно шахты Естюнинская 2,5 млн. т руды в год, максимальным – мощности ГОКа за счет увеличения мощности шахты Естюнинская до 5 млн т руды в год. В соответствии с данной концепцией типизированы технологические схемы (табл. 1), соответствующие 5 вариантам ГС в шаге

освоения (вскрытия и отработки), по признакам: производственная мощность шахты; порядок отработки этажей во времени и в пространстве; система разработки; место расположения обогатительного комплекса (ОК); способ погашения выработанных камер и утилизации отходов горно-обогатительного производства (ГОП). Варианты 1 – 3 обеспечивают производительность шахты 2,5 млн т, варианты 4 – 5 5 млн т.

Определенной новизной обладают варианты 4 и 5 ГС [5]. В варианте 4 ГС этажи отрабатываются параллельно в комбинированном порядке, верхние – в нисходящем системах с обрушением, нижние – в восходящем этажно-камерной системой с закладкой. ОК располагается на земной поверхности. Руда по рудоспускам поступает на концентрационный горизонт и далее перемещается локомотивами до скипового ствола, скипами выдается на поверхность и железнодорожным транспортом перевозится на ОК. Отходы сухой (СМС) и мокрой (ММС) магнитной сепарации направляются на закладочный комплекс (ЗК) и в виде закладки транспортируются до камер по трубам (рис. 1, а). В варианте 5 ГС технология и порядок отработки аналогичны варианту 4. ПОК располагается в подземных выработках нижнего этажа. Руда с нижних этажей по автоуклону транспортируется до ПОК автосамосвалами, верхних этажей – по рудоспускам перепускается в ПОК. Отходы СМС и ММС после предварительного обезвоживания в виде сухой (СЗ) или пастовой закладки транспортируются от ПОКа до выработанного пространства. Концентрат по концентрационному горизонту электровозами до ствола и скипами выдается на поверхность.

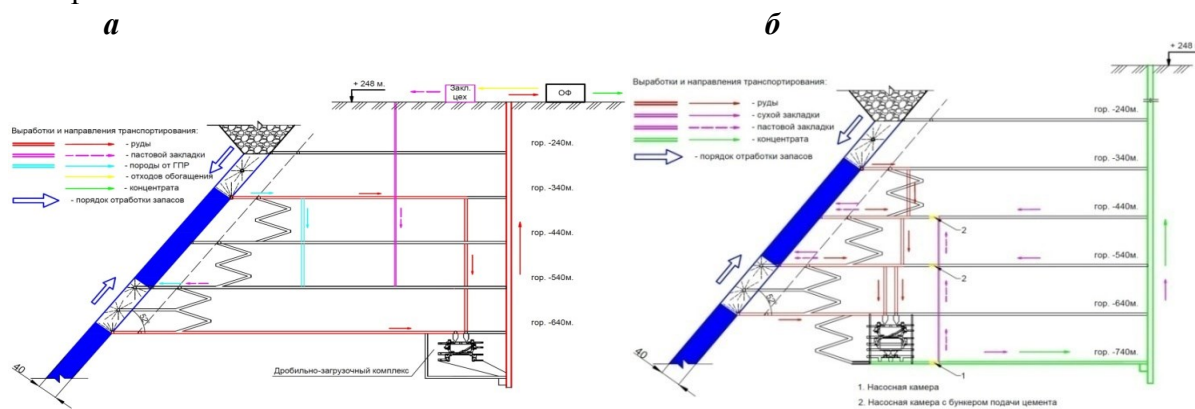


Рис. 1 – Варианты 4 – а и 5 – б ГС освоения Естюнинского месторождения

Для условий восходящей отработки Естюнинского месторождения сгруппированы варианты камерной системы разработки с СЗ и самоходным оборудованием (СО) по признакам: порядок отработки камер и целиков, технология очистной выемки, способ создания и сохранения закладочного массива, схема подготовки и конструкция днища. Наиболее эффективным признан вариант выемки трапецевидными камерами с наклонными торцовыми стенками из СЗ, укрепленной цементным раствором (рис. 2). Здесь реализуется двухстадийный камерно-целиковый порядок отработки камер в этаже по схеме 1-2-1-2-1. С целью создания устойчивого закладочного массива в обоих торцовых частях камеры 1-й очереди формируется откос путем придания торцовым стенкам камеры наклона (55 – 70°). Закладочный массив формируется путем отсыпки слоев СЗ и последующего их укрепления цементным раствором (цемент+вода). В камерах 2-й очереди закладочный массив формируется путем отсыпки СЗ из выработок буровентиляционного горизонта.

Преимущества подземного размещения ОК заключаются в следующем:

- резкое сокращение площади земель (на 90 – 95 %), занимаемых поверхностными ОК, отвалами и шламохранилищами, соединяющими их дорогами и коммуникациями;
- практически полная ликвидация экологического воздействия на ОС как самого ОК, так и открытых складов продуктов обогащения, отвалов и шламохранилищ, дорог;

- сокращение платежей за земельный отвод, складирование хвостов и экологическое воздействие обогатительного производства, отвалов и шламохранилищ;
- стоимость строительства ПОК не выше, чем строительства аналогичного по производительности ОК на поверхности, а в нашем случае дешевле на 20 – 35 %.

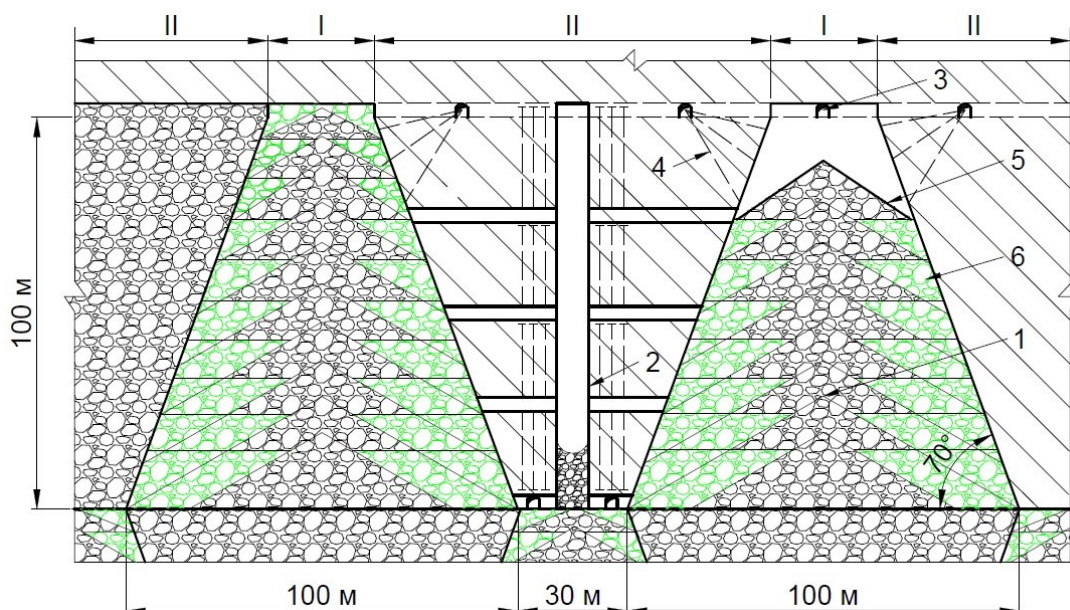


Рис. 2 – Вариант выемки трапециевидными камерами с комбинированной закладкой:
 I, II – порядок отработки, 1 – отсыпка слоев СЗ и их укрепление в камере 1-й очереди,
 2 – закладочные выработки, 3 – отработка камер 2-й очереди,
 4 – закладочные скважины для подачи укрепляющего раствора,
 5 – формируемый слой СЗ, 6 – укрепленный откос

Разработана и запатентована технологическая схема ПОК, позволяющая сократить капитальные затраты на его строительство и повысить эффективность подземного обогащения за счет уменьшения количества выработок и усреднения качества поступающей на обогащение исходной руды [6] (рис. 3). Также предложен способ подземной разработки мощных железорудных месторождений, позволяющий существенно сократить объем дорогостоящих мероприятий по изоляции закладываемых камер для предотвращения прорыва текущих хвостов обогащения в выработки, на который получено решение о выдаче Патента на изобретение (Заявка № 2014120839/03(033497).

Оценка вариантов ГС в новом шаге освоения с балансовыми запасами Q_6 должна учитывать комплекс как производственного, так и социально-экологического эффектов от реализации стратегических решений [7]. С учетом динамики развития ГТС во времени T целесообразно в качестве критерия оценки принять максимум ЧДД в следующем виде (руб.):

$$\text{ЧДД} = \frac{\sum_{t=0}^T \Pi_{it}}{(1+E)^t} - \left(\frac{\sum_{t=0}^T K_{it}}{(1+E)^t} + \frac{\sum_{t=0}^T \Xi_{it}}{(1+E)^t} + \frac{\sum_{t=0}^T \text{СЭП}_{it}}{(1+E)^t} \right) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где T – длительность оценки. Равна времени строительства и отработки, год; Π_{it} – доход от реализации продукции, получаемый в t -м году оценки при реализации i -го варианта ГС, руб/год; K_{it} – капитальные затраты на строительство подземного рудника и ОК в t -м году оценки при реализации i -го варианта ГС, руб/год; Ξ_{it} – эксплуатационные затраты на процессы добычи и обогащения руды в t -м году оценки при реализации i -го

варианта ГС, руб/год; $CЭП_{it}$ – денежная оценка социально-экологических последствий от реализации i -го варианта ГС, руб/год; E – норма дисконта, доля ед.

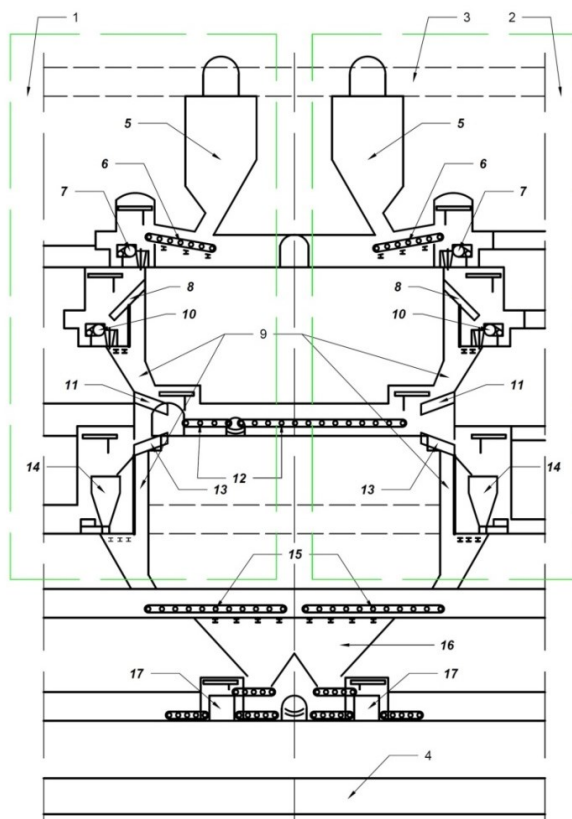


Рис. 3 – Подземная обогатительная фабрика

Предложено степень замкнутости ГТС, соответствующей варианту ГС, оценивать показателем η , равным отношению суммарного объема отходов V^o , образующихся в рамках ГТС, к максимальному объему пустот $V^п$, образующихся в рамках ГТС.

$$\eta = V^o / V^п \rightarrow 1. \quad (2)$$

Если $0 \leq \eta \leq 1$, то ГТС замкнута, если $\eta > 1$, то ГТС не замкнута. По η можно также определять долю систем разработки с закладкой выработанного пространства в годовой производственной мощности рудника, а по $1 - \eta$ – долю систем с обрушением. Использование данного показателя в качестве критерия оценки экологической эффективности ГС в комплексе с ЧДД повысит ее объективность.

По каждому из двух критериев варианту ГС присваивается рейтинг. Более высокий рейтинг получает вариант с минимальным количеством баллов. Для выбора лучшего варианта ГС вводится глобальный критерий принятия компромиссного решения R – комплексный эколого-экономический критерий, рассчитываемый как сумма баллов по каждому критерию с учетом их веса

$$R = k_{чдд} r_{чдд} + k_{\eta} r_{\eta}, \quad (3)$$

где $r_{чдд}$, r_{η} – рейтинг по критерию ЧДД и η , соответственно,

$k_{чдд}$, k_{η} – вес критериев ЧДД и η в глобальном критерии, принятый за 1.

Разработана блок-схема формирования и компьютерная программа (в приложении Excel) выбора ГС, указывающие последовательность установления оптимальных решений по блокам в соответствии с локальными критериями, принятыми для соответствующих подсистем ГТС и ГТС в целом (рис. 4).

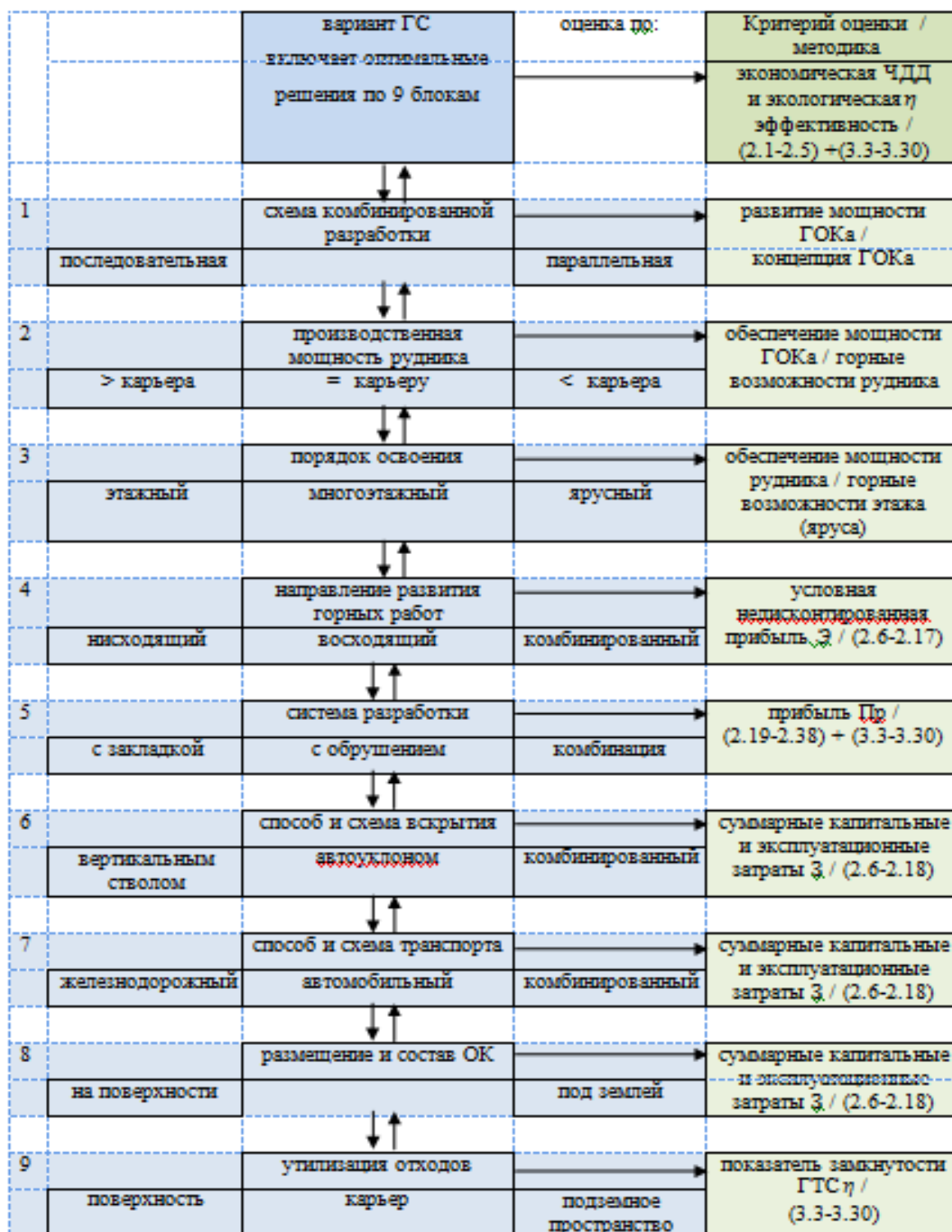


Рис. 4 – Блок-схема формирования и оценки варианта ГС

Выполнено экономико-математическое моделирование (ЭММ) вариантов ГС по ЧДД при норме дисконта 12 % и базовом содержании железа 29 % (рис. 5). Результаты ЭММ показали, что ЧДД по варианту 4 ГС больше в 1,6 и 3,6 раза по сравнению с вариантами 5 и 2. Расчет по комплексному эколого-экономическому критерию показал, что при Fe = 29 % целесообразен полный переход на системы с закладкой. При этом показатель замкнутости ГТС можно улучшить до $\eta=1,43$ (табл. 2).

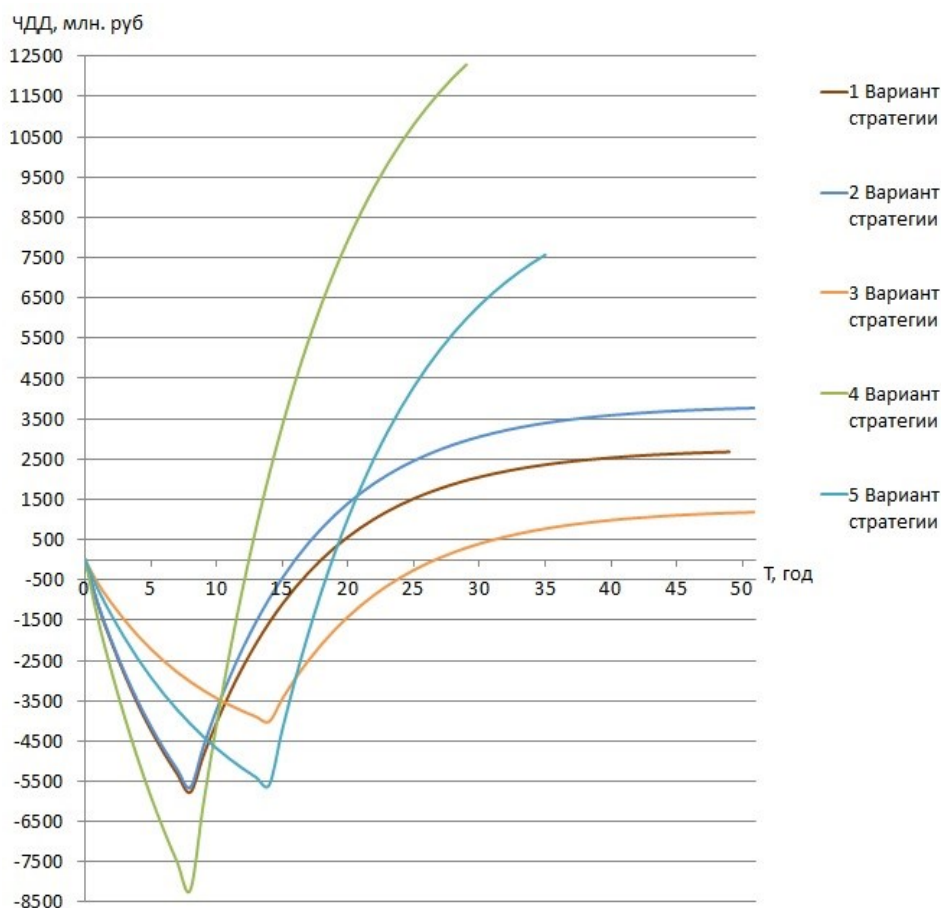


Рис. 5 – ЧДД по вариантам 1 – 5 ГС

Таблица 2

Рейтинги вариантов ГС

При содержании Fe = 29%							
Показатель	Обозн.	Ед. измер	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
Содержание металла в балансовых запасах	c_1	доля ед.	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Показатель замкнутости ГТС	η	доля ед.	15,00	1,43	1,43	1,43	1,43
Место в рейтинге по возможности утилизации	r_η	балл	5	1	1	1	1
Чистый дисконтированный доход	ЧДД	тыс. руб.	2 678 157	3 766 288	1 180 724	13 609 762	8 344 926
Место в рейтинге по ЧДД	$r_{\text{чдд}}$	балл	4	3	5	1	2
Комплексный эколого-экономический критерий	R	балл	9	4	6	2	3
Итоговое место в рейтинге			5	3	4	1	2

Установлено, что технически возможно добиться замкнутости ГТС при содержании $\text{Fe} \geq 43\%$, поскольку объем получаемых хвостов становится не более объема образующихся пустот. При $\text{Fe} = 43\%$ замкнутость ГТС обеспечивается применением исключительно систем с закладкой, а при $\text{Fe} > 43\%$ – оптимальным соотношением систем с закладкой и с обрушением.

Выявлены оптимальные области применения ПОК при увеличении уровня установленных благоприятных факторов – затрат на СЭП или на транспортирование руды от рудника до ОФ. Так, при увеличении норматива платы за отчуждение земель до

3000 руб/м² или длины доставки руды до ОФ до 19 км ЧДД по вариантам 4 и 5 ГС одинаковы.

Перспективы промышленного внедрения разработанной ГС связаны с освоением глубоких горизонтов Ново-Естюнинского и Северо-Гороблагодатского железорудных месторождений, а также Тарыннахско-Горкитского железорудного узла.

Исследования выполнены в рамках проекта фундаментальных исследований УрО РАН № 15-11-5-7 «Исследование переходных процессов и учет закономерностей их развития при разработке инновационных технологий оценки, добычи и рудоподготовки минерального сырья».

Литература

1. Каплунов Д.Р. Современное содержание методологии проектирования освоения недр / Д.Р. Каплунов // Недропользование. – XXI век. – 2008. – № 1. – С. 32 – 34.
2. 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.
3. Яковлев В.Л. О стратегии освоения меднорудных месторождений Урала / В.Л. Яковлев, Ю.В. Волков, О.В. Славиковский // Горный журнал. – 2003. – № 9. – С. 3 – 7.
4. Соколов И.В. Комплексная экологоориентированная подземная геотехнология добычи и обогащения железных руд / И.В. Соколов, Н.В. Гобов, А.А. Смирнов, А.Н. Медведев // Экология и промышленность России. – 2013. – № 6. – С. 16 – 20.
5. Соколов И.В. Целесообразность применения подземных обогатительных комплексов на железорудных шахтах / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Н.В. Гобов, Ю.Г. Антипин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 6. – С. 197 – 206.
6. Пат. 2565300 Российская Федерация, МПК E21C 41/00 B03B 9/00. Подземная обогатительная фабрика / Смирнов А.А., Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Соломеин Ю.М.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ИГД УрО РАН. – заявл. 11.06.2014; опубл. 20.10.2015, Бюл. № 29.
7. Соколов И.В. Систематизация и методика оценки вариантов стратегии освоения железорудных месторождений с применением подземных обогатительных комплексов / И.В. Соколов, Н.В. Гобов, Ю.Г. Антипин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 7. – С. 101 – 109.