

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СТРАТЕГИИ ОСВОЕНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИ-СБАЛАНСИРОВАННОЙ ПОДЗЕМНОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИЕЙ

И.В. Соколов¹, А.А. Смирнов¹, И.В. Никитин¹, Ю.М. Соломеин¹

¹ Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН)

Аннотация: Для снижения отрицательного воздействия горно-обогатительного производства на окружающую среду сформированы варианты геотехнологической стратегии освоения железорудных месторождений, базирующиеся на экологически-сбалансированной комплексной подземной геотехнологии добычи, и обогащения железных руд, что позволяет разместить отходы горно-обогатительного производства в выработанном пространстве и перенести экологически наиболее опасный процесс обогащения под землю. Разработаны технологические схемы камерной выемки этажей в восходящем порядке, позволяющие отказаться от формирования рудных целиков, тем самым повысить показатели извлечения руды из недр и использовать выработанное пространство для складирования отходов в виде сухой закладки. На основе экономико-математического моделирования и комплексной оценки по эколого-экономическому критерию для условий подземной разработки одного из крупнейших железорудных месторождений России установлен наиболее эффективный вариант геотехнологической стратегии. Применение восходяще-нисходящего порядка отработки этажей с оптимальным соотношением систем разработки с закладкой выработанного пространства и систем с обрушением в зависимости от содержания полезного компонента в добытой руде, объема выработанного пространства, подлежащего закладке, и объема хвостов обогащения, используемых в качестве закладочного материала, позволяет утилизировать практически весь объем отходов горно-обогатительного производства в выработанном пространстве и эффективно осваивать запасы в новом шаге.

Ключевые слова: железорудное месторождение, экологическая безопасность, стратегия, порядок отработки, подземная геотехнология, подземный обогатительный комплекс, экономико-математическое моделирование, комплексный критерий.

Благодарность: Исследования выполнены в рамках государственного задания №075–00581–19–00 по Теме №0405–2019–0005.

Для цитирования: Соколов И.В., Смирнов А.А., Никитин И.В., Соломеин Ю.М. Комплексная оценка стратегии освоения железорудных месторождений экологически-сбалансированной подземной геотехнологией // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3-1. – С. 313–325. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-313-325.

Comprehensive evaluation of strategy for mining of iron ore deposits by environmentally-balanced underground geotechnology

I.V. Sokolov¹, A.A. Smirnov¹, I.V. Nikitin¹, Yu.M. Solomein¹

¹ The Institute of Mining of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Russia

Abstract: For the purpose to solve the problem of reducing the negative impact of mining and processing production on the environment that is relevant for most mining regions of Russia, options of geotechnological strategy for mining of iron ore deposits on the basis of an ecologically balanced integrated underground geotechnology of extraction and processing of iron ore, which allow to utilize the entire volume of mining and processing waste in the mined out space and transfer the most environmentally hazardous enrichment process under the ground, have been formed. Technological schemes for chamber excavation of floors in ascending order have been developed, which make it possible to abandon the formation of ore pillars, thereby increasing the extraction of ore from the bowels, and using the worked out space for waste storage in the form of a dry backfill. Based on economic and mathematical modeling and a comprehensive assessment according to the environmental and economic criterion for the conditions of mining in a new step of one of the largest iron ore deposits in Russia the most effective option of geotechnical strategy has been established. Use of an ascending-descending order of floor mining with an optimal ratio of mining systems with laying out the worked out space and systems with collapse depending on the content of the useful component in the ore mined, the amount of space mined current tab and the volume of tailings used as backfill material, allows to utilize the entire volume of mining and processing waste in the mined out space and effectively to develop of reserves in a new step.

Key words: iron ore deposit, environmental safety, strategy, mining method, underground geotechnology, underground processing complex, economic and mathematical modeling, complex criterion.

Acknowledgments: the Research was carried out within the framework of the state task № 075-00581-19-00 on the Topic № 0405-2019-0005.

For citation: Sokolov I.V., Smirnov A.A., Nikitin I.V., Solomein Yu.M. Comprehensive evaluation of strategy for mining of iron ore deposits by environmentally-balanced underground geotechnology. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3-1):313-325. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-313-325.

Введение

Одной из главных причин неблагоприятной экологической обстановки большинства регионов России, экономика которых базируется на добыче и переработке минерального сырья, является функционирование горно-обогатительных предприятий, наносящих значительный ущерб природной экосистеме в результате накопления огромного количества отходов, размещаемых на поверхности земли [1–3]. Общепризнанным подходом к решению данной проблемы считается принцип «Более чистого производства» (Cleaner Production), при котором основной упор делается на снижение объемов и интенсивности влияния вредных веществ, образующихся непосредственно в производственных процес-

сах, а не на их последующую нейтрализацию [4].

При освоении железорудных месторождений подземным способом наиболее перспективным направлением минимизации воздействия на окружающую среду является создание экологически сбалансированной комплексной подземной геотехнологий добычи, обогащение железных руд на основе рационального сочетания камерных систем разработки с закладкой выработанного пространства и систем с обрушением [5–6] в соотношении, обеспечивающим полную замкнутость горнотехнической системы (ГТС), и размещения обогатительного комплекса под землей (ПОК) [7–9].

Внедрение вышеуказанных технических и технологических решений должно осуществляться при обоснова-

нии и выборе геотехнологической стратегии (ГС) освоения месторождения.

Таким образом, изыскание и комплексная оценка ГС освоения железорудных месторождений на основе экологически-сбалансированной подземной геотехнологии, позволяющей значительный объем отходов горно-обогатительного производства утилизировать в подземном выработанном пространстве, является весьма актуальной научно-технической задачей.

Формирование вариантов стратегии на основе экологически-сбалансированной подземной геотехнологии

Для условий одного из крупнейших железорудных месторождений Центральной России с запасами более 1500 млн т руды и содержанием железа до 37 %, намеченного к освоению подземным способом, разработаны пять вариантов ГС, различающихся по следующим признакам: годовая производительность шахты, порядок отработки запасов во времени и пространстве, система разработки, способ погашения камер, место расположения обогатительного комплекса и место утилизации отходов производства.

Вариант 1 ГС соответствует технологии, применяемой на большинстве железорудных шахт, и предусматривает отработку запасов в нисходящем порядке камерной системой с последующим обрушением целиков и вмещающих пород в сочетании с обогащением руды на поверхности. Варианты 2 и 3 ГС основаны на восходящей камерной выемке с закладкой выработанного пространства при обогащении руды на поверхности или на ПОК [10]. Варианты 4 и 5 ГС обладают новизной за счет применения восходяще-нисходящей отработки на основе сочетания камерных систем с закладкой и систем

с обрушением при обогащении руды на поверхности или на ПОК [11]. Варианты 1–3 ГС обеспечивают годовую производительность шахты 6 млн т, варианты 4–5 ГС – 12 млн т.

Схема вскрытия шахтного поля предусматривает строительство пяти вертикальных стволов до глубины 500 м, наклонного съезда с поверхности и четырех горизонтов. Высота этажа равна 80 м.

При расположении обогатительной фабрики на поверхности (варианты 1, 2 и 4 ГС) руда по концентрационному горизонту локомотивами доставляется к рудовыдачному стволу, далее выдается на поверхность и железнодорожным транспортом перевозится на обогатительную фабрику. Отходы сухой и мокрой магнитной сепарации направляются в закладочный комплекс и в виде твердеющей закладки транспортируются по трубам в камеры. При использовании ПОК (варианты 3 и 5 ГС), расположенного ниже нижнего горизонта [9], руда с верхних этажей по рудоспускам перепускается в ПОК, с нижних этажей — транспортируется автосамосвалами до ПОК. Отходы обогащения после предварительного обезвоживания в виде сухой или пастовой закладки [12–14] транспортируются автосамосвалами от ПОК в камеры, а концентрат — по концентрационному горизонту локомотиво-составами до скипового ствола и выдается на поверхность.

Варианты 2–5 ГС в принципе позволяют разместить в подземном выработанном пространстве практически весь объем отходов, образующихся в рамках ГТС. Однако одной из главных проблем реализации восходящей камерной выемки является создание устойчивого закладочного массива в виде сухой закладки (порода от проходки выработок и отходы обогащения — дробленая порода после сухой

магнитной сепарации и обезвоженные хвосты после мокрой магнитной сепарации) при выемке смежных камер.

Обоснование камерной системы разработки с сухой закладкой

Для условий восходящей отработки железорудного месторождения разработаны варианты камерной системы разработки с сухой закладкой, отличающихся по признакам: порядок выемки камер и целиков, технология очистных работ, способ создания и обеспечения устой-

чивости закладочного массива (табл. 1). Варианты 1–5 сконструированы для рудных тел средней мощности (20–50 м), варианты 6–7 – для мощных рудных тел (более 50 м). Варианты 1–5 с расположением камер по простиранию рудного тела, варианты 6–7 – вкрест простирания. Технология очистной выемки камерных запасов предусматривает отбойку рудного массива буровзрывным способом, формирование траншейного или плоского днища камеры, торцовый или площадный выпуск руды

Таблица 1

Варианты камерной системы разработки с сухой закладкой при восходящей выемке
Options of chamber ascending mining systems with dry backfill

Вар.	Система разработки	Порядок отработки	Технология очистной выемки	Способ создания и сохранения закладочного массива
1	Камерная с оставлением рудных целиков (РЦ)	Сплошной с оставлением РЦ: 1-РЦ-1-РЦ-1	Отбойка и выпуск руды через траншейное днище	Отсыпка ведется из выработок вышележащего этажа и уплотнение под собственным весом
2	Камерная с бетонными целиками (БЦ)	Камерно-целиковый с опережающим созданием БЦ: 3-БЦ-2-БЦ-3	Камеры и целики отрабатываются аналогично варианту 1	Опережающее формирование БЦ между камерами 2 и 3 очереди твердеющей закладкой
3	Камерная с временными РЦ (ВРЦ)	Камерно-целиковый с ВРЦ: 1-ВРЦ-2-ВРЦ-1	Камеры отрабатываются аналогично варианту 1, ВРЦ – с обрушением	Формирование ВРЦ между камерами 1 и 2 очереди. Отсыпка ведется аналогично варианту 1
4	Наклонными камерами с укрепленной сухой закладкой	Сплошной	Основная часть камеры отрабатывается аналогично варианту 1, меньшая часть – с взрыводоставкой	Отсыпка ведется аналогично варианту 1 с последующим укреплением откоса цементным раствором
5	Трапециевидными камерами с укрепленной сухой закладкой	Камерно-целиковый: 1-2-1-3-1	Камеры отрабатываются аналогично варианту 1	Отсыпка слоев сухой закладки и укрепление их цементным раствором
6	Камерная с ВРЦ	Камерно-целиковый с ВРЦ: 1-ВРЦ-2-ВРЦ-1	Камеры отрабатываются с торцовым выпуском, ВРЦ – подэтажным обрушением	Отсыпка, планирование сухой закладки бульдозером с дистанционным управлением

Окончание табл. 1

Вар.	Система разработки	Порядок отработки	Технология очистной выемки	Способ создания и сохранения закладочного массива
7	Ромбовидными камерами	Камерно-целиковый: 1-2-1-2-1	Камеры отрабатываются с торцовым выпуском руды ПДМ с дистанционным управлением	Отсыпка, планирование сухой закладки и укрепление откосов твердеющей закладкой

с помощью погрузо-доставочной машины (ПДМ), при необходимости с дистанционным управлением, и доставку ее до рудоспуска.

Подробно рассмотрены варианты 5 и 7 как наиболее эффективные.

Вариант 5 отработки этажа трапециевидными камерами с торцевыми стенками из сухой закладки, укрепленными раствором, реализуется в камерно-целиковом порядке по двухстадийной

схеме 1-2-1-2-1 (рис. 1) [6]. С целью создания устойчивого закладочного массива торцам камеры 1-й очереди придается наклон ($55-70^\circ$). Закладочный массив формируется путем отсыпки слоев сухой закладки и последующего их укрепления твердеющим раствором (цемент и вода). В камерах 2-й очереди сухая закладка отсыпается из выработок буро-вентиляционного горизонта.

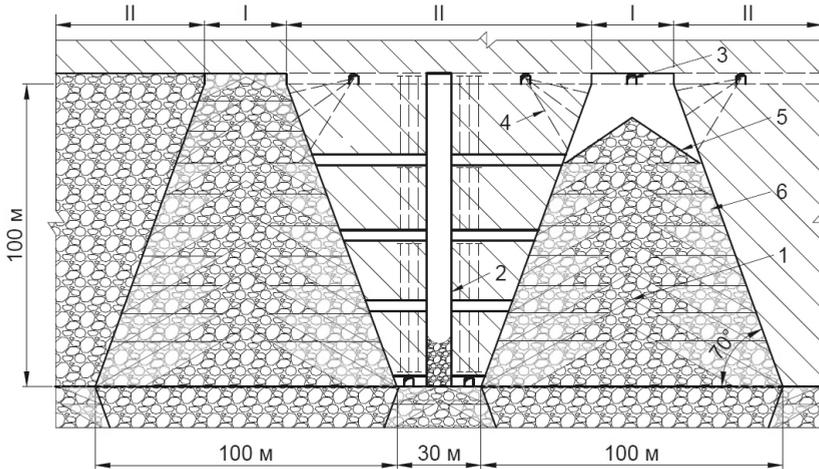


Рис. 1. Камерная система разработки трапециевидными камерами с укрепленной сухой закладкой и восходящей выемкой (вариант 5): I, II — порядок отработки; 1 — отсыпка слоев сухой закладки и их укрепление в камере 1-ой очереди; 2 — выемка камер 2-ой очереди; 3 — закладочная выработка; 4 — закладочные скважины для подачи укрепляющего раствора; 5 — формируемый слой сухой закладки; 6 — укрепленный откос

Fig. 1. Chamber mining system by trapezoidal chambers with a reinforced dry backfill and ascending excavation (option 5): I, II — mining order; 1 — filling layers of dry backfill and their strengthening in the chamber of the first stage; 2 — excavation of the chambers of the second stage; 3 — filling opening; 4 — filling holes for supplying a strengthening solution; 5 — layer formed by dry backfill; 6 — reinforced slope

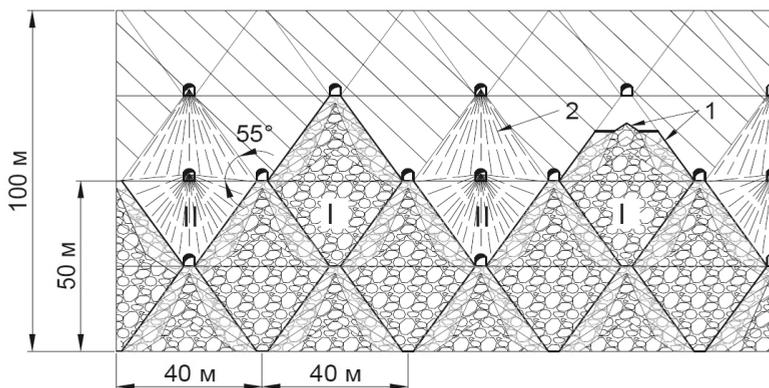


Рис. 2. Камерная система разработки ромбовидными камерами с укрепленной сухой закладкой и восходящей выемкой (вариант 7): I, II — порядок отработки; 1 — отсыпка закладочного массива и укрепление его верхних откосов твердеющим раствором в камерах 1-ой очереди; 2 — выемка камер 2-ой очереди

Fig. 2. Chamber mining system by rhomboid chambers with a reinforced dry backfill and ascending excavation (option 7): I, II — mining order; 1 — dumping the filling massif and strengthening its upper slopes with a strengthening solution in the chambers of the first stage; 2 — excavation of the chambers of the second stage

Вариант 7 отработки этажа ромбовидными камерами с укрепленной сухой закладкой предусматривается в камерно-целиковом порядке по двухстадийной схеме 1-2-1-2-1 (рис. 2). Камеры вынимаются в шахматном порядке со смещением по вертикали на половину высоты этажа [6, 15]. Отработанные камеры заполняются сухой закладкой из выработок бурового и вентиляционного горизонтов. Верхние откосы закладочного массива отработанной камеры укрепляются твердеющим раствором, подаваемым из выработок или по скважинам. При отработке вышележащей камеры укрепленные откосы представляют собой борта выпускной траншеи.

Результаты сравнения традиционной этажно-камерной системы разработки и рассмотренных вариантов камерной системы разработки с укрепленной сухой закладкой при восходящей выемке представлены в табл. 2. Установлено, что по критерию прибыли на 1 т погашаемых балансовых запасов этажно-камерная

система разработки (вариант 5) эффективнее традиционной на 13 %, подэтажно-камерная (вариант 7) — на 5 %.

Методика комплексной оценки вариантов стратегии

При комплексной оценке вариантов ГС необходимо учитывать как производственно-экономический, так и экологический эффекты от реализации стратегических решений [16, 17]. Поэтому для установления наиболее эффективного варианта ГС применяется комплексный эколого-экономический критерий (ЭЭК), определяемый как суммарный дисконтированный доход от реализации варианта ГС с учетом эксплуатационных затрат на утилизацию отходов горно-обогатительного производства (размещение их на поверхности в отвалах и шламохранилищах, в карьере или подземных выработках и камерах) [6].

Составлена блок-схема формирования и оценки вариантов ГС, представленная в табл. 3, указывающая последовательность нахождения оптимальных

Таблица 2

Технико-экономические показатели вариантов камерной системы разработки
Technical and economic indicators of the options of chamber mining system

Показатель	Ед. изм.	Система разработки		
		этажно-камерная с обрушением целиков (традиционная)	этажно-камерная с укрепленной сухой закладкой (вариант 5)	подэтажно-камерная с укрепленной сухой закладкой (вариант 7)
Потери руды	доли ед.	0,213	0,07	0,05
Разубоживание	доли ед.	0,125	0,10	0,08
Извлекаемая ценность	руб/т	513,6	606,9	620,0
Эксплуатационные затраты на добычу,	руб/т	135	185	217
в т.ч. на закладочные работы	руб/т	–	64	96
Эксплуатационные затраты на обогащение	руб/т	150	164	162
Прибыль	руб/т	228,6	257,9	241,0

Таблица 3

Блок-схема формирования и оценки варианта ГС

Block diagram of the formation and evaluation of the option of strategy

№	Вариант ГС (включает оптимальные решения по 9 блокам) комплексный эколого-экономический критерий			Критерий оценки
<i>Стратегические блоки (1–3)</i>				
1	Схема разработки			Концепция развития мощности ГОКа
	последовательная	параллельная	комбинированная	
2	Производственная мощность рудника в новом шаге			Горные возможности рудника по обеспечению мощности ГОКа
	меньше, чем в старом шаге	равна мощности в старом шаге	больше, чем в старом шаге	
3	Порядок освоения			Горные возможности этажа (яруса) по обеспечению мощности рудника
	этажный	многоэтажный	ярусный	
<i>Технологические блоки (4–9)</i>				
4	Направление (порядок) развития горных работ			Прибыль по системе разработки
	нисходящий	восходящий	комбинированный	
5	Система разработки			Прибыль по системе разработки
	с закладкой	с обрушением	комбинированная	
6	Способ и схема вскрытия			Суммарные капитальные и эксплуатационные затраты на вскрытие
	вертикальным стволом	автоуклоном	комбинированный	

Окончание табл. 3

№	Вариант ГС (включает оптимальные решения по 9 блокам) комплексный эколого-экономический критерий			Критерий оценки
7	Способ и схема транспорта			Суммарные капитальные и эксплуатационные затраты на транспорт
	железнодорожный	автомобильный	комбинированный	
8	Место размещения обогатительного комплекса			Суммарные капитальные и эксплуатационные затраты на обогащение
	поверхность	карьер	под землей	
9	Место утилизации отходов ГОП			Эксплуатационные затраты на утилизацию отходов производства
	поверхность	карьер	подземное пространство	

решений по стратегическим (1–3) и технологическим (4–9) блокам в соответствии с локальными критериями, принятыми для соответствующих подсистем ГТС, и оценки их совокупности на уровне ГТС в целом по комплексному критерию.

Основные положения формирования вариантов ГС заключаются в решении следующих задач:

1. Выбор схемы разработки (последовательная, параллельная, комбинированная) месторождения в зависимости от принятой ГОКом концепции развития шахты при переходе к новому шагу освоения — поддержание или наращивание производственной мощности;

2. Определение производственной мощности рудника в новом шаге по горным возможностям в зависимости от потребной мощности ГОКа, ее сравнение с мощностью рудника в старом шаге освоения. Оптимальное решение зависит от блока 1;

3. Установление порядка освоения (этажный, многоэтажный, ярусный) запасов и обоснование количества этажей в одновременной отработке в зависимости от потребной мощности подземного рудника и горных возможностей этажей

(ярусов). При этажной (многоэтажной) отработке очистные работы в этажах могут вестись разно- или одновременно, но по взаимосвязанным технологическим схемам, а при ярусной отработке — одновременно и без взаимного влияния. Оптимальное решение тесно связано с блоками 1–2;

4. Выбор направления (порядка) развития горных работ в пространстве (нисходящий, восходящий, комбинированный) по критерию максимума прибыли. Оптимальное решение зависит от блоков 2–4, 5;

5. Обоснование систем разработки и способа погашения выработанного пространства по критерию максимума прибыли, доли их применения по критерию оптимума степени замкнутости ГТС. Оптимальное решение тесно связано с блоками 2–4 и 9. Применение систем с обрушением допустимо при нисходящем порядке развития горных работ, систем с закладкой — ограничено экономической целесообразностью;

6. Обоснование способа и схемы вскрытия запасов по критерию минимума суммарных капитальных и эксплуатационных затрат на вскрытие.

Оптимальное решение тесно связано с блоками 2–5, 7 и 8. С одной стороны, при системах с обрушением целесообразно вскрытие вертикальными стволами с поверхности, с другой стороны, вскрытие обусловлено способом и схемой транспорта горной массы и наличием ПОК;

7. Выбор способа и схемы транспорта горной массы, концентрата, отходов обогащения по критерию минимума суммарных капитальных и эксплуатационных затрат на транспорт грузов. Оптимальное решение тесно связано с блоками 6, 8 и 9, поскольку обусловлено способом и схемой вскрытия, наличием ПОК, местом утилизации отходов производства;

8. Определение рационального места размещения (поверхность, карьер, под землей) и состава обогатительного комплекса по критерию минимума суммарных капитальных и эксплуатационных затрат на обогащение. Оптимальное решение определяется блоками 5–7 и 9, поскольку обусловлено системой разработки, способом и схемой вскрытия и транспорта и влияет на место и способ утилизации отходов производства;

9. Установление места (поверхность, карьер, подземное пространство) и способа (закладка выработан-

ного пространства, складирование, реализация хвостов обогащения) утилизации отходов по критерию минимума эксплуатационных затрат на утилизацию отходов. Оптимальное решение зависит от блоков 5–8.

Видно, что все блоки взаимосвязаны друг с другом, при этом блоки 4–9 служат технологической основой для принятия решений по стратегическим блокам 1–3.

Результаты моделирования

Для обеспечения замкнутости ГТС методом оптимизации с использованием компьютерной программы в приложении Microsoft Excel установлено необходимое соотношение объемов добычи руды системами с закладкой и системами с обрушением для рассматриваемых условий. Основными факторами, влияющими на обеспечение замкнутости ГТС, являются: содержание железа в балансовых запасах C_{Fe} , объем закладываемых пустот V_n и объем отходов V_o , используемых в качестве закладочного материала.

Соотношение систем разработки в годовой производительности шахты, обеспечивающее размещение максимального количества образующихся отходов в подземном выработанном пространстве по вариантам 4 и 5 ГС в зависимости от содержания железа в балансовых

Таблица 4

Соотношение систем разработки в годовой производительности шахты

Proportion change of mining systems in annual mine productivity

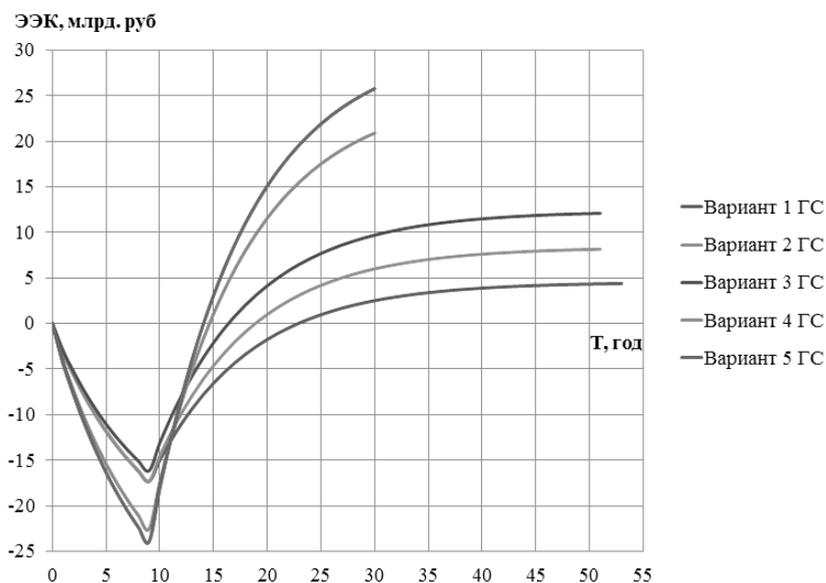
C_{Fe} , %	Доля систем с закладкой / систем с обрушением, %		
	$V_{СМС} = 100\%$, $V_{ММС} = 0\%$	$V_{СМС} = 0\%$, $V_{ММС} = 100\%$	$V_{СМС} = 100\%$, $V_{ММС} = 100\%$
26	119/0*	49/51	159/0*
32	84/16	65/35	140/0*
37	65/35	67/33	124/0*
45	51/49	59/41	100/0

Примечание. образуется избыток отходов горно-обогатительного производства, размещаемый на поверхности в отвалах и шламохранилищах.

Таблица 5

Пример комплексной оценки вариантов 1–5 ГС при $C_{Fe} = 37\%$ An example of a comprehensive evaluation of the options 1–5 of strategy at $C_{Fe} = 37\%$

Показатель	Ед. изм.	Вариант ГС				
		1	2	3	4	5
Чистый дисконтированный доход	млн руб.	4687	8415	12195	21895	26772
Объем выработанного пространства, подлежащего закладке	тыс. м ³	100	71429	71429	36706	36706
Объем отходов, используемых в качестве закладочного материала	тыс. м ³	93658	88917	88917	91149	91149
Эксплуатационные затраты на утилизацию отходов	млн руб.	1952	370	364	1131	1131
Комплексный эколого-экономический критерий	млн руб.	4390	8157	12045	20705	25612

Рис. 3. Эколого-экономический критерий по вариантам 1–5 ГС при $C_{Fe} = 37\%$ Fig. 3. Environmental and economic criterion of the options 1–5 of strategy at $C_{Fe} = 37\%$

запасах C_{Fe} , степени использования в качестве сухой закладки хвостов сухой $V_{СМС}$ и мокрой $V_{ММС}$ магнитной сепарации (при условии утилизации всего объема породы от проходки горных выработок), представлено в табл. 4.

Из таблицы видно, что при базовом $C_{Fe} = 37\%$ отходов образуется на 24 %

больше, чем пустот, в которых они могут быть размещены, ГТС может стать полностью замкнутой только при содержании $C_{Fe} \geq 45\%$, при этом целесообразно применение исключительно систем с закладкой.

В результате экономико-математического моделирования и оценки вариантов

1—5 ГС по комплексному эколого-экономическому критерию ЭЭК установлено, что наиболее эффективным является вариант 5 ГС во всем диапазоне изменения C_{Fe} . Расчетные значения локальных и комплексного критериев приведены в табл. 5 и на рис. 3.

Предложения по направлению будущих исследований

В дальнейшем планируется провести исследования по определению области эффективного применения подземного обогатительного комплекса при освоении железорудных месторождений в зависимости от ценности земель, вовлекаемых в горный отвод, расстояния магистрального транспорта руды до обогатительной фабрики, вида и состава закладочного материала.

Заключение

На примере освоения подземным способом одного из крупнейших железорудных месторождений Центральной России с запасами более 1500 млн т руды и содержанием железа до 37 % сформирована и в результате экономико-

математического моделирования и комплексной оценки установлена оптимальная геотехнологическая стратегия, базирующаяся на экологически-сбалансированной комплексной подземной геотехнологии добычи и обогащения железных руд, позволяющей практически весь объем отходов горно-обогатительного производства утилизировать в подземном выработанном пространстве. Новизна варианта заключается в применении восходяще-нисходящего порядка отработки этажей на основе сочетания камерных систем с закладкой и систем с обрушением.

Разработаны варианты камерной системы разработки с сухой закладкой и восходящей выемкой, позволяющие отказаться от формирования рудных целиков, тем самым повысить показатели извлечения руды из недр. Установлено оптимальное соотношение систем разработки с закладкой и систем с обрушением в зависимости от содержания полезного компонента в руде, объемов выработанного пространства и отходов, используемых в качестве закладочного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев В.Л., Гальянов А.В. Методологические аспекты стратегии освоения минеральных ресурсов. — 2-е издание. — Екатеринбург: УрО РАН, 2003. — 152 с.
2. Корнилков С.В., Лаптев Ю.В., Кантемиров В.Д. Стратегия освоения месторождений твердых полезных ископаемых Приполярного Урала // Известия Вузов. Горный журнал. — 2013. — № 6. — С. 11–17.
3. Antoninova N.Y., Shubina L.A. The use of industrial waste for environmental purposes at mining and metallurgical enterprises // Ecology and Industry of Russia. 2015. no 12. Pp. 38–41.
4. Pimentel B.S., Gonzalez E.S., Barbosa G.N. O. Decision-support models for sustainable mining networks: fundamentals and challenges // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 112. Pp. 2145–2157.
5. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Проблемы и перспективы развития ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения недр земли // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2012. — № 4. — С. 116–122.
6. Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И.В. Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья / Под ред. член-корр. РАН В.Л. Яковлева. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2018. — 360с.
7. Шварц Ю.Д. Подземные комплексы по добыче и переработке минерального сырья — предприятия XXI века // Горная промышленность. — 2000. — № 1. — С. 34–36.

8. Пирогов Г.Г. Подземные горнотехнические системы: техногенные воздействия на природную среду // Вестник забайкальского государственного университета. — 2019. — № 4. — С. 13–20.

9. Соколов И.В., Смирнов А.А., Гобов Н.В., Антипин Ю.Г. Целесообразность применения подземных обогатительных комплексов на железорудных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2014. — № 6. — С. 197–206.

10. Минаев Д.Ю., Богуславский Э.И. Концепция восходящей отработки крутопадающих рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2005. — № 11. — С. 241–245.

11. Патент РФ № 2534301. Способ отработки крутопадающих рудных месторождений / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Н.В. Гобов, Ю.Г. Антипин // Заявл. 16.07.2013; Опубл. 27.11.2014. Бюл. № 33. — 8 с.

12. Packey D.J. Multiproduct mine output and the case of mining waste utilization // Resources Policy. 2012. Vol. 37. no 1. Pp. 104–108.

13. Matani A.G., Doifode S.K. Effective industrial waste utilization technologies towards cleaner environment // International Journal of Chemical and Physical Sciences. 2015. Vol. 4. no 1. Pp. 536–540.

14. Sheshpari M.A. Review of underground mine backfilling methods with emphasis on cemented paste backfill // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2015. Vol. 20. no 13. Pp. 5183–5208.

15. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Гобов Н.В., Барановский К.В., Никитин И.В., Соломеин Ю.М., Рожков А.А. Геотехнологические аспекты стратегии освоения крупных железорудных месторождений // Проблемы недропользования [Электронный ресурс]. — 2014. — № 3. — С. 113–125. URL: <http://trud.igduran.ru> (дата обращения: 18.11.2019).

16. Rosa J.C. S., Sanchez L.E. Advances and challenges of incorporating ecosystem services into impact assessment // Journal of Environmental Management. 2016. Vol. 180. Pp. 485–492.

17. Александрова Т.Н., Липина Л.Н., Крупская Л.Т. Геоэкологическая оценка состояния компонентов природной среды с использованием геоинформационных технологий в зоне влияния горноперерабатывающего предприятия // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2013. — № 1. — С. 185–193. **ПЛАТ**

REFERENCES

1. Jakovlev V.L., Gal'janov A.V. *Metodologicheskie aspekty strategii osvoenija mineral'nyh resursov* [Methodological Aspects of Mineral Resource Mining Strategy], second edition, Ekaterinburg, Ural branch of the Russian Academy of Sciences. 2003, 152 p. [In Russ]

2. Kornil'kov S.V., Lapt'ev Ju. V., Kantemirov V.D. Development strategy for solid mineral deposits of the Subpolar Ural. *Izvestija Vuzov. Gornyj zhurnal*. 2013, no 6, pp. 11–17. [In Russ]

3. Antoninova N.Y., Shubina L.A. The use of industrial waste for environmental purposes at mining and metallurgical enterprises. *Ecology and Industry of Russia*, 2015, no 12, pp. 38–41.

4. Pimentel B.S., Gonzalez E.S., Barbosa G.N. O. Decision-support models for sustainable mining networks: fundamentals and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 2016, Vol. 112, pp. 2145–2157.

5. Trubeckoj K.N., Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V. Problems and prospects of development of resource-saving and resource-reproducing geotechnologies in complex mining of the earth's bowels. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*. 2012, no 4, pp. 116–122. [In Russ]

6. Jakovlev V.L., Kornil'kov S.V., Sokolov I.V. *Innovacionnyj bazis strategii kompleksnogo osvoenija resursov mineral'nogo syr'ja* [Innovative basis of the strategy of integrated

development of mineral resources], Ekaterinburg, The Institute of Mining of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences. 2018, 360 p. [In Russ]

7. Shvarc Ju. D. Underground complexes for the extraction and processing of raw minerals – 21st century enterprises. *Gornaja promyshlennost'*. 2000, no 1, pp. 34–36. [In Russ]

8. Pirogov G.G. Underground mining systems: technogenic impacts on the natural environment. *Vestnik zabajkalskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2019, no 4, pp. 13–20. [In Russ]

9. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Gobov N.V., Antipin Ju. G. The practicability of using underground processing complexes at iron ore mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no 6, pp. 197–206. [In Russ]

10. Minaev D. Ju., Boguslavskij Je. I. The concept of ascending mining steeply falling ore deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2005, no 11, pp. 241–245. [In Russ]

11. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Gobov N.V., Antipin Ju. G. Patent RU 2534301 C33, 27.11.2014. [In Russ]

12. Packey D.J. Multiproduct mine output and the case of mining waste utilization. *Resources Policy*, 2012, Vol. 37, no 1, pp. 104–108.

13. Matani A.G., Doifode S.K. Effective industrial waste utilization technologies towards cleaner environment. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*, 2015, Vol. 4, no 1, pp. 536–540.

14. Sheshpari M.A. Review of underground mine backfilling methods with emphasis on cemented paste backfill. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, Vol. 20, no 13, pp. 5183–5208.

15. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Ju. G., Gobov N.V., Baranovskij K.V., Nikitin I.V., Solomein Ju. M., Rozhkov A.A. Geotechnological aspects of the development strategy of large iron ore deposits. *Problemy nedropol'zovanija*, 2017, no 3, pp. 113–125. available at: <http://trud.igduran.ru> (accessed 18.11.2019).

16. Rosa J.C. S., Sanchez L.E. Advances and challenges of incorporating ecosystem services into impact assessment. *Journal of Environmental Management*, 2016, Vol. 180, pp. 485–492.

17. Aleksandrova T.N., Lipina L.N., Krupskaja L.T. Geocological assessment of the state of the components of the environment using geoinformation technologies in the zone of influence of the mining enterprise. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*, 2013, no 1, pp. 185–193. [In Russ]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Соколов Игорь Владимирович*¹ – докт. техн. наук, действительный член Академии горных наук, врио директора, e-mail: geotech@igduran.ru,

*Смирнов Алексей Алексеевич*¹ – канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии,

*Никитин Игорь Владимирович*¹ – научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии,

*Соломеин Юрий Михайлович*¹ – научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии,

¹ Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН), 620075 г. Екатеринбург, ГСП-219, Мамина-Сибиряка 58.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Sokolov I.V.*¹, Dr. Sci. (Eng.), full member of the Academy of mining sciences, acting director, e-mail: geotech@igduran.ru,

*Smirnov A.A.*¹, Cand. Sci. (Eng.), senior research worker of the laboratory of underground geotechnology,

*Nikitin I.V.*¹, research worker of the laboratory of underground geotechnology,

*Solomein Yu.M.*¹, research worker of the laboratory of underground geotechnology,

¹ The Institute of Mining of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, 620075, Ekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 21.11.2019; получена после рецензии 12.02.2020; принята к печати 20.03.2020.

Received by the editors 21.11.2019; received after the review 12.02.2020; accepted for printing 20.03.2020.