

# Исследование эколого ориентированной подземной геотехнологии добычи и переработки железных руд на основе экономико-математического моделирования

Игорь Владимирович СОКОЛОВ\*,  
Николай Васильевич ГОБОВ\*\*,  
Юрий Михайлович СОЛОМЕИН\*\*\*

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

**Введение.** Изложены результаты исследования эколого-ориентированной комплексной подземной геотехнологии добычи и переработки железных руд. Она разработана в рамках геотехнологической стратегии, целью которой является повышение экономической эффективности и экологической безопасности освоения железорудных месторождений, а путем достижения цели – применение систем разработки разных классов в одном шаге освоения (вскрытия и отработки) месторождения и перенос процесса обогащения в подземные условия.

**Методология исследования.** Произведены экономико-математическое моделирование разработанных вариантов геотехнологической стратегии и их оценка по предложенному комплексному эколого-экономическому критерию, учитывающему степень замкнутости горнотехнической системы и величину чистого дисконтированного дохода.

**Результаты исследования.** Параллельное применение систем с обрушением для разработки верхних этажей и систем с закладкой – нижних этажей – позволяет не только увеличить производительную мощность рудника до двух раз, но и обеспечить замкнутость формируемой горнотехнической системы за счет использования отходов горно-обогатительного производства в качестве закладки. Перенос процесса обогащения под землю позволяет многократно сократить площадь земельного отвода предприятия, выдавать на поверхность только концентрат и излишки хвостов обогащения, что значительно повышает экологическую безопасность горно-обогатительного производства. Кроме этого, формирование подземного обогатительного комплекса, включающего стадии дробления, измельчения и обогащения руды, вблизи зоны ведения очистных работ на безопасном расстоянии позволяет исключить некоторые присущие традиционной технологии процессы (транспортирование горной массы до ствола, ее перегрузку и подъем на поверхность, обратную подачу отходов обогащения в виде закладочного материала в шахту), а следовательно, получить экономический эффект.

**Выводы.** Технико-экономическое сравнение показало, что вариант геотехнологической стратегии с подземным обогатительным комплексом является вполне конкурентоспособным при условии, что срок его строительства не превышает срока строительства всех горно-капитальных, горно-подготовительных и нарезных выработок, необходимых для ввода рудника в эксплуатацию.

**Ключевые слова:** железорудное месторождение, подземная геотехнология, геотехнологическая стратегия, горнотехническая система, подземный обогатительный комплекс, чистый дисконтированный доход, экономико-математическое моделирование.

Перед современной мировой горнодобывающей промышленностью стоят две серьезные проблемы: удовлетворение постоянно растущего спроса на полезные ископаемые при практической невозобновляемости минеральных ресурсов; сохранение экологического баланса в геосферах Земли и уменьшение вредного влияния на окружающую среду при огромных объемах извлекаемых из недр и перерабатываемых горных масс имеющимися технологиями. Разработка месторождения в экологическом плане всегда представляет собой развитие во времени и пространстве природно-технической системы, в которой обе составляющие находятся в антагонистическом противоречии, при этом все экологические ограничения определяются законами развития природы, а возможности выполнения этих ограничений связаны с особенностями и свойствами применяемых геотехнологий [1–7].

Отработка открытым способом крупных железорудных месторождений в сочетании с традиционным размещением обогатительных фабрик на поверхности Земли характеризуется чрезвычайно негативным воздействием на окружающую среду. Переход на более экологически безопасный подземный способ разработки резко снижает техногенную нагрузку на природную среду и актуализирует постановку вопроса о целесообразности размещения под землей подземных обогатительных комплексов (ПОК).

Наиболее перспективным и признанным подходом к решению эколого ориентированных задач является создание новых производств и объектов в соответствии с принципом «более чистого производства» (Cleaner Production), акцентирующимся не на очистке и обезвреживании образовавшихся отходов, а на уменьшении их объемов и степени опасности [8, 9]. При подземной разработке железорудных месторождений в наибольшей степени данному принципу соответствует восходящий способ выемки руды с закладкой выработанного пространства. Кроме этого, поскольку при подземном способе разработки одним из главных факторов, определяющих степень негативного воздействия на окружающую среду, является работа обогатительных фабрик с входящими в их состав хвостохранилищами, транспортными системами, очистными сооружениями, то размещение обогатительных комплексов под землей нейтрализует данный фактор. За рубежом имеется опыт подземного обогащения руды, в отечественной практике ПОК не применяются.

Объектом исследования данной статьи выступает эколого ориентированная комплексная технология добычи и переработки железных руд на основе ПОК. Сочетание подземного обогащения с восходящим способом отработки месторождения создает предпосылки для формирования безотходной технологии добычи и переработки железных руд

\* geotech@igduran.ru

id <https://orcid.org/0000-0001-7841-5319>

\*\* icaeotech910@igduran.ru

id <https://orcid.org/0000-0002-1198-3300>

\*\*\* aeotech@igduran.ru

id <https://orcid.org/0000-0002-8226-6494>

**Таблица 1. Варианты ГС освоения нижних горизонтов Естюнинского месторождения.**  
**Table 1. Geotechnological strategy options for developing the lower horizons of the Estyuninskoye field.**

Варианты ГС	Порядок развития горных работ	Система разработки	Расположение ОК	Способ погашения выработанного пространства и место утилизации отходов ГОП
<i>Производственная мощность шахты 2,5 млн т</i>				
1	Последовательный нисходящий одноэтажный	Камерная с последующим обрушением целиков	На земной поверхности	Обрушенными породами. На поверхности
2	Последовательный восходящий одноэтажный	Камерная с закладкой	На земной поверхности	Закладкой. Выработанное пространство камер
3	Последовательный восходящий одноэтажный	Камерная с закладкой	Под землей	Закладкой. Выработанное пространство камер
<i>Производственная мощность шахты 5 млн т</i>				
4	Параллельный комбинированный многоэтажный	Верхние этажи – нисходящий	На земной поверхности	Камеры верхних этажей – обрушенными породами
		Нижние этажи – восходящий		Камеры нижних этажей – закладкой
5	Параллельный комбинированный многоэтажный	Верхние этажи – нисходящий	Под землей	Камеры верхних этажей – обрушенными породами
		Нижние этажи – восходящий		Камеры нижних этажей – закладкой

с полной утилизацией отходов горно-обогатительного производства (ГОП) в недрах Земли и выдачей на поверхность только его продукта – концентрата.

На примере нового шага освоения (вскрытия и отработки) глубоких горизонтов (–240 м/–640 м) Естюнинского месторождения разработаны и оценены варианты геотехнологической стратегии (ГС), табл. 1. В основу ГС кроме приведенных принципов положена концепция восполнения выбывающих мощностей Высокогорского ГОКа за счет увеличения производительности шахты Естюнинская от 2,5 до 5 млн т руды в год. Вскрытие осуществляется вертикальными стволами (скиповым, клетевым и вентиляционными) и этажными квершлагами через 100 м по высоте (гор. –340 м, –440 м, –540 м, –640 м). Сконструированы соответствующие вариантам ГС технологические схемы, различающиеся по признакам: производственная мощность шахты; порядок отработки этажей во времени и в пространстве; система разработки; место расположения обогатительного комплекса (ОК); способ погашения камер; место утилизации отходов ГОП (порода от проходки и хвосты обогащения). На рис. 1 показаны технологические схемы вариантов 4(а) и 5(б) ГС.

Место положения ПОК, его состав и соответственно конструкция определяются следующим [10–12]:

- располагается вблизи зоны ведения очистных работ на минимальном безопасном расстоянии с учетом схемы и способа вскрытия;

- включает в себя стадии дробления, измельчения и обогащения руды – сухой и мокрой магнитной сепарации (СМС и ММС), сушки концентрата, приготовления закладки из хвостов;

- производительность и технологический состав должны соответствовать производственной мощности шахты и качеству поступающей руды как с верхних этажей, разрабатываемых системами с обрушением, так и с нижних этажей, разрабатываемых с закладкой;

- оптимизируется совместно с транспортной схемой перемещения грузов: руды от добычных горизонтов до приемных бункеров по рудоспускам, хвостов СМС и (или) ММС от ПОК до закладываемых камер, концентрата – на поверхность. Перспективным является трубопроводный транспорт хвостов и концентрата с применением насосов фирмы Putzmeister [13, 14];

- использование сил гравитации в процессе стадийного обогащения руды за счет вертикальной компоновки.

Вся добытая руда как с верхних этажей, разрабатываемых системами с обрушением, так и с нижних этажей, разрабатываемых с закладкой, перепускается под действием силы тяжести к ПОК, далее руда дробится, измельчается и обогащается. Рудоспуски с добычных горизонтов до ПОК располагаются за зоной сдвижения пород лежачего бока от отработки самого нижнего этажа. Хвосты обогащения после приготовления из них закладочного материала транспортируются от ПОК на закладочные горизонты нижних этажей и размещаются в отработанных камерах. Концентрат по квершлагам и стволу выдается на поверхность. В горизонтальной плоскости оптимальным является расположение ПОК по центру тяжести всех запасов в шаге освоения.

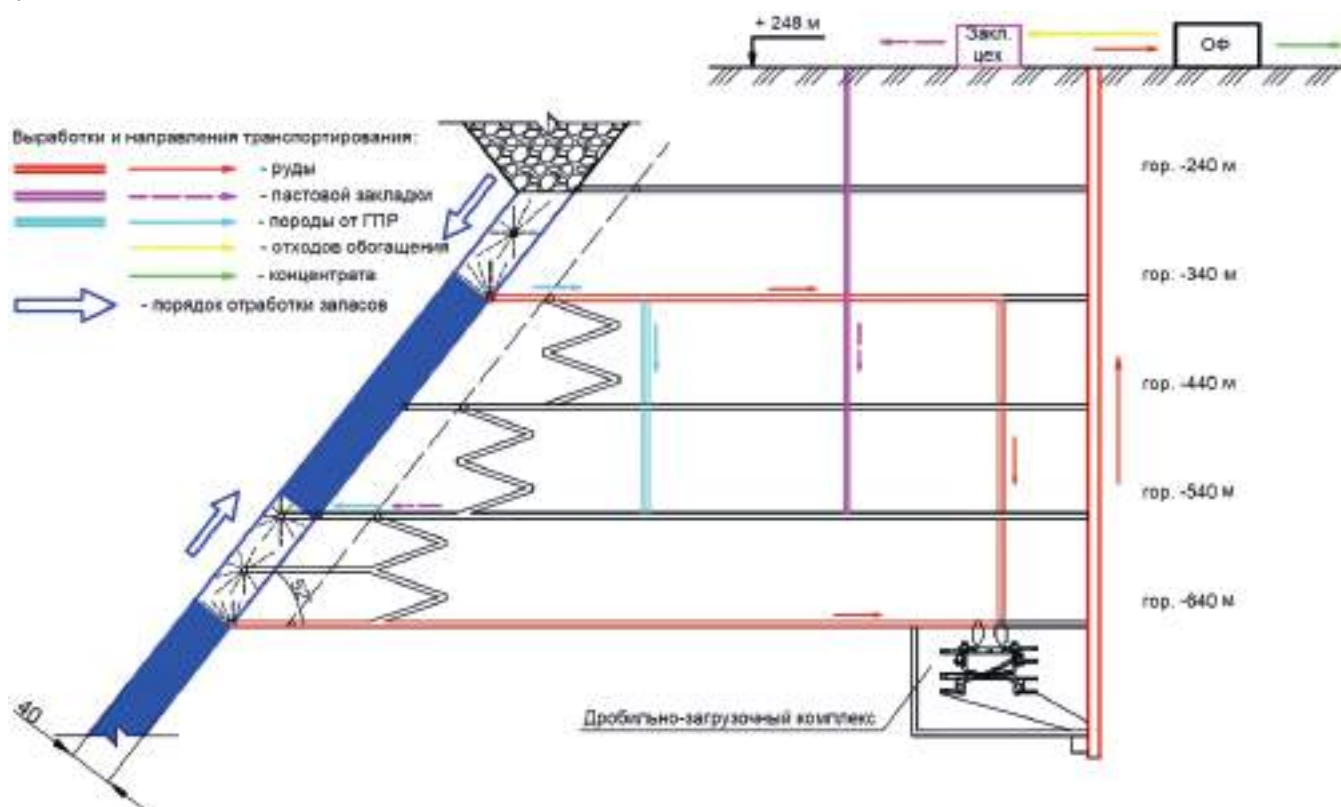
Таким образом, устраняются недостатки традиционной технологии добычи и переработки рудного сырья – транспортирование горной массы до ствола, перегрузочные процессы, подъем на поверхность и обратная подача отходов обогащения в виде закладочного материала в шахту.

Оптимальное место расположения ПОК в шаге освоения глубоких горизонтов (–240 м/–640 м) в вертикальной плоскости установлено по критерию минимума суммарных приведенных капитальных затрат на вскрытие и эксплуатационных затрат на транспортирование руды, породы, хвостов обогащения и концентрата в зависимости от применяемого вида и схемы транспорта [15, 16].

В зависимости от вида перемещения различных грузов разработаны следующие транспортные схемы шахты:

а) руда из добычных блоков до рудоспусков или до приемного бункера ПОК доставляется автосамосвалом МТ436ЛР

а



б

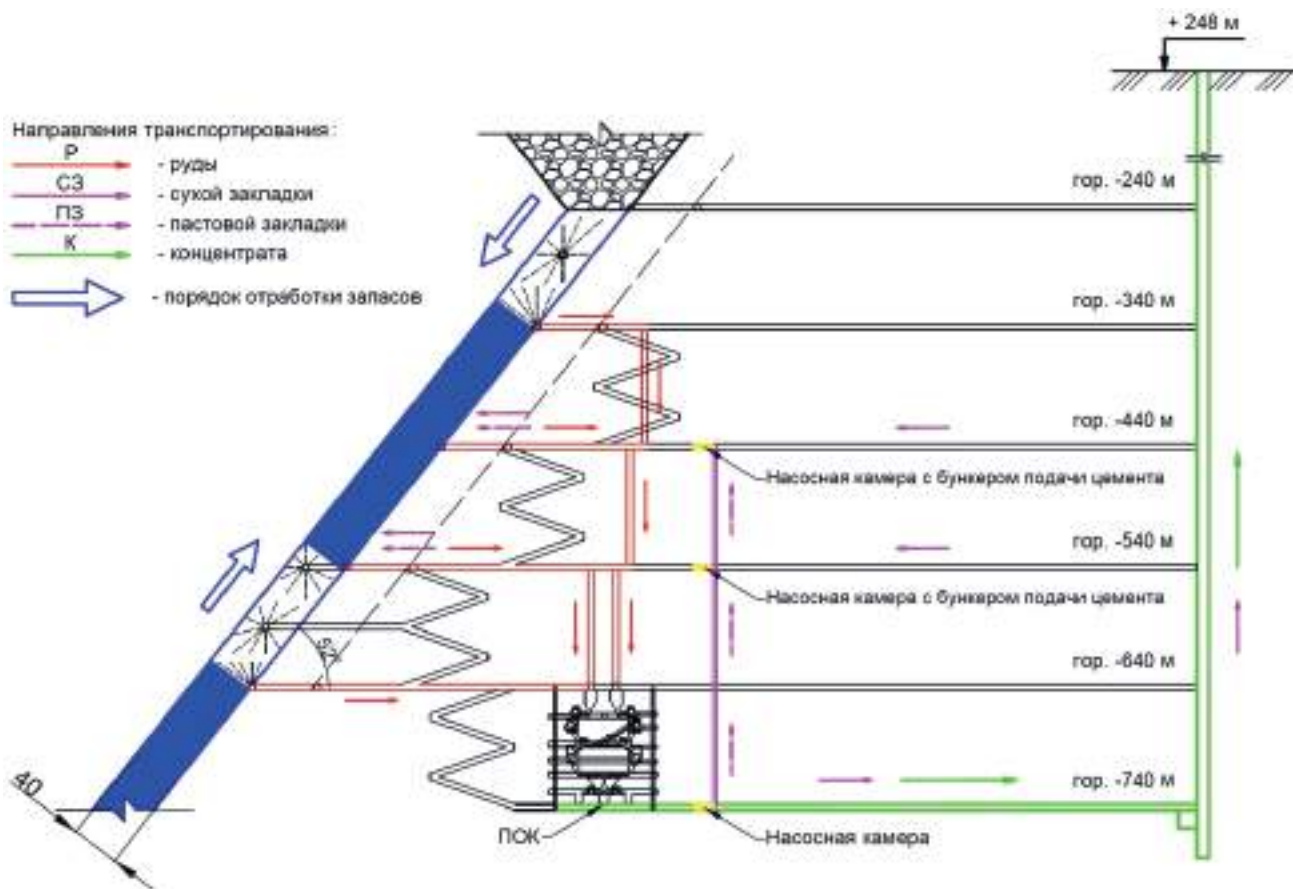


Рисунок 1. Технологические схемы вариантов 4 (а) и 5 (б) ГС освоения Естюнинского месторождения.  
 Figure 1. Technological schemes of options 4 (a) and 5 (b) GS for the development of the Estyuninskoye field.

грузоподъемностью 35 т; порода из проходческих забоев до закладываемых камер – ПДМ типа ST14 грузоподъемностью 14 т; сухая закладка (хвосты СМС) от ПОК до закладываемых камер – автосамосвалом МТ436LP; гидравлическая закладка (хвосты ММС) от ПОК до закладываемых камер – по трубам; концентрат от ПОК до ствола на горизонте –340 м – конвейером по уклону (схема А35 + КУ);

б) отличается от схемы 1 тем, что концентрат от ПОК до ствола транспортируется электровозом 14КР 2А в вагонетках ВГ-10 (схема А35 + ЖД);

в) руда по откаточным горизонтам до капитальных рудоспусков, пройденных в ПОК, доставляется электровозом 14КР 2А в вагонетках ВГ-10; порода из проходческих забоев до закладываемых камер – ПДМ типа ST 14; сухая закладка (хвосты СМС) от ПОК до ствола электровозом 14КР 2А – в вагонетках ВБ-4, подъем – по стволу до закладочного горизонта, транспорт от ствола до добычных блоков – электровозом 14КР 2А; гидравлическая закладка (хвосты ММС) от ПОК до закладываемых камер – по трубам; концентрат от ПОК до ствола – электровозом 14КР 2А в вагонетках ВГ-10 (схема ЖД + ЖД).

Результаты моделирования показали, что оптимальным в вертикальной плоскости является расположение приемных выработок ПОК на уровне нижнего добычного горизонта, в данном случае на гор. –640 м. Среди сравниваемых транспортных схем наиболее экономичной является ЖД + ЖД (рис. 2).

Методика оценки и выбора вариантов ГС в шаге освоения месторождения учитывает комплекс как производственного, так и экологического эффектов от реализации стратегических решений [17]. Для всесторонней оценки вариантов ГС применяется комплексный эколого-экономический критерий. Для оценки экономического эффекта в качестве критерия принят максимум чистого дисконтированного дохода (ЧДД), учитывающий динамику развития образованной горнотехнической системы (ГТС) во времени, записанный в следующем виде, руб.:

$$\text{ЧДД} = (\sum \Pi_{it} - \sum K_{it} - \sum \Theta_{it} - \sum \text{СЭП}_{it}) / (1 + E)^t \rightarrow \max,$$

где  $\Pi_{it}$  – доход от реализации продукции, получаемый в  $t$ -м году реализации  $i$ -го варианта ГС, руб./год;  $K_{it}$  – капитальные затраты на строительство шахты и ОК в  $t$ -м году реализации  $i$ -го варианта ГС, руб./год;  $\Theta_{it}$  – эксплуатационные затраты на процессы добычи и обогащения руды в  $t$ -м году реализации  $i$ -го варианта ГС, руб./год;  $\text{СЭП}_{it}$  – денежная оценка социально-экологических последствий от реализации  $i$ -го варианта ГС, руб./год;  $E$  – норма дисконта, доли ед.;  $t$  – изменяется в пределах от 0 до  $T$ , равного времени строительства шахты и отработки запасов в новом шаге.

Для оценки экологического эффекта от реализации ГС производилась оценка способности ее вариантов (табл. 1) утилизировать внутри себя образованные отходы. Показатель замкнутости ГТС  $\eta$  – это количественное выражение экологичности ГТС, который равен отношению суммарного объема отходов  $V^o$  к объему пустот  $V^n$ , образующихся и закладываемых в рамках ГТС

$$\eta = V^o / V^n \rightarrow 1.$$

Если  $0 \leq \eta \leq 1$ , то ГТС замкнута, если  $\eta > 1$ , то ГТС не замкнута.

Для выбора лучшего варианта ГС выдвинут комплексный эколого-экономический критерий в виде глобального критерия принятия компромиссного решения  $R$ , рассчитываемого как минимум суммы баллов по обоим критериям с учетом их веса

$$R = k_{\text{чдд}} r_{\text{чдд}} + k_{\eta} r_{\eta} \rightarrow \min,$$

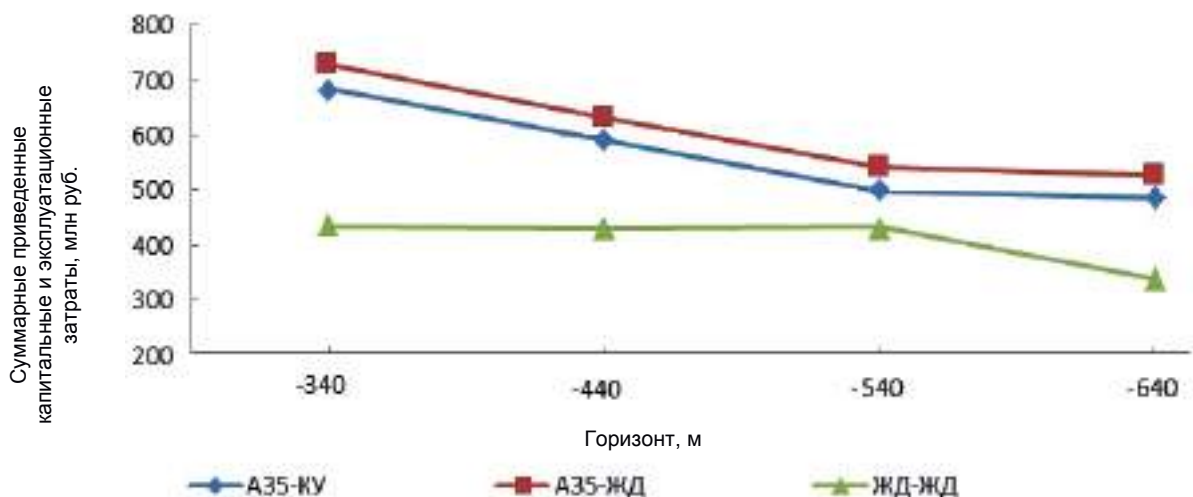


Рисунок 2. Зависимость суммарных приведенных капитальных и эксплуатационных затрат на транспортирование грузов от высотного расположения ПОК.  
 Figure 2. The dependence of the total reduced capital and operating costs on transportation of goods from the high-altitude location of the underground mineral processing complex.



где  $r_{чдд}$ ,  $r_{\eta}$  – рейтинг по критерию ЧДД и  $\eta$  соответственно. Более высокий рейтинг (минимальное количество баллов) получает вариант ГС с лучшим значением критерия;  $k_{чдд}$ ,  $k_{\eta}$  – вес критериев ЧДД и  $\eta$  в глобальном критерии. Поскольку данные веса относятся к взаимно противоположным критериям, то в соответствии с императивом Cleaner Production можно принять их равноправными, например равными 1.

Следующим этапом стало экономико-математическое моделирование (ЭММ) вариантов ГС освоения нижних горизонтов Естюнинского железорудного месторождения. Для этого была написана компьютерная программа в приложении Excel пакета программ Microsoft Office. Для расчета технико-экономических показателей по вариантам ГС требуется весьма большой массив исходных данных – более 200 горно-геологических, горнотехнических, экономических параметров. По каждому из двух критериев варианту ГС присваивается рейтинг  $r_{чдд}$  и  $r_{\eta}$ . Более высокий рейтинг (минимальное количество баллов) получает вариант с лучшим значением критерия. Выручаемый при освоении нового шага ЧДД приведен на рис. 3, показатели и рейтинги по вариантам ГС – в табл. 2.

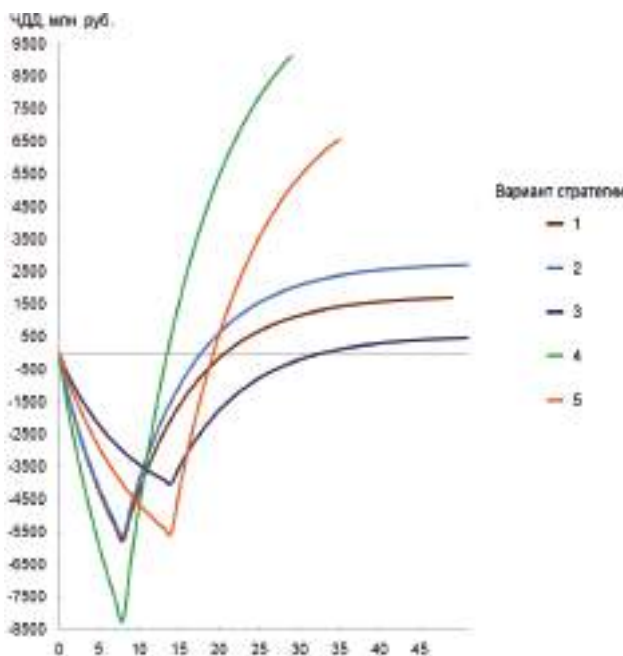
Результаты ЭММ показали, что по комплексному эколого-экономическому критерию наиболее эффективными являются варианты 2 и 4 ГС. Несмотря на уступающий в 2 раза показатель замкнутости у варианта 4 ГС, его ЧДД по сравнению с вариантом 2 ГС лучше в 3,4 раза. Однако у варианта 2 ГС производственная мощность в 2 раза ниже, а срок освоения и срок окупаемости капитальных вложений соответственно в 1,6 и 1,3 раза больше.

Относительно варианта 5 ГС можно сказать, что при экологической эффективности, равной варианту 4 ГС, экономическая в 1,4 раза ниже, а срок строительства рудника большего почти в 2 раза больше (14 и 8 лет соответственно) из-за более длительного времени строительства ПОК. Исходя из принципа Cleaner Production, считаем необходимым выполнить модернизацию варианта 5 ГС по следующим направлениям:

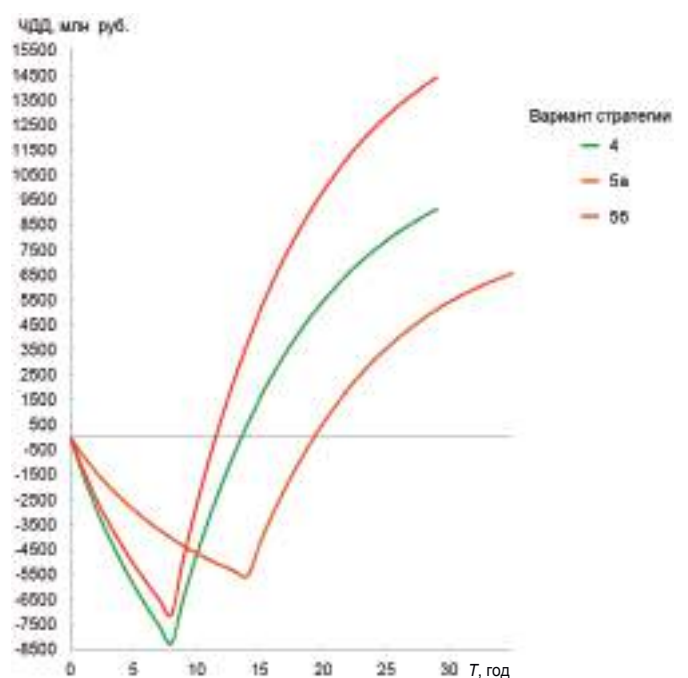
- 1) сокращение срока строительства ПОК за счет организации его первоочередного вскрытия;
- 2) оптимизация конструкции ПОК за счет использования сил гравитации при строительстве и эксплуатации;
- 3) применение методов очистной выемки при проходке камерных выработок ПОК;
- 4) использование вскрывающих и подготовительных выработок ПОК для выдачи концентрата на поверхность.

**Таблица 2. Показатели и рейтинги вариантов ГС.**  
**Table 2. Indicators and ratings of geotechnological strategy options.**

Показатель	Вариант				
	1	2	3	4	5
Показатель замкнутости ГТС, доли ед.	$\infty$	1,43	1,43	2,85	2,85
Рейтинг по критерию $\eta$ , баллы	5	1	1	3	3
ЧДД, млн руб.	1695	2702	456	9121	6564
Рейтинг по критерию ЧДД, баллы	4	3	5	1	2
Комплексный эколого-экономический критерий, баллы	9	4	6	4	5
Итоговое место варианта ГС в рейтинге	5	1	4	1	3



**Рисунок 3. ЧДД и сроки освоения по вариантам ГС.**  
**Figure 3. NPV and terms of development for the options of geotechnological strategy.**



**Рисунок 4. ЧДД и сроки освоения по вариантам 4, 5а и 5б ГС.**  
**Figure 4. NPV and timing of development for options 4, 5a and 5b, geotechnological strategy.**

**Таблица 3. Показатели и рейтинги вариантов ГС.**  
**Table 3. Indicators and ratings of geotechnological strategy options.**

Показатель	Вариант		
	4	5а	5б
Показатель замкнутости ГТС, доли ед.	2,85	2,85	2,85
Рейтинг по критерию $\eta$ , баллы	1	1	1
ЧДД, млн руб.	9121	6564	14 402
Рейтинг по критерию ЧДД, баллы	2	3	1
Комплексный эколого-экономический критерий, баллы	3	4	2
Итоговое место варианта ГС в рейтинге	2	3	1

Рассмотрено два подварианта варианта 5 ГС, отличающихся сроком строительства ПОК в рамках общего срока строительства рудника – больше срока строительства всех горно-капитальных, горно-подготовительных и нарезных выработок, необходимых для ввода рудника в эксплуатацию (5а) и не превышающих его (5б). Вариант 5а фактически соответствует ранее рассмотренному варианту 5 ГС. Графики ЧДД для сравниваемых вариантов 4, 5а и 5б ГС приведены на рис. 4.

Результаты ЭММ показали, что вариант 5б ГС является оптимальным – при равенстве по показателю замкнутости он занимает первое место по критерию ЧДД, прежде всего за счет равенства срока строительства ПОК сроку строительства ОК на поверхности (вариант 4 ГС). При этом сокращены сечения ствола, околоствольных дворов и исключены выработки и процессы, присущие традиционной технологии, а также площади земель, занимаемые ОК, отвалами и шламохранилищами на поверхности.

Таким образом, определены необходимые условия эффективности применения ПОК:

1. Срок строительства рудника с ПОК должен быть не больше срока строительства традиционного рудника с ОК на поверхности:

$$T_{\text{вскр}}^{\text{ПОК}} + T_{\text{ГПР}}^{\text{ПОК}} + T_{\text{ПНР}}^{\text{ПОК}} + T_{\text{ПОК}} \leq T_{\text{вскр}}^{\text{ОК}} + T_{\text{ГПР}}^{\text{ОК}} + T_{\text{ПНР}}^{\text{ОК}} + T_{\text{ОК}},$$

где  $T_{\text{ПОК}}$ ,  $T_{\text{ОК}}$  – время строительства ПОК и ОК, соответственно, лет;  $T_{\text{вскр}}^{\text{ПОК}}$ ,  $T_{\text{ГПР}}^{\text{ПОК}}$ ,  $T_{\text{ПНР}}^{\text{ПОК}}$  – время строительства вскрывающих, горно-подготовительных и нарезных выработок, необходимых для ввода в эксплуатацию рудника с ПОК, лет;  $T_{\text{вскр}}^{\text{ОК}}$ ,  $T_{\text{ГПР}}^{\text{ОК}}$ ,  $T_{\text{ПНР}}^{\text{ОК}}$  – время строительства вскрывающих, горно-подготовительных и нарезных выработок, необходимых для ввода в эксплуатацию рудника с ОК, лет.

2. Срок строительства ПОК должен быть не больше срока строительства всех горно-капитальных, горно-подготовительных и нарезных выработок, необходимых для ввода рудника в эксплуатацию:

$$T_{\text{ПОК}} \leq T_{\text{вскр}}^{\text{ПОК}} + T_{\text{ГПР}}^{\text{ПОК}} + T_{\text{ПНР}}^{\text{ПОК}}.$$

3. Строительство ПОК должно осуществляться в рамках единой схемы вскрытия и одновременно со строительством всех горно-капитальных, горно-подготовительных и нарезных выработок, необходимых для ввода рудника в эксплуатацию.

Проведенные исследования показывают, что разработанная эколого ориентированная комплексная технология добычи и переработки железных руд на основе ПОК способна не только снизить экологическую нагрузку на окружающую среду, но и в определенных условиях повысить экономический эффект при отработке железорудных месторождений. Перспективы промышленного внедрения данной технологии связаны с освоением глубоких горизонтов Ново-Естюнинского и Северо-Гороблагодатского железорудных месторождений, а также Тарыннахско-Горкитского железорудного узла. Актуальность разработанной геотехнологии подчеркивается существенным увеличением в ближайшие годы затрат на экологические аспекты освоения месторождений (приобретение земли по нормативу в зависимости от кадастровой стоимости, плата за перевод в категорию промышленного назначения, налог на землю, плата за размещение отходов на поверхности и др.).

*Работа выполнена при поддержке Комплексной программы фундаментальных исследований УрО РАН (Проект 18-5-5-10).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П. Геоэкология освоения недр и экогеотехнологии разработки месторождений. М.: Научтехлитиздат, 2015. 360 с.
2. Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П. Природоподобные горные технологии – перспектива разрешения глобальных противоречий при освоении минеральных ресурсов литосферы // Вестник РАН. 2017. Т. 87, № 7. С. 655–662.
3. Trubetskoy K. N., Kaplunov D. R., Ryl'nikova M. V. Problems and prospects in the resource-saving and resource-reproducing geotechnology development for comprehensive mineral wealth development // Journal of Mining Science. 2012. Vol. 48, № 4. P. 688–693. <http://dx.doi.org/10.1134/S1062739148040132>
4. Каплунов Д. Р. Современное содержание методологии проектирования освоения недр // Недропользование – XXI век. 2008. № 1. С. 32–34.
5. Трубецкой К. Н., Корнилов С. В., Яковлев В. Л. О новых подходах к обеспечению устойчивого развития горного производства // Горный журнал. 2012. № 1. С. 15–19.
6. Kalabin G. V., Gorny V. I., Kritsuk S. G. Satellite monitoring of vegetation mantle response to the Sorsk copper-molybdenum mine impact // Journal of Mining Science. 2014. Т. 50, № 1. С. 155–162.

7. Aleksandrova T. N., Lipina L. N., Grekhnev N. I. Geocological estimate of state of nature in a mining and processing plant influence area using geoinformation technologies // Journal of Mining Science. 2013. Т. 49, № 1. С. 167–174.
8. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н. Научно-методические основы проектирования экологически сбалансированного цикла комплексного освоения и сохранения недр Земли // Условия устойчивого функционирования минерально-сырьевого комплекса России. Вып. 3: ГИАБ. 2015. Вып. 4 (спец. вып. 15). С. 5–11.
9. Cleaner Production. URL: <https://web.archive.org/web/20051208113414/http://www.unido.org/en/doc/4460>
10. Пирогов Г. Г. Перспективные технологии подземной добычи руд // Вестник Забайкальского государственного университета. 2017. № 2. С. 28–33.
11. Подземная обогатительная фабрика: пат. 2565300 Рос. Федерация. № 2014124330; заявл. 11.06.2014; опубл. 20.10.2015. Бюл. № 29. 7 с.
12. Соколов И. В., Гобов Н. В., Смирнов А. А., Медведев А. Н. Комплексная эколого-ориентированная подземная геотехнология добычи и обогащения железных руд // Экология и промышленность России. 2013. № 6. С. 16–20.
13. Lee C., Gillot P. Case study – a high strength paste aggregate backfill at Randgold's Loulo mine in Mali // Mine Fill 2014: proceedings of the 11<sup>th</sup> International Symposium on Mining with Backfill. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2014. P. 231–242.
14. Packey D. J. Multiproduct mine output and the case of mining waste utilization // Resources Policy. 2012. Vol. 37, issue 1. P. 104–108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2011.11.002>
15. Соломеин Ю. М., Никитин И. В. Определение места расположения подземного обогатительного комплекса при освоении железорудного месторождения // Проблемы недропользования. 2015. № 3(6). С. 44–48.
16. Способ разработки крутопадающих рудных месторождений с подземным обогащением: пат. 2652223 Рос. Федерация. № 2016126357; заявл. 30.06.2016; опубл. 25.04.2018, Бюл. № 12. 5 с.
17. Соколов И. В., Гобов Н. В., Антипин Ю. Г. Систематизация и методика оценки вариантов стратегии освоения железорудных месторождений с применением подземных обогатительных комплексов // ГИАБ. 2015. № 7. С. 101–109.

*Статья поступила в редакцию 06 января 2019 г.*

# Environmental-friendly underground research geotechnologies of mining and processing of iron ore based on economic and mathematical modelling

Igor Vladimirovich SOKOLOV\*,  
Nikolay Vasilievich GOBOV\*\*,  
Yuri Mikhailovich SOLOMEIN\*\*\*

Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, Ekaterinburg

**Relevance.** The results of a study of an ecologically oriented integrated underground geotechnology for mining and processing iron ores are presented. It was developed as part of a geotechnological strategy, the purpose of which is to increase the economic efficiency and environmental safety of the development of iron ore deposits; the goal is to use development systems of different classes (opening and development) of the deposit and transfer the enrichment process to underground conditions.

**Methodology of research.** Economic and mathematical modelling of the developed versions of the geotechnological strategy and their assessment according to the proposed integrated environmental and economic criterion, taking into account the degree of closure of the mining system and the value of the net present value, were carried out.

**Results of research.** The parallel use of caving systems for the development of upper stages and lower stages allows us not only to increase the production capacity of the mine up to two times, but also to ensure closure of the formed mining system through the use of mining and processing waste as a filling. Transferring the enrichment process underground allows you to significantly reduce the land allotment area of the enterprise, to release only concentrate and surplus tailings to the surface, which significantly increases the environmental safety of mining and processing plants. In addition, the formation of an underground processing complex, including the stages of crushing, grinding and beneficiation of ore, near the treatment area at a safe distance, eliminates some of the processes inherent in traditional technology (transporting the rock mass to the trunk, its reloading and lifting to the surface, and the return of the beneficiation waste in the form of filling material in the mine), and therefore, to obtain an economic effect.

**Conclusions.** A feasibility study showed that the option of a geotechnological strategy with an underground processing complex is quite competitive, provided that its construction period does not exceed the construction period of all capital, mining and preparation workings necessary for putting the mine into operation.

**Keywords:** iron ore deposit, underground geotechnology, geotechnological strategy, mining system, underground mineral processing complex, net present value, economic and mathematical modeling.

*This work was supported by the Comprehensive Program for Fundamental Research, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Project 18-5-5-10).*


## REFERENCES

1. Trubetskoy K. N., Galchenko Yu. P. 2015, *Geoekologiya osvoyeniya nedr i ekogeotekhnologii razrabotki mestorozhdeni* [Geoecology of subsurface development and environmental geotechnology of field development]. Moscow, 360 p.
2. Trubetskoy K. N., Galchenko Yu. P. 2017, Nature-like mining technologies – the prospect of resolving global contradictions in the development of the mineral resources of the lithosphere. *Vestnik RAN* [Herald of the Russian Academy of Sciences], vol. 87, no. 7, pp. 655–662. (In Russ.)
3. Trubetskoy K. N., Kaplunov D. R., Ryl'nikova M. V. 2012, Problems and prospects in the resource-saving and resource-reproducing geotechnology development for comprehensive mineral wealth development. *Journal of Mining Science*, vol. 48, no. 4, pp. 688–693. <http://dx.doi.org/10.1134/S1062739148040132>
4. Kaplunov D. R. 2008, Updated content of the methodology of designing the development of mineral resources. *Nedropol'zovaniye – 21 vek* [Subsoil Use – XXI century], no. 1, pp. 32–34. (In Russ.)
5. Trubetskoy K. N., Kornilkov S. V., Yakovlev V. L. 2012, On new approaches to ensuring sustainable development of mining. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], no. 1, pp. 15–19. (In Russ.)
6. Kalabin G. V., Gornyy V. I., Kritsuk S. G. 2014, Satellite monitoring of vegetation mantle response to the Sorsk copper-molybdenum mine impact. *Journal of Mining Science*, vol. 50, no. 1, pp. 155–162.
7. Aleksandrova T. N., Lipina L. N., Grekhnev N. I. 2013, Geoecological estimate of state of nature in a mining and processing plant influence area using geoinformation technologies. *Journal of Mining Science*, vol. 49, no. 1, pp. 167–174.
8. Kaplunov D. R., Ryl'nikova M. V., Radchenko D. N. 2015, Scientific and methodological foundations for designing an ecologically balanced cycle of integrated development and conservation of the Earth's bowels. Conditions for the stable functioning of the mineral resource complex of Russia. Issue 3, *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], issue 4 (special issue 15), pp. 5–11. (In Russ.)
9. Cleaner Production. URL: <https://web.archive.org/web/20051208113414/http://www.unido.org/en/doc/4460>
10. Pirogov G. G. 2017, Promising technologies for underground ore mining. *Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Transbaikalian State University], no. 2, pp. 28–33. (In Russ.)
11. 2015, *Podzemnaya obogatitel'naya fabrika* [Underground screening plant]. Patent RF no 2565300.
12. Sokolov I. V., Gobov N. V., Smirnov A. A., Medvedev A. N. 2013, Integrated ecology-oriented underground geotechnology for mining and processing of iron ores. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], no. 6, pp. 16–20. (In Russ.)
13. Lee C., Gillot P. 2014, Case study – a high strength paste aggregate backfill at Randgold's Loulo mine in Mali. Mine Fill 2014: proceedings of the 11<sup>th</sup> International Symposium on Mining with Backfill. Perth: Australian Centre for Geomechanics, pp. 231–242.
14. Packey D. J. 2012, Multiproduct mine output and the case of mining waste utilization. *Resources Policy*, vol. 37, issue 1, pp. 104–108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2011.11.002>
15. Solomein Yu. M., Nikitin I. V. 2015, Determination of the location of the underground processing complex during the development of the iron ore deposit. *Problemy nedropol'zovaniya* [Subsoil Use Issues], no. 3(6), pp. 44–48. (In Russ.)


\* [geotech@igduran.ru](mailto:geotech@igduran.ru)

 <https://orcid.org/0000-0001-7841-5319>

\*\* [iaeotech910@igduran.ru](mailto:iaeotech910@igduran.ru)

 <https://orcid.org/0000-0002-1198-3300>

\*\*\* [aeotech@igduran.ru](mailto:aeotech@igduran.ru)

 <https://orcid.org/0000-0002-8226-6494>



16. 2018, *Sposob razrabotki krutopadayushchikh rudnykh mestorozhdeniy s podzemnym obogashcheniyem* [Method of developing steeply dipping ore deposits with underground processing]. Patent RF no. 2652223.
17. Sokolov I. V., Gobov N. V., Antipin Yu. G. 2015, Systematization and methodology for evaluating options for the development strategy of iron ore deposits using underground processing complexes. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], no. 7, pp. 101–109. (In Russ.)

*The article was received on January 06, 2019*