

УДК 622.272.06:622.341

Никитин Игорь Владимирович

научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58,
e-mail: geotech@igduran.ru

Соломенн Юрий Михайлович

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

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ ПОДКАРЬЕРНЫХ ЗАПАСОВ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ*

Аннотация:

Для условий комбинированной открыто-подземной разработки уральского медно-цинкового месторождения разработаны перспективные варианты подземной геотехнологии освоения подкарьерных запасов, отличающиеся состоянием карьера на момент перехода к подземному способу разработки, порядком развития подземных горных работ во времени и пространстве, способом и схемой вскрытия, системой разработки, способом изоляции подземного выработанного пространства от карьера и схемой утилизации отходов горно-обогатительного производства. Проведено экономико-математическое моделирование разработанных вариантов по комплексному экономико-экологическому критерию, учитывающему совокупность экономического эффекта и экологических последствий от реализации геотехнологических решений. В результате моделирования установлен оптимальный вариант подземной геотехнологии, основанный на вскрытии подкарьерных запасов автоуклоном из карьера и наклонным съездом с поверхности и их разработке этажно-камерной системой с твердеющей закладкой под рудным целиком. Эффект достигается за счет применения схемы вскрытия из карьера, обеспечивающей быстрый ввод подземного рудника в эксплуатацию, и системы разработки с закладкой, позволяющей утилизировать наибольший объем отходов горно-обогатительного производства в выработанном пространстве.

Ключевые слова: меднорудное месторождение, комбинированная разработка, подземная геотехнология, вскрытие, система разработки, экономико-математическое моделирование, комплексный критерий

DOI: 10.25635/2313-1586.2020.03.073

Nikitin Igor V.

Research Worker
of the Laboratory of Underground Geotechnology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
620075, Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.,
e-mail: geotech@igduran.ru

Solomein Yuriy M.

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

ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODELING OF UNDERGROUND GEOTECHNOLOGY OF MINING OF SUB-PIT RESERVES OF ORE DEPOSITS

Abstract:

Promising options for underground geotechnology of developing underground reserves for the conditions of the combined open-underground mining of the Ural copper-zinc deposit have been elaborated, which differ in the state of the quarry at the time of transition to the underground mining method, in the procedure of development of underground mining works in time and space, in the method and scheme of opening, in the mining system, in the method of isolation of underground mined-out space from the quarry, and in the scheme of waste disposal of mining and processing production. The economic and mathematical modeling of the elaborated options based on the complex ecological and economic criterion, taking into account the totality of the economic effect and environmental consequences of the implementation of geotechnological solutions. As a result of modeling the optimal variant of underground geotechnology is established, based on the opening of the sub-pit reserves by an autoclave from the quarry and an inclined exit from the surface and their development by a floor-chamber system with consolidating stowing under the ore rib. The effect is achieved due the use of the scheme of opening of the quarry, which provides rapid commissioning of the underground mine, and of the development system with stowing, that allows to dispose the most amount of mining and processing waste in the worked-out space.

Key words: copper ore deposit, combined mining, underground geotechnology, opening, mining system, economic and mathematical modeling, complex criterion

* Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00581-19-00, тема № 0405-2019-0005

Введение

Разработке научных основ комбинированного способа разработки рудных месторождений в связи с его широким применением посвящены труды многих отечественных и зарубежных ученых [1 – 8]. Несмотря на это, по-прежнему актуальной остается задача изыскания и обоснования оптимальной подземной геотехнологии освоения переходных зон (ПЗ) – участков месторождения, формирующихся при переходе от открытого к подземному способу разработки.

При освоении ПЗ подземным способом необходимо не только учитывать горно-геологические, горнотехнические, экономические и экологические факторы и условия, сформированные в процессе отработки верхней части месторождений открытыми геотехнологиями, но и обеспечивать эффективность и безопасность разработки основных запасов (ОЗ), предназначенных для подземных горных работ [4]. Таким образом, многочисленность условий и факторов, а также сложность их совокупного влияния обуславливают необходимость решения поставленной задачи методом и средствами компьютерного экономико-математического моделирования с использованием комплексного экономико-экологического критерия.

Научно-обоснованный выбор геотехнологии комплексного освоения недр различными способами или их рациональным сочетанием во времени и пространстве должен базироваться на методологии проектирования, всесторонне учитывающей и адекватно отображающей проектируемый объект с прогнозными показателями извлечения полезных ископаемых и технического прогресса [1, 2]. Неверный учет или игнорирование значимых факторов при проектировании комплексного освоения недр является причиной принятия стратегически неверных решений [9].

В современных эколого-технических условиях одним из перспективных направлений развития стратегии комплексного освоения месторождений является создание эффективных и экологически безопасных подземных геотехнологий добычи и переработки руды, позволяющих утилизировать в выработанном пространстве максимально возможный объем отходов горно-обогажительного производства (ГОП). Данное направление достигается путем формирования замкнутых горнотехнических систем (ГТС), включающих порядок отработки, способ и схему вскрытия, технологию очистной выемки, способ погашения выработанного пространства, схему транспорта горной массы и способ утилизации отходов ГОП, объединенных общей целью обеспечения экологической безопасности и получения максимального экономического эффекта от освоения подземных запасов месторождения [10].

Краткая характеристика месторождения и варианты его отработки

Для условий мощного (40 м), крутопадающего (50°), глубокозалегающего (500 м) медно-цинкового месторождения, обрабатываемого открыто-подземным способом (глубина карьера 260 м), разработаны четыре рациональных варианта подземной геотехнологии освоения подкарьерных запасов (включая переходную зону), отличающихся состоянием карьера на момент перехода к подземному способу разработки, порядком развития подземных горных работ во времени и пространстве, способом и схемой вскрытия, системой разработки, способом изоляции подземного выработанного пространства от карьера и схемой утилизации отходов ГОП [3].

Вариант 1. Карьер обрушен или на его дне создан внутренний отвал. Порядок отработки – этажный нисходящий, начиная с ПЗ.

Вскрытие ПЗ и ОЗ осуществляется с поверхности двумя вертикальными стволами, расположенными по центру лежачего бока месторождения – скиповым и вентиляционно-вспомогательным, этажными квершлагами и одним концентрационным горизонтом. Внутришахтный транспорт руды по концентрационному горизонту – электровозный. Доставка руды по доставочным ортам и штрекам эксплуатационных горизонтов до капитальных рудоспусков – погрузо-доставочными машинами (ПДМ) типа

ЛН 307. Спуск самоходного оборудования в шахту производится по вентиляционно-вспомогательному стволу, его перемещение между горизонтами – по участковым наклонным съездам.

Система разработки ПЗ – этажное принудительное обрушение под массивом разрыхленных пород, образуемым на дне карьера, ОЗ – этажное принудительное обрушение под массивом разрыхленных пород.

Место утилизации отходов ГОП – карьер.

В а р и а н т 2. Карьер в устойчивом состоянии. Порядок отработки – этажный нисходящий, начиная с ПЗ (рис. 1б).

Вскрытие ПЗ и ОЗ производится из карьера автотранспортным уклоном (угол наклона 8°) и с поверхности – вентиляционно-вспомогательным наклонным съездом, расположенными по центру лежачего бока месторождения. Внутришахтный транспорт руды по эксплуатационным горизонтам и автоуклону до перегрузочного пункта, оборудованного на нижнем уступе карьера – автосамосвалами типа *ТН 550*, на поверхность – по карьерным съездам автосамосвалами типа БелАЗ-75145. Для перегрузки руды в карьере применяется экскаватор типа ЭКГ-5. Доставка руды по доставочным ортам и штрекам эксплуатационных горизонтов до мест погрузки в автосамосвалы – ПДМ типа *ЛН 307*. Спуск и подъем самоходного оборудования осуществляется по вентиляционно-вспомогательному наклонному съезду.

Система разработки ПЗ – этажно-камерная с закладкой под рудным целиком, формируемым в пределах ПЗ, ОЗ – этажно-камерная с закладкой под закладочным массивом.

Место утилизации отходов ГОП – подземное выработанное пространство.

В а р и а н т 3. Карьер обрушен или на его дне создан внутренний отвал. Порядок отработки – этажный восходящий, ПЗ отрабатывается в последнюю очередь.

Вскрытие и транспорт руды аналогичны варианту 1. Отличие состоит в том, что сначала осуществляется вскрытие и отработка нижнего этажа, затем других этажей последовательно снизу вверх. Система разработки ПЗ – этажное принудительное обрушение без изоляции, ОЗ – этажно-камерная с закладкой под рудным массивом.

Место утилизации отходов ГОП при освоении ПЗ – карьер, при освоении ОЗ – подземное выработанное пространство.

В а р и а н т 4. Карьер в устойчивом состоянии. Порядок отработки – этажный восходящий, ПЗ отрабатывается в последнюю очередь.

Вскрытие и транспорт руды аналогичны *варианту 2*. Отличие состоит в том, что сначала осуществляется вскрытие и отработка нижнего этажа, затем других этажей последовательно снизу вверх. Система разработки ПЗ – этажно-камерная с закладкой под рудным целиком, формируемым в пределах ПЗ, ОЗ – этажно-камерная с закладкой под рудным массивом.

Место утилизации отходов ГОП – подземное выработанное пространство.

Методика сравнения вариантов подземной геотехнологии

При сравнении вариантов подземной геотехнологии целесообразно применять комплексный критерий, учитывающий совокупность экономического, выраженного чаще всего в виде максимума чистого дисконтированного дохода (ЧДД) [4], и экологического эффектов от реализации геотехнологических решений [6, 11].

Для оценки экологических последствий от реализации геотехнологии в качестве критерия используется показатель замкнутости ГТС η , отражающий предельную возможность размещения отходов в выработанном подземном пространстве, определяемый по формуле [12]:

$$\eta_i = V_i^o / V_i^n \rightarrow 1, \text{ доли ед.}, \quad (1)$$

где V_i^o – суммарный объем твердых отходов, образующихся при i -м варианте геотехнологии, м^3 ; V_i^n – суммарный объем выработанного пространства, используемого для

утилизации отходов при i -м варианте геотехнологии, м^3 .

Система является замкнутой, когда за ее пределы выходит только готовый продукт (концентрат, агломерат), а образующиеся в процессе добычи и обогащения руды твердые отходы утилизируются внутри самой системы [6]. Следовательно, при условии $0 \leq \eta \leq 1$ система является замкнутой, а при $\eta > 1$ система является незамкнутой, то есть не позволяет утилизировать внутри себя весь объем образующихся отходов.

Для определения величины η рассчитываются следующие показатели:

1. Содержание металла в добытой руде:

$$a_{ij} = c_{ij}(100 - P_i), \%, \quad (2)$$

где j – извлекаемые металлы (для меднорудных месторождений – медь и цинк); c_i – содержание j -го извлекаемого металла в балансовых запасах в i -м варианте геотехнологии, %; P_i – разубоживание руды в i -м варианте геотехнологии, %.

2. Извлечение металла в концентрат (по эмпирическим данным обогатительной фабрики Учалинского ГОКа):

- меди:

$$\mathcal{E}_{\text{Cu}_i} = -12,76a_i^2 + 55,73a_i + 27,16, \%, \quad (3)$$

- цинка:

$$\mathcal{E}_{\text{Zn}_i} = -8,84 + 78,14a_i - 26,42a_i^2, \%. \quad (4)$$

3. Выход концентрата:

$$\gamma_{ij} = a_{ij}\mathcal{E}_{ij} / \beta_j, \%, \quad (5)$$

где β_j – содержание j -го извлекаемого металла в концентрате, %. Для медного концентрата $\beta = 17,5$ %, для цинкового – $\beta = 49,01$ %.

4. Выход хвостов обогащения:

$$\gamma_{\text{хв}_i} = 100 - \sum \gamma_{ij}, \%, \quad (6)$$

где $\sum \gamma_{ij}$ – суммарный выход концентратов извлекаемых металлов, %.

5. Суммарный объем отходов (порода ПНР и хвостов обогащения), производимых в рамках ГТС и используемых в качестве твердеющей закладки:

$$V_i^o = (V_{P_i}\gamma_{\text{хв}_i} + V_{\text{ПНР}_i})k_{\text{р хв}}, \text{м}^3, \quad (7)$$

где V_{P_i} – суммарный объем рудной массы (в массиве), извлеченной в ПЗ и ОЗ в i -м варианте геотехнологии, м^3 ; $V_{\text{ПНР}_i}$ – объем пустой породы ПНР, извлеченной в ПЗ и ОЗ в i -м варианте геотехнологии, м^3 ; $k_{\text{р хв}}$ – коэффициент разрыхления хвостов в твердеющей закладке, доли ед.

6. Объем рудной массы (в массиве), извлеченной в ПЗ или ОЗ:

$$V_{\text{P ПЗ(ОЗ)}_i} = [Q_{\text{Б ПЗ(ОЗ)}}(1 - \Pi_{\text{ПЗ(ОЗ)}_i}) / (1 - P_{\text{ПЗ(ОЗ)}_i})] / \gamma_{\text{р}}, \text{м}^3, \quad (8)$$

где $Q_{\text{Б ПЗ(ОЗ)}}$ – балансовые запасы ПЗ (ОЗ), т; $\Pi_{\text{ПЗ(ОЗ)}_i}$ – потери руды в ПЗ (ОЗ) в i -м варианте геотехнологии, доли ед.; $P_{\text{ПЗ(ОЗ)}_i}$ – разубоживание руды в ПЗ (ОЗ) в i -м варианте геотехнологии, доли ед.; $\gamma_{\text{р}}$ – плотность рудной массы, $\text{т}/\text{м}^3$.

7. Суммарный объем рудной массы, извлеченной в ПЗ и ОЗ:

$$V_{\text{P}_i} = V_{\text{P ПЗ}_i} + V_{\text{P ОЗ}_i}, \text{м}^3. \quad (9)$$

8. Объем выработанного пространства

- при варианте 1:

$$V_1^{\text{п}} = 0; \quad (10)$$

- при варианте 2 и 4:

$$V_{2(4)}^{\text{п}} = V_{\text{P 2(4)}}; \quad (11)$$

- при варианте 3:

$$V_3^{\text{п}} = V_{\text{РОЗЗ}} \cdot \quad (12)$$

Комплексный экономико-экологический критерий R включает критерии максимума ЧДД и оптимума η и рассчитывается по следующей формуле:

$$R = \text{ЧДД}_i - \frac{(\eta_i - 1)V_i^0 \rho^0 \Pi_{\text{разм}}}{(1 - E)^t} \rightarrow \max, \text{ руб.}, \quad (13)$$

где ЧДД_i – величина ЧДД в i -м варианте геотехнологии, руб.; ρ^0 – плотность отходов (порода ПНР и хвостов обогащения), т/м^3 ; $\Pi_{\text{разм}}$ – плата за размещение отходов на поверхности в отвалах и шламохранилищах, руб/т; E – норма дисконта, доли ед.; t – срок вскрытия и обработки ПЗ и ОЗ, лет.

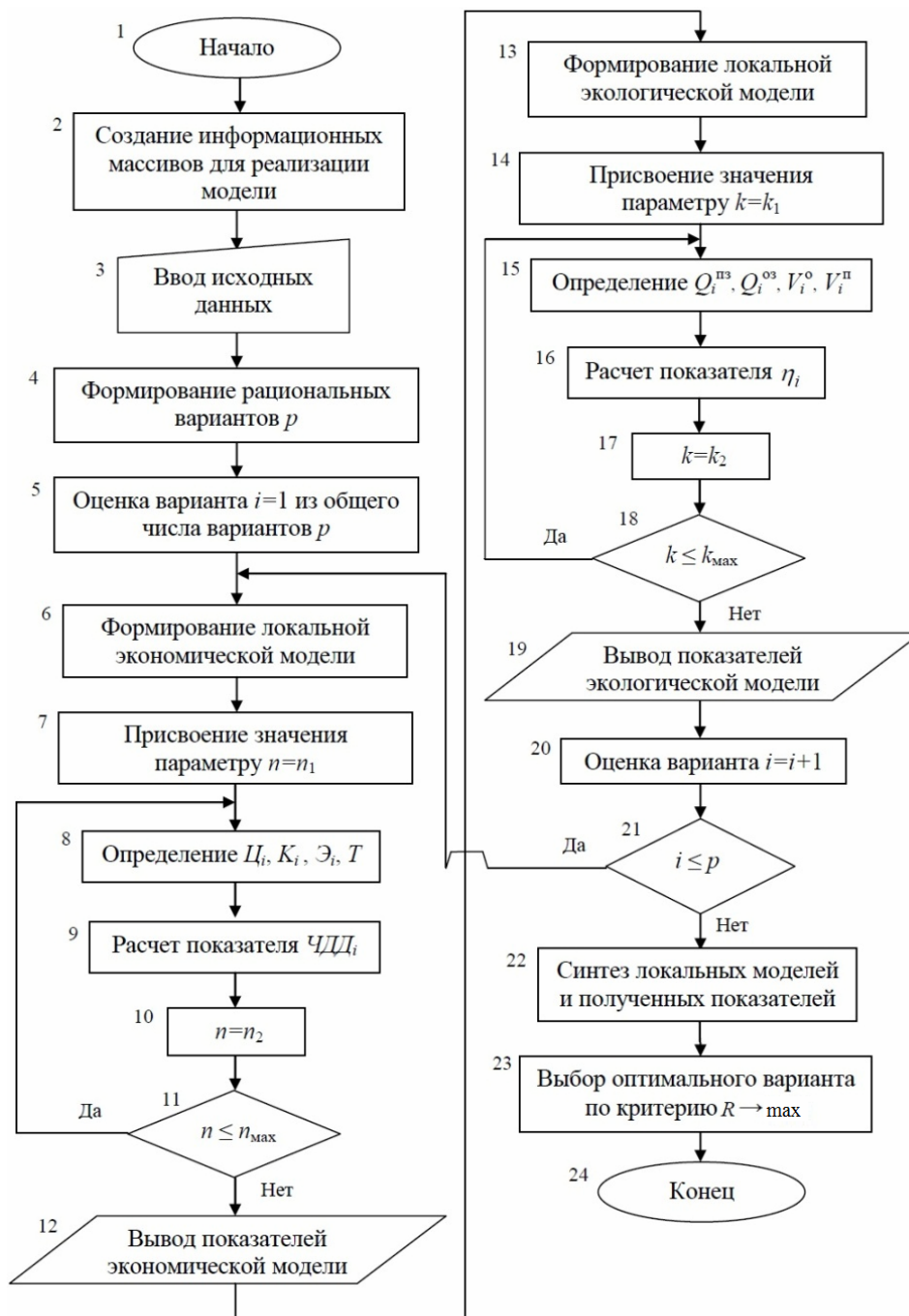


Рис. 1 – Алгоритм оценки и выбора оптимального варианта подземной геотехнологии по экономико-экологическому критерию

С использованием расчетных формул [4, 10] и (1) – (13), разработан алгоритм, описывающий последовательность действий по расчету основных показателей и выбору оптимального варианта подземной геотехнологии (рис. 1). Данный алгоритм реализован в приложении Excel пакета Microsoft Office.

Методика, алгоритм и написанная на их основе компьютерная программа в совокупности представляют собой экономико-математическую модель, позволяющую путем исследования необходимых параметров и показателей выбрать оптимальный вариант подземной геотехнологии освоения подкарьерных запасов рудных месторождений по комплексному экономико-экологическому критерию.

Экономико-математическое моделирование подземной геотехнологии

На начальном этапе моделирования определены значения критериев ЧДД и η по вариантам 1 – 4. Также установлены зависимости η от содержания извлекаемых металлов ($\text{Cu}=0,4\div 3,2\%$ и $\text{Zn}=0,6\div 2,0\%$) при фиксированных базовых значениях содержания одного из металлов ($\text{Cu}=1,8\%$ и $\text{Zn}=0,6\%$).

В результате экономико-математического моделирования по критерию η установлено (рис. 2):

– вариант 1 не обеспечивает замкнутость ГТС, так как выработанное пространство в процессе очистной выемки заполняется с обрушенными вмещающими породами, следовательно $\eta \rightarrow \infty$;

– варианты 2 и 4 позволяют утилизировать в выработанном пространстве наибольшее количество отходов ГОП. При базовых значениях содержания $\text{Cu}=1,8\%$ и $\text{Zn}=0,6\%$ $\eta=1,15$. Это означает, что в рамках ГТС образуются излишки отходов ГОП в размере 15 % (по объему);

– вариант 3 позволяет утилизировать меньшее по сравнению с вариантами 2 и 4 количество отходов ГОП. При базовых Cu и Zn $\eta=1,63$. Объем излишков достаточно велик и составляет 63 % (по объему);

– с увеличением содержания Cu в диапазоне от 0,4 до 3,2 % η существенно снижается (до 15 %) во всех вариантах вследствие повышения извлечения металла в концентрат и снижения выхода хвостов обогащения, а с увеличением содержания Zn в диапазоне от 0,6 до 2 % η практически не изменяется.

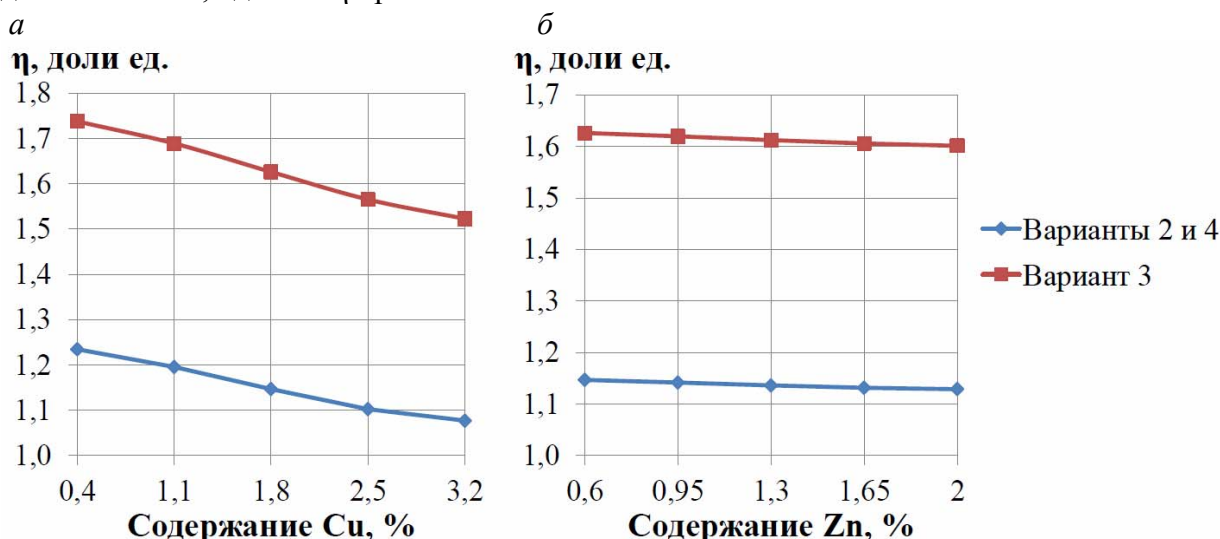


Рис. 2 – Зависимость η от содержания:
а – Cu (при содержании $\text{Zn}=0,6\%$); б – Zn (при содержании $\text{Cu}=1,8\%$)

На завершающем этапе моделирования выполнена сравнительная оценка всех 4-х вариантов по комплексному экономико-экологическому критерию R .

Результаты моделирования приведены в табл.1.

Таблица 1

Экономико-экологические показатели вариантов подземной геотехнологии

Показатель	Единица измерения	Вариант			
		1	2	3	4
ЧДД	млн руб.	-93	1428	270	750
V_i^o	тыс. м ³	3448	3388	3448	3388
$V_i^п$	тыс. м ³	100	2954	2120	2955
η	доли ед.	34	1,15	1,63	1,15
ρ^o	т/м ³	3,0	3,0	3,0	3,0
$P_{разм}$	руб/т	107,18	107,18	107,18	107,18
E	доли ед.	0,1	0,1	0,1	0,1
t	лет	36	32	35	34
R	млн руб.	-430	1389	143	718

Заключение

В результате экономико-математического моделирования установлено, что по комплексному экономико-экологическому критерию вариант подземной геотехнологии, основанный на первоначальном вскрытии ПЗ автоуклоном из карьера и наклонным съездом с поверхности и ее разработке этажно-камерной системой с твердеющей закладкой под рудным целиком, последующем вскрытии и отработке ОЗ этажно-камерной системой с закладкой под сформированным в пределах ПЗ закладочным массивом является оптимальным за счет применения схемы вскрытия из карьера, обеспечивающей быстрый ввод подземного рудника в эксплуатацию, и системы разработки с закладкой, позволяющей утилизировать наибольший объем отходов ГОП в подземном выработанном пространстве.

Список литературы

1. Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И.В., 2018. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья*. Под ред. член-корр. РАН В.Л. Яковлева, Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 360 с.
2. Яковлев В.Л., Соколов И.В., Саканцев Г.Г., Кравчук И.Л., 2017. Исследование переходных процессов при комбинированной разработке рудных месторождений. *Горный журнал*, № 7, С. 46–50.
3. Волков Ю.В., Соколов И.В., 2011. Оптимизация подземной геотехнологии в стратегии освоения рудных месторождений комбинированным способом. *Горный журнал*, № 11, С. 41–44.
4. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., 2018. Методология выбора подземной геотехнологии освоения переходных зон при комбинированной разработке рудных месторождений. *Горный журнал*, №1, С. 22–26.
5. Соколов И.В. Антипин Ю.Г., Никитин И.В., 2017. Принципы формирования и критерий оценки геотехнологической стратегии освоения переходных зон рудных месторождений подземным способом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 9, С. 151–160.
6. Соколов И.В., Гобов Н.В., Соломеин Ю.Г, Антипин Ю.М., 2018. Стратегия освоения железорудных месторождений эколого-ориентированной подземной геотех-

нологией. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 2., С. 282–295.

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

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

9. Сашурин А.Д., 2018. Геомеханические процессы и явления, определяющие безопасность и эффективность недропользования, закономерности их развития. *Проблемы недропользования*, №3, С. 21–31.

10. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Барановский К.В., 2013. Выбор варианта вскрытия подземных запасов при комбинированной разработке месторождений на основе экономико-математического моделирования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 9, С. 357–362.

11. Erzurumlu S.S., Erzurumlu Y.O., 2015. Sustainable mining development with community using design thinking and multi-criteria decision analysis. *Resources Policy*, Vol. 46., No. 1., P. 6–14.

12. Соломеин Ю.М., Никитин И.В., 2017. Определение эколого-экономической эффективности освоения железорудных месторождений на основе экономико-математического моделирования. *Проблемы недропользования*, № 1, С. 146–153.

References

1. Yakovlev V.L., Kornilkov S.V., Sokolov I.V., 2018. *Innovatsionnyi bazis strategii kompleksnogo osvoeniya resursov mineral'nogo syr'ya* [Innovative Basis of the Strategy for Integrated Development of Mineral Resources]. Pod red. chlen-korr. RAN V.L. Yakovleva, Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 360 p.

2. Yakovlev V.L., Sokolov I.V., Sakantsev G.G., Kravchuk I.L., 2017. *Issledovanie perekhodnykh protsessov pri kombinirovannoi razrabotke rudnykh mestorozhdenii* [Study of Transient Processes by Combined Development of Ore Deposits]. *Gornyi zhurnal*, № 7, P. 46–50.

3. Volkov Yu.V., Sokolov I.V., 2011. *Optimizatsiya podzemnoi geotekhnologii v strategii osvoeniya rudnykh mestorozhdenii kombinirovannym sposobom* [Optimization of Underground Geotechnology in the Strategy of Ore Deposits Development by Combined Method]. *Gornyi zhurnal*, № 11, P. 41–44.

4. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., 2018. *Metodologiya vybora podzemnoi geotekhnologii osvoeniya perekhodnykh zon pri kombinirovannoi razrabotke rudnykh mestorozhdenii* [Methodology of selecting underground geotechnology for deployment of transition zones in the combined development of ore deposits]. *Gornyi zhurnal*, №1, P. 22–26.

5. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., 2017. *Printsipy formirovaniya i kriterii otsenki geotekhnologicheskoi strategii osvoeniya perekhodnykh zon rudnykh mestorozhdenii podzemnym sposobom* [Foundations of conformation and criteria for evaluation of geotechnological strategy for deployment of transition zones of ore deposits by underground method]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 9, P. 151–160.

6. Sokolov I.V., Gobov N.V., Solomein Yu.G., Antipin Yu.M., 2018. *Strategiya osvoeniya zhelezorudnykh mestorozhdenii ekologo-orientirovannoi podzemnoi geotekhnologii* [Strategy for Development of Iron Ore Deposits by Eco-oriented Underground Geotechnology]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 2., P. 282–295.

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

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

9. Sashurin A.D., 2018. *Geomekhanicheskie protsessy i yavleniya, opredelyayushchie bezopasnost' i effektivnost' nedropol'zovaniya, zakonomernosti ikh razvitiya* [Geomechanical Processes and Phenomena Determining the Safety and Effectiveness of Subsurface Use, Patterns of their Development]. Problemy nedropol'zovaniya, №3, P. 21–31.

10. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Baranovskii K.V., 2013. *Vybor varianta vskrytiya podzemnykh zasobov pri kombinirovannoi razrabotke mestorozhdenii na osnove ekonomiko-matematicheskogo modelirovaniya* [Alternative Choice for Opening Underground Reserves by Combined Development of Deposits Based on Economic and Mathematical Modeling]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 9, P. 357–362.

11. Erzurumlu S.S., Erzurumlu Y.O., 2015. *Sustainable mining development with community using design thinking and multi-criteria decision analysis*. Resources Policy, Vol. 46., No. 1., P. 6–14.

12. Solomein Yu.M., Nikitin I.V., 2017. *Opreделение ekologo-ekonomicheskoi effektivnosti osvoeniya zhelezorudnykh mestorozhdenii na osnove ekonomiko-matematicheskogo modelirovaniya* [Determination of Ecological and Economic Efficiency of Iron Ore Deposits Development Based on Economic and Mathematical Modeling]. Problemy nedropol'zovaniya, № 1, P. 146–153.