

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ, ГОРНЫЕ МАШИНЫ

УДК 504.55.054:622(470.6)

DOI: 10.21440/0536-1028-2022-1-58-71

Обоснование параметров подземной разработки рудных месторождений с закладкой выработанных пространств

Ляшенко В. И.^{1*}, Хоменко О. Е.², Голик В. И.³, Мицик М. Ф.⁴

¹ Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии, г. Желтые Воды, Украина

² Национальный технический университет «Днепровская политехника», г. Днепр, Украина

³ Северо-Кавказский государственный технологический университет, г. Владикавказ, Россия

⁴ Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета, г. Шахты, Россия

*e-mail: vilyashenko2017@gmail.com

Реферат

Актуальность. Основное влияние на экосистемы окружающей среды в горном производстве оказывают техногенные месторождения. Поэтому приоритетным направлением комплексных исследований является создание технологий и технических средств на основе минимизации отходов производства.

Цель исследования. Обоснование параметров подземной разработки рудных месторождений с закладкой выработанных пространств методами математического моделирования и многокритериальной минимизации отходов горного производства на основе результатов, полученных с применением методов регрессионного анализа и планирования эксперимента, обеспечивающих повышение экономической эффективности и экологической безопасности разработки рудных месторождений, а также рациональное использование и охрану недр.

Методология исследования. Определялись параметры формирования техногенных месторождений при добыче руд традиционными и альтернативными технологиями, произведен расчет параметров напряженно-деформированного состояния земной поверхности и подземных выработок. Изучались технологии перевода неактивных запасов техногенных месторождений в активные путем воздействия на них физико-химическими процессами. Расчеты параметров и регрессионных зависимостей проводились с помощью математического пакета прикладных программ «Maple 9.5». Приводимые графики построены в среде «Maple 9.5» или «Microsoft Excel» по стандартным и новым методикам.

Результаты. Показано, что сохранность массива горных пород достигается путем закладки техногенных пустот твердеющими смесями различного состава и прочности от 1,2 до 6,0 МПа. Установлено, что коэффициент структурного ослабления увеличивается к периферии до 0,15. Это означает уменьшение прочности горных пород по сравнению с ненарушенным массивом от 1,5 до 6,0 раз.

Выводы. Получены регрессионные зависимости прибыли от коэффициентов потерь и разубоживания, совокупных затрат на переработку, а также ущерба (экономических последствий) от разубоживания руды в окрестности точки оптимума. Зависимость прибыли является выпуклой, монотонно убывающей функцией, где величина прибыли тем меньше, чем больше коэффициент разубоживания руды. При увеличении коэффициента разубоживания руды до 0,6 величина прибыли упадет до 50,5 р./т, т. е. более чем на 20 %. Рекомендованы главные направления совершенствования технологий подземной разработки месторождений полезных ископаемых с учетом их комбинирования в пределах шахтного поля.

Ключевые слова: рудные и техногенные месторождения; подземная разработка; математическое моделирование; эффективность; экологическая безопасность.

Введение. Добыча полезных ископаемых в недрах и на земной поверхности формирует техногенные месторождения, запасы которых увеличиваются, при этом возрастает необходимость обеспечения промышленности минеральным сырьем [1, 2]. Отложения непереработанных минеральных масс становятся источниками растворов тяжелых металлов и солей, из чего следует необходимость ограничения объемов выдачи минеральных масс на земную поверхность, что является приоритетным направлением совершенствования технологий и технических средств разработки месторождений полезных ископаемых [3, 4]. Снижение загрязнения экосистем окружающей среды обеспечивается уменьшением потерь и разубоживания минерального сырья в процессе его добычи и переработки [5, 6]. Данная статья является продолжением выполненных ранее исследований, основные теоретические и экспериментальные результаты которых приведены в [7–10].

Цель работы. Обоснование параметров подземной разработки рудных месторождений с закладкой выработанных пространств методами математического моделирования и многокритериальной минимизации отходов горного производства на основе результатов, полученных с применением методов регрессионного анализа и планирования эксперимента, обеспечивающих повышение экономической эффективности и экологической безопасности разработки рудных месторождений, а также рациональное использование и охрану недр.

Для реализации поставленной цели авторами решены задачи:

- **выполнен расчет** прочностных характеристик обнажений земной поверхности для сохранения ее от разрушения;
- **определен параметры** регулирования величин напряжений в разнoprочных участках, обеспечивающие надежность и безопасность выемки руды в зависимости от времени существования обнажений;
- **исследованы и получены** зависимости прибыли от экономических последствий, коэффициентов потерь и разубоживания руды, эксплуатационных и суммарных затрат на добычу руды.

Методы исследований. Определялись параметры формирования техногенных месторождений при добыче руд традиционными и альтернативными технологиями. Выполнен расчет параметров напряженно-деформированного состояния земной поверхности и подземных выработок. Изучались технологии перевода неактивных запасов техногенных месторождений в активные путем воздействия на них физико-химическими процессами. Расчеты параметров и показателей подземной разработки рудных месторождений с закладкой выработанных пространств и регрессионных зависимостей проводились с помощью математического пакета прикладных программ «Maple 9.5». Приводимые графики строились в среде «Maple 9.5» или «Microsoft Excel». Использовались методы регрессионного и корреляционного анализа в применении их к статистическим данным работы ряда рудников, планирования эксперимента по плану Бокса по стандартным и новым методикам.

Обсуждение и оценка полученных результатов. Основное влияние на экосистемы окружающей среды в горном производстве оказывают техногенные месторождения. Поэтому приоритетным направлением исследований является создание технологий и технических средств на основе минимизации отходов производства. Часто запроектированная мощность предприятия в процессе эксплуатации осваивается лишь на 60 %, а по конечной продукции всего на 50 %. Так, на ЗАО «Урупский ГОК»

(Карачаево-Черкесская Республика, п. Медногорский, Российской Федерации) запасы металлов подтвердились только на 48 %. Критерий оптимальности горнорудного предприятия может быть представлен в виде показателей, характеризующих экономическую эффективность варианта по сравнению с базовым не только в сфере производства, но и в сфере потребления руд, концентратов и металлов. Техническое перевооружение действующих предприятий и комплексное использование минеральных ресурсов обычно в 2–3 раза более эффективны по сравнению со строительством новых предприятий [11, 13].

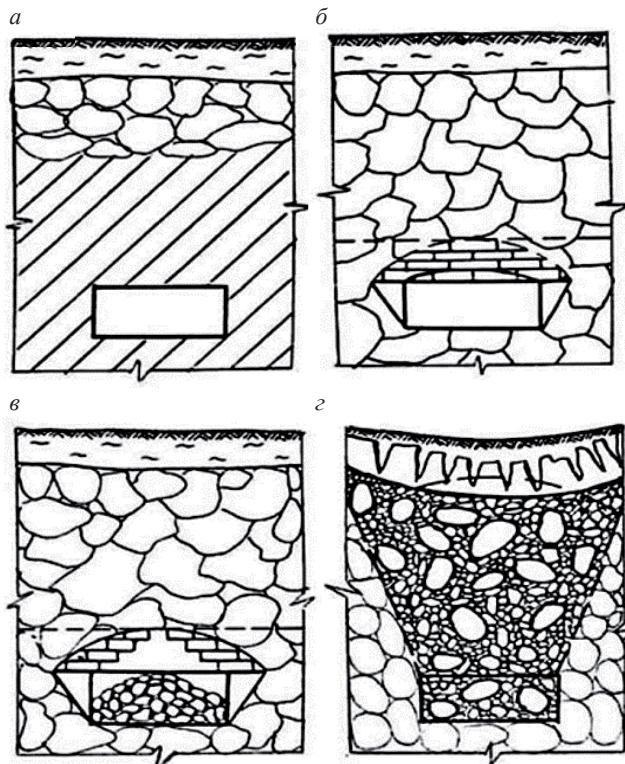


Рисунок 1. Влияние пустот на земную поверхность (схемы):
а – перекрытие из прочных пород; б – плоская кровля при самоупрочнении пород; в – обрушение пород, не достигающее земной поверхности; г – обрушение пород с вовлечением в процесс земной поверхности

Figure 1. Influence of voids on the earth's surface (schemes):
a – roofing of hard rocks; б – flat roof under self-hardening of rocks;
в – rock caving below the earth's surface; г – rock caving involving
the earth's surface

Теория вопроса. В практике наиболее распространены следующие способы погашения пустот: обрушением вмещающих пород; изоляцией пустот; твердеющей закладочной смесью и комбинированное погашение (рис. 1). В работах [14, 15] показано, что наибольшее влияние на прибыль оказывает фактор разубоживания руды. Сохранность массива горных пород и земной поверхности описывается вероятностной моделью твердой дискретной среды с параметрами распределения, которые рассчитываются методом максимального подобия. Несущая способность массива горных пород и земной поверхности зависит от напряжений в элементах системы и предполагает возможность управления напряжениями посредством

ограничения деформаций с помощью закладки техногенных пустот твердеющими смесями различного состава и прочности:

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 = \sigma_n K_1 K_2 K_3 K_4,$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения в зоне нетронутых пород, влияния очистных работ и закладочном массиве соответственно, МПа; σ_n – нормативное сопротивление закладки на сжатие, МПа; K_1, K_2, K_3, K_4 – коэффициенты неоднородности горного массива, неоднородности закладочного массива, увеличения прочности закладки со временем и в массиве соответственно, ед.

Напряжение в результате заполнения пустот твердеющими смесями:

$$\sigma_m = n_1 \sigma_{n3} + n_2 \sigma_{c3} + n_3 \sigma_{m3} + n_4 \sigma_{n3} + n_5 \sigma^{ocm} + \sum_1^{\ell} n_\ell \sigma_m^y,$$

где $\sigma_{n3}, \sigma_{c3}, \sigma_{m3}, \sigma_{n3}$ – величины подпора, прочного, среднепрочного и малопрочного состава твердеющих смесей соответственно, МПа; ℓ – число упрочняющих элементов; n_1, \dots, n_5 – массовое число материала в количестве смеси; σ_m^y – прочность твердеющих смесей, МПа; σ^{ocm} – остаточная прочность энергонарушенного горного массива, МПа.

Сформулируем оптимизационную задачу по управлению состоянием массива пород при заполнении его твердеющими смесями в зависимости от величины потерь и разубоживания руды:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\leq \sigma_2 \leq \sigma_3 = \sigma_n K_1 K_2 K_3 K_4; \\ \Pi_{yt} &= \Pi_t - Z_t - Y_{Tbal} - Y_{TRS} - Y_{TRP}; \\ B_a &= B_c \mathcal{E}_b, \end{aligned}$$

где Π_{yt} – прибыль от добычи и переработки руды, р./т; Π_t – ценность добытой руды, р./т; Z_t – полные затраты на добычу и переработку руды, р./т; $Y_{Tbal}, Y_{TRS}, Y_{TRP}$ – ущерб (экономические последствия) от 1 т потерянной балансовой руды, разубоживающей массы по контуру эксплуатационного блока и ее переработки соответственно, р./т; B_a, B_c – количество утилизируемых и стандартных вяжущих соответственно, вес. ед.; \mathcal{E}_b – коэффициент эквивалентности вяжущего материала (Эквивалент активности – количество активированного вяжущего из отходов, равносенное по вяжущим свойствам цементу. Он определяется косвенным методом по рациональному соотношению вяжущих).

Технологии добычи принципиально различаются способами управления массивом: без заполнения пустот и с заполнением. При 1-м варианте, как показал статистический анализ на основе выборок средней размерности 100 наблюдений на уровне значимости 5 %, при низких эксплуатационных расходах неизбежны повышенные потери и разубоживание руды. При 2-м варианте обеспечиваются минимальные потери и разубоживание руды, но возрастают расходы на управление массивом путем закладки дорогостоящим материалом [16, 17].

Экономическое сравнение технологий разработки проводится на основе экономико-математической модели путем сравнения значений точек оптимума для целевых функций и выбора значений параметров, соответствующих точке оптимума по конечной продукции с учетом извлечения металла.

Основные показатели по очистной выемке приняты по данным отчетов и проектов отработки месторождения:

$$\Pi_{УТТ} = \left[3_{To} \left(1 - \frac{Q'_h + Q'_g}{Q_6} \right) + \frac{3_{3K}}{\rho} \left(1 + \frac{Q''_h + Q''_n}{Q_6} \right) + 3_{Th} \frac{Q'_h + Q''_h}{Q_6} + 3_{Tn} \frac{Q'_n + Q''_n}{Q_6} \right] - \Delta\gamma_T \Pi_{Tбат} - \frac{R_s}{(1-R_s)P} \left[\left(3_{To} + \frac{3_{3K}}{\rho} \right) + (1-\Delta\gamma_T) Y_{TBS} \right] - \frac{1-P}{P} \times \left[3_{Tбд} - B \left(3_{To} + \frac{3_{3K}}{S} \right) \right] + \frac{(1-P)(1-B)(1-\varepsilon)}{P} (1-\Delta\gamma_T) Y_{TRP},$$

где $\Pi_{Tбат}$ – ценность теряемой руды с содержанием металла α_T р.; 3_{To} , 3_{Th} , 3_{Tn} , 3_{3K} – затраты на отбойку, выпуск и транспортировку руды, на нарезные, горно-подготовительные и закладочные работы соответственно, р.; Q_6 , Q_h , Q'_n , Q''_n – объемы руды, пород и забалансовой руды в границах рудного тела, а также нарезных и горно-подготовительных работ по руде и породе соответственно, м³; ρ – плотность руды, т/м³; $3_{Tбд}$ – затраты на добычу теряемой балансовой руды, р.; R_s – разубоживание руды, т; P – потери руды, т; B – количество разубоживающих пород, т; ε – содержание металла в разубоживающих породах, доли ед.

Исходные данные и технико-экономические показатели приведены в табл. 1. Моделированием по оптимальным значениям полученных параметров было установлено, как изменяется прибыль предприятия в зависимости от величины потерь и разубоживания по конечному продукту. На основе экспериментальных и расчетных показателей создан симметричный план Бокса B_4 по данным практики Садонского свинцово-цинкового комбината (пос. Мизур, Северный Кавказ, РСО-Алания) в период нормальной работы предприятия.

Доля разубоживания составляет 65–67 %, что позволяет использовать его в качестве основного критерия оптимизации. Значения независимых фиктивных переменных, обеспечивающие минимальные затраты на добычу: $X_1 = -1$; $X_2 = +1$; $X_3 = -1$; $X_4 = +1$.

График зависимости суммарных затрат от параметра X_4 – разубоживание руды при оптимальных значениях переменных X_1 , X_2 , X_3 – представлен на рис. 2.

В переводе на натуральный масштаб основные параметры оптимизационной задачи составляют: добыча руды – 200 тыс. т/год; содержание металлов в руде – 5 %; потери – 6 %; разубоживание – 25 %. Значение затрат в точке оптимума составляет 280 р./т. Аналогичным образом рассчитываются суммарные затраты на производство концентратов, р./т:

$$3_{Tпр} = 36,65 - 7,70 X_1 + 0,0058 X_2 + 0,305 X_3 + \\ + 1,47 X_1^2 + 0,03 X_2^2 + 0,58 X_3^2 - 0,01 X_1 X_2,$$

где X_1 – затраты на отбойку, р./т; X_2 – затраты на транспортировку, р./т; X_3 – затраты на обогащение, р./т.

Результаты моделирования показывают, что наиболее сильное влияние на затраты оказывают процесс обогащения руд или компенсация разубоживания на этапе горного передела. Ведущим направлением модернизации технологий подземной разработки месторождений полезных ископаемых является их комбинирование в пределах шахтного поля.

Экономическая эффективность комбинирования технологий определяется сравнением подземной выемки кондиционных руд с извлечением металлов на фабрике (традиционный метод) и подземного выщелачивания (инновационный метод) металла, в том числе из бедных и забалансовых руд и хвостов обогащения. Комбинирование традиционного и инновационного методов означает выбор различных значений для параметров оптимизации с учетом допустимых. Показатели комбинированной разработки определяются для золоторудного месторождения с условиями: глубина горных работ до 400 м, на этапе 1 в течение года добывается с переработкой на заводе 40 000 т балансовых руд с содержанием 7 г/т, на этапе 2 перерабатывается 60 000 т балансовых руд с содержанием 3 г/т выщелачиванием на месте залегания, а 40 000 т хвостов обогащения содержанием 0,5 г/т выщелачиваются в штабелях с комбинированной механохимической активацией [18, 19].

Таблица 1. Технико-экономические показатели сравнения вариантов разработки
Table 1. Technical and economic indicators of options of development comparison

Показатель	Вариант 1	Вариант 2
Удельный вес технологии, %	100	100
Объем очистной выемки на 1 т запасов, м ³ /т	0,63	0,52
Расход горно-подготовительных работ на 1 т запасов, м ³ /т	0,087	0,056
Потери, %	15	5
Разубоживание, %	30	15
Доля руды, поступающей на рудообогатительную фабрику, %	50	50
Средний выход хвостов обогащения, %	21	21
Месячная производительность блока, тыс./м ³	1,6	1,8
Годовая производительность блока, тыс./м ³	18,8	21,2
Трудоемкость очистной выемки, чел.-см/м ³	0,11	0,98
Отрабатываемые балансовые запасы, %	100	100
Выход руды на 1 т балансовых запасов	1,2	1,8
Количество добытой горной массы, %	105	100
Качество добытой руды, %	90	100
Извлечение металла в готовую продукцию, %	91	100
Затраты на выемку 1 м ³ горной массы, р./м ³	16,3	21,2
Прибыль на 1 т балансовых запасов, р./т	52,2	57,2
Экономический эффект на 1 т запасов, р./т	-4,5	0
Годовой экономический эффект (ущерб), тыс. р.	-1700	0

По итогам обработки результатов эксперимента и отсева статистически незначимых коэффициентов регрессии получены уравнения регрессии, оказавшиеся статистически надежными на уровне значимости 0,05.

Модель экономической эффективности комбинирования технологий на этапах разработки месторождения с независимыми переменными в безразмерном масштабе такова:

$$W = -0,365X_1 + 68288,391X_2 + 0,437X_3 + 2215,482X_4,$$

где W – прибыль, р./т; X_1 – количество горной массы, т; X_2 – содержание золота в руде, г/т; X_3 – извлечение золота из руды, т; X_4 – рудничная себестоимость, р./т.

Коэффициент детерминации: $R^2 = 0,9991$. Расчетное значение критерия Фишера $F_{\text{расч}} = 1662,35$. Табличное значение критерия Фишера $F_{\text{табл}} = 19,25$. Поскольку $F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$, зависимость принимается как правдоподобная. Так как коэффициенты при X_1 и X_3 во много раз меньше коэффициентов при X_2 и X_4 , то факторы X_1 и X_3 практически не оказывают влияния на показатель прибыли [20, 21].

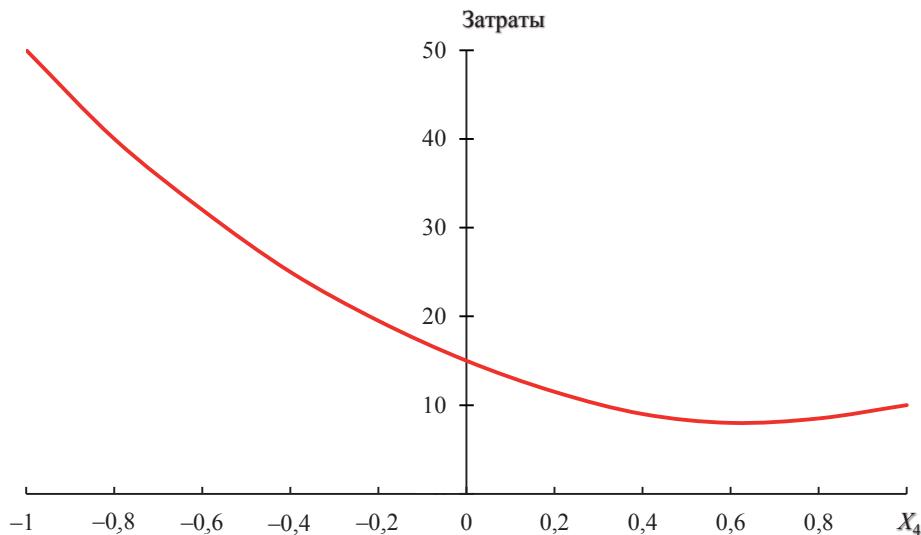


Рисунок 2. Зависимость суммарных затрат на добычу руды от ее разубоживания (экономические последствия) в окрестности точки оптимума
Figure 2. Dependence between the total expenditures for ore mining and its dilution (economic results) at a point of optimum

Влияние фактора X_2 больше, чем фактора X_4 , поскольку коэффициент при X_2 на порядок больше. Наиболее сильное влияние на результативный показатель прибыли оказывает фактор содержания золота в руде. Доля затрат на горные работы в структуре рудничной себестоимости превышает 50 %, что позволяет использовать эти затраты в качестве основного критерия оптимизации, а также для оценки экономической эффективности комбинирования этапов разработки месторождения [22, 23]. Оценка эффективности комбинированных способов разработки рудных месторождений с оптимизацией по критерию полноты использования недр производится на основании результатов экономико-математического моделирования (табл. 2–4).

Математическая модель зависимости между факторами X_1, X_2, X_3, X_4 по симметричному плану Бокса [24, 25]:

$$X_4 = 23,092 - 0,005X_1^2 + 3,657X_2^2 + 0,015X_1 - 0,423X_1X_2 + 17,768X_2.$$

Модель указывает на наиболее тесную связь между факторами X_2 и X_4 , так как коэффициент при X_2 на порядок больше остальных коэффициентов.

Поэтапное извлечение запасов рудных месторождений объясняется трехмерным нормальным законом распределения руд по процентному содержанию металла, параметры которого определяются на основе статистического анализа данных при выемке руд [26]. Извлекаемая ценность руды закономерно повышается после

ее обогатительного и металлургического передела, поэтому процесс оптимизации производства металлов должен осуществляться способом компромиссного оптимума – нахождением такой точки, в которой значение целевой функции близко к оптимальному по каждому из переделов в отдельности.

Внедрение результатов исследований. Приведенное обоснование расчета параметров извлечения руды позволяет предложить новые природоохранные и ресурсосберегающие технологии и технические средства, дающие положительные результаты при подземной разработке рудных месторождений сложной структуры в Российской Федерации, Республике Казахстан, Украине и др. развитых горнодобывающих странах мира [27, 28].

Таблица 2. Показатели комбинированного извлечения золота на этапах добычи
Table 2. Indicators of combined methods of gold recovery at the stage of production

Показатель	Этап 1	Этап 2	Этап 3	Всего
Горно-капитальные работы, \$/т	1,9	1,15	–	–
Горно-подготовительные работы, \$/т	3,8	5,0	–	–
Очистные работы, \$/т	3,2	4,0	–	–
Горные работы (всего), \$/т	8,9	10,15	–	–
Закладочные работы, \$/т	2,7	–	–	–
Подземный транспорт, \$/т	0,5	0,39	–	–
Подъем и сортировка, \$/т	0,73	0,18	–	–
Проветривание, \$/т	1,2	0,31	–	–
Водоотлив (перекачка растворов), \$/т	0,3	1,17	–	–
Оборудование куч выщелачивания, \$/т	–	–	1,0	–
Выщелачивание хвостов, \$/т	–	–	1,0	–
Общерудничные расходы, \$/т	3,85	2,45	–	–
Рудничная себестоимость, \$/т	18,3	14,9	2,0	–
Количество горной массы, т	40 000	60 000	40 000	140 000
Содержание золота, г/т	7	3	0,5	–
Количество золота в горной массе, г	280 000	180 000	20 000	480 000
Извлечение золота, %	90	60	60	77
Добыто золота, г	252 000	108 000	12 000	372 000
Продажная цена, \$/г	10	10	10	10
Рыночная цена, \$/г	12	12	12	12
Прибыль, \$	504 000	216 000	24 000	744 000
Эффективность, %	100	–	–	148

Перспективные направления исследований. Безопасность горного производства обеспечивается минимизацией объемов добываемых минералов и утилизацией уже выданного на поверхность некондиционного сырья. Экологическая безопасность горного производства предполагает управление процессом формирования техногенных отвалов пород при разработке природных месторождений и перевodom неактивных запасов техногенных месторождений в активные, воздействуя на них физико-химическими процессами.

Традиционные методы переработки не позволяют ликвидировать запасы техногенных месторождений, что влечет необходимость создания альтернативных способов переработки породных отвалов для извлечения полезных компонентов

из сырья. Перспективным направлением исследований становятся альтернативные способы переработки сырья на основе технологических процессов добычи по критерию минимизации отходов производства. Полученные результаты позволяют комплексно оценить эффективность проекта в целом и разработать способы его реализации. Достижение целей проекта возможно на основе анализа параметров технологических процессов традиционной и альтернативной технологий добычи руд и их переработки [29, 30].

Таблица 3. Граничные условия независимых переменных по уровням
Table 3. Boundary conditions of variables by levels

Показатель	Уровень			
	Нижний, -1	Средний, 0	Верхний, +1	Интервал, Δ
Количество горной массы, тыс. т (X_1)	40	90	140	50
Содержание золота в руде, г/т (X_2)	0,50	3,75	7,00	3,25
Извлечение золота из руды, % (X_3)	60	75	90	15
Рудничная себестоимость, \$/т (X_4)	2,00	10,15	18,30	8,15

Выводы. Параметры массива горных пород описываются вероятностной трехмерной моделью твердой дискретной среды на основе метода максимального подобия, учитывающей напряжения на различных участках массива с возможностью управления главными напряжениями посредством закладки техногенных пустот твердеющими смесями разного состава и прочности – от 1,2 до 6,0 МПа. Так, в зоне нарушенных пород мощностью от 0,5 до 10 м коэффициент ослабления снижается от 0,25 до 1,15. Зона повышенной ослабленности имеет мощность 0,5–1,5 м. Коэффициент структурного ослабления увеличивается к периферии до 0,15, что означает уменьшение прочности в сравнении с ненарушенным массивом от 1,5 до 6,0 раз.

Таблица 4. Граничные условия независимых переменных по этапам
Table 4. Boundary conditions of variables by stages

Показатель	Этап 1		Этап 2		Этап 3		Всего	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Количество горной массы, тыс. т (X_1)	20	60	40	80	20	60	80	200
Содержание золота в руде, г/т (X_2)	5	9	2	5	1	3	1	9
Извлечение золота из руды, % (X_3)	70	90	60	70	50	60	50	90
Рудничная себестоимость, \$/т (X_4)	19,2	12,0	10,7	19,2	5,2	14,9	5,2	19,2

Получены регрессионные зависимости прибыли от коэффициентов потерь и разубоживания, показателей выемки грунта, совокупных затрат на переработку, а также ущерба (экономических последствий) от разубоживания руды в окрестности точки оптимума. Зависимость прибыли является выпуклой, монотонно убывающей функцией, где величина прибыли тем меньше, чем больше коэффициент разубоживания руды. При увеличении коэффициента разубоживания руды до 0,6 величина прибыли упадет до 50,5 р./т, т. е. более чем на 20 %. Таким образом, влияние фактора разубоживания руды тем сильнее, чем больше его величина.

Рекомендованы главные направления модернизации технологий подземной разработки месторождений полезных ископаемых с учетом их комбинирования в пре-

делах шахтного поля. Так, для золоторудного месторождения с условиями: глубина горных работ до 400 м на этапе 1 в течение года добывается с переработкой на заводе 40 000 т балансовых руд с содержанием 7 г/т, на этапе 2 перерабатывается 60 000 т балансовых руд с содержанием 3 г/т выщелачиванием на месте залегания, и 40 000 т хвостов обогащения содержанием 0,5 г/т выщелачиваются в штабелях с комбинированной механохимической активацией.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhanchiv B., Rudakov D., Khomenko O., Tsendlzhav L. Substantiation of mining parameters of Mongolia uranium deposits // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2013. No. 4. P. 10–18.
2. Chetveryk M., Bubnova O., Babiy K. The rate of deformation development in the rock massif on the basis of surveying monitoring on the earth surface // Mining of Mineral Deposits. 2017. No. 11(1). P. 57–64. <https://doi.org/10.15407/mining11.01.057>
3. Rysbekov K., Huayang D., Kalybekov T., Sandybekov M., Idrissov K., Zhakypbek Y., Bakhmagambetova G. Application features of the surface laser scanning technology when solving the main tasks of surveying support for reclamation // Mining of Mineral Deposits. 2019. No. 13(3). P. 40–48. <https://doi.org/10.33271/mining13.03.040>
4. Kalinichenko V., Dolgikh O., Dolgikh L., Pysmennyyi S. Choosing a camera for mine surveying of mining enterprise facilities using unmanned aerial vehicles // Mining of Mineral Deposits. 2020. No. 14(4). P. 31–39. <https://doi.org/10.33271/mining14.04.031>
5. Хомяков В. И. Зарубежный опыт закладки на рудниках. М.: Недра, 1984. 224 с.
6. Добыча и переработка урановых руд в Украине: монография / под ред. А. П. Чернова. Киев: Адеф–Украина, 2001. 238 с.
7. Ляшенко В. И., Голик В. И. Научное и конструкторско-технологическое сопровождение развития уранового производства. Достижения и задачи // ГИАБ. 2017. № 7. С. 137–152.
8. Хоменюк О. Е., Ляшенко В. И. Рациональное использование и охрана недр при подземной разработке рудных месторождений в условиях техногенеза // Разведка и охрана недр. 2019. № 4. С. 60–65.
9. Голик В. И., Комащенко В. И., Ляшенко В. И. Рациональное использование и охрана недр при комбинированной разработке рудных месторождений // Разведка и охрана недр. 2019. № 11. С. 47–52.
10. Ляшенко В. И., Голик В. И., Дятчин В. З. Повышение экологической безопасности снижением техногенной нагрузки в горнодобывающих регионах // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 7. С. 529–538. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-529-538
11. Bondarenko V., Kovalevska I., Svystun R., Cherednichenko Yu. Optimal parameters of wall bolts computation in the united bearing system of extraction workings frame-bolt support // Annual Scientific-Technical Collection – Mining of Mineral Deposits. 2013. P. 5–9.
12. Чистяков Е. П. Совершенствование способов поддержания подземных горных выработок шахт Криворожского бассейна // Вісник Криворізького технічного університету. 2006. № 13. С. 16–20.
13. Еременко В. А., Есина Е. Н., Семенякин Е. Н. Технология оперативного мониторинга напряженно-деформированного состояния разрабатываемого массива горных пород // Горный журнал. 2015. № 8. С. 42–47.
14. Трунова И. А., Сидоренко Р. В., Вакал С. В., Карпович Э. А. Анализ основных направлений утилизации фосфогипса – отхода производства фосфорной кислоты // Екологічна безпека. 2010. № 2/10. С. 31–35.
15. Трубецкой К. Н. Развитие ресурсосберегающих и ресурсоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения месторождений полезных ископаемых. М.: ИПКОН РАН, 2014. 196 с.
16. Jonson D. Controlled shock waves and vibrations during large and intensive blasting operations under Stockholm city // Workshop on Tunneling by Drilling and Blasting hosted by the 10th Int. Symp. on Fragmentation due to Blasting (Fragblast 10). New Delhi, India, 24–25 November, 2012. P. 49–58.
17. Monalas F. I., Arusu T. Blasting works in urban area: a Singapore case study // Workshop on Tunneling by Drilling and Blasting hosted by the 10th Int. Symp. on Fragmentation due to Blasting (Fragblast 10). New Delhi, India, 24–25 November, 2012. P. 23–30.
18. Gupta I. D., Trapathy G. R. Comparison of construction and mining blast with specific reference to structural safety // Indian Mining and Engineering Journal. 2013. Vol. 54. No. 4. P. 13–17.
19. Каплунов Д. Р., Радченко Д. Н. Принципы проектирования и выбор технологий освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников // Горный журнал. 2017. № 11. С. 121–125.
20. Рудмин М. А., Мазуров А. К., Рева И. В., Стеблецов М. Д.. Перспективы комплексного освоения Бакчарского железорудного месторождения (Западная Сибирь, Россия) // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2018. № 10. С. 87–99.
21. Мухаметшин В. В., Андреев В. Е. Повышение эффективности оценки результативности технологий, направленных на расширение использования ресурсной базы месторождений с трудноизвлекаемыми запасами // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2018. № 329(8). С. 30–36.

22. Каряев В. И., Комков А. А., Кузнецов А. В., Плотников И. П. Извлечение меди и цинка из медеплавильных шлаков при восстановительно-сульфидирующей обработке // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2020. Т. 18. № 2. С. 4–12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-2-4-12>
23. Volkov E. P., Anushenkov A. N. Developing the technology of mine stowing with processing tailings based hardening blends // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal. 2019; 7: 5–13. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-5-13
24. Крупская Л. Т., Голубев Д. А., Растворина Н. К., Филатова М. Ю. Рекультивация поверхности хвостохранилища закрытого горного предприятия Приморского края с использованием биоремедиации // ГИАБ. 2019. № 9. С. 138–148. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-138-148
25. Antonelli C., Feder C. The new direction of technological change in the global economy // Structural Change and Economic Dynamics. 2020. No. 52. P. 1–12.
26. Хоботова Э. Б., Игнатенко М. И., Беличенко Е. А., Поникаровская С. В. Радиационные свойства отходов угледобывающей и теплоэнергетической отраслей // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 8. С. 60–67. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-8-60-67
27. Lazareva E., Anopchenko T., Murzin A. Human capital in the system of urban territory sustainable development management // Springer Geography. 2020. P. 269–277.
28. Комарова О. Г., Стровский В. Е., Перегон И. В. Инновационность горных предприятий с позиции значимости человеческого капитала // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 2. С. 52–58. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-2-52-58
29. Голик В. И., Разоренов Ю. И., Вагин В. С., Ляшенко В. И. Исследование и разработка составов твердеющей смеси на основе нетрадиционных отходов производства // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 3. С. 13–27. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-13-27
30. Хоменко О. Е., Кононенко М. Н., Ляшенко В. И. Охрана недр при разработке сопутствующих ископаемых в энергонарушенных массивах пород // Разведка и охрана недр. 2021. № 4. С. 61–68.

Поступила в редакцию 24 мая 2021 года

Сведения об авторах:

Ляшенко Василий Иванович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела государственного предприятия Украинского научно-исследовательского и проектно-изыскательского института промышленной технологии. E-mail: vilyashenko2017@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8361-4179>

Хоменко Олег Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры подземной разработки месторождений Национального технического университета «Днепровская политехника». E-mail:rudana.in.ua@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7498-8494>

Голик Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного дела Северо-Кавказского государственного технологического университета. E-mail: v.i.golik@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>

Мицк Михаил Федорович – кандидат технических наук, доцент кафедры математики и прикладной информатики Института сферы обслуживания и предпринимательства филиала Донского государственного технического университета. E-mail: m_mits@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6746-2053>

DOI: 10.21440/0536-1028-2022-1-58-71

Justifying the parameters of ore fields underground mining with goaf backfilling

Vasili I. Liashenko¹, Oleg E. Khomenko², Vladimir I. Golik³, Mikhail F. Mitsik⁴

¹ Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology, Zhovti Vody, Ukraine.

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

³ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.

⁴ Institute of Service and Business (branch) of Don State Technical University, Shakhty, Russia.

Abstract

Relevance. Manmade deposits have a major impact on environmental ecosystems in mining. Therefore, the priority direction of comprehensive research is the creation of technologies and technical means based on minimizing production waste.

Research objective is to justify the parameters of ore fields underground mining with goaf backfilling using mathematical modeling and multi-criteria minimization of mining waste based on the results obtained by the regression analysis and planning of an experiment, ensuring economic efficiency and environmental safety growth, as well as subsoil rational use and protection.

Methods of research. The parameters of technogenic deposit formation when extracting ore by traditional and alternative technologies were determined. The earth's surface and underground working stress-strain state parameters were calculated. The technologies of converting inactive reserves of technogenic deposits into active ones by influencing them by physicochemical processes were studied. Parameters and regression dependences were calculated using the Maple 9.5 mathematical software package. The presented graphs were built in Maple 9.5 or Microsoft Excel using standard and new methods.

Results. It is shown that the preservation of the rock mass implies the possibility of controlling the main stresses by limiting their deformations by filling technogenic voids with hardening mixtures of different composition and strength from 1.2 to 6.0 MPa. The structural weakening coefficient increases towards the periphery to 0.15, which means a decrease in strength in comparison with the undisturbed massif from 1.5 to 6.0 times.

Conclusions. The regression dependences of profit on the coefficients of losses and dilution, indicators of soil excavation, total processing costs, as well as damage (economic consequences) from dilution of ore in the vicinity of the optimum point are obtained. The profit dependence is a convex monotonically decreasing function, where the profit value is the smaller; the greater the ore dilution coefficient. With an increase in the ore dilution coefficient to 0.6, the profit value will fall to 50.5 rubles/t, i.e. more than 20%. The main directions of modernization of technologies for underground mining of mineral deposits are recommended, taking into account their combination within a single mine field.

Keywords: ore and technogenic deposits; underground mining; mathematical modeling; efficiency; environmental safety.

REFERENCES

1. Zhanchiv B., Rudakov D., Khomenko O., Tsendlzhav L. Substantiation of mining parameters of Mongolia uranium deposits. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2013; 4: 10–18.
2. Chetverik M., Bubnova O., Babiy K. The rate of deformation development in the rock massif on the basis of surveying monitoring on the earth surface. *Mining of Mineral Deposits*. 2017; 11(1): 57–64. Available from: <https://doi.org/10.15407/mining11.01.057>
3. Rysbekov K., Huayang D., Kalybekov T., Sandybekov M., Idrissov K., Zhakypbek Y., Bakhmagambetova G. Application features of the surface laser scanning technology when solving the main tasks of surveying support for reclamation. *Mining of Mineral Deposits*. 2019; 13(3): 40–48. Available from: <https://doi.org/10.33271/mining13.03.040>
4. Kalinichenko V., Dolgikh O., Dolgikh L., Pysmennyyi S. Choosing a camera for mine surveying of mining enterprise facilities using unmanned aerial vehicles. *Mining of Mineral Deposits*. 2020; 14(4): 31–39. Available from: <https://doi.org/10.33271/mining14.04.031>
5. Kholomakov V. I. *International practice of mine backfill*. Moscow: Nedra Publishing; 1984. (In Russ.)
6. Chernov A. P. (ed.) *Uranium ore mining and processing in the Ukraine: monograph*. Kiev: Adef-Ukraina Publishing; 2001. (In Russ.)
7. Liashenko V. I., Golik V. I. Scientific and engineering supervision of uranium production development achievements and challenges. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 7: 137–152. (In Russ.)
8. Khomenko O. E., Liashenko V. I. Rational use and protection of subsurface resources in the underground mining of ore deposits in conditions of technogenesis. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2019; 4: 60–65. (In Russ.)
9. Golik V. I., Komashchenko V. I., Liashenko V. I. Rational use and protection of surfaces in combined development of ore deposits. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2019; 11: 47–52. (In Russ.)
10. Liashenko V. I., Golik V. I., Diatchin V. Z. Increasing environmental safety by reducing technogenic load in mining regions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2020; 63(7): 529–538. (In Russ.) Available from: doi: 10.17073/0368-0797-2020-7-529-538
11. Bondarenko V., Kovalevska I., Svystun R., Cherednichenko Yu. Optimal parameters of wall bolts computation in the united bearing system of extraction workings frame-bolt support. *Annual Scientific-Technical Collection – Mining of Mineral Deposits*. 2013: 5–9.
12. Chistiakov E. P. Improving the methods of supporting underground workings in mines of the Kryvyi Rih Basin. *Visnik Krivorizkogo tekhnichnogo universitetu = Proceedings of Kryvyyi Rih National University*. 2006; 13: 16–20. (In Russ.)
13. Eremenko V. A., Esina E. N., Semeniakin E. N. The technology of the strain-stressed state on-line monitoring of the exploited rock mass. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2015; 8: 42–47. (In Russ.)

14. Trunova I. A., Sidorenko R. V., Vakal S. V., Karpovich E. A. Analysis of basic directions of utilization of fosfogips – departure of production of phosphoric acid. *Ekologichna bezpeka = Environmental security*. 2010; 2/10: 31–35.
15. Trubetskoi K. N. *Developing resource-saving and resource-reproducing geotechnologies of integrated development of minerals*. Moscow: IPKON RAS Publishing; 2014. (In Russ.)
16. Jonson D. Controlled shock waves and vibrations during large and intensive blasting operations under Stockholm city. In: *Workshop on Tunneling by Drilling and Blasting hosted by the 10th Int. Symp. on Fragmentation due to Blasting (Fragblast 10)*. New Delhi, India, 24–25 November, 2012. P. 49–58.
17. Monalas F. I., Arusu T. Blasting works in urban area: a Singapore case study. In: *Workshop on Tunneling by Drilling and Blasting hosted by the 10th Int. Symp. on Fragmentation due to Blasting (Fragblast 10)*. New Delhi, India, 24–25 November, 2012. P. 23–30.
18. Gupta I. D., Trapathy G. R. Comparison of construction and mining blast with specific reference to structural safety. *Indian Mining and Engineering Journal*. 2013; 54(4): 13–17.
19. Kaplunov D. R., Radchenko D. N. Design philosophy and choice of technologies of sustainable development of underground mines. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2017; 11: 121–125. (In Russ.)
20. Rudmin M. A., Mazurov A. K., Reva I. V., Stebletsov M. D. Prospects of integrated development of Bakchar iron deposit (Western Siberia, Russia). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018; 10: 87–99. (In Russ.)
21. Mukhametshin V. V., Andreev V. E. Increasing the efficiency of assessing the performance of techniques aimed at expanding the use of resource potential of oilfields with hard-to-recover reserves. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018; 329(8): 30–36. (In Russ.)
22. Kariaev V. I., Komkov A. A., Kuznetsov A. V., Plotnikov I. P. Recovery of copper and zinc from copper smelting slags during reducing-sulfidizing treatment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2020; 18(2): 4–12. Available from: <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-2-4-12>
23. Volkov E. P., Anushenkov A. N. Developing the technology of mine stowing with processing tailings based on hardening blends. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 7: 5–13. Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2019-7-5-13
24. Krupskaia L. T., Golubev D. A., Rastanina N. K., Filatova M. Iu. Reclamation of tailings storage surface at a closed mine in the Primorsky Krai by bio remediation. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2019; 9: 138–148. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-138-148
25. Antonelli C., Feder C. The new direction of technological change in the global economy. *Structural Change and Economic Dynamics*. 2020; 52: 1–12.
26. Khobotova E. B., Ignatenko M. I., Belichenko E. A., Ponikarovskaia S. V. Radiation properties of coal and thermal industries waste. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2020; 8: 60–67. (In Russ.) Available from: doi: 10.24000/0409-2961-2020-8-60-67
27. Lazareva E., Anopchenko T., Murzin A. Human capital in the system of urban territory sustainable development management. *Springer Geography*. 2020: 269–277.
28. Komarova O. G., Strovskii V. E., Peregor I. V. Mining enterprises innovativeness from the point of view of human capital significance. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 2: 52–58. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2020-2-52-58
29. Golik V. I., Razorenov Iu. I., Vagin V. S., Liashenko V. I. Study and development of hardening mixture composition base on unconventional industrial waste. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 3: 13–27. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2021-3-13-27
30. Khomenko O. E., Kononenko M. N., Liashenko V. I. Mining protection in the development of consistent mines. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2021; 4: 61–68. (In Russ.)

Received 24 May 2021

Information about authors:

Vasilii I. Liashenko – PhD (Engineering), Senior Researcher, Head of the Research and Development Department, Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology. E-mail: vilyashenko2017@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8361-4179>

Oleg E. Khomenko – DSc (Engineering), professor of the Underground Mining Department, Dnipro University of Technology. E-mail: rudana.in.ua@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7498-8494>

Vladimir I. Golik – DSc (Engineering), Professor, professor of the Mining Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University). E-mail: v.i.golik@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>

Mikhail F. Mitsik – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Mathematics and Applied Informatics, Institute of Service and Business (branch) of Don State Technical University. E-mail: m_mits@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6746-2053>

Для цитирования: Ляшенко В. И., Хоменко О. Е., Голик В. И., Мицик М. Ф. Обоснование параметров подземной разработки рудных месторождений с закладкой выработанных пространств // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 1. С. 58–71. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-1-58-71

For citation: Liashenko V. I., Khomenko O. E., Golik V. I., Mitsik M. F. Justifying the parameters of ore fields underground mining with goaf backfilling. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2022; 1: 58–71 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2022-1-58-71