ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Экогеотехнология добычи бедных руд с созданием условий для попутной утилизации отходов горного производства

И.В.СОКОЛОВ, Ю.Г.АНТИПИН, А.А.РОЖКОВ ✉, Ю.М.СОЛОМЕИН

Институт горного дела Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Рожков А.А., Соломеин Ю.М. Экогеотехнология добычи бедных руд с созданием условий для попутной утилизации отходов горного производства // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 289-296. DOI: 10.31897/PMI.2023.21

Аннотация. В связи с постоянно ухудшающейся экологической обстановкой в регионах размещения предприятий горной промышленности, в статье рассмотрен актуальный вопрос утилизации максимально возможного объема отходов добычи и переработки бедных руд черных металлов за счет создания эффективной подземной экогеотехнологии. Традиционная технология с нисходящей отработкой запасов системой с обрушением не позволяет утилизировать отходы в выработанном пространстве. Идея заключается в применении геотехнологии, основанной на восходящем порядке отработки рудного тела, камерной выемке, оставлении целиков усеченной формы и шахматном расположении смежных камер по высоте, что позволяет сформировать емкости для размещения отходов в виде бесцементной закладки. Исследованы основные показатели предлагаемой технологии и выполнено их сравнение с традиционной технологией отработки бедных железных руд. Установлено, что с точки зрения полноты извлечения запасов и удельных затрат на проходку подготовительно-нарезных выработок технологии сопоставимы, в то время как по показателю качества извлечения предлагаемый вариант значительно эффективней. Оценка экогеотехнологии по критерию утилизируемости отходов, выполненная по предложенной методике, показала, что совокупностью названных технических решений обеспечивается размещение в сформированном выработанном пространстве от 80 до 140 % всех отходов, образующихся при добыче и обогащении бедных железных руд.

***Ключевые слова*:** экогеотехнология; подземная геотехнология; утилизация; отходы; бедные руды; восходящий порядок; бесцементная закладка; экологический потенциал

Благодарность. Работа выполнена в рамках Госзадания № 075-00412-22 ПР. Тема 1 (2022-2024) (FUWE-2022-0005), рег. № 1021062010531-8-1.5.1.

Поступила: 17.10.2022 ***Принята: 13.02.2023*** ***Онлайн: 14.03.2023*** ***Опубликована: 25.04.2023***

Введение. Непрерывность аккумулирования отходов производства, добычи и обогащения полезного ископаемого приводит к значительному ухудшению экологической обстановки в регионах размещения горно-добывающих и перерабатывающих предприятий [1-3]. За последнее десятилетие прирост данных отходов на территории России увеличился с 3,8 до 7,9 млрд т в год [4]. Очевидно, что проблема утилизации отходов становится все более актуальной как с точки зрения экологических последствий недропользования [5-7], так и с точки зрения экономической эффективности функционирования предприятий в условиях ужесточения природоохранных требований [8-10]. Объектом исследования в настоящей работе являются геотехнологические способы утилизации отходов добычи и переработки минерального сырья при подземной разработке месторождений, которые позволили бы снизить долю применения геоэкологических мероприятий, таких как рекультивация и нейтрализация.

Все геотехнологические способы утилизации отходов в первую очередь основаны на их размещении в выработанном пространстве. При открытых горных работах основными способами размещения являются внутреннее отвалообразование, использование всей чаши карьера или ее части для складирования жидких и пастообразных отходов, подготовка техногенных емкостей внутри карьерного пространства или в отвалах с использованием вскрышных пород, дамб и габионных

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

конструкций и др. [11-13]. При подземной разработке месторождений утилизация отходов возможна путем их использования в качестве закладочного материала для погашения выработанного пространства [14, 15]. Оставаясь неотъемлемой частью подземной геотехнологии, закладочные работы в основном рассматриваются с точки зрения управления горным давлением и повышения полноты очистной выемки. В современных условиях очевидна необходимость применения комплексного подхода к освоению месторождений, когда геотехнологию с закладкой выработанного пространства следует рассматривать в аспекте обеспечения благоприятных условий для утилизации отходов горно-обогатительного производства, иными словами, как экогеотехнологию [16-18].

Таким образом, разработка эффективной подземной экогеотехнологии с целенаправленным созданием условий для утилизации максимально возможного объема отходов является актуальной научно-технической задачей.

Методология. В связи с малым содержанием полезного компонента при больших объемах добычи наиболее остро вопрос утилизации отходов стоит при освоении мощных месторождений. При добыче руд цветных металлов формирование закладочных массивов, как правило, осуществляется твердеющими смесями на основе цементного вяжущего, и значительные затраты на закладочные работы оправдываются полнотой и качеством извлечения полезного ископаемого и высокой извлекаемой ценностью добытой и обогащенной руды [19]. К недостаткам твердеющей закладки, помимо высокой себестоимости, следует отнести стадийность технологии отработки запасов, обусловленную значительным сроком набора прочности закладочного массива [20, 21]. Для снижения себестоимости твердеющей закладки при отработке медноколчеданных месторождений изыскивались составы смесей на основе известково-шлаковых вяжущих, что позволило отказаться от использования цемента и снизить стоимость закладочных работ на 20-30 % [22]. Проводились исследования возведения комбинированного закладочного массива из сухой и твердеющей закладки, что позволило снизить затраты и интенсифицировать процесс, но усложнило организацию закладочных работ [23]. Существуют разработки по частичному укреплению сухого закладочного массива путем инъектирования твердеющими растворами через специальные скважины и последующего его уплотнения путем отбойки запасов соседней камеры на зажатую среду закладочного массива [24].

Еще одним направлением являлось возведение высокоплотных искусственных массивов с незначительной долей твердеющей закладки (10-15 %) и механического уплотнения породной отсыпки по аналогии с дорожным строительством. Недостатком технологии является необходимость использования в подземных условиях тяжелых дорожных катков и определенный порядок возведения закладочного массива с точной планировкой – чередованием брустверов определенных размеров на определенном расстоянии. Необходимо отметить, что использование твердеющих смесей даже в незначительных количествах и независимо от их состава влечет за собой организационно-техническое усложнение и удорожание всей геотехнологии в целом. Однако получаемый при добыче руд цветных металлов или богатых руд экономический эффект позволяет практически безальтернативно применять для отработки мощных месторождений системы разработки с твердеющей закладкой.

При добыче бедных и рядовых руд черных металлов, в частности, железа, низкая извлекаемая ценность делает применение твердеющей закладки нецелесообразным. Такие месторождения, как правило, отрабатываются системами разработки с обрушением руд и вмещающих пород. Традиционная технология имеет существенные достоинства в виде высокой производительности труда на очистной выемке и небольшой себестоимости на добычу, однако характеризуется низкими показателями извлечения руды (потери и разубоживание до 20-30 %) и большим удельным объемом подготовительно-нарезных работ (ПНР) [25-27]. Эти факторы сказываются на ее эффективности, но позволяют рентабельно разрабатывать месторождения бедных железных руд в современных экономических условиях. Потенциал данной геотехнологии с точки зрения утилизации отходов в выработанном пространстве практически отсутствует [28]. Таким образом, единственный способ повышения экологического потенциала геотехнологии таких месторождений – это применение систем разработки с бесцементной закладкой.

Применение бесцементной закладки предполагает формирование изолирующих междуэтажных (МЭЦ) и междукамерных целиков (МКЦ), поскольку закладка не обладает необходимыми

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2023.21

свойствами устойчивости при наличии боковых плоскостей обнажения. При этом МКЦ могут быть как оставлены, так и отработаны системами разработки с обрушением. Применение восходящего порядка отработки запасов позволяет отказаться от МЭЦ [29]. Значительная часть рудного тела оставляется в виде неизвлекаемых целиков, либо отрабатывается технологией с обрушением, не подразумевающей создание условий для утилизации отходов в выработанном пространстве.

Таким образом, при конструировании экологоориентированной системы разработки следует руководствоваться следующими принципами:

• применение камерной выемки, позволяющей сформировать выработанное пространство в качестве емкости для размещения отходов;

• использование восходящего порядка отработки запасов;

• конструкция системы должна обеспечивать возможность размещения максимального объема отходов в виде бесцементной закладки при минимальном объеме формируемых рудных целиков;

• обеспечение сопоставимых с традиционной технологией с обрушением руды и вмещающих пород показателей извлечения.

В результате сконструирован вариант подэтажно-камерной системы разработки с бесцементной закладкой, отвечающий основным тенденциям совершенствования подземной добычи руды в рамках создания экогеотехнологий. Технология предусматривает разделение этажа на подэтажи, отработка которых осуществляется в восходящем порядке камерами, располагаемыми относительно соседних камер со смещением в вертикальной плоскости на половину высоты подэтажа, и оставлением неизвлекаемых изолирующих целиков треугольной или трапециевидной формы с минимальной шириной верхнего основания (рис.1).

Выемка камерных запасов осуществляется двумя забоями путем секционной отбойки руды встречными веерами скважин и последующего торцового выпуска при помощи погрузочно-доставочных машин (ПДМ) с дистанционным управлением (ДУ). После отработки камеры производится ее заполнение закладочным материалом. Для транспортирования бесцементной закладки до камеры используются шахтные автосамосвалы. Формирование закладочного массива осуществляется шахтным бульдозером с ДУ путем распределения и планирования породы по всей площади камеры, что позволяет создать горизонт выпуска вышележащей камеры.

Восходящий порядок отработки рудного тела, шахматное расположение камер по высоте и оставление изолирующих треугольных целиков позволяют изолировать отрабатываемую камеру от соседнего выработанного пространства, заложенного отходами, тем самым формируя емкость для возведения бесцементного закладочного массива, а усеченная форма неизвлекаемых целиков обеспечивает минимизацию их размеров.

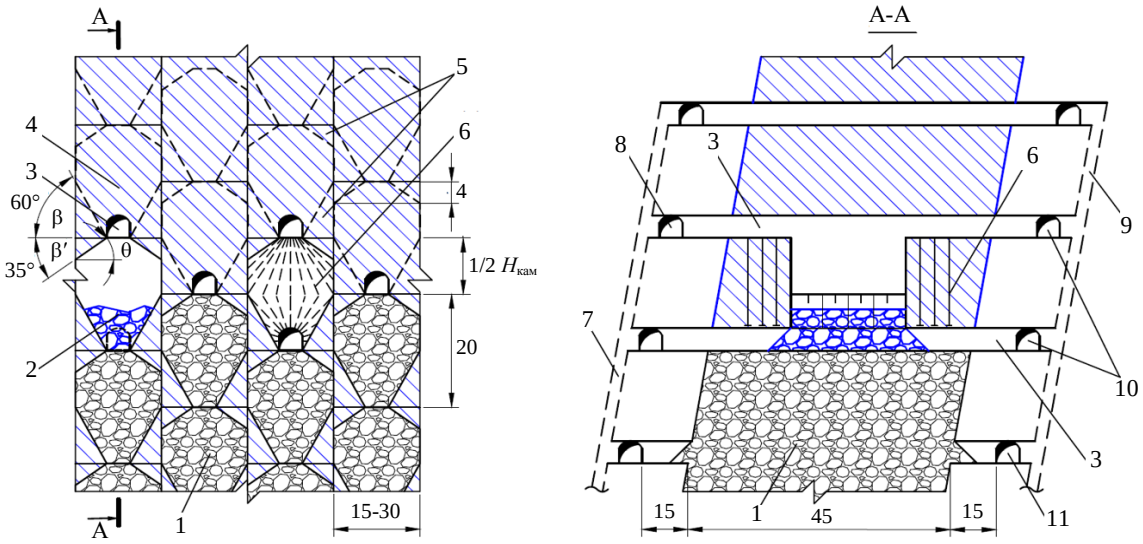


Рис.1. Подэтажно-камерная система разработки с восходящей выемкой и бесцементной закладкой

1 – бесцементная закладка; 2 – отбитая руда; 3 – буро-доставочный орт; 4 – камера; 5 – изолирующий целик; 6 – взрывные скважины; 7 – вентиляционно-ходовой восстающий; 8 – вентиляционный штрек; 9 – рудоспуск; 10 – подэтажный штрек; 11 – этажный штрек

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Обсуждение результатов. Предлагаемый вариант не должен уступать традиционному варианту технологии по полноте и качеству извлечения запасов недр. Другим важным показателем любой подземной геотехнологии является удельный объем ПНР, оказывающий значительное влияние на себестоимость проходки подготовительно-нарезных выработок. Данные показатели и объем формирующейся емкости для размещения отходов существенно зависят от геометрических параметров камер, определяемых с учетом конкретных горно-геологических и геомеханических условий. Известно, что с увеличением размеров очистных камер технико-экономические показатели улучшаются. Поскольку исследование носит методический характер, нами рассмотрен диапазон изменения ширины камеры от 15 до 30 м при постоянной высоте 20 м. С увеличением высоты камер весьма сложно качественно оформить целики усеченной формы, обеспечивающие устойчивость массива бесцементной закладки [30].

Показатели традиционной системы определены при рациональном соотношении ширины и высоты панели – 15×20 м, 20×25 и 25×30 м [31] по общепринятой методике [32]. При предлагаемой технологии потери руды в изолирующих целиках усеченной формы составляют основную долю от суммарных эксплуатационных потерь при выемке запасов. С увеличением ширины камеры от 15 до 30 м потери в целиках уменьшаются в два раза (от 25 до 13 %), потери отбитой руды остаются в пределах 2-3 %.

Расчет удельного объема ПНР с учетом увеличения ширины камеры или панели производился следующим образом

$$\Delta V_{\text{пнр}} = \frac{\Sigma V_{\text{пнр}} \cdot 1000}{Q_{\text{экс}}}; \quad (1)$$

$$\Sigma V_{\text{пнр}} = S_{\text{б.о}} m + S_{\text{з}} l_{\text{з}} n_{\text{з}} + (S_{\text{вхв}} + S_{\text{рс}}) h_{\text{пэ}} \frac{B}{L_{\text{рс}}} + S_{\text{пш}} B n_{\text{пш}}; \quad (2)$$

$$Q_{\text{экс}} = B h_{\text{пэ}} m \gamma_{\text{р}} \frac{(1-\text{П})}{(1-\text{Р})}, \quad (3)$$

где $\Sigma V_{\text{пнр}}$ – суммарный объем проходки ПНР по камере (панели), м^3; $Q_{\text{экс}}$ – эксплуатационные запасы камеры, т; $S_{\text{б.о}}$, $S_{\text{з}}$, $S_{\text{вхв}}$, $S_{\text{рс}}$, $S_{\text{пш}}$ – площади бурового орта, заезда в камеру, вентиляционно-ходового восстающего, рудоспуска и подэтажного штрека, м^2; m – мощность рудного тела, м; $l_{\text{з}}$ – длина заезда в камеру, м; $n_{\text{з}}$ – количество заездов в камеру, шт.; $L_{\text{рс}}$ – расстояние между вентиляционно-ходовым восстающим и рудоспуском по простиранию рудного тела, м; $h_{\text{пэ}}$ – высота подэтажа, м; B – ширина камеры, м; $n_{\text{пш}}$ – количество подэтажных штреков, шт.; $\gamma_{\text{р}}$ – плотность руды, т/м^3; П – коэффициент потерь руды, д.ед.; Р – коэффициент разубоживания руды, д.ед.

Сравнение показателей потерь и удельного объема ПНР, характеризующих традиционный (1) и предлагаемый вариант (2) в зависимости от ширины выемочной единицы (панели или камеры), представлено на рис.2.

Анализ графиков на рис.2 показывает, что с точки зрения полноты извлечения запасов и удельных затрат на проходку подготовительно-нарезных выработок варианты сопоставимы. При этом с увеличением ширины выемочных единиц показатели потерь и удельного объема ПНР при обоих вариантах улучшаются. Удельный расход ПНР снижается за счет большего прироста эксплуатационных запасов камеры (панели) к приросту объема ПНР. Разубоживание при камерной выемке мощного крутопадающего рудного тела в восходящем порядке будет в несколько раз ниже, чем при нисходящей отработке системой подэтажного обрушения с торцовым выпуском (5-7 % против 25-30) за счет минимального примешивания пустых пород висячего бока и ведения очистной выемки под рудным массивом, а не обрушенными породами.

Как было отмечено выше, традиционная технология с обрушением руды и вмещающих пород не обладает экологическим потенциалом, так как не образуется пригодных для заполнения отходами пустот. Для оценки экологического потенциала разработанной подземной геотехнологии предлагается соответствующий критерий – коэффициент утилизируемости отходов в выработанном пространстве, являющийся отношением заполняемого объема камеры к объему образующихся отходов при ее отработке

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2023.21

Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 289-296
© И.В.Соколов, Ю.Г.Антипин, А.А.Рожков, Ю.М.Соломеин, 2023

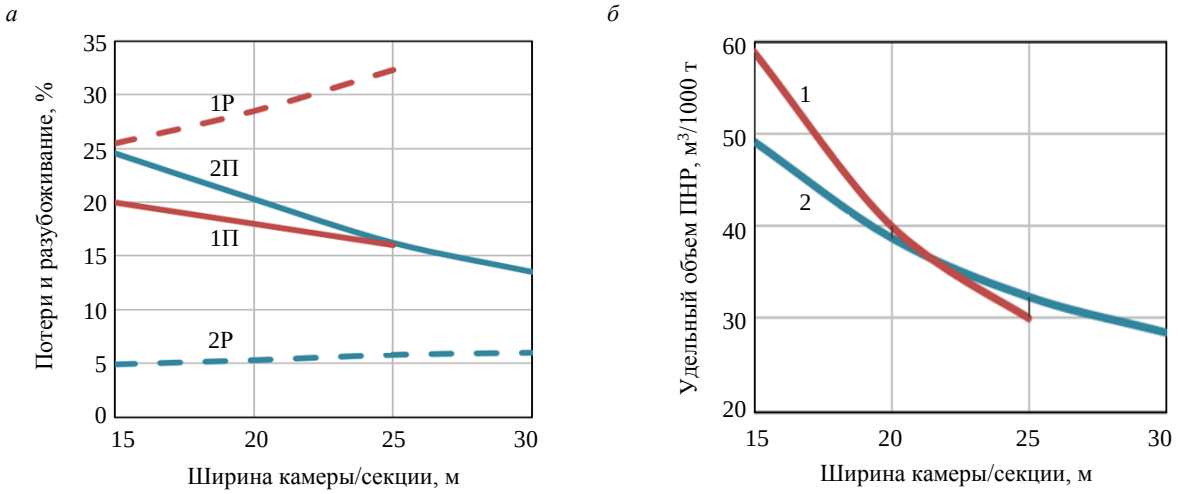


Рис.2. Сравнение показателей извлечения руды и удельного расхода ПНР при традиционном (1) и предлагаемом (2) вариантах технологии

$$\eta = \frac{V_{экс} k_{зап}}{V_{от} k_{ус}}, \quad (4)$$

где $V_{экс}$ – эксплуатационный объем камеры, м^3; $k_{зап}$ – коэффициент заполнения камеры, д.ед.; $k_{ус}$ – коэффициент усадки отходов, д.ед.; $V_{от}$ – объем отходов, образующихся при отработке камеры, м^3.

Эксплуатационный объем камеры определяется с учетом треугольной формы целиков

$$V_{экс} = (ah - b^2 \mathrm{tg}\beta - b^2 \mathrm{tg}\beta')m, \quad (5)$$

где a – ширина камеры, м; h – высота камеры, м; b – ширина основания целика, м; β – угол наклона треугольного целика в нижней части камеры, град; β' – угол наклона треугольного целика в верхней части камеры, град; m – мощность крутопадающего рудного тела, м.

Угол β определяется шириной целика, высотой подэтажа и ограничивается половиной этой высоты. Угол β' равен углу θ, который принимается на 1-2 град больше угла естественного откоса формируемого закладочного массива в кровле камеры.

Объем образующихся при отработке камеры отходов определяется с учетом удельного расхода ПНР и технологии двухстадийного обогащения железных руд методами сухой и мокрой магнитных сепараций [33, 34]:

$$V_{от} = V_{пор} + V_{смс} + V_{ммс}, \quad (6)$$

где $V_{пор}$ – объем породы от проходки подготовительно-нарезных выработок, м^3; $V_{смс}$ – объем отходов сухой магнитной сепарации руды, м^3; $V_{ммс}$ – объем отходов мокрой магнитной сепарации, м^3.

В качестве примера оценки экологического потенциала предлагаемой технологии рассмотрено крутопадающее рудное тело со средней мощностью 45 м и содержанием железа в бедных рудах от 25 до 45 %.

Ориентировочные объемы отходов представлены в виде зависимости от ширины камеры и содержания полезного компонента (рис.3, *а*).

Из графиков на рис.3, *а* видно, что объем размещаемых отходов возрастает с увеличением ширины камеры за счет увеличения объема эксплуатационных запасов в выемочной единице и уменьшается с ростом содержания металла в руде. При этом возрастание интенсивности функции с увеличением ширины камеры происходит за счет снижения влияния доли отходов от проходки, а снижение интенсивности функции с ростом содержания полезного компонента – за счет возрастания разубоживания и снижения прироста качества в процессе обогащения на стадии сухой магнитной сепарации [35].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 289-296 DOI: 10.31897/PMI.2023.21
© И.В.Соколов, Ю.Г.Антипин, А.А.Рожков, Ю.М.Соломеин, 2023

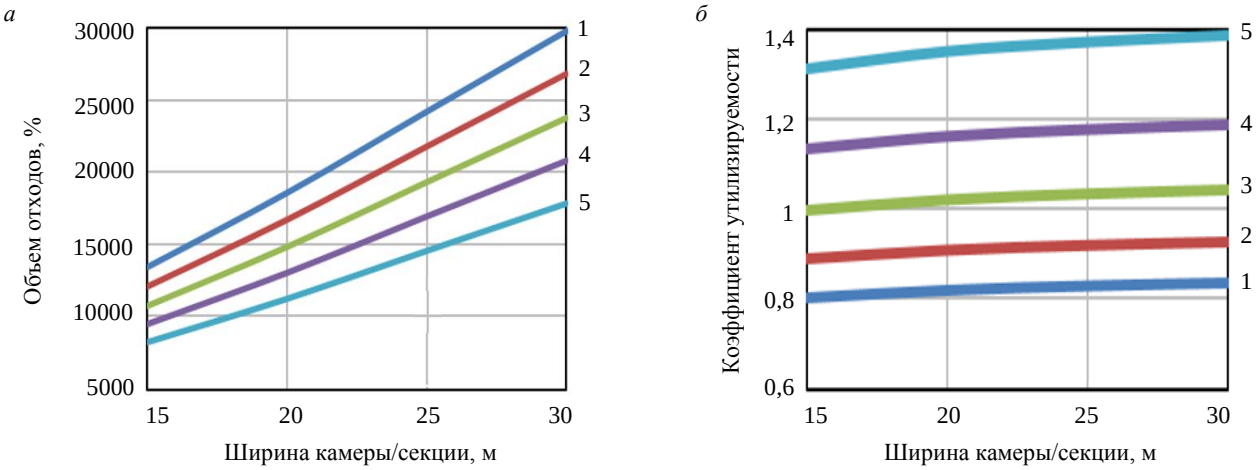


Рис.3. Зависимость объема отходов, образующихся при отработке камеры (*а*), и коэффициента утилизируемости (*б*) от ширины камеры и содержания полезного компонента в руде

1 – Fe = 25 %; 2 – 30; 3 – 35; 4 – 40; 5 – 45

Значения коэффициента утилизируемости отходов, определенные для разработанной экогеотехнологии в зависимости от ширины выемочной единицы в рассмотренном диапазоне содержания полезного компонента в руде, представлены на рис.3, *б*.

Из рис.3, *б* видно, что значения коэффициента повышаются с шириной камер и содержанием полезного компонента в руде за счет увеличения объема запасов и уменьшением доли пустых пород в рудной массе. Снижение интенсивности функции с ростом ширины камер происходит за счет улучшения показателя потерь и ухудшения показателя разубоживания.

Результаты исследования показывают возможность утилизации значительного объема отходов добычи и переработки бедных железных руд в специально сформированных камерах-емкостях без использования вяжущего для консолидации и удержания закладочного материала в устойчивом состоянии (от 80 % – в худшем, до 140 % – в лучшем из рассмотренных случаев). Также при содержании железа в руде более 35 % ($\eta > 1$) закладываемые камеры способны вместить в себя больше сухих и твердых отходов, чем образуется в результате их отработки, что позволит дополнительно утилизировать породу от проходки горно-капитальных выработок или иные, уже имеющиеся на предприятии отходы добычи.

Заключение. В рамках создания экологоориентированных подземных геотехнологий добычи бедных руд разработана экогеотехнология, основанная на отработке месторождения в восходящем порядке, камерной выемке запасов с шахматным расположением камер по высоте, формировании изолирующих целиков усеченной формы и размещении отходов горного производства в выработанном пространстве в виде бесцементной закладки. Помимо железорудных месторождений, разработанная технология может быть перспективна для аналогичных по условиям залегания месторождений бедных руд цветных металлов и апатит-нефелинового сырья.

В результате проведенных исследований основных показателей предлагаемой технологии и их сравнения с традиционной технологией отработки бедных железных руд – системой разработки подэтажного обрушения, установлено, что по показателю полноты извлечения запасов и удельных затрат на проходку подготовительно-нарезных выработок технологии сопоставимы, в то время как по показателю качества извлечения разработанный вариант значительно эффективней.

Оценка экогеотехнологии по критерию утилизируемости отходов, выполненная по предложенной методике, показала, что подэтажно-камерная система разработки с восходящей выемкой камер и бесцементной закладкой обеспечивает размещение в сформированном выработанном пространстве от 80 до 140 % всех отходов, образующихся при добыче и обогащении бедных железных руд при изменении содержания железа от 25 до 45 %.

Совершенствование подземных экогеотехнологий и развитие методологии их оценки с выходом на комплексный эколого-экономический критерий является направлением дальнейших исследований авторов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

ЛИТЕРАТУРА

1. *Pashkevich M.A.* Classification and Environmental Impact of Mine Dumps // Assessment, Restoration and Reclamation of Mining Influenced Soils. London: Academic Press, 2017. P. 1-32. DOI: 10.1016/B978-0-12-809588-1.00001-3

2. *Lima A.T., Mitchell K., O'Connell D.W. et al.* The legacy of surface mining: remediation, restoration, reclamation and rehabilitation // Environmental Science & Policy. 2016. Vol. 66. P. 227-233. DOI: 10.1016/j.envsci.2016.07.011

3. *Agboola O., Babatunde D.E., Fayomi O.S. et al.* A review on the impact of mining operation: Monitoring, assessment, and management // Results in Engineering. 2020. Vol. 8. № 100181. DOI: 10.1016/j.rineng.2020.100181

4. *Антонинова Н.Ю., Шубина Л.А.* Об особенностях комплексного экологического анализа районов, испытывающих локальную техногенную нагрузку предприятий горнометаллургического комплекса // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 2. С. 52-56. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-2-52-56

5. *Arratia-Solar A., Svobodova K., Lèbre É., Owen J.R.* Conceptual framework to assist in the decision-making process when planning for post-mining land-uses // The Extractive Industries and Society. 2022. Vol. 10. № 101083. DOI: 10.1016/j.exis.2022.101083

6. *Boldy R., Santini T., Annandale M. et al.* Understanding the impacts of mining on ecosystem services through a systematic review // The Extractive Industries and Society. 2021. Vol. 8. Iss. 1. P. 457-466. DOI: 10.1016/j.exis.2020.12.005

7. *Корнилков С.В., Антонинова Н.Ю., Шубина Л.А., Славиковская Ю.О.* Экологические аспекты выбора направления рекультивации при отработке месторождений полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 5-2. С. 218-230. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_218

8. *Onimisi A.H., Olanrewaju I.O.* Environmental impacts of iron ore mining on quality of surface water andits health implication on the inhabitants of Itakpe // International Journal of Current Multidisciplinary Studies. 2016. Vol. 2. Iss. 6. P. 318-321.

9. *Пашкевич М.А., Алексеенко А.В., Петрова Т.А.* Оценка и контроль эколого-экономического риска в Новороссийской промышленной агломерации // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2018. № 1. С. 23-35.

10. *Антонинова Н.Ю., Рыбникова Л.С., Славиковская Ю.О., Шубина Л.А.* Эколого-экономические аспекты выбора направлений реабилитации территорий размещения промышленных отходов горно-металлургического комплекса // Горная промышленность. 2022. № S1. С. 71-77. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-71-77

11. *Трубецкой К.Н.* Решение проблем экологически сбалансированного освоения месторождений открытыми геотехнологиями // Горный журнал. 2018. № 6. С. 71-76. DOI: 10.17580/gzh.2018.06.15

12. *Зотеев О.В., Кравчук Т.С., Пыталев И.А., Якшина В.В.* Исследование возможности применения габионных конструкций при комплексном освоении георесурсов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 4. С. 179-189. DOI: 10.25635/h3068-0098-9195-n

13. *Саканцев Г.Г., Переход Т.М., Свещинская Н.А.* Теоретические основы безотходных технологий открытой разработки рудных месторождений // Проблемы недропользования. 2019. № 3 (22). С. 86-94. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.03.086

14. *Каплунов Д.Р., Юков В.А.* О принципах перехода горнодобывающего предприятия к устойчивому экологически сбалансированному развитию // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3. С. 74-86. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-74-8615

15. *Хайрутдинов М.М., Кузиев Д.А., Копылов А.Б., Головин К.А.* Техногенные отходы в закладочных смесях – путь снижения воздействия на экологию // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 1. С. 152-164. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-1-1-152-164

16. *Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н.* Научно-методические основы проектирования экологически сбалансированного цикла комплексного освоения и сохранения недр земли // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S4-2. С. 5-11.

17. *Галченко Ю.П.* Создание и применение экогеотехнологий – как перспектива развития инженерной защиты окружающей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № S1. С. 211-227.

18. *Litvinenko V., Naumov I., Bowbrick I., Zaitseva Z.* Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 338. № 130530. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130530

19. *Danilov A.S., Horttanainen M.V., Matveeva V.A., Korelskiy D.S.* Backfill Of A Mined-Out Gold Ore Deposit With The Cemented Rubber-Cord And Waste Rock Paste: Environmental Changes In Aqueous Media // Journal of Ecological Engineering. 2021. Vol. 22. Iss. 7. P. 190-203. DOI: 10.12911/22998993/138870

20. *Wu D., Fall M., Cai S.J.* Coupling temperature, cement hydration and rheological behaviour of fresh cemented paste backfill // Minerals Engineering. 2013. Vol. 42. P. 76-87. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.11.011

21. *Yowa G.G., Sivakugan N., Tuladhar R., Arpa G.* Strength and Rheology of Cemented Pastefill Using Waste Pitchstone Fines and Common Pozzolans Compared to Using Portland Cement // International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. 2022. Vol. 8. № 56. DOI: 10.1007/s40891-022-00400-3

22. *Калмыков В.Н., Петрова О.В., Янтурина Ю.Д.* Оценка технологических резервов обеспечения устойчивого развития горнотехнической системы при подземной разработке рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № S1-1. С. 69-78.

23. *Аллабердин А.Б., Мажитов А.М., Пыталев И.А., Гавришев С.Е.* Анализ и оценка схем формирования комбинированного искусственного массива при этажно-камерной системе разработки // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 3 (45). С. 436-443. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-3-436-443

24. *Мажитов А.М., Волков П.В., Красавин А.В., Аллабердин А.Б.* Разработка технологии формирования искусственного массива с заданными геотехническими характеристиками // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2019. № 2. С. 51-58. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-2-51-58

25. *Савич И.Н.* Проблемы применения систем с принудительным обрушением при подземной разработке рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № S1. С. 366-373.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

26. *Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В. и др.* Изыскание подземной геотехнологии при переходе к освоению глубокозалегающих запасов наклонного медноколчеданного месторождения // Известия Уральского государственного горного университета. 2016. № 2 (42). С. 47-53. DOI: 10.21440/2307-2091-2016-2-47-53

27. *Ross I.T.* Benchmarking and its application for caving projects // Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving, 15-17 October 2018, Perth, Australia. Australian Centre for Geomechanics, 2018. P. 473-486. DOI: 10.36487/ACG_rep/1815_36_Ross

28. *Falorni G., Del Conte S., Bellotti F., Colombo D.* InSAR monitoring of subsidence induced by underground mining operations // Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving, 15-17 October 2018, Perth, Australia. Australian Centre for Geomechanics, 2018. P. 705-712. DOI: 10.36487/ACG_rep/1815_54_Falorni

29. *Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Рожков А.А., Клюев М.В.* Обзор комбинированных систем подземной разработки рудных месторождений // Проблемы недропользования. 2020. № 3 (26). С. 5-22. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.03.005

30. *Антипин Ю.Г., Рожков А.А., Барановский К.В.* Обоснование параметров камерной системы разработки с оставлением неизвлекаемых целиков // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2021. № 4. С. 15-23. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-15-23

31. *Noriega R., Pourrahimian Y., Victor W.L.* Optimization of the undercut level elevation in block caving mines using a mathematical programming framework // Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving, 15-17 October 2018, Perth, Australia. Australian Centre for Geomechanics, 2018. P. 363-372. DOI: 10.36487/ACG_rep/1815_25_Noriega

32. *Mijalkovski S., Despodov Z., Mirakovski D., Adjiski V.* Methodology for optimization of coefficient for ore recovery in sublevel caving mining method // Podzemni radovi. 2017. Vol. 30. P. 19-27. DOI: 10.5937/podrad1730019S

33. *Пелевин А.Е.* Технологии обогащения железных руд России и пути повышения их эффективности // Записки Горного института. Т. 256. С. 579-592. DOI: 10.31897/PMI.2022.61

34. *Feiwang Wang , Zhiqiang Zhao, Song Zhang et al.* Performance assessment of an innovative precise low-intensity magnetic separator // Minerals Engineering. 2022. Vol. 187. № 107774. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107774

35. *Tripathy S.K., Singh V., Rama Murthy Y. et al.* Influence of process parameters of dry high intensity magnetic separators on separation of hematite // International Journal of Mineral Processing. 2017. Vol. 160. P. 16-31. DOI: 10.1016/j.minpro.2017.01.007

***Авторы*: И.В.Соколов,** *д-р техн. наук, директор, https://orcid.org/0000-0001-7841-5319* (*Институт горного дела Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия*), **Ю.Г.Антипин,** *канд. техн. наук, заведующий лабораторией, https://orcid.org/0000-0002-3564-0310* (*Институт горного дела Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия*), **А.А.Рожков,** *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, 69artem@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3007-1099* (*Институт горного дела Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия*), **Ю.М.Соломеин,** *научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-8226-6894* (*Институт горного дела Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0