

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ РУД ИЗМЕНЧИВОГО ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА

Р.В. Клюев

Московский политехнический университет, Москва, Россия, e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Аннотация: Представлены результаты комплексного геоэкологического и технологического изучения руд золоторудного месторождения с изменчивым вещественным составом. На основе анализов балансовых и забалансовых проб (химический, пробирный, рентгено-флуоресцентный, атомно-эмиссионная спектрометрия) установлено, что руды относятся к убого-сульфидной разновидности (1,4–2,7% сульфидов) с преобладанием кварца, полевых шпатов и слюд, а также гипергенных минералов железа. Показано, что вовлечение забалансовых руд требует щадящих технологий (гравитация, биовыщелачивание) из-за риска кислотообразования и миграции тяжелых металлов. Исследована сорбционная способность свежего и регенерированного активированного угля. Предельная емкость регенерированного угля по золоту ниже (1,5 мг/г против 2 мг/г), что при повторном использовании может увеличивать объем техногенных отходов. Для обезвреживания жидкой фазы хвостов цианирования применен гипохлорит кальция (расход активного хлора 0,75 кг/м³), обеспечивший снижение концентрации цианидов с 89,0 до 0,006 мг/л и удаление тяжелых металлов. Твердый осадок после обработки отнесен к 5-му классу опасности (практически неопасные отходы), что позволяет использовать его при рекультивации или закладке выработанного пространства. Обоснована необходимость замкнутых водо-химических схем для предотвращения вторичного загрязнения гидросферы.

Ключевые слова: геоэкология, забалансовые руды, вещественный состав, цианирование, сорбция золота (активированный уголь), хвосты цианирования, обезвреживание (гипохлорит кальция), класс опасности отходов, замкнутые технологические циклы.

Для цитирования: Клюев Р. В. Геоэкологическая оценка технологий переработки руд изменчивого вещественного состава // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 8. – С. 67–78. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_8_0_67.

Geocological evaluation of processing technologies for ores with variable material constitution

R.V. Klyuev

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Abstract: The article describes the integrated geocological and technological study of gold-bearing ore with variable material constitution. The analyses of economic and sub-economic ore samples (chemical, assaying, X-ray fluorescent, atomic emission spectroscopy) find out that the test material is low-sulfide ore (1.4–2.7% of sulfides), with dominant quartz, feldspar and mica, as well as supergene minerals of iron. It is shown that processing of sub-economic

ore needs soft technologies (gravity, bio-leaching) because of risk of acid formation and migration of heavy metals. The sorption ability of fresh and recovered activated carbon is investigated. The limit sorption capacity of recovered carbon with respect to gold is lower (1.5 mg/g as against 2 mg/g), which may increase quantity of waste in recycling. Detoxification of liquid cyanidation tailings used calcium hypochlorite (active chlorine consumption of 0.75 kg/m³) which reduced concentration of cyanides from 89.0 to 0.006 mg/l and ensured removal of heavy metals. The post-processing fixed residue is related to hazard class 5 (nonhazardous waste), which allows using it in reclamation or backfill. The necessity of closed-loop water-chemistry regime is validated for the prevention of secondary pollution of the hydrosphere.

Key words: geoecology, sub-economic ore, material constitution, cyanidation, gold adsorption (activated carbon), cyanidation tailings, detoxification (calcium hypochlorite), waste hazard class, closed-loop process flow sheets.

For citation: Klyuev R. V. Geoecological evaluation of processing technologies for ores with variable material constitution. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(8):67-78. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_8_0_67.

Введение

Важным вопросом для исследования технологии обогащения, в частности, золоторудного сырья, являются геоэкологические аспекты переработки руд с изменчивым вещественным составом. При этом следует отметить, что литологические различия рудных зон, наличие балансовых и забалансовых руд, а также присутствие вредных примесей требуют дифференцированного подхода к технологическим схемам. Отдельное внимание необходимо уделить проблеме образования и складирования цианидсодержащих хвостов, которые являются основным источником экологического риска. Цель работы состоит в обосновании малоотходных и экологически безопасных решений: от селективной выемки сырья до обезвреживания жидкой фазы и снижения класса опасности твердых отходов на основе детального изучения вещественного состава руд и технологических проб [1, 2].

Используемые методы

В работе применялся комплекс аналитических и экспериментальных методов:

1. Анализ вещественного состава руд: классический химический и пробирный анализы; количественная рентгенофлуоресцентная спектроскопия (РФА); атомно-абсорбционный анализ; гравиметрия; атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES).
2. Сорбционные исследования: построение изотерм сорбции золота и серебра на свежем и регенерированном активированном угле (продолжительность 72 ч, варьирование объемов раствора).
3. Обезвреживание жидкой фазы: хлорирование гипохлоритом кальция $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ в лабораторной емкости с лопастной мешалкой; контроль pH и окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) мультитестерами (стеклянный и золотой электроды); фильтрация и декантирование.
4. Оценка класса опасности: по результатам химического состава осадка.

Геоэкологические аспекты переработки руд с учетом их вещественного состава

В пределах изучаемой золотоносной территории выделяются породы, сильно

отличающиеся друг от друга по своему литологическому строению. Каждая рудная зона месторождения имеет уникальный состав и характеризуется собственными типами руд с разнообразными текстурно-структурными особенностями [3, 4]. Учитывая эти геологические особенности, были выполнены детальные анализы вещественного состава и технологических характеристик образцов из рудных зон, которые сейчас находятся в стадии промышленного освоения [5, 6]. При этом исследовались две категории проб: отдельно пробы, относящиеся к балансовым (кондиционным) рудам, и отдельно — к забалансовым (некондиционным). Как правило, забалансовые руды характеризуются низким содержанием ценного компонента и часто содержат вредные примеси (например, мышьяк, сурьму или соединения серы), которые при стандартных методах обогащения могут переходить в хвосты и загрязнять окружающую среду.

С точки зрения геоэкологии отработка месторождений с изменчивым вещественным составом требует дифференцированного подхода:

- Раздельная переработка. Целесообразно предусмотреть возможность селективной выемки и складирования руд с разных зон. Это позволит не смешивать «упорные» (труднообогащаемые) руды с легкообогащаемыми, снижая расход реагентов [7, 8];

- Минимизация токсичных отходов. Для забалансовых руд, вовлекаемых в переработку, необходимо применять щадящие технологии (например, биовыщелачивание или гравитацию без использования цианидов), чтобы предотвратить образование кислых дренажных вод в хвостохранилищах [9, 10];

- Закладочные смеси. Измельченные забалансовые руды с нейтральным составом могут быть использованы в качестве инертного заполнителя для за-

кладки выработанного пространства, что решит проблему их складирования на поверхности и снизит риск просадок земной коры.

Таким образом, детальное изучение литологических разностей рудных зон служит не только целям извлечения золота, но и фундаментом для проектирования замкнутых, малоотходных схем обогащения, сохраняющих геологическую среду региона [11, 12].

Изучение вещественного состава забалансовых руд и геоэкологические аспекты их вовлечения в переработку

В рамках исследований по обогащению полезных ископаемых и геоэкологии был проанализирован ряд технологических образцов, отобранных в рассматриваемой шахте месторождения. Пять из них, ранее отнесенные к категории забалансовых руд, были объединены в одну общую пробу для детального изучения их вещественного состава и технологической ценности.

Минеральный состав пробы руды представлен на рис. 1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: 1 — кварц; 2 — плагиоклазы; 3 — калиевый полевой шпат; 4 — слюды (биотит, мусковит, гидрослюда); 5 — хлорит; 6 — амфиболы; 7 — карбонаты (кальцит); 8 — пирит; 9 — гидроксиды железа (лимонит, гетит, гидрогетит); 10 — углеродистое вещество.

Анализ данных рис. 1 показывает, что основу образцов составляют породообразующие минералы. Ключевую роль среди них играют: кварц — его содержание варьируется от 39 до 42%; полевые шпаты — их доля достигает 29–35%, при этом плагиоклазы преобладают (22–25%), а калиевая разновидность представлена в объеме 7–10%; слюды — на их долю приходится 12–19%. Остальные нерудные компоненты встречаются

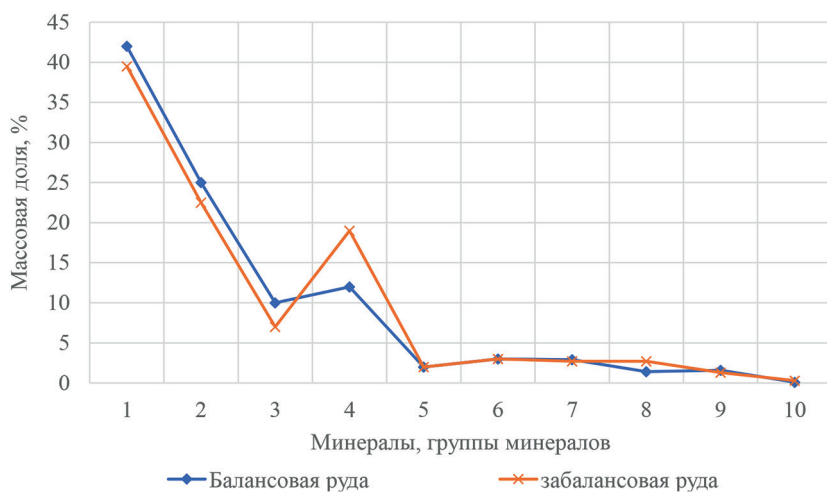


Рис. 1. Минеральный состав пробы руды
 Fig. 1. Mineral composition of the ore sample

ся в меньших количествах: амфиболы (около 3%), хлорит (2–3%) и карбонаты (2,7–2,9%). Углеродистое вещество присутствует в следовых объемах — не более 0,1–0,3%.

Что касается рудной составляющей, ее общая концентрация колеблется от 3,1 до 4,0%. Примечательно, что почти половину этой массы формируют гипергенные минералы (лимонит, гетит, гидрогетит) — 1,3–1,7%. Сульфидная часть распределена неравномерно: в балансовых рудах ее уровень составляет около 1,4%, тогда как в забалансовых достигает 2,7%. Среди сульфидов доминирует пирит. Остальные (арсенопирит, халькопирит, сфалерит, галенит) обнаруживаются лишь в виде одиночных включений. По содержанию сульфидов исследуемый материал относится к убогосульфидной разновидности руд.

Учитывая крайне низкую долю сульфидов (1,4–2,7%), такая руда не представляет интереса для традиционных пирометаллургических или гидрометаллургических схем извлечения цветных металлов. Основная ценность здесь — кварц-полевошпатовая ассоциация со слюдами, которую можно рассматри-

вать как потенциальное сырье для керамической, стекольной или строительной промышленности. Для извлечения этих нерудных компонентов потребуются флотационная схема с использованием катионных и анионных собирателей в кислой или нейтральной среде. Однако высокое содержание карбонатов (до 2,9%) и железистых гипергенных минералов может осложнить процесс, требуя стадии предварительного обесшламливания или магнитной сепарации для удаления лимонита и гетита.

С точки зрения геоэкологии убогосульфидная руда с повышенной долей гипергенных соединений железа (1,7%) и рассеянными сульфидами несет потенциальную угрозу при складировании в отвалах. Даже низкое содержание пирита способно генерировать кислые дренажные воды (КДВ) при длительном контакте с атмосферным кислородом и влагой [13, 14]. Особенно опасна забалансовая руда (2,7% сульфидов), так как ее окисление может привести к подкислению почв и мобилизации тяжелых металлов (мышьяк, медь, цинк, свинец), присутствующих даже в единичных зернах арсенопирита, халькопирита, сфа-

лерита и галенита. Поэтому при обработке таких месторождений необходимо предусматривать перекрытие отвалов нейтрализующими материалами (известняк, карбонатсодержащие породы) и организацию систем сбора и очистки карьерных вод. Оптимальным с экологической точки зрения решением станет полная переработка всей горной массы с выделением нерудных продуктов в товарные концентраты, что минимизирует объем токсичных хвостов [15, 16].

Геоэкологическая оценка эффективности регенерации сорбента и сорбционные свойства углей при извлечении золота из цианистых растворов

В ходе экспериментов по цианированию пробы руды все полученные золотосодержащие жидкие фазы были объединены в один пул. Эта общая проба в дальнейшем применялась для построения изотермы сорбции, необходимой для оценки сорбционных характеристик материалов. Чтобы выяснить, какую предельную поглощающую способность проявляет сорбент, на основе объединенных растворов, образовавшихся после стадии агитационного выщелачивания, были получены изотермы сорбции с использованием активированного угля. В работе сравнивались два типа сорбентов: свежий активированный уголь марки Gold CARB 207С 6×12 и уголь, прошедший стадию регенерации в реальном производственном цикле обогатительной фабрики. Остаточное содержание драгоценного металла в регенерированном угле составляло 0,03 г/кг.

Полученные изотермы сорбции позволили не только рассчитать рабочую емкость углей, но и оценить экологическую эффективность процесса регенерации сорбента. Как показали результаты, даже при остаточном содержании золота 0,03 г/кг регенерированный уголь

демонстрирует снижение динамической активности по сравнению со свежим материалом. Это приводит к необходимости увеличения времени контакта фаз и, как следствие, к росту объемов жидких техногенных отходов (хвостов). С геоэкологической точки зрения повторное использование не полностью регенерированного угля может быть оправдано лишь при условии дополнительной очистки оборотных цианистых растворов. В противном случае накопление «слепого» золота в сорбенте снижает общее извлечение металла и провоцирует рост концентрации труднорастворимых органических соединений в хвостохранилищах, что требует разработки замкнутых водно-химических схем с нейтрализацией токсичных компонентов. Дальнейшие исследования должны быть направлены на поиск оптимальной частоты термической регенерации, позволяющей балансировать между экономической выгодой и минимизацией экологического следа обогатительного производства [17, 18].

Анализ объединенного продуктивного раствора показал, что основную массу растворенных компонентов составляют щелочные и щелочноземельные элементы. Концентрация натрия (Na) достигла 931,0 мг/л, а кальция (Ca) — 159,0 мг/л. Калий (K) присутствовал в количестве 29,5 мг/л, тогда как магний (Mg) был зафиксирован на уровне менее 0,020 мг/л, что указывает на его следовое содержание.

Среди ценных компонентов золото (Au) имело концентрацию 0,63 мг/л, а серебро (Ag) — 0,47 мг/л. Алюминий (Al) присутствовал в растворе в концентрации 2,90 мг/л, а железо (Fe) — 0,207 мг/л. Что касается токсичных примесей, то мышьяк (As) был обнаружен в количестве менее 0,010 мг/л, то есть практически на пределе обнаружения. Таким образом, раствор характеризу-

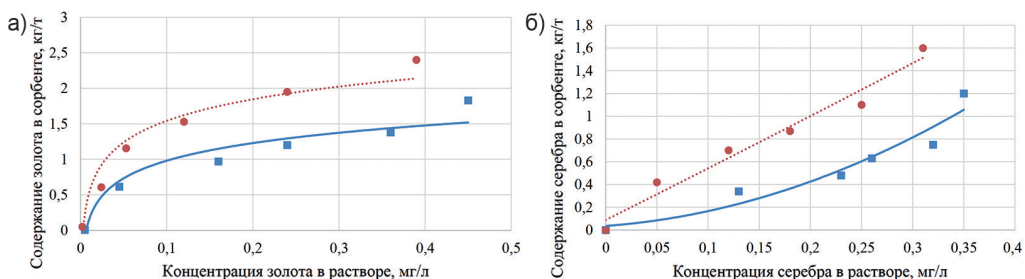


Рис. 2. Изотермы сорбции золота на свежий (а) и регенерированный (б) уголь из цианистых растворов, полученных при выщелачивании пробы руды рассматриваемого месторождения

Fig. 2. Isotherms of gold sorption on fresh (a) and regenerated (b) carbon from cyanide solutions obtained by leaching an ore sample from the deposit under consideration

ется преобладанием натриевой и кальциевой форм, низким содержанием тяжелых металлов и благородных компонентов на уровне десятых долей миллиграмма на литр.

В ходе эксперимента изотермы строили, меняя объемы рабочего раствора, который предварительно получили в режиме интенсивного перемешивания (агитации). Оптимальные параметры цианирования были подобраны на лабораторном этапе. Сам процесс сорбции длился 72 ч. Полученные зависимости для свежего и восстановленного угля, отражающие извлечение золота и серебра, представлены на рис. 2.

Согласно графикам (рис. 2), предельная сорбционная способность нового угля по золоту составляет 2 мг/г, тогда как у регенерированного этот показатель ниже — 1,5 мг/г.

Такое различие в емкости свежего и регенерированного угля объясняется частичной деградацией активных центров и накоплением неэлюируемых примесей в пористой структуре после циклов регенерации.

Обезвреживание жидкой фазы хвостов цианирования

При переработке руды образуются хвосты цианирования, которые представляют собой сгущенную пульпу. Эта пульпа транспортируется по специаль-

ному трубопроводу в намывное хвостохранилище. Там происходит естественное расслоение: твердые частицы оседают, а жидкость отделяется. Осевшую твердую фракцию затем осушают до остаточной влажности в пределах 15—25%.

Отделенная жидкая фаза направляется обратно на фабрику для повторного использования в технологическом цикле водоснабжения. В случае превышения допустимых нормативов или возникновения экологических рисков эта жидкость подлежит предварительной нейтрализации (обезвреживанию). Основным материальным отходом добычи является именно обезвреженная твердая фаза, складированная в чаше хвостохранилища. Данный вид отходов представляет собой хвосты цианирования, характерные для руд, содержащих золото и серебро.

В рамках исследования процессов обезвреживания изучалась жидкая составляющая объединенных хвостов цианирования, полученных из опытных проб руды.

Однако проблема управления хвостами цианирования не ограничивается только физическим разделением фаз. Основные геоэкологические риски связаны с долговременным хранением обезвоженного твердого остатка в хвостохранилище. При взаимодействии с атмо-

сферными осадками или под влиянием биогенных факторов возможно вторичное выщелачивание остаточных цианидов и тяжелых металлов (например, меди, цинка или мышьяка, часто сопутствующих золоторудным месторождениям).

Внедрение таких технологий переводит объект исследований от пассивного складирования (источника потенциальной катастрофы, как в случае с авариями на рудниках) к техногенному месторождению, где отход становится вторичным сырьем. Ключевая задача геоэкологии применительно к данному объекту – разработать замкнутый цикл, при котором жидкая фаза полностью возвращается в процесс, а твердая фаза либо утилизируется в безопасных формах, либо рекультивируется без риска для подземных вод и почв [19–21].

Для очистки жидкой составляющей цианидсодержащих хвостов, характерных для данного рудного поля, наиболее эффективным признан метод обработки хлорными реагентами. Суть подхода заключается в разрушении ядовитых компонентов растворов с помощью сильного окислителя, содержащего хлор. В качестве такого реагента предлагается применять гипохлорит кальция ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$). Его действие основано на выделении так называемого «активного хлора», который непосредственно участвует в реакции окисления. Экспериментально подтверждено, что при введении гипохлорита в отходы почти все стойкие токсиканты, присутствующие в техногенных растворах, подвергаются эффективной деструкции.

Лабораторные опыты выполнялись в емкости из стекла с использованием лопастной мешалки. Показатели кислотности среды (pH) и окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) фиксировались при помощи мультите- стеров модели ИПЛ 111-1. Замеры про-

изводились с двумя типами электродов: комбинированным стеклянным (для определения pH) и золотым HI 4430 (для фиксации ОВП).

В ходе эксперимента объектом обработки служил цианидсодержащий раствор, представляющий собой жидкую фракцию смешанных хвостов от выщелачивания двух типов руд. В эту среду при непрерывном помешивании дози-

Таблица 1

Химический состав жидкой фазы объединенных хвостов цианирования до и после обезвреживания
Chemical composition of the liquid phase of combined cyanidation tailings before and after neutralization

Определяемые ингредиенты	Анализируемая проба	
	исходная жидкая фаза объединенных хвостов цианирования	жидкая фаза объединенных хвостов цианирования после обезвреживания
pH, ед.	11,5	10,5-11,0
общее соледержание, мг/л	3960,0	4920,0
Ca^{2+}	42,6	40,0
SO_4^{2-}	<400	<400
Cl^-	<400	468,0
CN^-	89,0	0,006
SCN^-	24,0	
Al	3,01	0,141
As	0,044	0,02
Cd	<0,005	<0,005
Co	0,103	0,0106
Cu	7,30	0,053
Fe	12,2	0,46
Mg	0,099	<0,02
Mn	<0,005	<0,005
Ni	1,18	<0,005
Pb	<0,005	<0,005
Sb	<0,005	<0,01
Zn	0,108	<0,02

рвали гипохлорит кальция в виде раствора. Критерием окончания процесса стали значения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) в диапазоне от +210 до +230 мВ при поддержании щелочного уровня pH 10,5–11,0. Длительность самого хлорирования составила 2 ч, после чего полученную смесь оставляли в покое на 1 ч для отстаивания. По истечении этого срока твердую фазу отделяли от жидкой методом фильтрации или декантирования.

Удельный расход стопроцентного «активного хлора» на обезвреживание жидкой составляющей хвостовой пульпы равнялся 0,75 кг на 1 м³. После технологической выдержки и фильтрации масса выделившегося твердого остатка составила 0,05 кг/м³.

Для наглядности в табл. 1 представлены данные о химическом составе исходной и очищенной жидкой фазы объединенных цианистых хвостов.

Соответственно, табл. 2 содержит сведения о вещественном составе полученного осадка.

Полученные результаты позволяют говорить не только о технической эффективности метода, но и о его геоэко-

Таблица 2

Состав осадков, образующихся при обезвреживании жидкой фазы объединенных хвостов цианирования
Composition of sediments formed during the neutralization of the liquid phase of combined cyanidation tailings

Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, %
SiO ₂	42,0	Zn	0,098
Al ₂ O ₃	0,58	Cu	0,53
CaO	20,11	Ni	0,077
TiO ₂	0,82	Fe	0,88
As	0,0072	S	0,53
Sb	0,0039	Co	0,049
Pb	0,0061	прочие	34,31

логической безопасности. В отличие от реагентов на основе молекулярного хлора, гипохлорит кальция менее летуч и проще в логистике, что снижает риски залповых выбросов на промплощадке. После завершения реакции окисления в жидкой фазе образуются преимущественно безвредные хлориды и малотоксичные органические остатки, которые склонны к естественной минерализации в теле хвостохранилища. Тем не менее, при внедрении данной технологии необходимо учитывать риск вторичного загрязнения — избыток «активного хлора» может прореагировать с органическим веществом пород с образованием следовых количеств хлорорганических соединений. Поэтому для соблюдения принципов устойчивого природопользования рекомендуется дополнить процесс стадией последующего сорбционного контроля (например, активированным углем) перед сбросом очищенных вод в систему оборотного водоснабжения.

С геоэкологической точки зрения это влечет за собой следующие последствия:

1. Возможность рекультивации без изоляции. Отходы 5 класса пригодны для использования в качестве грунта при технической рекультивации нарушенных земель. Инертный минеральный скелет хвостов (пески, алевриты) можно использовать для засыпки карьеров или формирования защитных экранов без риска загрязнения грунтовых вод.

2. Экономия экологических платежей. Предприятие получает право на существенное снижение платы за негативное воздействие на окружающую среду при размещении таких отходов, что стимулирует внедрение технологий переработки, переводящих токсичные компоненты в 5 класс.

Несмотря на низкий класс опасности, перед окончательным размещени-

ем твердой фазы необходимо провести выщелачивание по стандартной методике (например, в уксуснокислом буфере). Это позволит проверить, не перейдут ли остаточные концентрации загрязнителей в жидкую фазу под влиянием кислотных дождей (рН 4–5). Если результаты выщелачивания также покажут соответствие ПДК рыбохозяйственных водоемов, то твердые хвосты можно рекомендовать для безопасного заполнения выработанного пространства карьеров.

Таким образом, подтверждение 5 класса опасности для твердой фазы является положительным сигналом для проектирования замкнутой системы переработки отходов данного месторождения [22 – 24].

Выводы

1. Те руды, которые раньше считались нерентабельными (мало золота, но много сульфидов и окислов железа), при хранении на отвалах начинают выделять в воду кислоту и тяжелые металлы. Поэтому их лучше перерабатывать отдельно — с помощью гравитации или бактерий, без ядовитого цианида.

2. Присвоение твердой фазе хвостов 5-го класса опасности является ключевым геоэкологическим результатом. Это позволяет снизить категорию риска

хвостохранилища, использовать отходы для рекультивации (инертный минеральный скелет) и уменьшить экологические платежи предприятия.

3. Установлено, что уголь для извлечения золота не стоит полностью восстанавливать. Если после очистки использовать старый уголь повторно, отходов становится меньше, но он хуже впитывает золото. Лучше смешивать свежий и восстановленный уголь (примерно одну часть свежего на три части старого) и дополнительно чистить растворы в обороте.

4. Доказано, что если обработать цианистые отходы гипохлоритом кальция (примерно 0,75 кг хлора на кубометр), то цианида почти не останется, а вредные металлы (медь, железо, никель, цинк) снизятся в десятки или сотни раз. Но тут важна доочистка на сорбентах — иначе могут появиться крошечные количества опасных хлорорганических веществ.

5. Необходимо организовать замкнутый технологический цикл Жидкая фаза после очистки должна полностью возвращаться в процесс, а твердая (5 класс) — либо перерабатываться в товарные концентраты (керамические, строительные), либо безопасно размещаться в выработанном пространстве с предварительным контролем выщелачиваемости в кислой среде (рН 4–5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евдокимов С. И., Максимов Р. Н., Дедегкаева Н. Т., Габараев Г. О. Разработка технологии подготовки лежалых хвостов Тырныаузской обогатительной фабрики к закладке выработанного горного пространства // Устойчивое развитие горных территорий. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 1111 – 1131. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-1111-1131.

2. Голик В. Снижение риска загрязнения экосистем при добыче руд в горных регионах // Экология и промышленность России. — 2025. — Т. 29. — № 9. — С. 36 – 39. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-9-36-39.

3. Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В. Геоэкологический мониторинг при ведении горных работ // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 580 – 588. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588.

4. Kovalsky E., Kongar-Syuryun C., Morgoeva A., Klyuev R., Khayrutdinov M. Backfill for advanced potash ore mining technologies // Technologies. 2025, vol. 13, article 60. DOI: 10.3390/technologies13020060.

5. Ключев Р. В. Анализ надежности элементов системы электроснабжения карьеров // Горные науки и технологии. — 2024. — № 9(2). — С. 183–194. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-254.
6. Kongar-Syuryun C., Babyr N., Klyuev R., Khayrutdinov M., Zaalishvili V., Agafonov V. Model for assessing efficiency of processing geo-resources, providing full cycle for development-case study in Russia // Resources. 2025, vol. 14, no. 3, article 51. DOI: 10.3390/resources14030051.
7. Конгар-Сюрюн Ч. Б. Влияние шахтной воды на прочностные характеристики искусственного массива, созданного на основе техногенных отходов // Уголь. — 2024. — № 12. — С. 75–78. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-75-78.
8. Pochechun V. A., Semyachkov A. I. Practical application of groundwater regime monitoring at middle Ural deposits the practice of application of the results of regulatory observations for groundwater at the fields of the middle Urals // Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2024, Part F3514, pp. 171–181. DOI: 10.1007/978-3-031-64423-8_15.
9. Петров Ю. С., Габараев О. З., Соколов А. А. Обобщенная оценка влияния горного предприятия на окружающую природную среду // Горный журнал. — 2015. — № 8. — С. 25–27. DOI: 10.17580/gzh.2015.08.06.
10. Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В. Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 205–216. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.
11. Malyukova L. S., Martyushev N. V., Tynchenko V. V., Kondratiev V. V., Bukhtoyarov V. V., Konyukhov V. Yu., Basmur K. A., Panfilova T. A., Brigida V. S. Circular mining wastes management for sustainable production of camellia sinensis (L.) O. Kuntze // Sustainability. 2023, vol. 15, no. 15, article 11671. DOI: 10.3390/su151511671.
12. Маковозова З. Э., Соколов А. А., Фоменко В. А., Сарбаева М. Т. Влияние гидрогеологических особенностей Унальского хвостохранилища на загрязнение экосистемы тяжелыми металлами // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 6. — С. 126–138. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_126.
13. Серянина А. В., Овчинникова Т. И., Тертычная С. В. К вопросу об экологической безопасности в металлургической промышленности // Безопасность труда в промышленности. — 2024. — № 8. — С. 23–28. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-8-23-28.
14. Wang Y., Zhang N., Chen, X. A short-term residential load forecasting model based on lstm recurrent neural network considering weather features // Energies. 2021, vol. 14, article 2737. DOI: 10.3390/en14102737.
15. Осьмин В. В., Киреева Г. И. Комплексная оценка ресурсного потенциала техногенных месторождений и технологий их переработки // Устойчивое развитие горных территорий. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 2188–2198. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-2188-2198.
16. Соколов А. А., Мирошников А. С., Соколова Е. А. Алгоритмы управления устойчивостью системы «предприятие горно-металлургического комплекса – внешняя среда» // Горный журнал. — 2016. — № 12. — С. 83–86. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.17.
17. Босиков И. И., Силаев И. В., Кузина А. В., Мишедченко А. А. Комплексный анализ свойств критерия эффективности задачи синтеза технических систем воздухообеспечения на угольных шахтах // Уголь. — 2025. — № 5. — С. 128–131. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-128-131.
18. Зиновьева О. М., Колесникова Л. А., Меркулова А. М., Смирнова Н. А. Управление экологическими рисками на горнодобывающих предприятиях // Уголь. — 2022. — № 3. — С. 76–80. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-3-76-80.
19. Валиев Н. Г., Голик В. И., Лебзин М. С. Инертность влияния стоков Тырныаузского вольфрамо-молибденового комбината на гидросистемы Северного Кавказа // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 1-1. — С. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_5.
20. Tuomela A., Ronkanen A.-K., Rossi P. M., Rauhala A., Haapasalo H., Kujala K. Using geomembrane liners to reduce seepage through the base of tailings ponds—a review and a framework for design guideline // Geosciences (Switzerland). 2021, vol. 11, no. 2, pp. 1–23. DOI: 10.3390/geosciences11020093.
21. Фрунзикян О. Б., Маргарян В. Г., Мисакян А. Э., Навасардян С. К. Оценка экологического состояния вод в горнодобывающих регионах (бассейн реки Дебед) // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2026. — № 6. — С. 68–82. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_6_0_68.

22. Banerjee B. P., Raval S., Maslin T. J., Timms W. Development of a UAV-mounted system for remotely collecting mine water samples // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2020, vol. 34, no. 6, pp. 385 – 396. DOI: 10.1080/17480930.2018.1549526.

23. Nguyen Q., Kitchener R., Bradshaw C. Investigation, monitoring and management of downstream groundwater in the tailings storage facilities of Nui Phao mine, Vietnam // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2019, vol. 231, pp. 35 – 45. DOI: 10.2495/WM180041.

24. Offenberg I., Iliash N. Geocological monitoring in extraction process of soluble minerals from underground deposits // *International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management Sgem*. 2019, vol. 19 (5.2). DOI: 10.5593/sgem2019/5.2/S20.050. **MIAB**

REFERENCES

1. Evdokimov S. I., Maksimov R. N., Dedegkaeva N. T., Gabaraev G. O. Preparing technology development for stocked tailings from the Tyrnyauz processing plant for backfilling into mined-out mining space. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025, vol. 17, no. 2, pp. 1111 – 1131. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-1111-1131.

2. Golik V. Reducing the risk of ecosystem pollution from mining in mountainous regions. *Ecology and Industry of Russia*. 2025, vol. 29, no. 9, pp. 36 – 39. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-9-36-39.

3. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Geocological monitoring during mining operations. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 2, pp. 580 – 588. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588.

4. Kovalsky E., Kongar-Syuryun C., Morgoeva A., Klyuev R., Khayrutdinov M. Backfill for advanced potash ore mining technologies. *Technologies*. 2025, vol. 13, article 60. DOI: 10.3390/technologies13020060.

5. Klyuev R. V. Reliability analysis of open-pit power supply system components. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024, no. 9(2), pp. 183 – 194. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-254.

6. Kongar-Syuryun C., Babyr N., Klyuev R., Khayrutdinov M., Zaalishvili V., Agafonov V. Model for assessing efficiency of processing geo-resources, providing full cycle for development-case study in Russia. *Resources*. 2025, vol. 14, no. 3, article 51. DOI: 10.3390/resources14030051.

7. Kongar-Syuryun Ch. B. Influence of mine water on the strength of artificial mass based on industrial waste. *Ugol'*. 2024, no. 12, pp. 75 – 78. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-75-78.

8. Pochechun V. A., Semyachkov A. I. Practical application of groundwater regime monitoring at middle Ural deposits the practice of application of the results of regulatory observations for groundwater at the fields of the middle Urals. *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. 2024, Part F3514, pp. 171 – 181. DOI: 10.1007/978-3-031-64423-8_15.

9. Petrov Yu. S., Gabaraev O. Z., Sokolov A. A. Generalized evaluation of ecological impact of a mine. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 8, pp. 25 – 27. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2015.08.06.

10. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Comprehensive assessment of geocological risks in conducting open and underground mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 205 – 216. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.

11. Malyukova L. S., Martyushev N. V., Tynchenko V. V., Kondratiev V. V., Bukhtoyarov V. V., Konyukhov V. Yu., Bashmur K. A., Panfilova T. A., Brigida V. S. Circular mining wastes management for sustainable production of camellia sinensis (L.) O. Kuntze. *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 15, article 11671. DOI: 10.3390/su151511671.

12. Makovozova Z. E., Sokolov A. A., Fomenko V. A., Sarbaeva M. T. Influence of hydrogeology at Unal tailings pond on ecosystem pollution with heavy metals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 6, pp. 126 – 138. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_126.

13. Seryanina A. V., Ovchinnikova T. I., Tertychnaya S. V. On the issue of environmental safety in the metallurgical industry. *Occupational Safety in Industry*. 2024, no. 8, pp. 23 – 28. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-8-23-28.

14. Wang Y., Zhang N., Chen, X. A short-term residential load forecasting model based on lstm recurrent neural network considering weather features. *Energies*. 2021, vol. 14, article 2737. DOI: 10.3390/en14102737.

15. Osmin V. V., Kireeva G. I. Integrated assessment of technogenic deposits resource potential and processing technologies. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025, vol. 17, no. 4, pp. 2188–2198. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-2188-2198.

16. Sokolov A. A., Miroshnikov A. S., Sokolova E. A. Control algorithms for mining and metallurgical plant ambient environment system stability. *Gornyi Zhurnal*. 2016, no. 12, pp. 83–86. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.17.

17. Bosikov I. I., Silaev I. V., Kuzina A. V., Mishedchenko A. A. Comprehensive analysis of the properties of the efficiency criterion for the synthesis of technical air supply systems for coal mines. *Ugol'*. 2025, no. 5, pp. 128–131. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-128-131.

18. Zinovieva O. M., Kolesnikova L. A., Merkulova A. M., Smirnova N. A. Environmental risk management at mining enterprises. *Ugol'*. 2022, no. 3, pp. 76–80. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-3-76-80.

19. Valiev N. G., Golik V. I., Lebzin M. S. Inertness of influence exerted by effluents of Tyrnyauz Tungsten–Molybdenum Plant on hydrological systems of the North Caucasus. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 1-1, pp. 5–16. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_5.

20. Tuomela A., Ronkanen A.-K., Rossi P. M., Rauhala A., Haapasalo H., Kujala K. Using geomembrane liners to reduce seepage through the base of tailings ponds—a review and a framework for design guideline. *Geosciences (Switzerland)*. 2021, vol. 11, no. 2, pp. 1–23. DOI: 10.3390/geosciences11020093.

21. Frunzikyan H. B., Margaryan V. G., Misakyan A. E., Navasardyan S. K. Assessment of the ecological state of waters in mining regions (Debed River basin). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026, no. 6, pp. 68–82. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_6_0_68.

22. Banerjee B. P., Raval S., Maslin T. J., Timms W. Development of a UAV-mounted system for remotely collecting mine water samples. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2020, vol. 34, no. 6, pp. 385–396. DOI: 10.1080/17480930.2018.1549526.

23. Nguyen Q., Kitchener R., Bradshaw C. Investigation, monitoring and management of downstream groundwater in the tailings storage facilities of Nui Phao mine, Vietna. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2019, vol. 231, pp. 35–45. DOI: 10.2495/WM180041.

24. Offenbergl I., Iliash N. Geoecological monitoring in extraction process of soluble minerals from underground deposits. *International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management Sgem*. 2019, vol. 19 (5.2). DOI: 10.5593/sgem2019/5.2/S20.050.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Клюев Роман Владимирович — д-р техн. наук, доцент, профессор, Московский политехнический университет, e-mail: kluev-roman@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0003-3777-7203.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

R. V. Klyuev, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Professor, Moscow Polytechnic University, 107023, Moscow, Russia, e-mail: kluev-roman@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0003-3777-7203.

Получена редакцией 24.04.2026; получена после рецензии 01.06.2026; принята к печати 10.07.2026.

Received by the editors 24.04.2026; received after the review 01.06.2026; accepted for printing 10.07.2026.

