



Научная статья

УДК 669.21.053.4

EDN: SYDLRX

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-2-8

## Минералого-технологические особенности лежалых хвостов золотоизвлекательных фабрик Енисейской Сибири и оценка перспектив их биометаллургической переработки

Д.И. Целюк<sup>a,е</sup>, А.Г. Михайлов<sup>b</sup>, Н.А. Махнева<sup>c</sup>, А.Н. Кокорин<sup>d</sup>, О.И. Целюк<sup>e</sup>

<sup>a-с,е</sup>Институт химии и химической технологии СО РАН, Красноярск, Российская Федерация

<sup>a,b</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

<sup>d</sup>Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, Российская Федерация

**Резюме.** Целью проведенного исследования являлось изучение вовлечения в переработку лежалых хвостов золотоизвлекательных фабрик Енисейской Сибири (Артемовской и Советской) в условиях ухудшения качества природного сырья. В ходе работы показано, что традиционные методы гравитации и прямого цианирования малоэффективны из-за тонкодисперсного состава техногенных отложений, где доля класса менее 0,05 мм достигает 92,6 %, а в зоне пруда-отстойника с этим классом связано до 97 % золота. Установлено, что низкая эффективность прямого цианирования обусловлена не крупностью материала, а упорностью сырья, связанной с тонкой вкрапленностью металла в сульфиды. В алеврито-пелитовых фракциях золото ассоциировано с пиритом, арсенопиритом, пирротинном и продуктами их окисления – гидроксидами железа и сульфатами. Значительная часть металла присутствует в наноразмерной и структурно-связанной формах, физически недоступных для цианистых растворов без предварительной деструкции минеральной матрицы. Фазовый анализ подтвердил, что доля свободного (цианируемого) золота в алеврито-пелитовой зоне Советской золотоизвлекательной фабрики практически отсутствует, а в хвостах Артемовской золотоизвлекательной фабрики не превышает 3,6 %. Экспериментально обоснована принципиальная возможность бактериального окисления сульфидов аборигенными микроорганизмами. В лабораторных колонных испытаниях степень окисления сульфидного концентрата достигла 95 %, что привело к разрушению матрицы и высвобождению тонкодисперсного золота. Результаты служат минералого-технологическим обоснованием для перехода к последующим испытаниям сорбционного цианирования биоокисленного продукта с целью подтверждения прогнозируемого извлечения золота и оценки расхода реагентов.

**Ключевые слова:** лежалые хвосты, сульфиды, тонкодисперсное золото, гранулометрический состав, бактериальное выщелачивание, биогидрометаллургия

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии и химической технологии СО РАН, проект FWES-2026-0004.

**Благодарности.** Результаты исследований получены с помощью оборудования Центра коллективного пользования Института химии и химической технологии СО РАН (г. Красноярск, Россия).

**Для цитирования:** Целюк Д.И., Михайлов А.Г., Махнева Н.А., Кокорин А.Н., Целюк О.И. Минералого-технологические особенности лежалых хвостов золотоизвлекательных фабрик Енисейской Сибири и оценка перспектив их биометаллургической переработки // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 2. С. ?–?. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-2-8>. EDN: SYDLRX.



## Original article

# Mineralogical and technological features of mature tailings from gold recovery plants in Yenisei Siberia and assessment of their biometallurgical processing prospects

Denis I. Tselyuk<sup>a,✉</sup>, Alexander G. Mikhailov<sup>b</sup>, Natalia A. Makhneva<sup>c</sup>,  
Aleksey N. Kokorin<sup>d</sup>, Oleg I. Tselyuk<sup>e</sup>

<sup>a–c,e</sup>Institute of Chemistry and Chemical Technology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>a,b</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>d</sup>Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Krasnoyarsk, Russian Federation

**Abstract.** The objective of this study is to investigate the recycling of mature tailings from gold recovery plants in Yenisei Siberia (Artemovskaya and Sovetskaya plants) in the context of deteriorating raw material quality. The study demonstrated that traditional gravity and direct cyanidation methods are ineffective due to the fine-grained composition of technogenic sediments, where the proportion of fine-grained sediments smaller than 0.05 mm reaches 92.6%, and in the settling pond zone, up to 97% of the gold is associated with this class. “It was found that the low efficiency of direct cyanidation is due rather to the refractory nature of the ore, which is related to the fine-grained dissemination of the metal within the sulfides, than to the coarseness of the material.” In silt-pelitic fractions, gold is associated with pyrite, arsenopyrite, pyrrhotite, and their oxidation products—iron hydroxides and sulfates. A significant portion of the metal is present in nanoscale and structurally bound forms, physically inaccessible to cyanide solutions without prior destruction of the mineral matrix. Phase analysis confirmed that the proportion of free (cyanidable) gold in the silt-pelite zone of the Sovetskaya gold recovery plant is virtually absent, and in the tailings of the Artemovskaya gold recovery plant, it does not exceed 3.6%. The fundamental possibility of bacterial oxidation of sulfides by indigenous microorganisms was experimentally substantiated. In laboratory column tests, the oxidation degree of the sulfide concentrate reached 95%, which led to matrix destruction and the release of finely dispersed gold. The results provide mineralogical and technological justification for subsequent testing of sorption cyanidation of the biooxidized product to confirm the predicted gold recovery and estimate reagent consumption.

**Keywords:** mature tailings, sulfides, finely dispersed gold, particle size distribution, bacterial leaching, biohydrometallurgy

**Funding:** The work was carried out as part of the state assignment of the Institute of Chemistry and Chemical Technology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, project FWES-2026-0004.

**Acknowledgements:** The research results were obtained using the equipment of the Shared Use Center of the Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russia).

**For citation:** Tselyuk D.I., Mikhailov A.G., Makhneva N.A., Kokorin A.N., Tselyuk O.I. Mineralogical and technological features of mature tailings from gold recovery plants in Yenisei Siberia and assessment of their biometallurgical processing prospects. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(2):?–?. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-2-8>. EDN: SYDLRX.

## Введение

В настоящее время Россия является одним из мировых лидеров по добыче золота. По данным Торгово-промышленной палаты Российской Федерации и Союза золотопромышленников, в 2021 г. в стране было добыто 363,5 т благородного металла, а в 2022 г. – 371 т [1]. По оценкам экспертов, к 2030 г. объем добычи золота в России может достичь 450–500 т в год [2].

В то же время параллельно с ростом добычи происходит снижение количества кондиционных запасов. Сложившиеся тренды связаны с ухудшением качества разведанных руд и сокращением промышленно-значимой сырьевой базы. Отмеченные тенденции негативно сказываются на долгосрочном прогнозе развития и освоения промышленной базы золота в Российской Федерации<sup>1,2</sup> [3]. В сложившейся ситуации крайне необходимым

<sup>1</sup> Бюллетень Счетной палаты РФ. Отчет о результатах экспертно-аналитического мероприятия «Анализ воспроизводства минерально-сырьевой базы Российской Федерации в 2015–2019 годах» (утв. Коллегией Счетной палаты Российской Федерации 26 февраля 2020 г.). 2020. № 5. Недропользование. Режим доступа: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/3ef/3efad1d974fb096eff58368ba6a9fca1.pdf?ysclid=mrliif17d7247189141> (дата обращения 12.03.2026).

<sup>2</sup> Иванов А.И. Минерально-сырьевая база золота Российской Федерации и перспективы ее развития: доклад на XX Горном форуме МАЙНЕКС // Rutube.ru. Режим доступа: <https://rutube.ru/video/dcb2ddec04a956a32e6042ee3924bec4/> (дата обращения: 12.03.2026).



является наращивание сырьевой базы за счет вовлечения в переработку новых объектов, существенную часть которых составляют золотоносные техногенные образования. В связи с этим в 2024 г. Правительством Российской Федерации утверждена «Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года». Сложность решения данной задачи также была отмечена на заседании Президиума Российской академии наук 22 апреля 2025 г. Исходя из поставленных Правительством задач, Президиум РАН указал, что одним из основных направлений научных исследований является изучение вещественного состава рудного сырья и техногенных отходов, образующихся при обогащении и переработке полезных ископаемых.

К настоящему времени установлено, что намывные лежалые хвосты обладают достаточно высоким промышленным потенциалом. Так, в Центральной Сибири в хвостохранилищах основных золотоизвлекательных фабрик (ЗИФ) размещено около 100 млн т техногенного сырья. Ресурсный потенциал содержащегося в хвостах драгоценного металла составляет порядка 120 т. Например, в лежалых хвостах Советской ЗИФ при среднем содержании золота 4,5 г/т находится порядка 24 т металла. Ресурсный потенциал хвостохранилища Балейской ЗИФ-1 оценивается в 9,7 т при содержании золота более 1 г/т. Утвержденные запасы в запруде № 3 хвостохранилища Артемовской ЗИФ по категории  $C_2$  составляют 3,5 т при содержании 2 г/т [4].

Продолжение работ, направленных на дальнейшее уточнение ресурсного потенциала лежалых хвостов ЗИФ и возможности рентабельного извлечения из них золота, является весьма востребованной задачей на современном этапе экономического развития страны. Это обусловлено тем, что до настоящего времени основным промышленным методом переработки золотосодержащих техногенных руд остается цианирование (как в режиме кучного выщелачивания, так и в условиях фабричной переработки в аппаратах механического перемешивания). Однако, несмотря на длительную историю применения и постоянное совершенствование, данный метод не достигает намечаемой эффективности применительно к лежалым хвостам. В качестве примера можно привести динамику извлечения золота из техногенного месторождения Артемовской ЗИФ. Опыт промышленного извлечения золота из лежалых хвостов,

основанный на методе прямого цианирования, показал его несостоятельность. При ожидаемом проектном извлечении золота 60,4 %, фактическая добыча не превысила 15 %.

Сложность применения существующих технологических схем переработки золотоносных лежалых хвостов заключается главным образом в отличии их вещественного состава от первичных природных руд, на формирование которого значительное влияние оказали техногенные факторы. К ним относятся физические и механические операции рудоподготовки: дробление, измельчение и другие процессы, меняющие структурные особенности техногенного вещества и переводящие его в тонкодисперсные формы. Наличие подавляющего количества тонких и дисперсных фракций зерен в составе лежалых хвостов существенно отличает их по свойствам от макро-размерных осадочных образований и влияет на коагуляцию и проницаемость техногенных осадков. Низкая эффективность прямого цианирования лежалых хвостов подтверждается и зарубежными исследованиями, которые показывают, что упорность золота в техногенных отложениях обусловлена не столько их тонкодисперсным составом (что само по себе не препятствует выщелачиванию в аппаратах механического перемешивания), сколько его тонкой вкрапленностью и структурно-связанным состоянием в сульфидах, что делает металл физически недоступным для цианистых растворов без предварительной деструкции минеральной матрицы [5, 6].

Применение цианистых растворов также сопровождается их активным взаимодействием с широко развитыми в хвостах новообразованными минеральными формами гидроксидов железа и тонкоагрегатной сульфатной минеральной массой, что снижает эффективность извлечения золота и приводит к существенному росту расхода цианида. Совокупность этих факторов занижает кондиционную привлекательность техногенных месторождений и рентабельность их промышленного освоения.

Таким образом, принципиально новым научным подходом к изучению особенностей формирования техногенных месторождений и возможности извлечения полезных компонентов является фундаментальность исследований по следующим направлениям:

1. Изучение вещественного состава алевритовых и пелитовых осадков золотовмещающих залежей.



2. Оценка их взаимодействия с технологическими растворами.

3. Определение параметров, обеспечивающих циркуляцию растворов в толще техногенных лежалых хвостов.

4. Определение условий перевода золота в подвижное состояние путем вскрытия рудовмещающих тонких и дисперсных фракций сульфидов биохимическими методами.

Цель проведенных исследований заключалась в том, чтобы, используя фундаментальные научные подходы, изучить особенности распределения, содержания и ассоциированности золота в тонких и дисперсных фракциях техногенных осадков лежалых хвостов, провести фазовый анализ золота и на этой основе выполнить минералого-технологическое обоснование перспектив их переработки с применением стадии бактериального окисления. Для достижения поставленной цели решались задачи по исследованию вещественного состава алеврито-пелитовых осадков золотовмещающих залежей, оценке условий раскрытия золотосодержащих сульфидов под воздействием технологических растворов и определению условий, обеспечивающих их циркуляцию в толще продуктивных отложений, а также по определению условий перевода золота в подвижное состояние с последующим его осаждением на геохимических барьерах.

#### **Материалы и методы исследования**

Объектами исследований послужили хвостохранилища Советской и Артемовской ЗИФ. Хранилища использовались для размещения хвостов, образовавшихся при обогащении руд золото-кварцевых и золото-кварц-сульфидных месторождений. Исходным материалом для Артемовской ЗИФ являлись руды Константиновского и Ольховского месторождений, формационный тип которых относится к золото-кварц-сульфидному. Сырьевой базой для Советской ЗИФ служили руды месторождений Советское и Эльдorado, принадлежащие к малосульфидной золото-кварцевой формации.

Характерной особенностью исследуемых объектов является то, что лежалые хвосты сформировались в результате переработки первичных руд по технологическим схемам, применявшимся на момент работы ЗИФ. В частности, руды Константиновского и Ольхов-

ского месторождений (Артемовская ЗИФ) перерабатывались по схемам гравитационного и флотационного обогащения с последующим цианированием, при этом образующиеся тонкие хвосты направлялись в хвостохранилище без стадии предварительного вскрытия. Сырьевая база Советской ЗИФ (месторождения Советское и Эльдorado) перерабатывалась по схеме как гравитационного обогащения, так и тонкого измельчения с последующей флотацией и цианированием. Однако, несмотря на применение указанных технологических решений, значительная часть тонких сульфидов, содержащих упорное золото, не подвергалась окислению и поступала в хвосты в невскрытом виде. Именно эти остаточные сульфидные минералы, сохранившиеся в хвостохранилище после переработки, и определяют современную технологическую упорность лежалых хвостов.

В настоящее время данные объекты представляют собой сложные природно-технические системы, где в процессе длительного хранения формируется новый техногенный тип руд, обладающий параметрами, существенно отличающимися их от природного сырья. Особенностью технической эксплуатации хвостохранилищ является зональное распределение техногенных осадков. В пляжной зоне формируются песчаные и супесчаные лежалые хвосты. В переходной к прудам-отстойникам зоне происходит осадконакопление преимущественно алевритовых фракций, а в зоне пруда-отстойника – пелитовых илов.

Получение исходного фактического материала осуществлялось в процессе бурения массивов лежалых хвостов. В летний период бурение проводилось в зонах осушенных прудов-отстойников Артемовской ЗИФ. В зимний период работы выполнялись со льда на действующей секции хвостохранилища Советской ЗИФ. Бурение велось по наблюдательным профилям буровой установкой ЛБУ на базе автомобиля ЗИЛ-131. Применялся метод колонкового бурения скважин диаметром 127 мм. Учитывая сложности, вызванные текучим состоянием техногенных отложений в накопителях, часть буровых работ производилась в зимний период. В феврале глубина промерзания грунта позволила безопасно осуществлять заезд на площадки бурения и вскрывать вертикальный разрез техногенных толщ на всю мощность. Глубина вскрытия техногенных





осадков на хвостохранилище Советской ЗИФ составила от 12 до 30 м, на Артемовской ЗИФ – от 5 до 8 м. Отбор проб выполнялся по всей мощности техногенных осадочных массивов, а также захватывал кровлю подстилающих пород. Интервал опробования составил 0,5 м. При отборе монолиты немедленно изолировались способом парафинирования.

Для изучения вещественного состава техногенных отложений отбирались пробы массой до 3 кг, которые затем усреднялись квартованием методом «кольца и конуса». Далее проба делилась на четыре части. Одна часть направлялась на ситовый анализ, вторая – на химические исследования и определение золотонности, третья – на минералогический анализ, оставшаяся часть – в лабораторию микробиологии для выделения аборигенных бактерий, окисляющих сульфиды.

Определение содержания псаммитовой и алевритовой фракций выполнялось с помощью ситового анализа с использованием набора сит. Определение гранулометрического состава пелитовой фракции осуществлялось ареометрическим методом в соответствии с ГОСТ 12536-2014<sup>3</sup>, а также с разделением фракций в тяжелых жидкостях.

Химический и геохимический анализ проб проводился с применением атомно-абсорбционного, атомно-эмиссионного спектрального методов и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). Исследования выполнялись на следующих приборах: спектральный атомно-эмиссионный комплекс ГРАНД, атомно-абсорбционный спектрометр SOLAAR-S, масс-спектрометры с индуктивно связанной плазмой ELAN 9000, атомно-эмиссионный спектрометр с индуктивно связанной плазмой ACTIVA-M. Химический анализ техногенных осадков на главные компоненты осуществлялся по методике Научного совета по аналитическим методам № 487-ХС<sup>4</sup>. Атомно-эмиссионный спектральный анализ валовых концентраций серебра, мышьяка, бария, бора, кобальта, хрома, меди, марганца, молибдена, никеля, свинца, стронция, титана,

ванадия, цинка, иттрия, циркония производился в соответствии с требованиями МВИ-05-АП-2007<sup>5</sup>.

Минералогический анализ включал изучение минерального состава с помощью оптических микроскопов МБС-10, Полам Р-312, стереомикроскопа Leica MZ 12.5. Детализация морфологии минеральных зерен и их поверхности осуществлялась с помощью сканирующих электронных микроскопов JEOL JSM-7001F и Hitachi TM-3000. Выборочное исследование минеральных форм проводилось методом рентгенофазового анализа на дифрактометре ДРОН-3.

Определение концентрации золота в легалых хвостах осуществлялось с использованием:

- масс-спектрометрического метода с индуктивно связанной плазмой (предел обнаружения до 0,005 г/т);
- пробирно-атомно-абсорбционного анализа (предел обнаружения от 0,005 г/т).

Изучение форм нахождения золота и оценки его доступности для цианирования выполнялось с помощью фазового анализа, основанного на методе последовательного выщелачивания навесок в специальных растворителях с различной растворяющей способностью. Схема анализа включала операции, описанные ниже.

Фазовый анализ золота проводился методом последовательного селективного выщелачивания. На первой стадии для извлечения свободного и поверхностного золота (технологически доступной для прямого цианирования фазы) навеску пробы обрабатывали 0,2 %-м раствором NaCN в течение 2 ч при температуре 20 °С. На второй стадии твердый остаток подвергали воздействию разбавленной азотной кислоты для растворения золота, ассоциированного с окисленными минеральными фазами (гидроксидами железа) и легко растворимыми сульфидами. Завершающая стадия заключалась в обработке остатка «царской водкой» (смесь HCl и HNO<sub>3</sub> в объемном соотношении 3:1) при нагревании, что обе-

<sup>3</sup> ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2019. 23 с.

<sup>4</sup> Методика количественного химического анализа № 487-ХС. Определение натрия, магния, алюминия, кремния, фосфора, калия, кальция, титана, марганца и железа в горных породах, объектах окружающей среды атомно-эмиссионным методом с индуктивно связанной плазмой. М., 2010. 37 с.

<sup>5</sup> МВИ-05-АП-2007. Методика выполнения измерений массовых долей элементов в почвах, донных отложениях, горных породах и рудах атомно-эмиссионным спектральным методом с использованием способа просыпки пробы в дуговой разряд.



спечивало полное разложение сульфидной матрицы и переход в раствор золота, прочно связанного в кристаллической решетке пирита и арсенопирита. Содержание золота в каждом растворе определялось атомно-абсорбционным методом, что позволило количественно оценить распределение металла по технологическим фазам и обосновать необходимость предварительного вскрытия сульфидов.

В связи с тем, что прямое выщелачивание лежалых хвостов малоэффективно из-за низких фильтрационных свойств тонкодисперсных фракций, эксперимент по бактериальному окислению проводился на сульфидном концентрате, выделенном из исходных хвостов. Предварительно исходная проба лежалых хвостов подвергалась гравитационному обогащению с использованием флотационных машин, а также концентраторов «Итомак» и GoldGenie. Доводка и очистка полученного концентрата осуществлялась на концентрационном столе. Масса полученного концентрата составила 5 кг.

Эксперимент по бактериальному окислению проводился в лабораторных колонных установках восходящего капиллярного выщелачивания (рис. 1). В качестве окислителя использовалась суспензия аборигенных бактерий, выделенных непосредственно из материала хвостов и адаптированных к специфическим условиям данного техногенного

материала. Выщелачивание проводилось при температуре 30 °С. Значение pH пульпы поддерживалось на уровне 3,5 – данный режим был выбран как оптимальный для работы выделенной аборигенной микрофлоры, сочетающей ацидофильные и нейтрофильные штаммы, способные к окислению железа и серы в мягких условиях. На начальном этапе выщелачивающий раствор подавался безнапорно до полного насыщения исследуемого материала. Объемы раствора и концентрацию водорастворимых солей замеряли через определенные промежутки времени. Были приняты меры для исключения испарения. После каждого цикла эксперимента проводили минералогический анализ проб материала с разных уровней колонны с последующей статистической обработкой средних значений.

Механизм перевода компонентов в раствор при бактериальном окислении заключается в биохимическом окислении ацидофильными хемолитотрофными бактериями ионов  $\text{Fe}^{2+}$  и элементарной серы до  $\text{Fe}^{3+}$  и серной кислоты. Образующийся сульфат железа (III) выступает химическим окислителем, разрушающим кристаллическую решетку сульфидов (реакция косвенного биохимического выщелачивания), что сопровождается переходом железа, серы и ассоциированного с ними золота в раствор или в твердые фазы гидроксидов. Таким образом, в жидкую фазу переходят ионы железа,

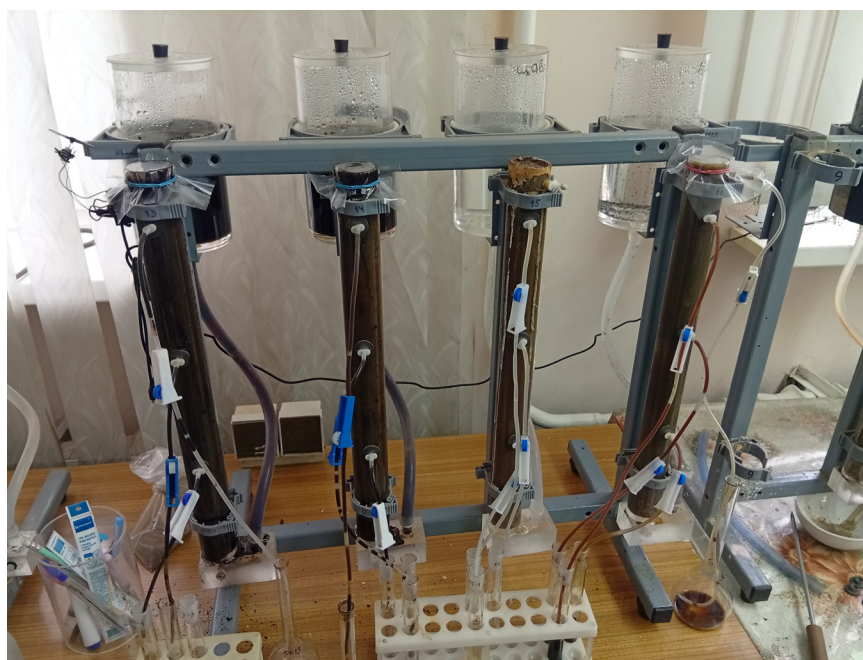


Рис. 1. Схема колонной установки восходящей капиллярной фильтрации с биокатализом  
Fig. 1. Diagram of a column-type ascending capillary filtration system with biocatalysis



серы, меди, никеля, а также высвобождающиеся из сульфидной матрицы золото.

В ходе экспериментов контролировали выход в жидкую фазу ионов золота, меди, никеля, железа, серы. Концентрацию элементов определяли методом масс-спектрометрии на анализаторе ICP-MS Agilent 7500a. Периодически отбирались пробы жидкой фазы для регистрации наличия и роста микроорганизмов. Анализ проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM-3000 и оптического микроскопа Olympus B43.

### Результаты исследования и их обсуждение

Лежалые хвосты ЗИФ представляют собой песчано-пылеватые отложения. По мере приближения от пляжной зоны к пруду-отстойнику обломки и зерна минералов приобретают все более тонкие (илистые) размеры. Уложенные в хвостохранилища техногенные осадки залегают горизонтально либо с незначительным уклоном в сторону пруда-отстойника осветленных вод.

Анализ гранулометрического состава показал, что лежалые хвосты Артемовской и Советской ЗИФ близки по основным классам крупности. Техногенные осадки обеих фабрик представлены песчано-илистыми отложениями. Доля мелких классов (менее 0,1 мм) составляет 69,8 и 65,3 %, средних классов (1–0,1 мм) – 28,1 и 26,5 % соответственно. Такое распределение свидетельствует о песчано-илистом составе лежалых хвостов. Основная масса хвостов становится более тонкой, с размерами зерен менее 0,05 мм, содержание которых достигает 92,6 %.

Хвосты из пляжной зоны имеют пористость 52,4–58,3 %, плотность грунта 1,5–1,7 г/см<sup>3</sup>, коэффициент фильтрации  $3,1 \times 10^{-5}$ – $4 \times 10^{-5}$  см/с.

В зоне пруда-отстойника физико-механические параметры осадков изменяются. Плотность грунта увеличивается до 2,1–2,3 г/см<sup>3</sup>, пористость понижается до 35,4–39,2 %, коэффициент фильтрации уменьшается до  $5,0 \times 10^{-6}$  см/с. Распределение золота по классам крупности представлено в табл. 1.

Характеристика химического состава лежалых хвостов приведена в табл. 2. Среди литофильных соединений доминируют оксид кремния (39,4–46,3 %) и оксид алюминия (5,8–11,9 %). Суммарное содержание оксидов магния и кальция не превышает 14 %, оксидов натрия и калия — около 2 %. Из рудообразующих компонентов преобладает оксид железа, концентрация которого находится в диапазоне 20,9–28 %.

Кроме основных компонентов в составе лежалых хвостов установлено постоянное присутствие микроэлементов: серебра, золота, мышьяка, бария, кобальта, хрома, меди, марганца, молибдена, никеля, свинца, титана, ванадия, цинка. Максимальные концентрации (0,1–1 %) характерны для мышьяка, меди, марганца, титана. Значения от 0,01 до 0,1 % присущи бария, кобальту, свинцу, ванадию, цинку. В интервале 0,001–0,01 % присутствуют литий, хром, никель. Содержания серебра и золота колеблются от 0,0001 до 0,001 %.

Минеральный состав лежалых хвостов довольно однообразен. Техногенные осадки представляют собой светло-серую средне- и тонкозернистую массу, состоящую из породообразующих и рудных минералов. Результаты рентгенофазового анализа лежалых хвостов показали, что в пляжной зоне хвостохранилища Советской ЗИФ преобладают кварц, гидрослюдистые образования (серицит), хлорит, пирит, арсенопирит, гетит и гипс. В зоне пруда-отстойника состав изменяется в сто-

**Таблица 1. Гранулометрический состав лежалых хвостов, %**  
**Table 1. Particle size distribution of mature tailings, %**

| Класс крупности, мм | Пляжная зона |                      | Переходная зона + пруд-отстойник |                      |
|---------------------|--------------|----------------------|----------------------------------|----------------------|
|                     | Выход класса | Распределение золота | Выход класса                     | Распределение золота |
| -3...+1             | 6,4          | 4,7                  | 0,02                             | –                    |
| -1...+0,5           | 12,3         | 12,1                 | 0,07                             | 0,4                  |
| -0,5...+0,315       | 5,1          | 5,3                  | 0,52                             | –                    |
| -0,315...+0,2       | 5,1          | 7,8                  | 0,98                             | 0,6                  |
| -0,2...+0,1         | 6,1          | 8,9                  | 2                                | 0,7                  |
| -0,1...+0,071       | 14,2         | 15,2                 | 1,56                             | 0,5                  |
| -0,071...+0,05      | 7,2          | 6,4                  | 2,22                             | 0,8                  |
| -0,05               | 43,6         | 39,6                 | 92,63                            | 97                   |
| Итого               | 100          | 100                  | 100                              | 100                  |



**Таблица 2. Химический состав лежалых хвостов, %**  
**Table 2. Chemical composition of mature tailings, %**

| Компонент                      | Артемовская<br>золотоизвлекательная фабрика |            | Советская<br>золотоизвлекательная фабрика |            |
|--------------------------------|---------------------------------------------|------------|-------------------------------------------|------------|
|                                | Скважина 5                                  | Скважина 6 | Скважина 4                                | Скважина 5 |
| SiO <sub>2</sub>               | 39,38                                       | 41,96      | 45,9                                      | 46,3       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 27,98                                       | 22,49      | 21,3                                      | 20,9       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,84                                        | 7,57       | 10,1                                      | 11,9       |
| CaO                            | 6,88                                        | 8,75       | 0,48                                      | 1,31       |
| MgO                            | 3,19                                        | 4,89       | 1,1                                       | 0,95       |
| Na <sub>2</sub> O              | 1,09                                        | 1,19       | -                                         | -          |
| K <sub>2</sub> O               | 0,76                                        | 1,04       | 1,48                                      | 1,7        |
| Fe <sub>общ.</sub>             | 23                                          | 18,3       | 23,56                                     | 21,42      |
| Fe <sub>окисл.</sub>           | 18,1                                        | 14,1       | 6,26                                      | 7,5        |
| Fe <sub>сульф.</sub>           | 4,9                                         | 4,2        | 17,3                                      | 15,16      |
| S <sub>общ.</sub>              | 12,2                                        | 7,81       | 16,14                                     | 14,32      |
| S <sub>сульфидн.</sub>         | 3,91                                        | 2,8        | 14,3                                      | 11,91      |
| S <sub>окисл.</sub>            | 7,08                                        | 5,1        | 0,34                                      | 1,3        |
| S <sub>элемент.</sub>          | -                                           | -          | 1,5                                       | 1,11       |
| As <sub>общ.</sub>             | -                                           | -          | 7,79                                      | 6,53       |
| As <sub>окисл.</sub>           | -                                           | -          | 2,75                                      | 1,95       |
| As <sub>сульф.</sub>           | -                                           | -          | 5,04                                      | 4,03       |

рону гидрослюдистых образований (серицит, иллит), хлорита, кварца, каолинита и гипса. Для хвостов Артемовской ЗИФ в пляжной зоне характерны кварц, полевые шпаты, карбонаты (доломит, кальцит), слюдисто-гидрослюдистые образования (биотит, мусковит, хлорит), пирротин, пирит, халькопирит, гетит и гипс. В зоне пруда-отстойника установлены полевые шпаты, карбонаты (доломит, кальцит), слюдисто-гидрослюдистые образования (биотит, мусковит, хлорит), кварц, каолинит и гипс.

Содержание породообразующих минералов в техногенных осадках изменяется от 42 до 60,3 %, рудных минералов — от 26,4 до 37 %. Минеральный состав хвостов в значительной степени определяется составом исходного сырья. Для хвостов Советской ЗИФ более характерен кварц-слюдисто-гидрослюдистый состав, для хвостов Артемовской ЗИФ — кварц-полевошпатово-карбонатный. Содержание рудных минералов в техногенных толщах близко, однако наблюдаются отличия, обусловленные типом перерабатываемых руд. В хвостах Советской ЗИФ среди сульфидов преобладают пирит и марказит (до 20,1 %), реже встречается арсенопирит (до 11 %). В хвостах Артемовской ЗИФ преобладают пирит (до 15,9 %) и пирротин (до 20,6 %). Вторичные минеральные фазы, образовавшиеся в процессе изменения первичного вещества, могут достигать 21–34 %.

Содержание золота в хвостах Артемовской ЗИФ изменяется от 0,8 до 4,5 г/т, в хвостах Советской ЗИФ — от 0,3 до 8,8 г/т. Анализ распределения золота по классам крупности (см. табл. 1) показывает, что в пляжной зоне преобладающая масса металла (около 60 %) сосредоточена в материале крупностью более 0,05 мм. В зоне пруда-отстойника, где отложения на 93 % сложены материалом крупностью менее 0,05 мм, с этим классом связано 97 % золота.

В лежалых хвостах золото присутствует в нескольких формах, существенно различающихся по технологической доступности для цианирования. Результаты фазового анализа, выполненного методом последовательного выщелачивания, представлены в табл. 3. Установлено, что в псаммитовой фракции хвостов Советской ЗИФ доля свободного (цианируемого) золота составляет 3,1 %, тогда как в алеврито-пелитовой зоне его концентрации не установлены. В хвостах Артемовской ЗИФ доля свободного золота не превышает 3,6 %. Основная масса металла (65,9–92,1 %) ассоциирована с рудными компонентами — тонковкрапленным и структурно-связанным золотом в сульфидах, что делает его принципиально недоступным для прямого цианирования.

Полученные результаты фазового анализа показывают, что подавляющая часть золота в алеврито-пелитовых фракциях находится в форме, недоступной для прямого цианирова-





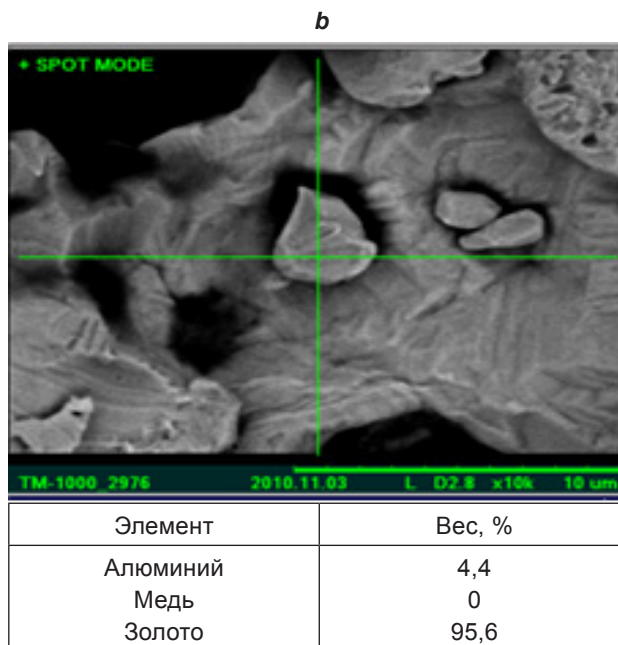
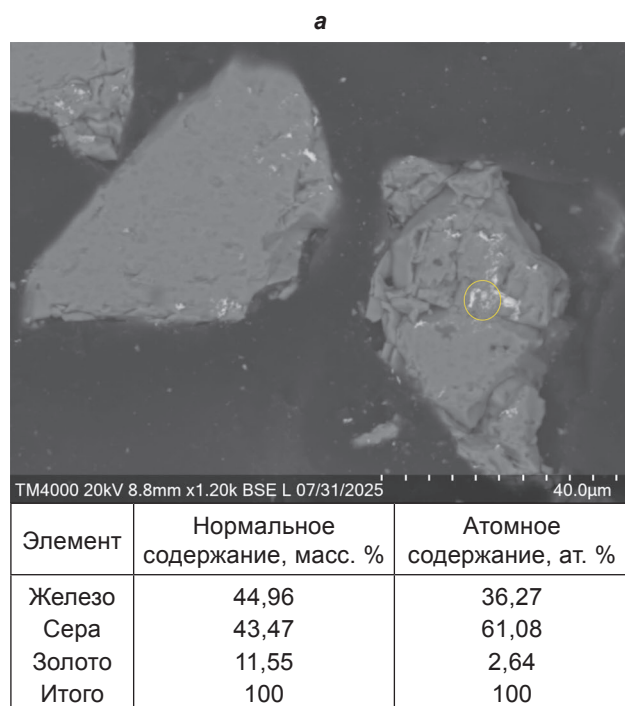
**Таблица 3. Распределение золота по формам нахождения в лежалых хвостах, %**  
**Table 3. Gold distribution by occurrence forms in mature tailings, %**

| Форма нахождения золота                              | Советская<br>золотоизвлекательная фабрика |                         | Артемовская<br>золотоизвлекательная фабрика |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|
|                                                      | Псаммитовая зона                          | Алеврито-пелитовая зона | Алеврито-пелитовая зона                     |
| Свободное золото                                     | 3,1                                       | –                       | 3,6                                         |
| Ассоциированное<br>с породообразующими<br>минералами | 2,1                                       | 0,2                     | 21,6                                        |
| Ассоциированное<br>с рудными компонентами            | 67,4                                      | 92,1                    | 65,9                                        |
| В гидроксидах железа<br>и сульфатной массе           | 27,7                                      | 7,7                     | 9                                           |
| Итого                                                | 100                                       | 100                     | 100                                         |

ния. Это служит прямым минералого-технологическим обоснованием необходимости предварительного вскрытия сульфидной матрицы перед выщелачиванием.

В псаммитовой фракции свободное золото представлено тонкими чешуйками и пластинками с неровными краями, поверхность которых деформирована в результате механических воздействий. Размеры золотин варьируют от 0,025 до 0,15 мм. Микронзондовый анализ показывает высокую пробность золота (77,5 масс. % Au, 22,5 масс. % Ag).

Золото в виде сростков фиксируется преимущественно в сульфидах (арсенопирите, пирите). Степень разложения сульфидов определяет характер сростаний: со слабоокисленными минералами золото образует плотные сростки, в псевдоморфозах гидроксидов железа встречается в виде тонких чешуек и пластинок. Широко распространены наноразмерные частицы золота, локализованные в полостях на поверхности более крупных выделений, а также в виде нановключений в кристаллах пирита (рис. 2).



**Рис. 2. Формы нахождения золота в лежалых хвостах (растровая электронная микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия):**

**a – вкрапленное золото в пирите; b – частица самородного золота**

**Fig. 2. Gold occurrence forms in mature tailings (scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray spectroscopy):**

**a – disseminated gold in pyrite; b – particle of native gold**



В алеврито-пелитовой фракции золото также ассоциировано преимущественно с сульфидами, которые часто находятся в слабоизмененном состоянии. В рудных минералах золото присутствует в виде наноразмерных частиц и кластеров, рассеянных в матрице пирита и арсенопирита, либо в структурно-связанной форме. Энергодисперсионным анализом концентрации золота установлены в дефектах поверхности пирита и микротрещинах его кристаллов (до 1,38 %), а также в объеме минерала (от 0,17 до 1,63 %). Полученные результаты согласуются с выводами Р.Р. Лардж, В.Л. Таусона, Е.В. Ковальчук, Р.Г. Кравцовой и других исследователей о существовании структурно и поверхностно-связанного золота в сульфидах [7–10].

Полученные данные объясняют низкую эффективность прямого цианирования лежалых хвостов. Как показал опыт отработки техногенного месторождения Артемовской ЗИФ, фактическое извлечение золота не превысило 15 % при проектном извлечении 60,4 %. Низкие показатели обусловлены тем, что основная доля золота находится в ассоциации с сульфидами и гидроксидами железа, причем значительная часть металла присутствует в структурно-связанной форме. В связи с этим доля извлекаемого золота гравитационным методом и прямым цианированием не превышает 15 %, что и было подтверждено на практике.

В связи с установленной упорностью сырья перспективным направлением является применение методов биогидрометаллургии, в частности бактериального окисления сульфидов перед цианированием [11–14]. Мировой опыт, обобщенный в работе Ф.Ф. Роберто, А. Шипперса, показывает, что в последние десятилетия именно биоокисление упорных золотосодержащих руд и концентратов становится доминирующей технологией для такого типа сырья, а переработка техногенных отходов рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений развития минерально-сырьевой базы [15]. Промышленная реализация этих процессов успешно осуществляется на ряде крупных предприятий. В России на Олимпиадинском горно-обогатительном комбинате (Красноярский край) применяется технология кучного бактериального выщелачивания BIONORD®, позволяющая вовлекать в переработку бедные упорные золотосульфидные руды [16]. На Навоийском горно-металлургическом комбинате в Узбеки-

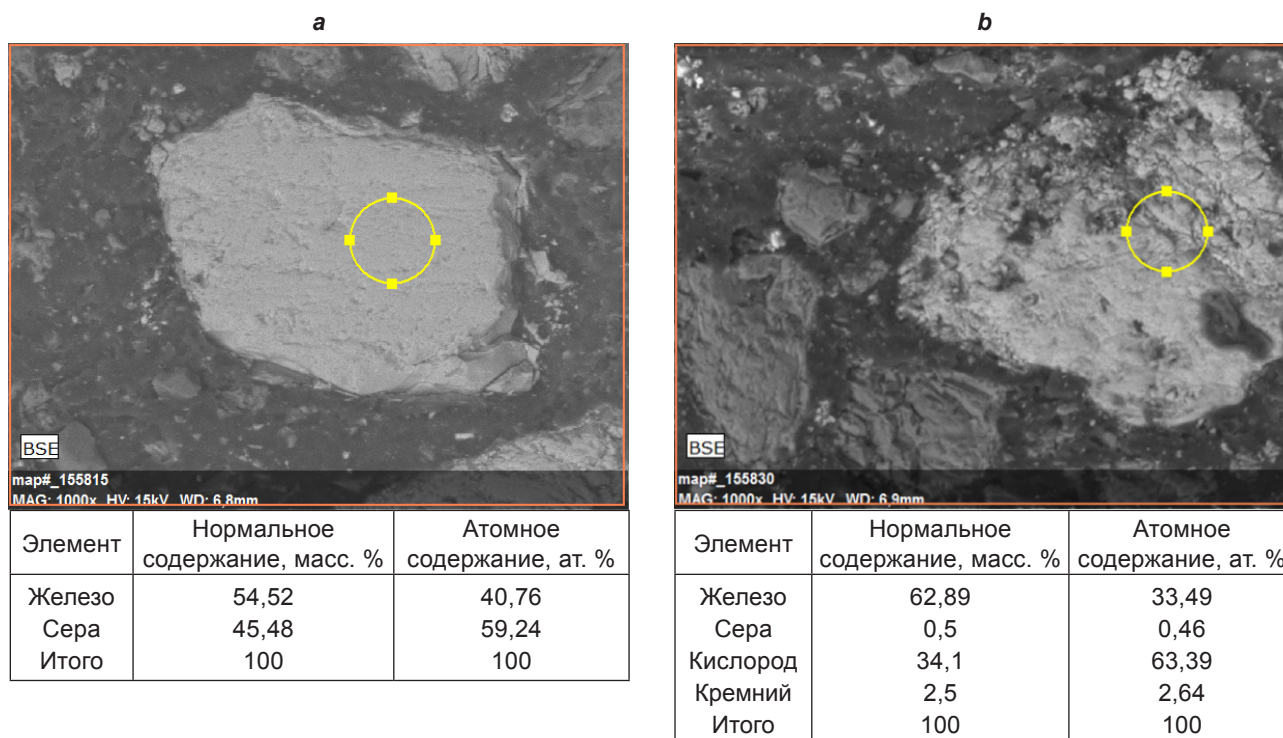
стане (гидрометаллургический завод НГМЗ-3) более 15 лет успешно функционирует производство с использованием технологии BIOX® для переработки упорных золотосульфидных концентратов [5]. Исследования последних лет подтверждают, что предварительное биоокисление позволяет существенно повысить извлечение золота из упорных руд по сравнению с прямым цианированием [5, 6]. Разрабатываются также комбинированные подходы, включающие стадии биоокисления с последующим удалением примесей [17] и использование катализаторов (например, ионов  $\text{Ag}^+$ ) для интенсификации процесса окисления упорных сульфидов [6].

Механизмы бактериального окисления сульфидных минералов подробно рассмотрены в ряде работ [18, 19]. Исследования показывают, что ведущую роль в процессах биоокисления играют ацидофильные хемолитотрофные бактерии, способные окислять железо и серу, что приводит к деструкции кристаллической решетки сульфидов и высвобождению тонкодисперсного золота [19]. Физико-химические закономерности этих процессов, включая кинетику окисления и роль поверхности минералов, были изучены казахстанскими исследователями применительно к различным типам минерального и техногенного сырья [18].

Для оценки принципиальной возможности деструкции сульфидной матрицы лежалых хвостов был проведен лабораторный эксперимент по бактериальному окислению сульфидного концентрата, выделенного из хвостов. В качестве окислителя использовалась суспензия аборигенных бактерий, выделенных непосредственно из материала хвостов. Процесс проводился в колоннах в течение 12 суток.

В процессе бактериального выщелачивания происходило активное окисление и растворение сульфидных минералов, о чем свидетельствовал переход в раствор серы, железа, золота и других элементов. По данным рентгенофазового анализа и электронной микроскопии, в твердом остатке после эксперимента содержание сульфидов снизилось на 95 %, а основными минеральными фазами стали гидроксиды железа и сульфаты (рис. 3).

Полученные результаты, подтверждающие высокую степень окисления сульфидов (95 %), согласуются с выводами Н. Ломидзе и др., которые в экспериментах по переработке сульфидных техногенных отходов достигли



**Рис. 3. Бактериальное окисление пирита из лежалых хвостов (растровая электронная микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия):**

*a – исходное зерно; b – его полная псевдоморфоза по гидроксидам железа через 12 суток*

**Fig. 3. Bacterial oxidation of pyrite from mature tailings (scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray spectroscopy):**

*a – original grain; b – its complete pseudomorphosis by iron hydroxides after 12 days*

96 %-го окисления сульфидной матрицы [16]. Исследования Г. Офори-Сарпонг и соавторов также подтверждают, что контроль параметров биоокисления позволяет подготовить материал для последующего извлечения золота цианированием [20]. В работах А.А. Магбулова, Н.А. Магбуловой показана возможность дополнительной интенсификации процесса за счет оптимизации состава питательной среды и адаптации микроорганизмов к высоким концентрациям мышьяка, что особенно актуально для хвостов с высоким содержанием арсенопирита, подобных Советской ЗИФ [5].

Таким образом, экспериментально подтверждена принципиальная возможность эффективного вскрытия упорного золота с помощью бактериального окисления сульфидов с использованием аборигенных микроорганизмов. Степень окисления сульфидов за 12 суток составила 95 %, что создает минералогические предпосылки для последующего извлечения золота цианированием. Окончательная оценка эффективности предложенной технологической схемы требует последующего проведения испытаний сорбционного цианирования биоокисленного продукта с

определением фактического извлечения золота и расхода реагентов.

### Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Лежалые хвосты Артемовской и Советской ЗИФ являются сложными техногенными образованиями с неравномерным распределением золота. Основной объем металла (до 97 % в отдельных зонах) сосредоточен в тонкодисперсных алеврито-пелитовых фракциях (менее 0,05 мм), что предопределяет упорность сырья для гравитационных методов обогащения и прямого цианирования.

2. Результаты фазового анализа показали, что доля свободного (цианируемого) золота в алеврито-пелитовой зоне Советской ЗИФ стремится к нулю, а в хвостах Артемовской ЗИФ не превышает 3,6 %. Основная масса металла (65,9–92,1 %) ассоциирована с сульфидными минералами (пиритом, арсенопиритом, пирротинном) и находится в тонковкрапленной и структурно-связанной формах.

3. Низкая эффективность прямого цианирования (15–30 %) обусловлена не самим





тонкодисперсным составом материала, а упорностью сырья. Она выражается в физической недоступности тонковкрапленного и структурно-связанного золота для цианистых растворов, а также в высоких сорбционных свойствах глинисто-гидроксидных фаз, значительно повышающих расход реагентов.

4. Мировой опыт подтверждает, что для такого типа упорного сырья эффективным способом подготовки является биологическое окисление сульфидов [15]. Успешная промышленная реализация биоокисления на российских и зарубежных предприятиях [5, 16] доказывает практическую состоятельность этого подхода.

5. Экспериментально доказана принципиальная возможность эффективного вскрытия упорного золота с помощью бактериального окисления сульфидов с использованием аборигенных микроорганизмов. Степень окисления сульфидов за 12 суток составила 95 %, что коррелирует с результатами других ис-

следователей, работающих с техногенными отходами [14, 20], и создает предпосылки для последующего высокого извлечения золота цианированием.

6. Полученные результаты служат минералого-технологическим обоснованием для разработки комбинированной технологии переработки лежалых хвостов, включающей стадию биоокисления сульфидного концентрата и последующее сорбционное цианирование. Дальнейшие исследования должны быть направлены на проведение опытных испытаний цианирования биоокисленного продукта с целью определения фактического извлечения золота и расхода реагентов. Перспективными направлениями оптимизации технологии могут стать использование катализаторов для ускорения процесса окисления упорных сульфидов [6], адаптация микроорганизмов к токсичным компонентам [5], а также применение комбинированных восстановительно-окислительных схем [17].

#### Список источников

1. Бутырина Е. Золотой вызов: почему добывать драгметалл в России становится невыгодно и как реагирует рынок на кризис // ФедералПресс. 2023. 7 июля. Режим доступа: <https://fedpress.ru/article/3253254> (дата обращения: 12.03.2026).
2. Прогноз добычи золота и алмазов в России до 2070 года // Вестник золотопромышленника. Режим доступа: <https://gold.1prime.ru/analytics/20220125/441113.html> (дата обращения: 12.03.2026).
3. Иванов А.И., Алексеев Я.В., Наумов Е.А., Куликов Д.А., Мигачёв И.Ф., Барышев А.Н. [и др.]. Прогноз долгосрочного освоения и развития минерально-сырьевой базы золота в Российской Федерации // Отечественная геология. 2023. № 6. С. 3–12. <https://doi.org/10.47765/0869-7175-2023-10026>. EDN: PWDQOT.
4. Целюк Д.И., Целюк И.Н. Техногенные хвосты золотодобычи: промышленный потенциал и перспективы вторичного освоения // Разведка и охрана недр. 2019. № 8. С. 41–47. EDN: MNITYQ.
5. Марбулов А.А., Марбулова Н.А. Интенсификация биотехнологии выщелачивания золотосульфидного концентрата // Наука, техника и образование. 2017. Т. 1. № 5. С. 21–24. EDN: YOYMUZ.
6. Hu J., Li W., Huang L., Li X., Ding W., Zhang X., et al. Experimental research on Ag<sup>+</sup> catalyzed microbial oxidation of refractory gold ore containing arsenic // Gold. 2022. Vol. 43. Iss. 10. P. 58–64. <https://doi.org/10.11792/hj20221012>.
7. Tauson V.L., Kravtsova R.G., Smagunov N.V., Spiridonov A.M., Grebenshchikova V.I., Budyak A.E. Structurally and superficially bound gold in pyrite from deposits of different genetic types // Russian Geology and Geophysics. 2014. Vol. 55. Iss. 2. P. 273–289. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.01.011>. EDN: SKLMML.
8. Large R.R., Maslennikov V.V. Invisible gold paragenesis and geochemistry in pyrite from orogenic and sediment-hosted gold deposits // Minerals. 2020. Vol. 10. Iss. 4. P. 339. <https://doi.org/10.3390/min10040339>.
9. Kovalchuk E.V., Tagirov B.R., Vikentyev I.V., Tyukova E.E., Nikolsky M.S., Borisovsky S.E., et al. “Invisible” gold in synthetic and natural arsenopyrite crystals, Vorontsovka deposit, Northern Urals // Geology of Ore Deposits. 2019. Vol. 61. Iss. 5. P. 447–468. <https://doi.org/10.31857/S0016-777061562-83>. EDN: TMELVW.
10. Kravtsova R.G., Makshakov A.S., Tauson V.L., Belozeroва O.Yu. Distribution features and species of finely dispersed and “invisible” gold in arsenopyrite and pyrite from the Natalka deposit (Northeastern Russia) // Geology of Ore Deposits. 2025. Vol. 67. Iss. 2. P. 143–177. <https://doi.org/10.7868/s3034507325020037>. EDN: TVVAPF.
11. Syed S. Recovery of gold from secondary sources: a review // Hydrometallurgy. 2012. Vol. 115–116. P. 30–51. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>.
12. Van Aswegen P.C., Marais H.J. Advances in the application of the BIOX® Process for refractory gold ores // Mining, Metallurgy & Exploration. 1999. Vol. 16. P. 61–68. <https://doi.org/10.1007/BF03403235>.
13. Syachputra A.J., Khairi H.A. Biomining technologies: extracting and recovering metals from ores and wastes / eds D.B. Johnson, C.G. Bryan, M. Schlömann, F.F. Roberto. Cham: Springer Nature, 2023. 314 p. <https://doi.org/10.1080/00206814.2024.2435055>.
14. Lomidze N., Malashkhia Sh., Kandelaki M., Chubinidze N., Kartvelishvili L. Procession of sulfide technogenic waste by means of biohydrometallurgy techniques // Annals of Agrarian Science. 2020. Vol. 18. Iss. 3. P. 392–402. Режим доступа: <https://www.meskhethi.tsu.ge/files/19-24-PB.pdf> (дата обращения: 12.03.2026).





15. Roberto F.F., Schippers A. Progress in bioleaching: part B, applications of microbial processes by the minerals industries // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2022. Vol. 106. P. 5913–5928. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-12085-9>.
16. Седельникова Г.В., Ким Д.Х., Ибрагимова Н.В. Кучное бактериальное выщелачивание бедных упорных золотосульфидных руд // *Золото и технологии*. 2017. № 1. С. 78–87.
17. Husain N.A., Yusoff A.H., Kew W.S., Shoparwe N., Chang C.S., Yusof N.N., et al. Removal of impurities from refractory gold ore using bio-reduction and bio-oxidation processes // *Комплексное использование минерального сырья*. 2025. Т. 333. № 2. С. 5–15. <https://doi.org/10.31643/2025/6445.12>. EDN: BNAYVA.
18. Кенжалиев Б.К., Койжанова А.К., Беркинбаева А.Н. Гидрометаллургия благородных металлов. Алматы, 2025. 432 с.
19. Блайда И.А., Васильева Т.В. Биотехнологические методы переработки некондиционных руд и промышленных отходов // *Мікробіологія і біотехнологія*. 2018. № 2. С. 6–25. [https://doi.org/10.18524/2307-4663.2018.2\(42\).134295](https://doi.org/10.18524/2307-4663.2018.2(42).134295).
20. Ofori-Sarpong G., Adam A.S., Asamoah R.K., Amankwah R.K. Characterisation of biooxidation feed and products for improved understanding of biooxidation and gold extraction performance // *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2020. Vol. 5. Iss. 2. P. 20–29. <https://doi.org/10.11648/j.ijmpem.20200502.11>.

## References

1. Butyrina E. The Golden challenge: Why precious metal mining in Russia is becoming unprofitable and how the market is reacting to the crisis. *FederalPress*. 2023, July 7. Available from: <https://fedpress.ru/article/3253254> [Accessed 12<sup>th</sup> March 2026]. (In Russ.).
2. Gold and diamond production forecast in Russia to 2070. *Vestnik zolotopromyshlennika*. Available from: <https://gold.1prime.ru/analytics/20220125/441113.html> [Accessed 12<sup>th</sup> March 2026]. (In Russ.).
3. Ivanov A.I., Alexeev Ya.V., Naumov E.A., Kulikov D.A., Migatchev I.F., Baryshev A.N., et al. Outlook for the long-term exploitation and development of the gold mineral resource base in the Russian Federation. *Otechestvennaya geologiya*. 2023;6:3-12. (In Russ.). <https://doi.org/10.47765/0869-7175-2023-10026>. EDN: PWDQOT.
4. Tselyuk D.I., Tselyuk I.N. Old tails of processing of gold ore: industrial potential and prospects of involvement in repeated processing. *Prospect and protection of mineral resources*. 2019;8:41-47. (In Russ.). EDN: MNITYQ.
5. Magbulov A.A., Magbulova N.A. Intensification of biotechnology of leaching of gold-sulfide concentrate. *Science, Technology and Education*. 2017;1(5):21-24. (In Russ.). EDN: YOYMUZ.
6. Hu J., Li W., Huang L., Li X., Ding W., Zhang X., et al. Experimental research on Ag<sup>+</sup> catalyzed microbial oxidation of refractory gold ore containing arsenic. *Gold*. 2022;43(10):58-64. <https://doi.org/10.11792/hj20221012>.
7. Tauson V.L., Kravtsova R.G., Smagunov N.V., Spiridonov A.M., Grebenshchikova V.I., Budyak A.E. Structurally and superficially bound gold in pyrite from deposits of different genetic types. *Russian Geology and Geophysics*. 2014;55(2):273-289. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.01.011>. EDN: SKLMML.
8. Large R.R., Maslennikov V.V. Invisible gold paragenesis and geochemistry in pyrite from orogenic and sediment-hosted gold deposits. *Minerals*. 2020;10(4):339. <https://doi.org/10.3390/min10040339>.
9. Kovalchuk E.V., Tagirov B.R., Vikentyev I.V., Tyukova E.E., Nikolsky M.S., Borisovsky S.E., et al. "Invisible" gold in synthetic and natural arsenopyrite crystals, Vorontsovka deposit, Northern Urals. *Geology of Ore Deposits*. 2019;61(5):447-468. <https://doi.org/10.31857/S0016-777061562-83>. EDN: TMELVW.
10. Kravtsova R.G., Makshakov A.S., Tauson V.L., Belozero O.Yu. Distribution features and species of finely dispersed and "invisible" gold in arsenopyrite and pyrite from the Natalka deposit (Northeastern Russia). *Geology of Ore Deposits*. 2025;67(2):143-177. <https://doi.org/10.7868/s3034507325020037>. EDN: TVVAPF.
11. Syed S. Recovery of gold from secondary sources: a review. *Hydrometallurgy*. 2012;115-116:30-51. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>.
12. Van Aswegen P.C., Marais H.J. Advances in the application of the BIOX® Process for refractory gold ores. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 1999;16:61-68. <https://doi.org/10.1007/BF03403235>.
13. Syachputra A.J., Khairi H.A. *Biomining technologies: extracting and recovering metals from ores and wastes*. Cham: Springer Nature; 2023, 314 p. <https://doi.org/10.1080/00206814.2024.2435055>.
14. Lomidze N., Malashkhia Sh., Kandelaki M., Chubinidze N., Kartvelishvili L. Procession of sulfide technogenic waste by means of biohydrometallurgy techniques. *Annals of Agrarian Science*. 2020;18(3):392-402. Available from: <https://www.meskhiti.tsu.ge/files/19-24-PB.pdf> [Accessed 12<sup>th</sup> March 2026].
15. Roberto F.F., Schippers A. Progress in bioleaching: part B, applications of microbial processes by the minerals industries. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2022;106:5913-5928. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-12085-9>.
16. Sedelnikova G.V., Kim D.H., Ibragimova N.V. Heap bacterial leaching of low-grade refractory gold-sulfide ores. *Zoloto i tekhnologii*. 2017;1:78-87. (In Russ.).
17. Husain N.A., Yusoff A.H., Kew W.S., Shoparwe N., Chang C.S., Yusof N.N., et al. Removal of impurities from refractory gold ore using bio-reduction and bio-oxidation processes. *Complex Use of Mineral Resources*. 2025;333(2): 5-15. <https://doi.org/10.31643/2025/6445.12>. EDN: BNAYVA.
18. Kenzhaliev B.K., Koizhanova A.K., Berkinbaeva A.N. *Hydrometallurgy of noble metals*. Almaty; 2025, 432 p.
19. Blaida I.A., Vasil'eva T.V. Biotechnological methods for processing substandard ores and industrial waste. *Mikrobiologiya i biotekhnologiya*. 2018;2:6-25. (In Russ.). [https://doi.org/10.18524/2307-4663.2018.2\(42\).134295](https://doi.org/10.18524/2307-4663.2018.2(42).134295).
20. Ofori-Sarpong G., Adam A.S., Asamoah R.K., Amankwah R.K. Characterisation of biooxidation feed and products for improved understanding of biooxidation and gold extraction performance. *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2020;5(2):20-29. <https://doi.org/10.11648/j.ijmpem.20200502.11>.



## Информация об авторах / Information about the authors

**Целюк Денис Игоревич,**

доктор геолого-минералогических наук,  
ведущий научный сотрудник лаборатории минеральных ресурсов,  
Институт химии и химической технологии СО РАН,  
г. Красноярск, Российская Федерация,  
профессор кафедры техносферной и экологической безопасности,  
Политехнический институт,  
Сибирский федеральный университет,  
г. Красноярск, Российская Федерация,  
✉ [tselukdi@mail.ru](mailto:tselukdi@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0006-3938-8243>

**Denis I. Tselyuk,**

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Leading Researcher, Mineral Resources Laboratory,  
Institute of Chemistry and Chemical Technology,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Krasnoyarsk, Russian Federation,  
Professor of the Department of Technosphere and Environmental Safety,  
Polytechnic Institute,  
Siberian Federal University,  
Krasnoyarsk, Russian Federation,  
✉ [tselukdi@mail.ru](mailto:tselukdi@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0006-3938-8243>

**Михайлов Александр Геннадьевич,**

доктор технических наук,  
заведующий лабораторией минеральных ресурсов,  
Институт химии и химической технологии СО РАН,  
г. Красноярск, Российская Федерация,  
профессор кафедры горных машин и комплексов,  
Институт цветных металлов,  
Сибирский федеральный университет,  
г. Красноярск, Российская Федерация,  
[mag@icct.ru](mailto:mag@icct.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-5537-7479>

**Alexander G. Mikhailov,**

Dr. Sci. (Eng.),  
Head of the Mineral Resources Laboratory,  
Institute of Chemistry and Chemical Technology,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Krasnoyarsk, Russian Federation,  
Professor of the Department of Mining Machinery and Complexes,  
Institute of Non-Ferrous Metals,  
Siberian Federal University,  
Krasnoyarsk, Russian Federation,  
[mag@icct.ru](mailto:mag@icct.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-5537-7479>

**Махнева Наталья Андреевна,**

аспирант,  
Институт химии и химической технологии СО РАН,  
г. Красноярск, Российская Федерация,  
[nataliamakhneva@yandex.ru](mailto:nataliamakhneva@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0009-0003-7606-1184>

**Natalia A. Makhneva,**

Postgraduate Student,  
Institute of Chemistry and Chemical Technology,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Krasnoyarsk, Russian Federation,  
[nataliamakhneva@yandex.ru](mailto:nataliamakhneva@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0009-0003-7606-1184>



**Кокорин Алексей Николаевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
декан факультета подготовки кадров,  
Федеральный исследовательский центр  
«Красноярский научный центр СО РАН»,  
г. Красноярск, Российская Федерация,  
kokorin.an@ksc.krasn.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-2079-1332>  
**Aleksey N. Kokorin**,  
Can. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Dean of the Faculty of Personnel Training,  
Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences",  
Krasnoyarsk, Russian Federation,  
kokorin.an@ksc.krasn.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-2079-1332>



**Целюк Олег Игоревич**,  
аспирант,  
Институт химии и химической технологии СО РАН,  
г. Красноярск, Российская Федерация,  
oitseluk@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0009-1652-3520>  
**Oleg I. Tselyuk**,  
Postgraduate Student,  
Institute of Chemistry and Chemical Technology,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Krasnoyarsk, Russian Federation,  
oitseluk@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0009-1652-3520>

#### Вклад авторов / Contribution of the authors

Д.И. Целюк – научное руководство, проведение исследования, курирование данных, написание черновика рукописи.

А.Г. Михайлов – научное руководство, проведение исследования, написание черновика рукописи.

Н.А. Махнева – проведение исследования, валидация результатов.

А.Н. Кокорин – проведение исследования, валидация результатов.

О.И. Целюк – проведение исследования.

Denis I. Tselyuk – supervision, investigation, data curation, writing – original draft.

Alexander G. Mikhailov – supervision, investigation, writing – original draft.

Natalia A. Makhneva – investigation, validation.

Aleksey N. Kokorin – investigation, validation.

Oleg I. Tselyuk – investigation.

#### Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 04.06.2026; одобрена после рецензирования 15.06.2026; принята к публикации 23.06.2026.

The article was submitted 04.06.2026; approved after reviewing 15.06.2026; accepted for publication 23.06.2026.